

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO COSTA SCHOLZ

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DIELÉTRICO DOS
MATERIAIS ISOLANTES UTILIZADOS EM
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DE
ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA**

**CURITIBA
2013**

RICARDO COSTA SCHOLZ

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DIELÉTRICO DOS
MATERIAIS ISOLANTES UTILIZADOS EM
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DE
ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA**

Projeto de Dissertação apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
e Ciência dos Materiais da Universidade
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

**CURITIBA
2013**

S368a Scholz, Ricardo Costa
Avaliação do comportamento dielétrico dos materiais isolantes utilizados em transformadores de distribuição por meio de espectroscopia dielétrica / Ricardo Costa Scholz. – Curitiba, 2013.
105f. : il. [color.], tab.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientadora: Vitoldo Swinka Filho
Bibliografia: p. 102-105.

1. Materiais isolantes. 2. Transformadores elétricos. I. Swinka Filho, Vitoldo. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD: 620.195

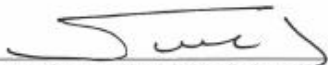


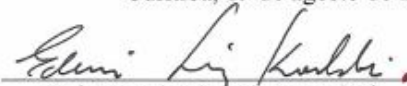
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE
Setor de Tecnologia


RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos dezenove dias do mês de agosto de 2013, no Auditório do LACTEC- no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof.^a Dr.^a Ana Sofia Clímaco Monteiro de Oliveira, Vice-Coordenadora do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a ducentésima quinquagésima primeira defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Prof. Dr Vitoldo Swinka Filho (UFPR), Edemir Luis Kowalski (UFPR), André Luiz Coelho Conceição (UTFPR). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **RICARDO COSTA SCHOLZ** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DIELÉTRICO DE MATERIAIS ISOLANTES UTILIZADOS EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DE ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA.**” Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela Aprovação do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 19 de agosto de 2013.


Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho
Orientadora


Prof. Dr. Edemir Luis Kowalski
Examinador


Prof. Dr. André Luiz Coelho Conceição
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Eu Ricardo Costa Scholz, agradeço inicialmente a Deus por mais uma oportunidade de aprendizado alcançado.

Agradeço ao LACTEC pelo espaço e equipamentos cedidos para realização deste trabalho.

Agradeço em especial ao Orientador, Professor Dr. Vitoldo Swinka Filho, pelo seu empenho, amizade, profissionalismo e dedicação para o sucesso deste trabalho.

Agradeço em especial a meu pai Nelson Scholz Jr., minha mãe Maria de Lourdes Scholz, aos meus irmãos Lucas e Fernanda, pelo apoio, incentivo, confiança e compreensão durante mais esta etapa.

Agradeço em especial a Kauana Fadel por todo o apoio, compreensão, incentivo, amor e carinho nesta jornada.

Agradeço em especial ao Eng. Marcelo Ravaglio pelas discussões, auxílio de várias atividades, apoio técnico e amizade.

Agradeço a Romagnole, em especial ao Eng. Márcio A. Tardivo, pelos materiais cedidos para realização deste trabalho.

Agradeço a COELBA, pelo incentivo para realização deste trabalho.

Agradeço ao Cnpq pelos equipamentos, materiais e incentivo para realização deste trabalho.

Agradeço a toda equipe da Divisão de Serviços Elétricos do LACTEC, em especial ao gerente Fábio A. Guerra pelo apoio, colaboração e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a equipe do Laboratório de análises Físico-químicas do LACTEC, Aline, Romualdo, Viviane, Guilherme, entre outros pela ajuda e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a equipe do Laboratório de Metrologia do LACTEC, Alessandro, Alexandre, Tiago, Vinícius, entre outros pela ajuda e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a equipe do Laboratório de Alta Tensão do LACTEC, Andrei, Vinícios, Nilson, entre outros pela ajuda e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação da estrutura dos hidrocarbonetos parafínicos [8].....	22
Figura 2 -	Representação da estrutura dos hidrocarbonetos naftênicos [8].....	23
Figura 3 -	Representação da estrutura dos hidrocarbonetos aromáticos [8].....	23
Figura 4 -	Circuito para um material dielétrico submetido a uma ddp DC [9]	24
Figura 5 -	Formas da corrente elétrica DC em um material dielétrico [9]	25
Figura 6 -	Ilustração do efeito de polarização de dielétricos devido à diferença de materiais ou impurezas [1]	28
Figura 7 -	Representação da faixa de frequências (Hz) de polarizabilidade [1]	29
Figura 8 -	Modelos de circuitos equivalentes RC - série e paralelo	37
Figura 9 -	Representação vetorial da tensão aplicada e da corrente resultante em um circuito RC paralelo [16]	39
Figura 10 -	Modelo da resposta dielétrica por meio de circuitos equivalentes [38]	39
Figura 11 -	Tensão de ruptura e fator de dissipação dependentes do conteúdo de água [25].....	42
Figura 12 -	Influência da umidade relativa no dielétrico em função da sua capacidade de resistir a tensões de ruptura [25]	43
Figura 13 -	Correlação entre o teor de umidade no papel e umidade relativa do ar Curva de Jeffries [27]	44
Figura 14 -	Diagrama de Nielsen – Equilíbrio entre teor de umidade no óleo isolante e no papel isolante [28]	45
Figura 15 -	Correlação entre o teor de umidade no papel e teor de água no óleo isolante – Curva de Griffin [29].....	45
Figura 16 -	Interpretação para os dados de domínio da frequência com a discriminação entre as influencias de vários fenômenos físicos [32]	47
Figura 17 -	Fator de dissipação e capacitância em função da frequência para diferentes teores de umidade nas amostras [33].....	48
Figura 18 -	Efeito da temperatura nas perdas dielétricas para medições com umidade de 0,2% [34]	49
Figura 19 -	Efeito da temperatura nas perdas dielétricas para medições com umidade de 2% [34]	50
Figura 20 -	Curva da tangente delta em função da frequência para diferentes umidades à 25°C [34].....	51
Figura 21 -	Comparação de quatro transformadores (dois tipos) pela curva da tangente delta em função da frequência [31].....	52

Figura 22 - Influência da condutividade do óleo na curva da tangente delta em função da frequência [31].....	52
Figura 23 - Comparação do valor medido por Gafvert com três valores calculados para três diferentes teores de umidade [31]	53
Figura 24 - Cuba utilizada por Fofana et al para realização das medições em amostras de papel impregnadas com óleo [38]	54
Figura 25 - Curva de capacitância em função da frequência obtida nas medições de espectroscopia dielétrica com controle de umidade e temperatura [38]	55
Figura 26 - Curva do fator de dissipação ou tangente delta em função da frequência obtida nas medições de espectroscopia dielétrica com controle de umidade e temperatura [38]	55
Figura 27 - Papel isolante em partes retangulares e em camadas sobre o tubo metálico	58
Figura 28 - Amostras de óleo utilizadas nas medições de espectroscopia dielétrica	59
Figura 29 - Amostras de papel imersa em óleo isolante.....	59
Figura 30 - Solartron modelo 1260 (FRA) e interface dielétrica Solartron modelo 1296.....	60
Figura 31 - Célula de medição utilizada nos ensaios de espectroscopia dielétrica em amostras de papel isolante	60
Figura 32 - Célula de medição utilizada nos ensaios de espectroscopia dielétrica em amostras de óleo isolante	61
Figura 33 - Estufa da marca Weiss, modelo WK 111	62
Figura 34 - Resistência portátil para aquecimento de líquidos.....	62
Figura 35 - Controlador de temperatura Omron modelo E5CW – R1P	63
Figura 36 - Estufa da marca Yamato, modelo ADP 21	63
Figura 37 - Sistema para medição de amostras de papel imersas em óleo isolante com controle de temperatura [vista frontal (à esq.) e superior (à dir.)]..	66
Figura 38 - Teores de umidade obtidos através da curva de Jeffries.....	68
Figura 39 - Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel kraft isolante com umidade variada para uma temperatura de 30 °C	69
Figura 40 - Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel kraft isolante com umidade variada para uma temperatura de 50 °C	72

Figura 41 -	Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel kraft isolante com umidade variada para uma temperatura de 70 °C	73
Figura 42 -	Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel isolante ensaiadas com 20% de umidade relativa do ar, variando a temperatura de medição	75
Figura 43 -	Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel isolante ensaiadas com 40% de umidade relativa do ar, variando-se a temperatura das medidas	78
Figura 44 -	Curvas de capacitância, capacitância imaginária e capacitância real obtidas de forma experimental e ajustada com o circuito RC paralelo para a amostra papel isolante ensaiada na estufa com 30°C e 20% de umidade relativa	79
Figura 45 -	Curvas de impedância, impedância imaginária e impedância real obtidas de forma experimental e ajustada com o circuito RC paralelo para a amostra papel isolante ensaiada na estufa com 30°C e 20% de umidade relativa	80
Figura 46 -	Modelo de circuito equivalente RC paralelo para ajuste com a curva obtida nas medições	80
Figura 47 -	Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real em função da frequência em amostras de óleo mineral isolante	82
Figura 48 -	Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante	85
Figura 49 -	Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante	87
Figura 50 -	Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante	89
Figura 51 -	Curvas de capacitância, impedância e tangente delta para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante nos níveis 2, 3 e 4 de umidade com temperatura de 30°C	91

Figura 52 - Curvas de capacitância, capacitância imaginária e capacitância real obtidas de forma experimental e ajustada com o circuito rc paralelo para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante nas medidas realizadas com 30°C, no nível de umidade 2.	92
Figura 53 - Curvas de impedância, impedância imaginária e impedância real obtidas de forma experimental e ajustada com o circuito rc paralelo para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante nas medidas realizadas com 30°C, no nível de umidade 2.	92
Figura 54 - Modelo RC paralelo utilizado para ajuste com curvas obtidas nas medições	93
Figura 55 - Valores de resistência em função do ramo no circuito modelado nas medições a 30°C em três níveis de umidade	93
Figura 56 - Valores das resistências com maior constante de tempo de resposta em função da temperatura de medição no nível 2 de umidade	94
Figura 57 - Valores das capacitâncias com maior constante de tempo de resposta em função da temperatura de medição no nível 2 de umidade	94
Figura 58 - Valores das resistências com maior constante de tempo de resposta em função da temperatura de medição no nível 4 de umidade	95
Figura 59 - Valores das capacitâncias com maior constante de tempo de resposta em função da temperatura de medição no nível 4 de umidade	96
Figura 60 - Valores de resistência em função do nível de umidade imposto para a medição	96

LISTA DE SÍMBOLOS

CA - Corrente elétrica alternada;

CC - Corrente elétrica contínua;

RC – Circuito elétrico formado por resistor e capacitor;

C_0 – Capacitância geométrica;

V – Tensão;

q – Carga elétrica;

l – Distância entre duas cargas elétricas;

μ - Momento de dipolo induzido;

E - Campo elétrico local;

α - Polarizabilidade dependente da natureza das ligações químicas moleculares e atômicas;

$\chi(E)$ - Susceptibilidade elétrica dependente do campo elétrico;

ϵ_0 - Permissividade elétrica do vácuo;

χ - Susceptibilidade elétrica do material;

ϵ_r - Permissividade relativa ou constante dielétrica do material;

E_l - Campo elétrico local no dipolo;

T - Temperatura em Kelvin;

A – Área das placas de um capacitor plano;

d – Distância de separação entre as placas de um capacitor;

Q - Carga total do capacitor;

σ - Condutividade elétrica pura que representa o movimento de cargas livres não envolvida na polarização;

$J(t)$ - Densidade de corrente elétrica total;

R - Resistência elétrica da amostra;

$\delta(t)$ - Função delta de Dirac;

f - Frequência circular dada em Hz;

J - Densidade de corrente elétrica dependente da frequência;

$\tan \delta$ - Perdas dielétricas;

ρ - Resistividade elétrica do material;

V_a - Tensão aplicada;

$I_{capacitiva}$ - Componente capacitiva da corrente elétrica no circuito RC;

$I_{resistiva}$ - Componente resistiva da corrente elétrica no circuito RC;

Z_1 e Z_2 - Impedâncias do circuito;

\dot{Z} - Impedância complexa;

R_s - Resistência do modelo RC série;

C_s - Capacitância do modelo RC série;

R_p - Resistência do modelo RC paralelo;

C_p - Capacitância do modelo RC paralelo.

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ASTM - American Society for Testing and Materials;

IEC - International Electrotechnical Commission;

EUA - Estados Unidos da América;

RMS - Valor de tensão dada pela razão entre a tensão pico a pico e raiz quadrada de dois, supondo uma tensão senoidal;

EPI - Equipamento de Proteção Individual;

PPM - Parte por milhão.

RESUMO

Nas redes de distribuição, entre os vários equipamentos instalados, destaca-se o transformador que é o dispositivo responsável por reduzir os níveis de média tensão para a baixa tensão (110 V ou 220 V). A vida dos transformadores tem sido associada à deterioração de seu sistema isolante. Estima-se que a vida de um transformador operando continuamente seja de aproximadamente 20 anos. Porém, a experiência tem mostrado que a vida dos transformadores de distribuição instalados em redes aéreas é bem menor que este valor, mesmo quando operam em temperaturas bem abaixo dos limites estabelecidos pelas normas técnicas. Segundo pesquisadores, muitos transformadores são danificados em decorrência da baixa qualidade nos materiais empregados, tais como: papel, óleo isolante, verniz isolante aplicado aos condutores do enrolamento primário, chapas de aço e buchas de alta e baixa tensão. A avaliação dos materiais que compõe o sistema isolante nos transformadores de distribuição é fundamental para se avançar no sentido de se obter transformadores de distribuição com uma vida útil maior. Com o objetivo de estudar componentes do isolamento (óleo, papel e papel impregnado em óleo), a fim de se obter uma caracterização dos materiais presentes no sistema isolante de um transformador de distribuição, bem como caracterizar e avaliar as respostas obtidas em função da variação de temperatura e da variação de umidade desenvolveu-se este trabalho. São apresentados os resultados obtidos através da aplicação de medidas de capacitância e impedância complexa no domínio da frequência em amostras de materiais isolantes presentes em transformadores de distribuição. São discutidos os possíveis processos que influenciam a resposta dielétrica das amostras dos materiais isolantes em função das medidas realizadas.

ABSTRACT

In the distribution networks among various equipments installed, the transformer is the device responsible for reducing the levels of medium voltage to low voltage (110 V or 220 V). The life of transformers has been associated with deterioration of your insulation system. It is estimated that the life of a transformer, operating continuously, is 20 years. However, the experience has shown that the life of distribution transformers installed in aerial is less than 20 years, even when operating at temperatures below the limits established in the technical standards. According to researchers, many transformers are damaged due to the low quality materials used, such as: paper, insulating oil, insulating varnish applied to the primary winding conductors, steel plates and dowels in the high and low voltage. The evaluation of the materials that compose the system insulation in distribution transformers is the key to advancing in order to obtain distribution transformers with a long service life. With the aim of studying the components of insulation systems (oil, and paper impregnated with oil) in order to obtain a characterization of the materials contained in the insulation system of a distribution transformer, to characterize and evaluate the responses due to changes in temperature and moisture variation developed this work. Shows the results obtained by applying measures of impedance in the complex frequency domain in samples of insulating materials presents in distribution transformers. Are discussed the possible processes that influence the dielectric response of the samples of insulating materials on the basis of measurements.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
2	Revisão Bibliográfica	20
2.1	Sistema isolante dos transformadores de distribuição	20
2.1.1	Papel isolante em transformadores de distribuição	20
2.1.2	Verniz isolante em transformadores de distribuição.....	21
2.1.3	Óleo mineral isolante em transformadores de distribuição.....	22
2.2	Revisão sobre Dielétricos	24
2.2.1	Processos de Polarização	25
2.2.2	Mecanismos responsáveis pela polarização dos dielétricos	26
2.2.3	Resposta Dielétrica no Domínio do Tempo	29
2.2.4	Resposta Dielétrica no Domínio da Frequência.....	33
2.2.5	Modelos de Isolamento	37
2.3	Estado da Arte da espectroscopia dielétrica em transformadores	41
2.3.1	Determinação da umidade na isolação de papel	43
2.3.2	Medidas das propriedades dielétricas	46
2.3.3	Análise da resposta dielétrica no domínio da frequência	47
3	Objetivo geral.....	57
3.1	Objetivos Específicos	57
4	Materiais e Métodos.....	58
4.1	Confecção das amostras para o estudo	58
4.1.1	Papel isolante.....	58
4.1.2	Óleo isolante	58
4.1.3	Papel isolante imerso em óleo isolante	59
4.2	Equipamentos utilizados.....	60
4.2.1	Analisador de Impedância (Solartron)	60
4.2.2	Célula de medição para amostras de papel isolante.....	60
4.2.3	Célula de medição para amostras de óleo isolante	61
4.2.4	Estufa para controle de umidade e temperatura nas medições no papel isolante.....	61
4.2.5	Aquecimento térmico do óleo isolante	62
4.2.6	Controle da temperatura nas medições do papel isolante imerso em óleo mineral isolante	62
4.2.7	Estufa à vacuo.....	63
4.3	Método das medidas	64
4.3.1	Medição de espectroscopia dielétrica.....	64

4.3.2	Determinação do teor de umidade nas amostras de papel isolante.....	64
4.3.3	Determinação do teor de umidade no papel isolante imersas em óleo isolante.....	65
4.3.4	Procedimento para as medições nas amostras de papel isolante.....	65
4.3.5	Procedimento para as medições nas amostras de óleo isolante.....	65
4.3.6	Procedimento para as medições nas amostras de papel imersas em óleo isolante.....	66
5	Resultados e Discussões.....	67
5.1	Medições de Espectroscopia Dielétrica em papel isolante.....	67
5.1.1	Medições variando-se a umidade com temperatura constante.....	67
5.1.2	Medições variando-se a temperatura com umidade constante.....	74
5.1.3	Modelagem e Simulações.....	79
5.2	Medições de Espectroscopia Dielétrica em óleo mineral isolante.....	81
5.3	Medições de Espectroscopia Dielétrica em papel isolante imerso em óleo mineral isolante.....	82
5.3.1.	Medições variando-se a temperatura com umidade constante.....	82
5.3.2.	Medições variando-se a umidade com temperatura constante.....	89
5.3.3.	Modelagem e Simulações.....	91
6	Conclusões.....	98
7	Trabalhos Futuros.....	100
8	Referências bibliográficas.....	101

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica ocupa um papel vital na qualidade de vida da sociedade e em seu desenvolvimento econômico. Para que a energia elétrica chegue ao consumidor, um complexo sistema que envolve geração e transmissão faz parte de um processo que é concluído nas linhas de distribuição, responsáveis por entregar a energia elétrica ao consumidor final.

Nas redes de distribuição entre os vários equipamentos instalados, destaca-se o transformador que é o dispositivo responsável por reduzir os níveis de média tensão para a baixa tensão (110 V ou 220 V). A falha neste equipamento implica diretamente no não fornecimento de energia ao consumidor e sua consequente insatisfação e pelo lado das concessionárias distribuidoras de energia, prejuízos com a não venda da energia, custos de manutenção com equipes, e a perda do transformador.

A vida dos transformadores tem sido associada à deterioração de seu sistema isolante. Estima-se que a isolação de papel de um transformador operando continuamente, durante aproximadamente 20 anos, dentro dos limites normalizados de temperatura, tem a sua rigidez mecânica à tração, reduzida para a metade do valor inicial. Essa redução de 50% do valor inicial da suportabilidade do papel à tração tem sido utilizada como critério para definir o fim de vida dos transformadores [1].

A experiência tem mostrado, contudo, que a vida dos transformadores de distribuição instalados em redes aéreas é bem menor que 20 anos, mesmo quando operam em temperaturas bem abaixo dos limites estabelecidos pelas normas técnicas. Portanto, outros fatores, além da deterioração do papel isolante, podem estar contribuindo para a ocorrência de falhas nos transformadores. Assim sendo, qualquer tentativa de melhoria no desempenho dos transformadores envolve a pesquisa da causa de suas falhas [1].

Trabalhos de inspeção em transformadores de distribuição danificados mostram que os principais problemas que causam o dano ao equipamento, são atribuídos às descargas atmosféricas, curtos-circuitos na rede secundária, sobrecargas excessivas, corrosão do tanque e falha de isolamento nas buchas do transformador. Nos casos de falhas elétricas observa-se que a região danificada do transformador é quase em sua totalidade o enrolamento primário, constituído por fio de cobre ou alumínio com uma camada de verniz isolante, além de papel e óleo. No caso de sobrecarga, ocorre o aquecimento do enrolamento do transformador e

consequentemente do verniz isolante. Sabe-se que certos processos de condução em materiais isolantes são processos termicamente ativados, podendo assim reduzir a capacidade de isolamento do mesmo, bem como ser um fator contribuinte para uma possível falha em transformadores de distribuição [2-3].

Certas vertentes de pesquisadores tem relacionado à vulnerabilidade do transformador à ação de agentes como: modo de instalação, aterramento, e características dos seus dispositivos de proteção contra surtos de tensão e sobrecorrentes. Segundo estas vertentes, muitos transformadores são danificados em decorrência da baixa qualidade nos materiais empregados, tais como: papel, óleo isolante, verniz isolante aplicado aos condutores do enrolamento primário, chapas de aço e buchas de alta e baixa tensão. A avaliação dos materiais que compõe o sistema isolante nos transformadores de distribuição é fundamental para se avançar no sentido de se obter transformadores de distribuição com uma vida útil maior. Sabe-se que os estudos desenvolvidos para caracterização de materiais isolantes em transformadores até o presente momento estão voltados para transformadores de potência, principalmente devido ao alto custo destes equipamentos quando comparados aos transformadores de distribuição. Em termos de importância para o desempenho do sistema, os transformadores de distribuição são os equipamentos responsáveis pela entrega de energia à totalidade dos consumidores finais, e sua falha causa transtornos aos consumidores, bem como à concessionária distribuidora, sendo, portanto assunto de importância e dedicação de estudos [1-2-3].

Além do custo e potência a distinção em termos de isolamento entre os transformadores de potência e distribuição está basicamente no enrolamento primário ou de alta tensão. Nos transformadores de potência o isolamento entre espiras é realizado com papel e nos transformadores de distribuição utiliza-se o fio metálico revestido com verniz isolante. Recentemente alguns fabricantes de transformadores de potência começaram a fabricar os enrolamentos primários com fios metálicos revestidos com verniz isolante a exemplo dos transformadores de distribuição. Assim, haverá necessidade de novos estudos que contemplem a avaliação do verniz isolante nestes transformadores de potência. Atualmente os ensaios aplicados aos transformadores de distribuição não permitem uma avaliação detalhada da qualidade dos materiais isolantes aplicados em sua confecção, sendo que as técnicas mais importantes foram desenvolvidas para transformadores de potência [1-2].

Neste ponto destaca-se o foco desta dissertação, onde se pretende realizar estudos em amostras de materiais presentes no sistema isolante dos

transformadores de distribuição e avaliar as condições de isolamento em situações diversas, aplicando medidas de capacitância e impedância complexas no domínio da frequência.

Tem-se como objetivo estudar componentes do isolamento (óleo, papel e papel impregnado em óleo), a fim de se obter uma caracterização dos materiais presentes no isolamento de transformadores de distribuição, bem como caracterizar e avaliar as respostas obtidas em função da variação de temperatura e da variação de umidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMA ISOLANTE DOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema isolante dos transformadores de distribuição é composto por verniz isolante, papel isolante e óleo mineral isolante. O papel utilizado em transformadores é de base celulósica (papel Kraft, papelão Kraft, papel manilha e papelão com fibra de algodão), impregnados com óleo. O papel Kraft é utilizado na forma de finas camadas envolvendo os enrolamentos ou na forma de espaçadores e tubos de alta densidade para promover o isolamento entre níveis de tensão e entre fases. Nas buchas cerâmicas capacitivas e não capacitivas de alta tensão, é usado papel impregnado com óleo ou com resina. Nas buchas de menor tensão podem ser utilizados materiais cerâmicos ou poliméricos [4]. Madeira laminada também é empregada em locais onde se requer resistência a solicitações mecânicas.

Vernizes isolantes compatíveis com o óleo isolante são utilizados para o isolamento entre espiras. O papel mais utilizado é o Kraft, porém, quando se deseja resistência a altas temperaturas (acima de 100°C), emprega-se papel termoestabilizado, que é um papel cuja celulose passa por um tratamento especial [5]. Papel nomex (poliamida) também pode ser utilizado como espaçador, enchimento de bobinas, isolamento de terminais e outras aplicações suportando temperaturas da ordem de 180°C a 200°C [6].

O óleo isolante mineral, de base parafínica ou naftênica, é utilizado devido as suas propriedades dielétricas e refrigerantes. Resinas e fibras são empregadas com a finalidade de fixação de componentes isolantes e ferromagnéticos.

2.1.1 PAPEL ISOLANTE EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Os papéis isolantes utilizados em transformadores são de base celulósica (papel Kraft, papelão Kraft, impregnados com óleo). O papel Kraft é utilizado geralmente nas seguintes aplicações:

- Isolação entre camadas dos enrolamentos de BT e AT;
- Isolação dos condutores de baixa tensão (fios retangulares);
- Na forma de espaçadores;
- Na forma de tubos (canudos) para isolação de cabos internos de BT e AT;

- Na forma de varetas (talas) para canais de circulação de óleo pra refrigeração;
- Barreiras para isolamento entre níveis de tensão e entre fases.

Entre os itens de envelhecimento do sistema isolante de um transformador, está relacionado à deterioração físico-química do papel, em função da temperatura e da umidade no decorrer do tempo. No final da vida útil do transformador a sua isolação sólida se apresenta frágil e quebradiça, com baixa resistência mecânica.

Basicamente o papel tem a função de promover o isolamento entre as partes do transformador. O papel isolante normalmente utilizado para isolação entre camadas dos transformadores de distribuição é do tipo diamantado, e nas espessuras de 0,13 mm e 0,2 mm, as quais são dimensionadas para atender solicitações mecânicas no equipamento. Com relação à quantidade de papel utilizada entre camadas para o sistema de isolação, o cálculo é feito em função da diferença de potencial entre elas, que nos casos dos transformadores de distribuição, as espessuras mencionadas acima são suficientes, e têm sido comprovadas empiricamente ao longo de experiências de fabricantes e por meio de ensaios realizados ao longo dos anos. Diante disto, atualmente existe uma padronização para dimensionar a quantidade de papel a ser empregada nos transformadores de acordo com a sua potência e classe de tensão [5-6].

As novas tecnologias para o desenvolvimento de transformadores resumem-se na evolução dos materiais e em técnicas de projeto. Existem materiais alternativos a serem adotados para substituir a isolação sólida, um deles seria papel NOMEX à base de aramida, a qual possui vantagem térmica sobre a celulose [7].

2.1.2 VERNIZ ISOLANTE EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Basicamente, o fio esmaltado é formado por um condutor de cobre ou alumínio redondo ou retangular, isolado com a aplicação de uma película termorrígida de verniz. Os vernizes isolantes têm a função de promover o isolamento entre as espiras, substituindo o papel celulósico aplicado nos transformadores de potência. A função da isolação entre espiras (transformadores de potência e enrolamento de baixa tensão de transformadores de distribuição) é prevenir a ocorrência de curto-circuitos. A classe térmica de isolação define o tipo de aplicação do fio esmaltado.

Nos transformadores de distribuição, a principal característica do fio de cobre esmaltado com verniz isolante deve ser a resistência às perdas dielétricas. A camada

de verniz nos fios esmaltados se desgasta após um determinado tempo de trabalho, acarretando em problemas para o transformador, como curto-circuito entre espiras num caso extremo [1].

A principal característica dessa película de verniz é sua elevada rigidez dielétrica. Para obter uma superfície lisa e uniforme, o fio precisa receber diversas passagens sucessivas de verniz isolante. O aumento da camada de verniz isolante no fio pode causar uma má acomodação entre as espiras e um aumento no tamanho da bobina causando problemas de dimensionamento e projeto. Já a redução da camada de verniz isolante poderia causar uma possível má de isolação nos fios [1-2].

2.1.3 ÓLEO MINERAL ISOLANTE EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

O óleo mineral isolante utilizado em equipamentos elétricos é obtido através do refino do petróleo, da fração de 300°C a 400°C. Este óleo pode ser de origem parafínica ou naftênica, dando origem ao correspondente óleo mineral isolante [8]. O óleo mineral isolante é uma mistura na qual a maioria das moléculas é constituída basicamente por carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) e, em pequenas quantidades, por compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio em sua estrutura. Os hidrocarbonetos, os quais constituem a maior parte do óleo, podem ser divididos em três grupos:

- Hidrocarbonetos parafínicos que são hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta linear ou ramificada, conforme mostrado na Figura 1.

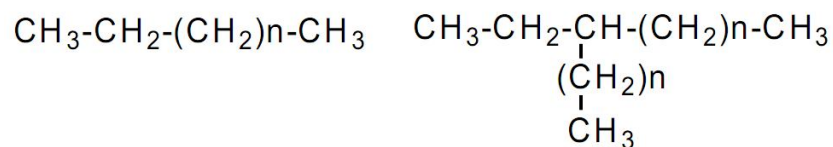


Figura 1 – Representação da estrutura dos hidrocarbonetos parafínicos [8]

- Hidrocarbonetos naftênicos que são hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo de um a seis anéis, sendo que estes podem possuir uma ou mais cadeias laterais lineares ou ramificadas, conforme mostrada na Figura 2.

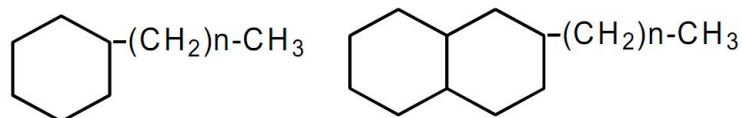


Figura 2 – Representação da estrutura dos hidrocarbonetos naftênicos [8]

- Hidrocarbonetos aromáticos que são hidrocarbonetos contendo um ou mais anéis aromáticos, podendo ou não apresentar cadeias laterais, conforme mostrado na Figura 3.

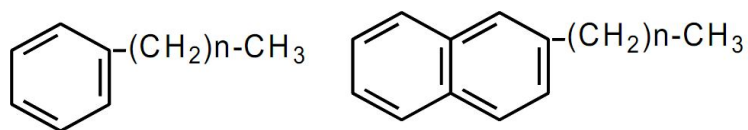


Figura 3 – Representação da estrutura dos hidrocarbonetos aromáticos [8]

O óleo possui também compostos orgânicos de enxofre termicamente estáveis que são inibidores naturais do processo de oxidação e conseqüentemente do envelhecimento. Podem ser adicionados inibidores sintéticos como o dicitrírio - butilparacresol (DBPC).

2.2 REVISÃO SOBRE DIELETRICOS

Um material dielétrico real é aquele onde ocorrem simultaneamente os processos de polarização e condução elétrica, quando submetidos a uma tensão DC. Assim, ao se submeter um material dielétrico a uma tensão DC, ter-se-ão três correntes elétricas, que somadas resultam na corrente elétrica medida no circuito. Estas correntes elétricas são chamadas de:

- Corrente elétrica capacitiva (I_c);
- Corrente elétrica de absorção (I_{ab});
- Corrente elétrica resistiva, ou corrente elétrica de condução (I_{cd}).

A corrente elétrica capacitiva flui normalmente por intervalos de tempo pequenos, pois ela realiza a carga do capacitor. Carregada à capacitância, esta corrente cessa. A corrente elétrica de absorção ocorre em função dos processos de polarização do dielétrico. Esta corrente elétrica, tipicamente decai após alguns segundos de aplicação da tensão DC. Em dielétricos que apresentam impurezas, processos de degradação ou envelhecimento, o tempo de decaimento desta corrente tende a ser maior, podendo ser um indicativo do estado do dielétrico.

A corrente elétrica de condução, consiste da corrente elétrica que realmente flui através do dielétrico, normalmente sendo composta pela corrente de dispersão (fuga) e a corrente de fuga superficial. A Figura 4 mostra um modelo simplificado de um material dielétrico e a Figura 5 as formas das correntes elétricas que circulam pelo dielétrico quando submetido a uma ddp DC.

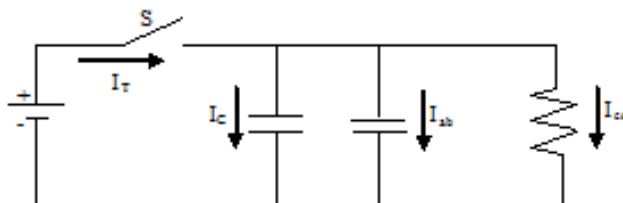


Figura 4 – Circuito para um material dielétrico submetido a uma ddp DC [1-9]

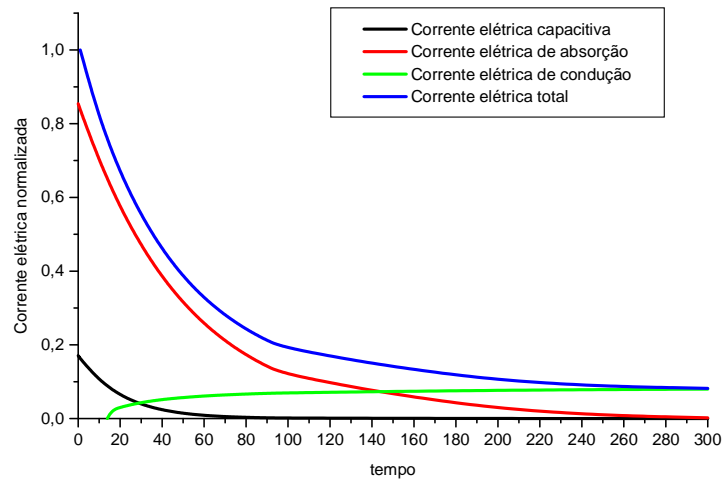


Figura 5 – Formas da corrente elétrica DC em um material dielétrico [1]

2.2.1 PROCESSOS DE POLARIZAÇÃO

Quando o material dielétrico está sujeito à ação de um campo elétrico, as distribuições de cargas moleculares e atômicas, inicialmente neutras, sofrem alterações em suas posições de equilíbrio, onde as cargas positivas e negativas de módulo q são separadas por uma distância l . O momento de dipolo induzido $\vec{\mu}$ é representado por [10]:

$$\vec{\mu} = q \cdot \vec{l} \quad (1)$$

Admite-se que estes momentos de dipolo induzidos $\vec{\mu}$ sejam proporcionais ao campo elétrico local:

$$\vec{\mu} = \alpha \cdot \vec{E} \quad (2)$$

sendo \vec{E} o campo elétrico local e α a polarizabilidade, que depende da natureza das ligações químicas moleculares e atômicas.

A ação do campo elétrico sobre o material dielétrico pode originar dipolos induzidos ou orientação de dipolos elétricos permanentes, criando no material uma polarização elétrica. Certos materiais apresentam uma polarização elétrica mesmo sem a ação do campo elétrico. Tais materiais são chamados de eletretos e

ferroelétricos [11-12-13]. Para campos elétricos estáticos ou quase estáticos, pode-se escrever o vetor polarização dielétrica \vec{P} como uma grandeza proporcional ao vetor campo elétrico \vec{E} [14]:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \chi(E) \cdot \vec{E} \quad (3)$$

onde $\chi(E)$ é a susceptibilidade elétrica dependente do campo elétrico. Se o material dielétrico for linear, a equação 3 torna-se:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E} \quad (4)$$

pois $\chi(E) = \chi = \text{constante}$, ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo e χ a susceptibilidade elétrica do material. Muitas vezes utiliza-se a permissividade relativa ou constante dielétrica do material ε_r , dada por:

$$\varepsilon_r = 1 + \chi \quad (5)$$

Assim, a equação 3 pode ser escrita como:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot (\varepsilon_r - 1) \quad (6)$$

2.2.2 MECANISMOS RESPONSÁVEIS PELA POLARIZAÇÃO DOS DIELETRICOS

a) Polarização eletrônica (P_e): É devida ao deslocamento da nuvem eletrônica em relação ao núcleo do átomo e ocorre num intervalo de tempo inferior a 10^{-15} s. Este mecanismo é independente da temperatura. O momento de dipolo pode ser obtido por [10]:

$$P_e = N_e \cdot \alpha_e \cdot E_l \quad (7)$$

Onde N_e é a população de elétrons, α_e é a polarizabilidade eletrônica e E_l o campo elétrico local no dipolo. A polarização eletrônica compõe a polarização rápida.

b) Polarização atômica (P_a) (iônica ou molecular): É o resultado de um deslocamento mútuo entre íons constituintes da molécula. Ocorre para intervalos de tempo da ordem de 10^{-13} s, sendo praticamente independente da temperatura. O momento de dipolo pode ser obtido pela equação [10]:

$$P_a = N_a \cdot \alpha_a \cdot E_l \quad (8)$$

Onde N_a é a população atômica e α_a é a polarizabilidade atômica. A polarização atômica também compõe a polarização rápida [10].

c) Polarização dipolar (P_d) (orientacional): É formada pela orientação dos dipolos permanentes presentes no dielétrico, na direção do campo aplicado. Este fenômeno provoca uma dissipação de energia a qual dependerá da relaxação dos dipolos. Trata-se de um processo lento, com um intervalo de tempo da ordem de 10^{-6} s e que depende fortemente da temperatura. O momento de dipolo pode ser obtido por [10]:

$$P_d = N_d \cdot \alpha_d \cdot E_l \quad (9)$$

Onde N_d é a população de dipolos, α_d é a polarizabilidade dipolar, dada por $\alpha_d = \frac{p^2}{3kT}$ sendo p o momento dipolar da molécula, k a constante de Boltzmann e T a temperatura em Kelvin. A polarização orientacional faz parte da polarização lenta [10].

d) Polarização interfacial (Efeito Maxwell-Wagner): Surge nas discontinuidades de fases, materiais diferentes, vazios e impurezas. Devido às diferentes condutividades e permissividades das regiões, ocorre a formação de cargas espaciais nas interfaces dessas regiões. Esta forma de polarização contribui para a polarização lenta. O tempo de relaxação (τ) para um modelo simples pode ser obtido por [10]:

$$\tau = \frac{(d_1 \varepsilon_1 + d_2 \varepsilon_2)}{d_1 \sigma_1 + d_2 \sigma_2} \quad (10)$$

Onde ε_1 e ε_2 são as permissividades relativas, σ_1 e σ_2 as condutividades e d_1 e d_2 as espessuras dos materiais 1 e 2 respectivamente, como ilustrado na Figura 6.

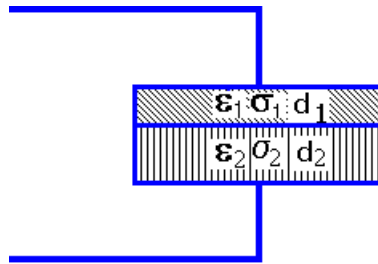


Figura 6 – Ilustração do efeito de polarização de dielétricos devido à diferença de materiais ou impurezas [1-9]

e) Polarização por cargas espaciais nos eletrodos: Surge na interface dielétrico-eletrodos. Ocorre quando os portadores de cargas (íons ou elétrons) se movem em direção aos eletrodos, não sendo neutralizados eletricamente devido às imperfeições do contato dielétrico-eletrodo, havendo desta forma um acúmulo de carga nos eletrodos, distorção do campo elétrico e aumento de perdas e da permissividade relativa [10].

f) Homocargas e heterocargas: Surgem do movimento de cargas elétricas espaciais, sendo que a homocarga tem o mesmo sinal da carga do eletrodo e sua formação ocorre pelo aprisionamento das cargas injetadas próximas ao eletrodo. A distribuição de cargas espaciais nas vizinhanças dos eletrodos reduzirá o campo elétrico nessa região, ressaltando o campo no volume do dielétrico. A homocarga é gerada por campos elétricos relativamente baixos. A heterocarga tem sinal oposto ao da carga do eletrodo. Após a aplicação do campo elétrico as moléculas carregadas ou íons podem migrar para os eletrodos com polaridade oposta, nas proximidades do qual são presas. A heterocarga é gerada por campos elétricos intensos [11-15]. Na Figura 7 são mostradas as regiões de respostas da polarização em função da frequência [10].

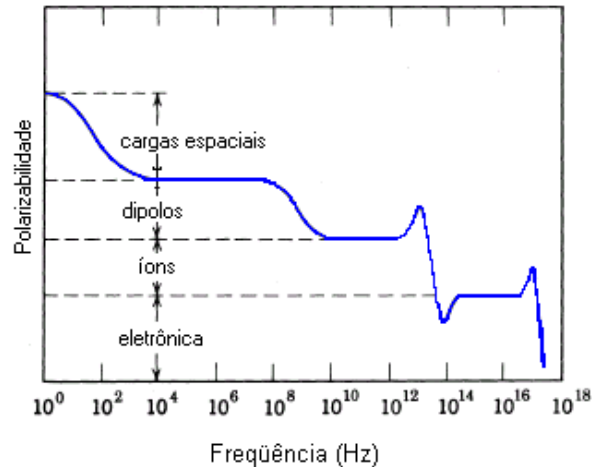


Figura 7 – Representação da faixa de frequências (Hz) de polarizabilidade [1-9]

Como discutido anteriormente, o movimento das partículas microscópicas possui tempos característicos. Se o campo elétrico aplicado é estático, a polarização após um certo tempo chegará a um novo valor de equilíbrio. Caso o campo elétrico varie com o tempo, a polarização não necessariamente ficará em equilíbrio com o campo elétrico, sofrendo um defasamento em relação ao campo elétrico. Se o campo variar muito rapidamente, os mecanismos que respondem de forma lenta deixarão de se movimentar, respondendo somente aqueles ligados à polarização instantânea. Nestes casos, torna-se mais conveniente a análise do comportamento dielétrico no domínio de frequência.

2.2.3 RESPOSTA DIELÉTRICA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Considerando-se um capacitor plano a vácuo, com placas paralelas de área A , separadas por uma distância d , ao aplicar-se uma tensão entre as placas do capacitor, ter-se-á o vetor indução elétrica ou vetor deslocamento elétrico \vec{D} , proporcional ao vetor campo elétrico \vec{E} . A relação entre o vetor deslocamento elétrico e o vetor campo elétrico, se o campo elétrico possuir uma dependência temporal, é dada por:

$$\vec{D}(t) = \epsilon_0 \cdot \vec{E}(t) \quad (11)$$

Onde ε_0 é a permissividade do vácuo. Como uma densidade de carga sobre os eletrodos será mantida, será gerada uma corrente elétrica entre estes, governada por $\frac{dQ}{dt}$, onde Q representa a carga total do capacitor. Ao substituir-se o vácuo por um meio dielétrico isotrópico, homogêneo, linear e não magnético, o deslocamento elétrico é acrescido por uma polarização \vec{P} , logo a equação 11 poderá ser escrita como:

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_0 \vec{E}(t) + \vec{P}(t) \quad (12)$$

Os vetores \vec{P} e \vec{D} são paralelos ao vetor \vec{E} , pois o material é isotrópico. Na prática percebe-se que a dependência temporal da polarização em relação ao campo elétrico pode não ser a mesma, em função do surgimento de diferentes processos de polarização, com diferentes tempos de atraso em relação ao campo elétrico aplicado. De forma geral, a polarização do dielétrico pode ser formada por duas componentes de polarização, sendo elas a polarização lenta $P_L(t)$ e a polarização rápida (instantânea) $P_I(t)$, assim:

$$P(t) = P_L(t) + P_I(t) \quad (13)$$

A polarização do material dielétrico não acompanha de forma instantânea o campo elétrico, havendo a necessidade de um intervalo de tempo para que a polarização total atinja um valor de equilíbrio. A parcela que responde a este efeito é a correspondente à polarização lenta. Considerando-se que o campo elétrico varia de forma arbitrária ao longo do tempo, pode-se representá-lo por uma sucessão de impulsos. Assim, a componente para a polarização lenta pode ser escrita como:

$$P_L(t) = \varepsilon_0 \int_0^{\infty} f(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (14)$$

Onde $f(t-\tau)$ é a função resposta ao impulso para a polarização, chamada de função relaxação dielétrica. Esta equação mostra que a polarização no instante atual (t) depende da superposição dos efeitos do campo elétrico em instantes anteriores (τ).

A função $f(t)$ deve respeitar o princípio da causalidade e superposição, logo as seguintes condições:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0 \\ f(t) = 0 \quad \text{para } t < 0 \end{cases} \quad (15)$$

Com as propriedades de 16 o limite de integração da equação 15 pode ser levado a $-\infty$. Considerando-se a integral de convolução para $f(t)$ e $E(t)$ a equação 15 torna-se:

$$P_L(t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t f(t-\tau)E(\tau)d\tau \quad (16)$$

Os processos de polarização considerados instantâneos seguem a seguinte relação:

$$P_I(t) = \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0 E(t) \quad (17)$$

Onde ε_{∞} representa a permissividade elétrica em alta frequência. Após as considerações sobre a polarização elétrica, a equação 13 pode ser reescrita sob a forma:

$$D(t) = \varepsilon_{\infty} \varepsilon_0 E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t f(t-\tau)E(\tau)d\tau \quad (18)$$

A condutividade pura σ é uma grandeza que representa o movimento de cargas livres e não é envolvida na polarização. Segundo Maxwell, o campo elétrico $E(t)$ gera uma densidade de corrente elétrica total $J(t)$, a qual é escrita como a soma da corrente de condução e correntes de deslocamento no vácuo. Logo,

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \quad (19)$$

Usando a equação 18 na equação 19, e após a devida manipulação matemática tem-se:

$$J(t) = \sigma E(t) + \varepsilon_0 \varepsilon_\infty \frac{\partial E(t)}{\partial t} + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t f(t-\tau) \frac{\partial E(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (20)$$

Utilizando-se parâmetros de circuitos, esta equação pode ser escrita como:

$$i(t) = \frac{U(t)}{R} + \varepsilon_\infty C_0 \frac{\partial U(t)}{\partial t} + C_0 \int_{-\infty}^t f(t-\tau) \frac{\partial U(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (21)$$

Onde R é a resistência elétrica da amostra, C_0 a sua capacitância geométrica.

Considerando $U(t)$ como uma função degrau, $U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ U_0 & t > 0 \end{cases}$. Assim, tem-se:

se:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} S(t) + C_\infty U_0 \delta(t) + C_0 f(t) U_0 \quad (22)$$

Onde $S(t)$ e $\delta(t)$ representam as funções degrau de Heaviside e delta de Dirac respectivamente.

Para a corrente elétrica de polarização $i_p(t)$ ter-se-á:

$$i_p(t) = C_0 U_0 \left[\frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} + f(t) \right] \quad (23)$$

Assim, para a corrente de despolarização $i_d(t)$, considerando-se $t > 0$, tem-se:

$$i_d(t) = C_0 U_0 f(t) \quad (24)$$

Onde U_0 é a tensão de polarização da amostra e $f(t)$ é a sua função resposta.

2.2.4 RESPOSTA DIELÉTRICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Aplicando-se a transformada de Fourier aos dois membros da equação 19 e fazendo uso da propriedade de que $\mathfrak{I}\left\{\frac{\partial D(t)}{\partial t}\right\} = i\omega D(\omega)$ e considerando-se que $\tilde{\chi}(\omega) = \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)$ obtém-se, após a devida manipulação matemática [16], a equação:

$$\tilde{J}(\omega) = \left\{ \sigma + i\omega\varepsilon_0 \left[1 + \chi'(\omega) - i\chi''(\omega) \right] \right\} \tilde{E}(\omega) \quad (25)$$

ou

$$\tilde{J}(\omega) = \left[\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} + \chi''(\omega) + i(1 + \chi'(\omega)) \right] \varepsilon_0 \omega \tilde{E}(\omega) \quad (26)$$

A parte real da equação 26 dá a componente da corrente de deslocamento que está em quadratura com o campo elétrico, não contribuindo, portanto para o fator de perdas. A parte imaginária dá a componente da corrente em fase com o campo elétrico, contribuindo para o fator de perdas [16].

A resposta dielétrica no domínio da frequência pode ser escrita em termos da permissividade elétrica $\varepsilon(\omega)$, que pode ser definida [16] pela expressão:

$$D(\omega) = \varepsilon(\omega)E(\omega) = \varepsilon_0[1 + \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)]E(\omega) \quad (27)$$

A parte real da permissividade consiste das contribuições do vácuo, que é obrigatoriamente real, não podendo, portanto, contribuir para as perdas. A parte imaginária da permissividade é totalmente devida ao meio material, o qual pode ter vários mecanismos de polarização coexistindo e não interagindo significativamente entre eles próprios [16]. A permissividade pode ser escrita como a soma das contribuições individuais dos mecanismos:

$$\tilde{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_0 \left\{ 1 + \sum_l \chi'_l(\omega) - i \sum_l \chi''_l(\omega) \right\} \equiv \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (28)$$

A maioria das medidas dielétricas (realizadas) é feita por meio de medidas de corrente elétrica seguindo, portanto, a equação 26, na qual aparece a contribuição DC no resultado. O instrumento de medida não pode diferenciar entre a verdadeira resposta dielétrica, a qual pode não conter σ , e a resposta efetiva que pode conter σ [16]. Escrevendo a equação 24 como:

$$\tilde{J}(\omega) = i\omega \tilde{\varepsilon}(\omega) \tilde{E}(\omega) \quad (29)$$

onde $\tilde{\varepsilon}(\omega)$ denota a permissividade efetiva, a qual é medida pelo instrumento, tem-se:

$$\tilde{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i \left[\varepsilon''(\omega) + \frac{\sigma}{\omega} \right] = \varepsilon_0 \left\{ 1 + \chi'(\omega) - i \left[\chi''(\omega) + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right] \right\} \quad (30)$$

O significado do último termo da equação 30, é que a condutividade DC aparentemente contribui para as medidas de perdas dielétricas realizadas em pontes ou outros instrumentos, que divergem nas medidas próximas à frequência zero [16]. Essa não é uma resposta dielétrica verdadeira, não sendo acompanhada por alguma contribuição da parte real da permissividade, que surge em função do instrumento

não distinguir entre um verdadeiro processo dielétrico e um processo de transporte DC [16].

A relação entre as partes real e imaginária é estabelecida pelas relações de Kramers-Kronig [10-16]:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{2}{\pi} \wp \int_0^\infty \frac{\omega' \varepsilon''(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (31)$$

$$\varepsilon''(\omega) = -\frac{2}{\pi} \omega_0 \wp \int_0^\infty \frac{\omega' \varepsilon'(\omega')}{\omega'^2 - \omega_0^2} d\omega' \quad (32)$$

o símbolo \wp é o valor principal da integral de Cauchy e ε_∞ é a permissividade em altas frequências, a qual está relacionada com a susceptibilidade χ_i pela relação

$$\varepsilon_\infty = \varepsilon_0(1 + \chi_i) \quad (33)$$

As medidas dielétricas são normalmente realizadas com amostras feitas em forma de capacitor plano de placas condutoras paralelas de área A e distância entre as placas d . A capacitância geométrica do dispositivo, desprezando-se o efeito de bordas, será:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \quad (34)$$

A capacitância do capacitor será:

$$C = \varepsilon C_0 \quad (35)$$

Supondo que sobre as armaduras do capacitor seja aplicada uma tensão alternada da forma $V = V_0 e^{i\omega t}$, a capacitância será uma quantidade complexa,

composta de uma parte real e uma parte imaginária, correspondentes diretamente às partes real e imaginária da permissividade complexa [16], logo:

$$C(\omega) = C'(\omega) - iC''(\omega) \quad (36)$$

$$C(\omega) = \frac{A}{d} [\varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)] \quad (37)$$

$C'(\omega)$ é parte real da capacitância e $C''(\omega)$ representa a componente das perdas dielétricas. Define-se a o fator de perdas dielétricas ou $\tan \delta$ como:

$$\tan \delta = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (38)$$

Na prática, a componente de perdas (ε'') e a permissividade elétrica (ε') do material são calculados por [16]:

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{C(\omega)}{C_0} \quad (39)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\sigma}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega R C_0} \quad (40)$$

Onde σ é a condutância elétrica e R é a resistência elétrica do material. Estas equações são utilizadas na interpretação dos resultados da técnica de Espectroscopia Dielétrica, utilizada em estudos de relaxações dielétricas em função da frequência do campo elétrico AC aplicado.

2.2.5 MODELOS DE ISOLAMENTO

A interpretação das respostas de um sistema isolante deve levar em consideração os circuitos equivalentes para os diferentes tipos de isolamento. Nos últimos anos vários modelos foram propostos para compreensão da resposta dielétrica [17]. Na maioria, os modelos propostos até agora têm sido derivados do modelo de Debye, baseado num circuito elétrico de RC, o qual consiste num arranjo paralelo, contendo ramos com uma ligação em série de resistência e capacitância. O número de ramos varia dependendo da natureza do processo de despolarização.

Uma vez calculada a impedância complexa, vários modelos de sistemas isolantes podem ser utilizados para determinar os parâmetros representativos. Existem dois modelos bastante simples, utilizados principalmente em análise de circuitos. Eles são compostos de uma capacitância C e de uma resistência R. Estes modelos de circuitos equivalentes RC são conhecidos como modelo série e modelo paralelo, como mostra a Figura 8, e calculados como segue:



Figura 8 – Modelos de circuitos equivalentes RC - série e paralelo

a) Circuito Equivalente Série

$$\dot{Z} = R_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (41)$$

$$R_s = \text{Re}\{\dot{Z}\} \quad (42)$$

$$C_s = -\frac{1}{\omega \text{Im}\{\dot{Z}\}} \quad (43)$$

b) Circuito Equivalente Paralelo.

$$\dot{Z} = \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C_p} \quad (44)$$

$$R_p = \frac{1}{\operatorname{Re}\left\{\frac{1}{\dot{Z}}\right\}} \quad (45)$$

$$C_p = \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{j\omega\dot{Z}}\right\} \quad (46)$$

Onde \dot{Z} é a impedância complexa, R_s e C_s a resistência e a capacitância do circuito RC série e R_p e C_p a resistência e a capacitância do circuito equivalente RC paralelo do material, respectivamente.

Com estes modelos podem-se definir outras grandezas, que são frequentemente usadas em diagnóstico de materiais isolantes. A capacitância C e o fator de dissipação ($\tan \delta$) ou fator de potência são definidos pelas eq. 47, 48 e 49.

$$C = \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{j\omega\dot{Z}}\right\} \quad (47)$$

$$\cos \varphi = \frac{\operatorname{Re}\{\dot{Z}\}}{|\dot{Z}|} \quad (48)$$

$$\tan \delta = \frac{\operatorname{Re}\{\dot{Z}\}}{\operatorname{Im}\{\dot{Z}\}} \quad (49)$$

Considerando-se um sistema puramente capacitivo, corrente e tensão estariam defasadas em 90° . No entanto a componente resistiva faz com que o ângulo entre $I(t)$ e $V(t)$ passe a ser $90^\circ - \bar{\delta}$, como pode ser visto na Figura 9. O ângulo $\bar{\delta}$ representa a dissipação da energia em forma de calor e é geralmente representado pela sua tangente, conhecida como tangente de perdas.

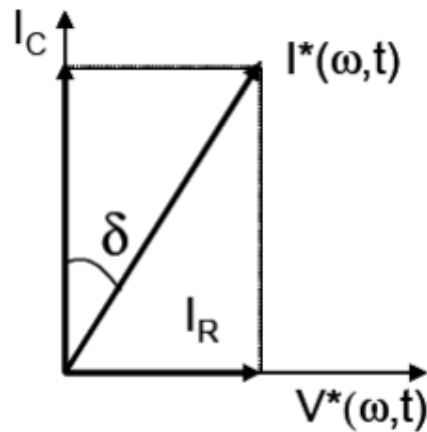


Figura 9 – Representação vetorial da tensão aplicada e da corrente resultante em um circuito RC paralelo [16]

2.2.5.1 Modelo de isolamento RC paralelo

A Figura 10 ilustra uma disposição adaptada à de uma isolação composta por papel e óleo. Cada circuito RC série representa um processo de relaxação no isolamento e tem associado a constante de tempo dado por $T = R * C$.

Considerando o isolamento sistema como uma "caixa preta", o modelo tenta identificar o efeito individual de cada componente da isolação, sem a necessidade de conhecimento prévio sobre a sua disposição relativa [18].

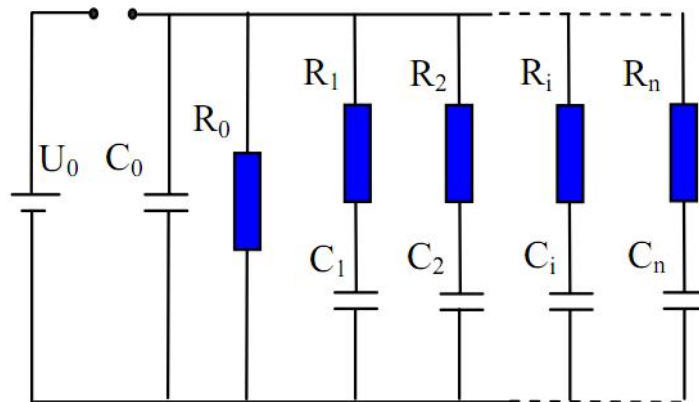


Figura 10 – Modelo da resposta dielétrica por meio de circuitos equivalentes [17]

Este modelo tem um comportamento linear. A linearidade da isolação de papel e óleo é influenciada pela intensidade do campo elétrico [19]. A validade deste modelo físico foi demonstrada por muitos autores, como por exemplo:

- Gafvert et al [20] estudo dos processos de polarização a partir de equações básicas da física dielétrica.
- Houhanessian et al [21], descreve a determinação de um circuito equivalente a partir de medições das correntes de polarização e despolarização.
- Saha et al [18] modelo principal do isolamento do sistema isolante de um transformador para descrever o comportamento dielétrico.

2.3 ESTADO DA ARTE DA ESPECTROSCOPIA DIELETRICA EM TRANSFORMADORES

O transformador de distribuição é um elemento vital e relativamente caro da rede de média tensão. Razões econômicas e técnicas fundamentaram o amplo interesse para a vida do transformador. Em geral, a vida de um transformador está associada ao estado de sua isolação.

O sistema isolante de um transformador, em condições operacionais, é submetido a vários tipos de estresses, tais como elétricos, ambientais, térmicos e mecânicos. A ação de cada um desses fatores ou o sinergismo entre eles causa o envelhecimento do sistema isolante, podendo degradar a tal ponto, que o equipamento não venha a resistir a solicitações mais severas, tais como impulsos atmosféricos, curto-circuito, entre outros que podem ocorrer na rede e provocam a falha do transformador [1-2]. O estresse térmico leva a um processo de degradação do óleo e do papel, bem como pode reduzir a resistência de isolamento em função dos processos de condução termicamente ativados [3-22-23]. O papel torna-se frágil e a durabilidade contra o estresse mecânico é reduzido. O processo de quebra de cadeias de moléculas de glicose na celulose produz água na isolação sólida, que atua como um catalisador para a desagregação. A tensão de ruptura do óleo isolante e do papel é reduzida com o teor de umidade crescente no óleo. A condutividade de um material é a propriedade que pode ser relacionada com o teor de umidade, envelhecimento e temperatura de operação. Assim, o conhecimento sobre a condutividade do óleo e do isolamento sólido do material pode ser usado como um parâmetro importante para a avaliação da condição da isolação.

Atualmente, o interesse das pesquisas é voltado aos transformadores de potência, devido ao seu alto custo. Nos estudos realizados observa-se que se trata como material sólido apenas o papel, não havendo referências ao verniz isolante.

As principais técnicas aplicadas são a medição de resistência de isolamento, fator de perdas dielétricas, descargas parciais, polarização interfacial, capacitância em função da frequência, quantidade de umidade do óleo, análise dos gases dissolvidos no óleo, grau de polimerização viscosimétrico e resistência à tração de materiais celulósicos. Técnicas de caracterização de materiais dielétricos têm sido consideradas como promissoras para uma avaliação não destrutiva da qualidade do isolamento dos transformadores, podendo-se citar as medições de domínio da frequência, medidas de corrente elétrica de polarização e despolarização e tensão de retorno [24]. Dessa forma, há uma grande demanda na indústria e

concessionárias de energia elétrica na utilização de métodos de diagnóstico para análise de materiais e de sistemas de isolantes.

Existem métodos indiretos, disponíveis para se estimar o estado da isolação de papel, no entanto, o envelhecimento do papel e a umidade só podem ser medidos em amostras coletadas e analisadas em laboratório. O isolamento sólido só pode ser examinado diretamente abrindo-se o equipamento e coletando amostras. Obviamente este não é um método aceitável, pois é destrutivo. O processo de coleta de amostras de óleo, quando se analisa por titulação de Karl Fischer, pode contribuir para um aumento no teor de umidade do óleo isolante

Determinar o teor de umidade em um sistema isolante é de fundamental importância, pois um aquecimento das partes umedecidas no isolamento pode conduzir a uma degradação avançada da isolação.

A água presente no isolamento óleo papel causa três efeitos: diminui a rigidez dielétrica do meio isolante, acelera o envelhecimento da celulose e provoca a emissão de bolhas em quando operando altas temperaturas [25].

A Figura 11 mostra a tensão de falha e o fator de dissipação ($\tan\delta$) do óleo, em função da concentração de água.

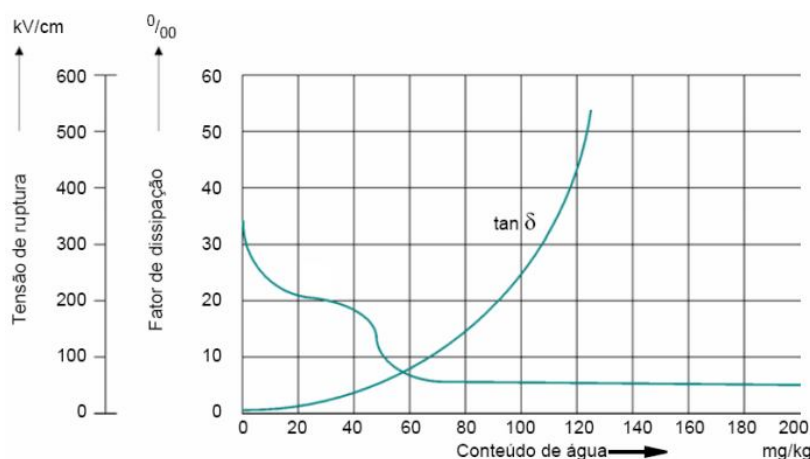


Figura 11 – Tensão de ruptura e fator de dissipação dependentes do conteúdo de água – Adaptado de [25]

Com concentração de água baixa, a tensão de ruptura é muito sensível para um diagnóstico, com o aumento desta concentração de água o fator de dissipação é um bom indicador do estado do isolamento.

A Figura 12 mostra a influência da umidade relativa no dielétrico em função da sua capacidade de resistir a tensões de ruptura, apontando diferentes valores de tangente delta para as diferentes situações. Nota-se que quanto maior a quantidade

de água, o dielétrico suporta uma tensão menor. Pode-se notar ainda que para diferentes condições do isolamento, mostrados pelos valores de tangente delta, o fenômeno se repete [25].

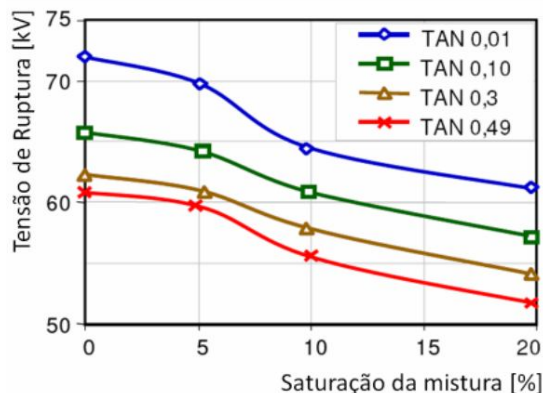


Figura 12 – Influência da umidade relativa no dielétrico em função da sua capacidade de resistir a tensões de ruptura – Adaptado de [25]

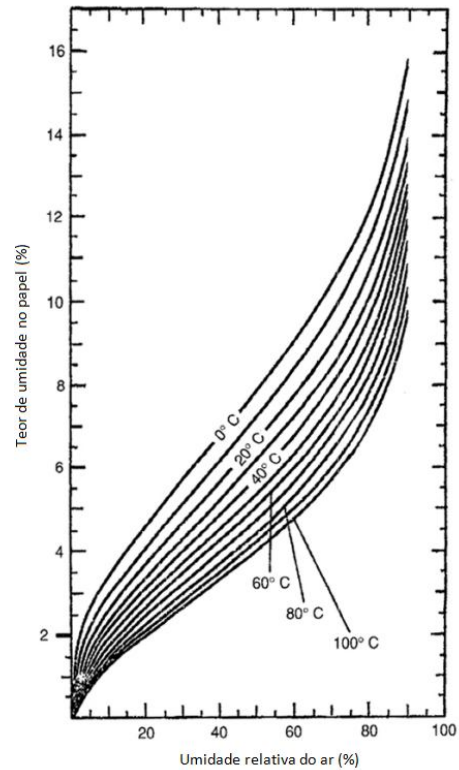
As moléculas de água podem dissociar-se acelerando o processo de degradação da isolação. Devido ao processo de hidrólise, tem-se a quebra da cadeia da celulose, resultando em partes menores [26].

2.3.1 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NA ISOLAÇÃO DE PAPEL

O estado da arte das medições de umidade nos últimos anos é baseado no diagrama de equilíbrio onde se tenta extrair a medida da quantidade de umidade no isolamento sólido, através da medida em PPM no óleo isolante.

Devido ao papel ser um material higroscópico e absorver água muito rapidamente, por conseguinte, deve ser seco e impregnado com óleo isolante.

O teor de umidade do papel exposto ao ambiente é mostrado na Figura 13, apresentada por Jeffries [27]. Ela indica que o papel isolante exposto ao ar ambiente contém uma percentagem elevada (> 3%) de água à temperatura ambiente em sua composição.



**Figura 13 – Correlação entre o teor de umidade no papel e umidade relativa do ar
Curva de Jeffries – Adaptado de [27]**

Para garantir o bom desempenho elétrico do sistema papel/óleo e reduzir o seu envelhecimento, a umidade deve ser mantida preferencialmente abaixo de 0,5 % no papel e 20 PPM no óleo [28]. Mudanças na temperatura provocam alterações na absorção de umidade do papel e do óleo, provocando a migração de água entre estes dois materiais e afetando desta maneira as propriedades deste sistema isolante. A Figura 14 mostra o diagrama de Nielsen que relaciona as isotermas de equilíbrio de umidade entre o óleo e o papel [28].

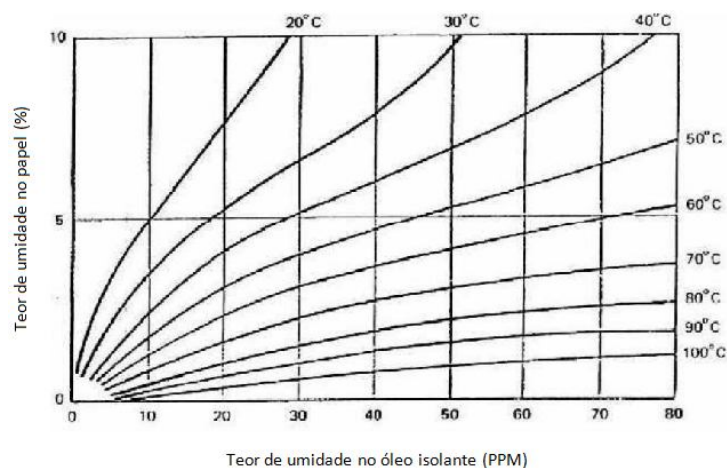


Figura 14 – Diagrama de Nielsen – Equilíbrio entre teor de umidade no óleo isolante e no papel isolante – Adaptado de [28]

Em 1983 Ommen desenvolveu um conjunto de curvas de equilíbrio de umidade em sistemas de papel-óleo. Desde então, outros engenheiros e pesquisadores também tem plotado suas próprias curvas. A Figura 15 mostra a curva de Griffin [29].

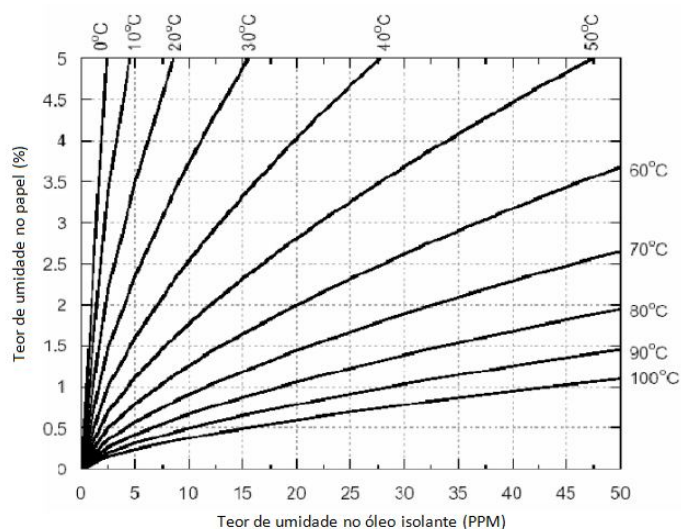


Figura 15 – Correlação entre o teor de umidade no papel e teor de água no óleo isolante - Curva de Griffin – Adaptado de [29]

As curvas de equilíbrio de umidade em um sistema de papel-óleo proporcionam uma ferramenta de avaliação do estado do papel nos transformadores de distribuição. É uma maneira rápida de prever o teor de umidade aproximado do papel isolante, que age como um guia útil no processo de controle de umidade. O

método de Karl Fisher pode ser afetado pelo ingresso de umidade na amostra durante o transporte para o laboratório, podendo comprometer os resultados e dificultando a comparação com valores referenciais [25].

Portanto, métodos de diagnóstico foram desenvolvidos para estimar o teor de umidade no papel e obter características do sistema isolante em função da resposta dielétrica [30]. Os resultados apresentados no artigo do Gafvert [31] confirmam que as medições das respostas dielétricas de um material podem fornecer informações valiosas sobre o estado da isolação óleo/papel em transformadores de potência, particularmente o teor de umidade.

As medições dielétricas descritas confirmam que a condição do óleo, especificamente a sua condutividade, tem um impacto significativo sobre resposta dielétrica, e isto deve ser levado em conta quando tenta-se estimar teores de umidade nos isolamentos sólidos. No que diz respeito à geometria da amostra, observou-se que existe influência sobre a resposta, mas não de forma tão significativa como o efeito da condutividade óleo [31].

De acordo com Gafvert, todos os métodos de resposta dielétrica, quando comparados refletem os fenômenos de polarização e condução no sistema isolante dos transformadores. As medições dielétricas realizadas confirmam que a condição do óleo, especificamente a sua condutividade, tem um impacto significativo sobre a resposta dielétrica, e isto deve ser levado em conta quando se tenta estimar o teor de umidade no isolamento [31].

Os trabalhos da Força Tarefa 15.01 do CIGRÉ mostram a validade desses métodos. Estes trazem a promessa de dar maior precisão ao diagnóstico e determinação da umidade em determinado isolamento.

2.3.2 MEDIDAS DAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS

A resposta dielétrica pode ser realizada no domínio do tempo ou no domínio frequência. Uma vez no domínio do tempo tem-se o registro da medida de carga e descarga das correntes pelo isolamento. Este procedimento é conhecido como Corrente de Polarização e Despolarização.

As medidas no domínio da frequência podem ser obtidas utilizando-se de um analisador de impedância, o qual mede as propriedades dielétricas dos materiais em função da frequência. Através do estudo das curvas obtidas é possível fazer uma distinção entre os diferentes tipos de fenômenos.

A impedância (módulo e ângulo) pode ser precisamente calculada através da medida da tensão e da corrente. Assim, vários parâmetros podem ser calculados,

tais como: capacitância (C), fator de dissipação ($\tan \delta$), capacitância complexa (C' e C'') e permissividade complexa (ϵ' e ϵ'').

2.3.3 ANÁLISE DA RESPOSTA DIELÉTRICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

O fator de dissipação em função da frequência mostra uma forma de curva típica em formato de "S". Com o aumento do teor de umidade, da temperatura ou com o envelhecimento, a curva se desloca para frequências mais elevadas [32]. A umidade influencia tanto em altas (acima de 60 Hz) como em baixas frequências (abaixo de 0,01 Hz). A parte central da curva com reflete a condutividade do óleo. Esta é a parte onde o valor do fator de dissipação decai rapidamente, formando uma rampa para baixo (quando a curva é analisada das frequências baixas para as altas). Antes do decaimento contínuo do fator de dissipação são registradas as condições da geometria do isolamento. Essas condições implicam em uma elevação à esquerda da medida da condutividade do óleo [32]. Em baixas frequências predominam as propriedades do isolamento sólido, como pode ser visto na Figura 16 [32].

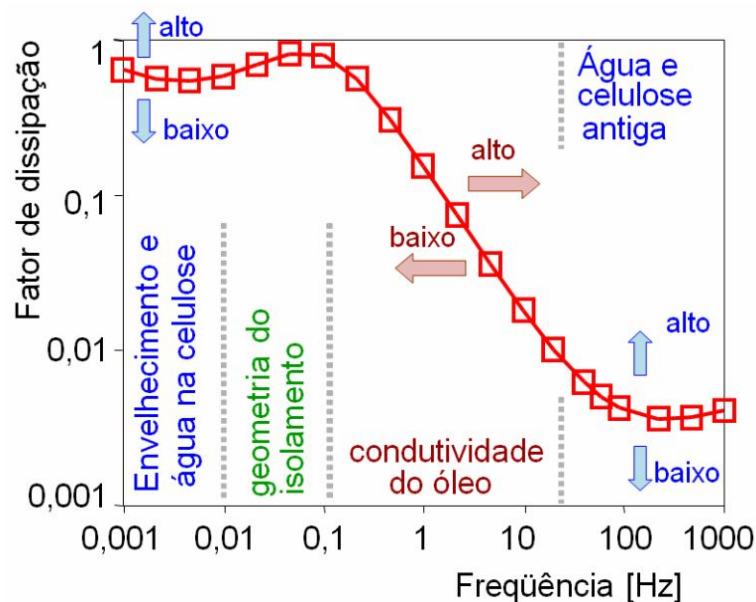


Figura 16 – Interpretação para os dados de domínio da frequência com a discriminação entre as influencias de vários fenômenos físicos [32]

Os resultados apresentados no artigo de Farahani et al [33] mostram a sensibilidade dos processos de polarização e de condução, no sistema isolante de máquinas rotativas de alta tensão. A fim de compreender a influência desses fatores

nas propriedades dielétricas, realizaram-se medidas no domínio do tempo e no domínio da frequência nas barras de um estator, após imersão das mesmas em água e posterior processo de secagem, com diferentes condições de umidade e temperatura. A isolamento das barras do estator das máquinas rotativas de alta tensão é composta com resina epoxy impregnada.

A Figura 17 mostra as mudanças no espectro da tangente delta e da capacitância em função das situações que estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Situações estabelecidas para realização das medidas

Situação	Descrição
1	Barramento novo (relativamente seco)
2	Após semanas exposto a ação da água e curta secagem (relativamente úmido)
3	Após 20 dias secando a 25 °C
4	Após mais de 20 dias secando a 25 °C
5	Após 5 dias secando a 40 °C
6	Após 3 dias secando a 70 °C
7	Após mais de 3 dias secando a 70 °C

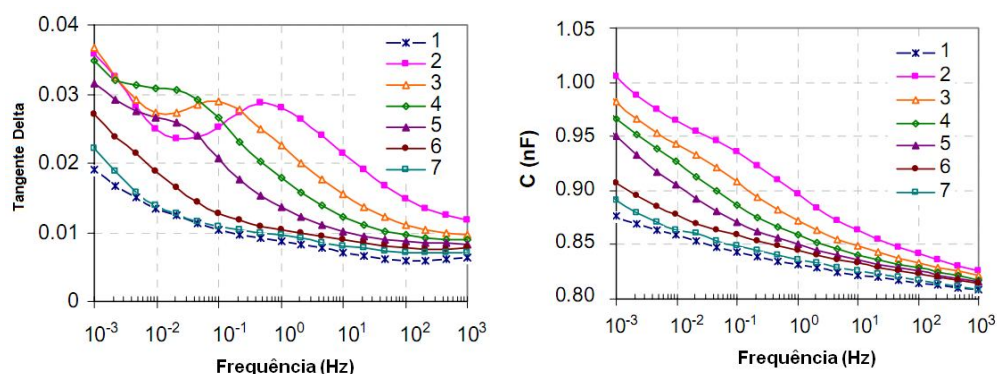


Figura 17 – Fator de dissipação e capacitância em função da frequência para diferentes teores de umidade nas amostras – Adaptado de [33]

O autor observou que a resposta dielétrica reflete bem a degradação do sistema isolante em função da umidade presente no isolamento. De acordo com a situação imposta, observaram-se mudanças nos valores absolutos das perdas dielétricas e da capacitância em diferentes faixas de frequência, embora as mudanças foram mais perceptíveis em baixas frequências. A posição e altura dos máximos na curva da tangente delta indicaram ser significativos.

A curva da tangente delta na condição de umidade elevada apresenta um pico, que é deslocado para baixas frequências com processo de secagem dentro do isolamento e finalmente desaparece. A curva da capacitância apresenta um aumento

considerável na absorção de água e retorna para valores originais dentro do progresso de secagem.

De acordo com Farahani et al pode-se dizer que o teor de umidade presente nas amostras tende a aumentar o fator de dissipação na resposta dielétrica e a influência da umidade sobre a capacitância é notável, afetando principalmente em baixas frequências. Assim, o autor concluiu que a alteração na capacitância pode ser um importante parâmetro para observar influência da umidade e do envelhecimento, bem como para se estimar o estado da isolação.

Com o intuito de observar a influência da umidade e da temperatura na resposta dielétrica de um sistema composto por papel e óleo, Saha et al [34] realizou um trabalho aplicando a técnica de espectroscopia dielétrica para avaliação do sistema isolante em transformadores de potência.

O autor realizou medidas variando a umidade em diferentes temperaturas, com o intuito de compreender a influência desses parâmetros. As medidas foram realizadas em condições de equilíbrio de umidade entre o óleo e o papel isolante. Os níveis de umidade utilizados no trabalho variam de 0,2% a 5% e os níveis de temperatura variam de 25 °C a 120 °C.

A Figura 18 mostra as curvas das perdas dielétricas do sistema de papel impregnado com óleo isolante, medidas com teor de umidade de 0,2%, obtidas a partir de várias temperaturas. Pode-se observar que as perdas dielétricas aumentam em função do aumento da temperatura.

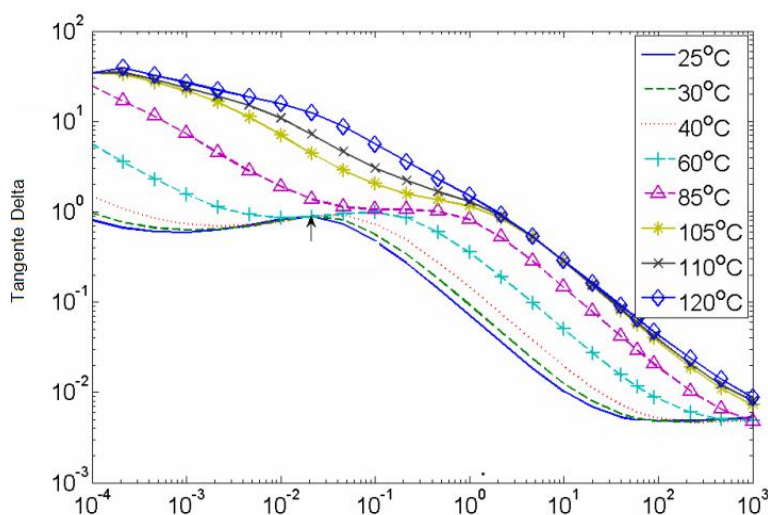


Figura 18 – Efeito da temperatura nas perdas dielétricas para medições com umidade de 0,2% - Adaptado de [34]

O autor salienta a existência de um ponto crítico nas curvas de perdas dielétricas, nas amostras ensaiadas em temperaturas abaixo de 60°C. Quando a temperatura de medição foi superior a 100°C, a tendência observada nas formas de curva em relação às curvas observadas nas medidas com menor temperatura. Em geral, de acordo com o autor, a curva das perdas dielétricas depende de dois fatores, da resistência de isolamento, que é em função da temperatura, e da migração de umidade entre óleo e papel.

Em temperaturas mais elevadas, espera-se que a perda dielétrica no papel seja menor, pois a água se dissipa para fora do papel. No entanto, as perdas no óleo isolante aumentam devido à migração de umidade e os efeitos de elevação de temperatura.

As medições de espectroscopia dielétrica realizadas com teor de umidade de 2% estão mostradas na Figura 19.

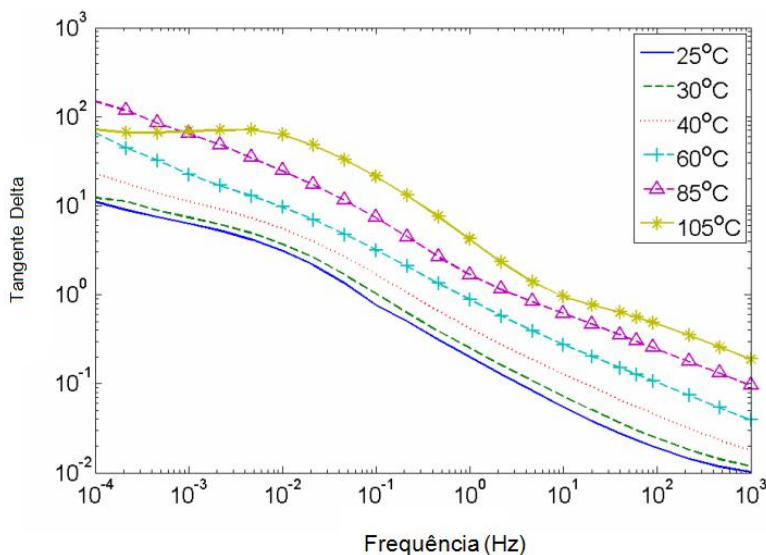


Figura 19 – Efeito da temperatura nas perdas dielétricas para medições com umidade de 2% - Adaptado de [34]

Pode-se observar nas curvas obtidas nas medições com umidade de 2% a mesma tendência observada nos medidas com 0,2% de umidade. Os pontos críticos vistos na condição de pouca úmidade e baixas temperaturas foram ausentes neste caso.

Pode ser visto na Figura 19 que as perdas dielétricas na medição realizada a 105°C revelaram valores abaixo dos observados na medida a 85 °C em baixas frequências. Os autores associaram este fato a migração excessiva de umidade entre o óleo e o papel, em temperaturas elevadas (acima de 100 °C), o que pode ter resultado em uma baixa perda no isolamento de papel.

A Figura 20 mostra as curvas das perdas dielétricas obtidas nas medições de espectroscopia dielétrica realizadas com teores de umidade de 0,2% e 2% no papel isolante.

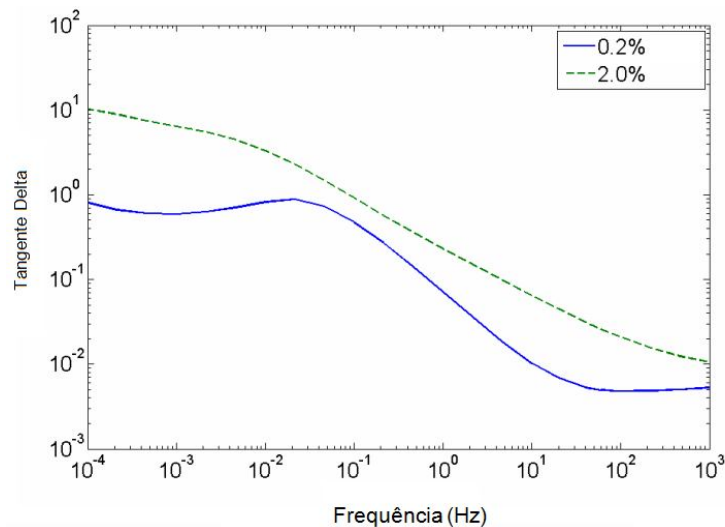


Figura 20 – Curva da tangente delta em função da frequência para diferentes umidades à 25°C – Adaptado de [34]

Pode-se observar que a umidade tem um efeito significativo na resposta dielétrica, obtida a partir das medições de espectroscopia dielétrica. O envelhecimento dos materiais presentes no sistema isolante dos transformadores pode resultar em alterações físicas e químicas em sua composição, por exemplo, a formação de pequenas moléculas dipolares e a mudança de solubilidade em água, o que pode ser indicado por meio da técnica de espectroscopia dielétrica [35].

Gafvert et al [31] realizou medidas em função da frequência em quatro unidades de transformadores como mostrados na Figura 21. As unidades T11 e T12 são semelhantes e T41 é semelhante a T42. Os dois primeiros transformadores são deslocados aproximadamente duas décadas da frequência em relação a as duas últimas unidades.

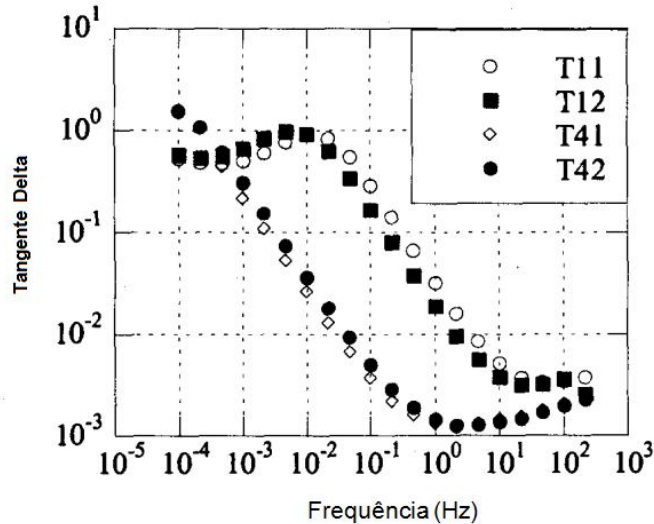


Figura 21 – Comparação de quatro transformadores (dois tipos) pela curva da tangente delta em função da freqüência – Adaptado de [31]

A principal razão para esta diferença é a maior condutividade do óleo para os transformadores T11 e T12, deslocando-os em função da freqüência. Na Figura 22 está apresentada a influência da condutividade do óleo na curva da tangente delta através de medições realizadas em três níveis de condutividade no óleo.

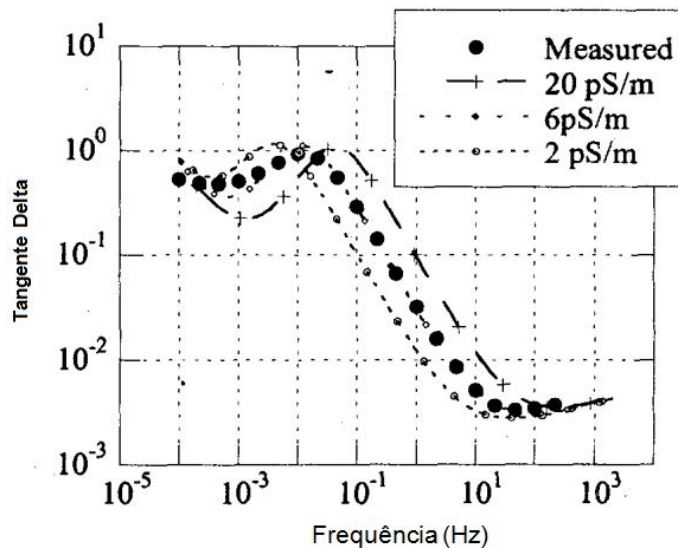


Figura 22 – Influência da condutividade do óleo na curva da tangente delta em função da freqüência – Adaptado de [31]

O autor explica que este comportamento é em função da combinação em série do óleo e da celulose. As placas existentes nos transformadores de potência atuam como uma barreira para os portadores de cargas iônicas presentes no óleo e

acumulam cargas superficiais nas interfaces, que dão origem a um pico em baixas frequências, tipo este muito pronunciado no modelo de Maxwell-Wagner [36]. A posição, em função da frequência, deste pico depende tanto da condutividade do óleo como da quantidade de placas condutoras, presentes no sistema isolante de transformadores [31]. A influência do teor de umidade na celulose pode ser visto na Figura 23.

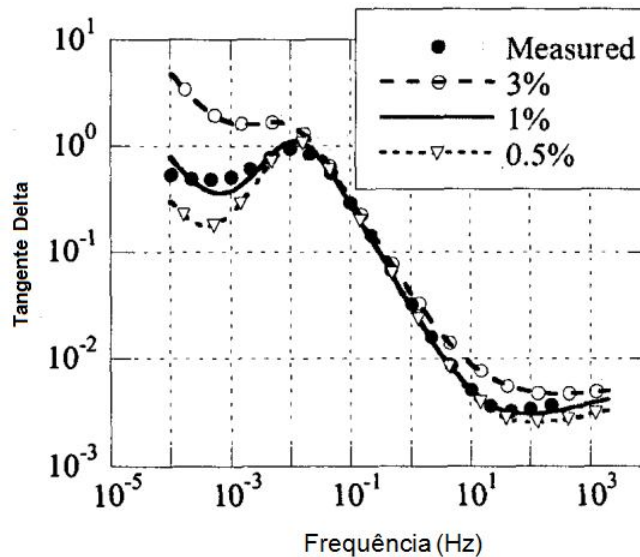


Figura 23 – Comparação do valor medido por Gafvert com três valores calculados para três diferentes teores de umidade – Adaptado de [31]

Em 2009 Shuang-suo Yang et al [37] publicaram um artigo no qual relatam a pesquisa realizada utilizando a técnica de espectroscopia dielétrica em amostras de papel, imersas em óleo isolante, com diferentes teores de umidade nas amostras, para medições realizadas em diferentes temperaturas. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos do envelhecimento, da umidade e da temperatura sobre a resposta dielétrica.

De acordo com Shuang-suo Yang et al, umidade e envelhecimento tem um grande efeito sobre a resposta dielétrica no domínio da frequência de um sistema de isolamento papel/óleo. Ambas as variáveis vão fazer com que ocorra um aumento nos valores da curva de tangente delta, sendo difícil de distinguir um fenômeno do outro. A variação da temperatura nas medições acarreta em um deslocamento do espectro de tangente delta para frequências de ordem superior. Os deslocamentos do pico observado na curva para frequências maiores podem ser explicados com a teoria de Arrhenius [37].

Com relação aos efeitos da umidade, o autor relata um deslocamento do espectro para cima e salienta que este fenômeno fica mais evidente à medida que se aumenta o teor de umidade. A umidade no papel tem grande impacto na perda dielétrica, com o aumento do teor de umidade aumentam-se as perdas. Além disso, o autor cita que a umidade tem efeito significativo na resposta. Nas curvas de tangente delta é possível observar grandes diferenças, assim, a resposta dielétrica pode ser usada para avaliação do teor de umidade. É necessária a correção da temperatura antes da realização das medidas.

Os resultados mostraram que as respostas obtidas nas medições de espectroscopia dielétrica não se referem apenas a estado dos materiais isolantes como o teor de água, mas também em função da distribuição desta água na estrutura do material.

Em junho de 2010, Fofana et al [38] descreveram a utilização da técnica de espectroscopia dielétrica, para investigar o estado da isolamento do sistema papel/óleo, com controle de temperatura e umidade. No artigo foram apresentados resultados de testes laboratoriais em amostras de papel impregnado com óleo, variando-se a temperatura e tendo a umidade no papel como parâmetro.

Fofana et al salientam que as medidas devem ser realizadas em intervalos de tempo para que o isolamento papel/óleo entre em equilíbrio de umidade. A configuração experimental utilizada no trabalho constituiu-se de um condutor envolto com papel isolante e folhas de alumínio como mostra a Figura 24.

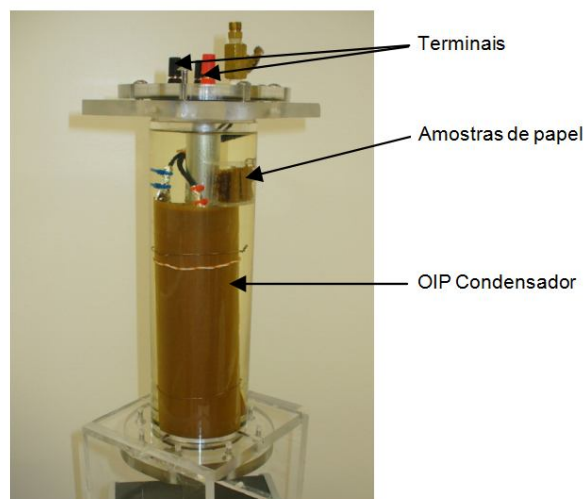


Figura 24 – Cuba utilizada por Fofana et al para realização das medições em amostras de papel impregnadas com óleo – Adaptado de [38]

O teor de umidade no papel foi medido por titulação de Karl Fisher e as temperaturas utilizadas foram de -10°C , 5°C e 20°C . A Figura 25 e a Figura 26 mostram a curva da capacitância em função da frequência e a curva da permissividade em função da frequência, respectivamente, para as situações de temperatura e umidade impostas para as medidas.

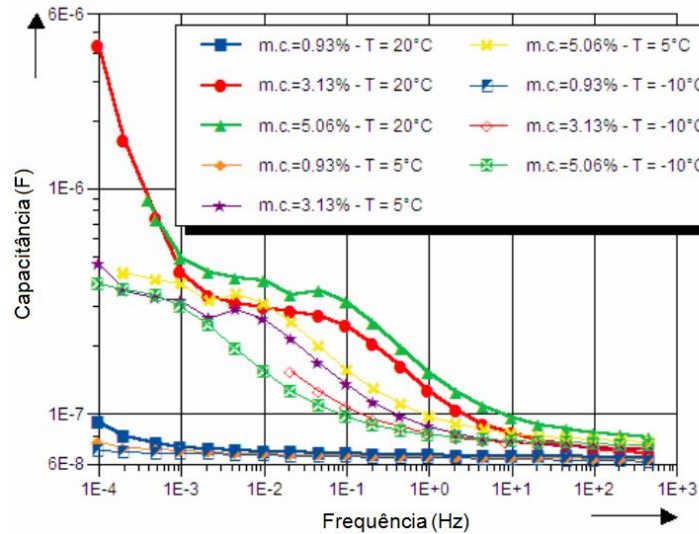


Figura 25 – Curva de capacitância em função da frequência obtida nas medições de espectroscopia dielétrica com controle de umidade e temperatura – Adaptado de [38]

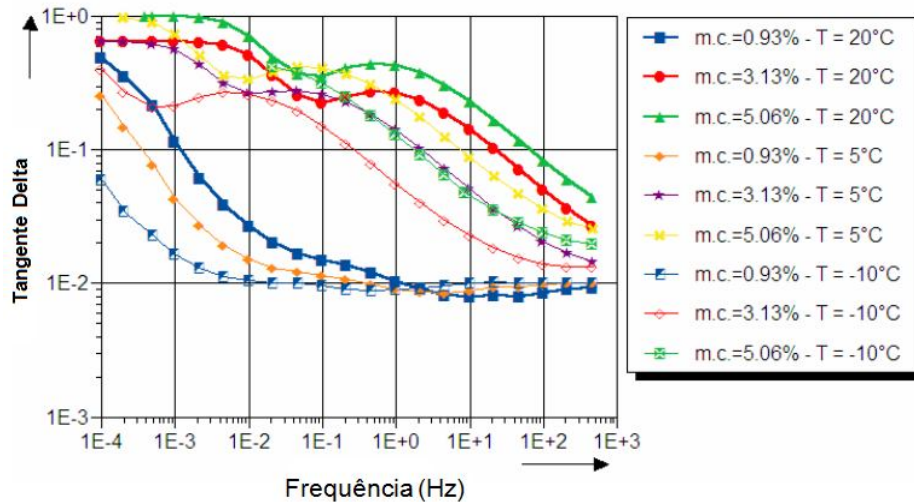


Figura 26 – Curva do fator de dissipação ou tangente delta em função da frequência obtida nas medições de espectroscopia dielétrica com controle de umidade e temperatura – Adaptado de [38]

O autor observou que na curva da capacitância ocorre um aumento dos valores de amplitude em baixas frequências, em função do aumento da temperatura, como pode ser visto na Figura 25.

A curva do fator de perdas revelou uma elevação nos valores em função da elevação da temperatura e da umidade, bem como um deslocamento do espectro para frequências maiores.

Altas temperaturas sobre o isolamento e alto teor de umidade são conhecidos por aumentar a condutividade da celulose e óleo. Este fenômeno também é verificado em baixas temperaturas. A água influencia diretamente as medições de espectroscopia dielétrica em amostras de papel impregnadas com óleo isolante. Isto está de acordo os trabalhos relatados pela Força tarefa do CIGRE 15.01.09 [39].

A temperatura tem uma influência direta sobre estes parâmetros. Obviamente, todos estes parâmetros são mais sensíveis à umidade a temperatura. De acordo com a bibliografia, medições em baixas frequências parecem ser muito úteis para o monitoramento do estado da isolação [40].

3 OBJETIVO GERAL

Avaliar os materiais presentes no sistema isolante dos transformadores de distribuição por meio da técnica de espectroscopia dielétrica.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos a serem buscados nesta dissertação são, a partir de amostras de materiais aplicados a transformadores de distribuição:

- Aplicar a técnica medição de espectroscopia dielétrica e avaliar a resposta dielétrica dos materiais isolantes presentes em transformadores de distribuição em função da variação de temperatura, variação de umidade e danos ocasionados;
- Modelar as respostas obtidas nos experimentos através de circuitos equivalentes;
- Analisar os parâmetros do modelo em função da variação de umidade e temperatura.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Deve-se salientar que os equipamentos utilizados neste projeto são de patrimônio do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. A Romagnole Produtos Elétricos foi de extrema importância e parceira nesta dissertação, pois forneceu as amostras dos materiais necessários para realização do mesmo.

Os materiais, a metodologia, os equipamentos e a técnica utilizada neste trabalho estão descritas a seguir.

4.1 CONFEÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O ESTUDO

4.1.1 PAPEL ISOLANTE

Para se avaliar o comportamento do papel isolante, as medidas foram realizadas em amostras de papel com duas configurações diferentes: em pequenas partes retangulares (10 cm x 9 cm) e envolta sobre o tubo metálico, onde foram enroladas espiras com fio de cobre nu, como pode ser visto na Figura 27.

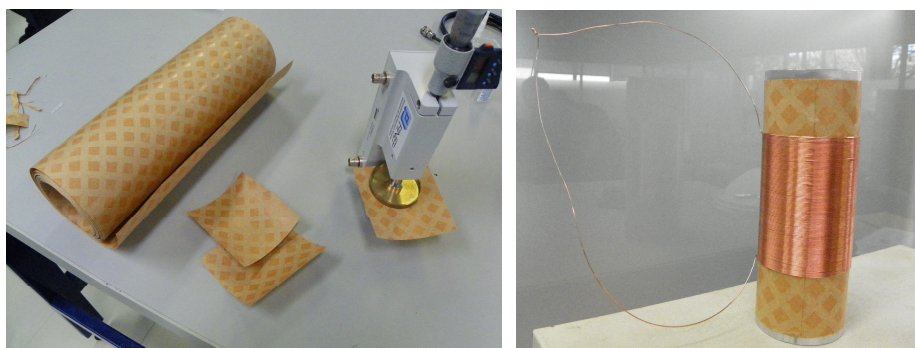


Figura 27 – Papel isolante em partes retangulares e em camadas sobre o tubo metálico

4.1.2 ÓLEO ISOLANTE

As amostras de óleo mineral isolante foram obtidas através da Divisão de Química do LACTEC. Utilizaram-se amostras de óleo mineral isolante novas e amostras de óleo isolante com indícios de degradação, classificadas de acordo com os relatórios técnicos emitidos pelo laboratório de análises físico-químicas do LACTEC. As amostras com indícios de degradação indicaram a presença de

hidrogênio, metano, monóxido de carbono e dióxido de carbono (superaquecimento do óleo). As amostras utilizadas nas medições podem ser vistas na Figura 28.



Figura 28 – Amostras de óleo utilizadas nas medições de espectroscopia dielétrica

4.1.3 PAPEL ISOLANTE IMERSO EM ÓLEO ISOLANTE

A amostra de papel isolante envolta sobre o tubo metálico foi imersa em óleo isolante e está mostrada na Figura 29.

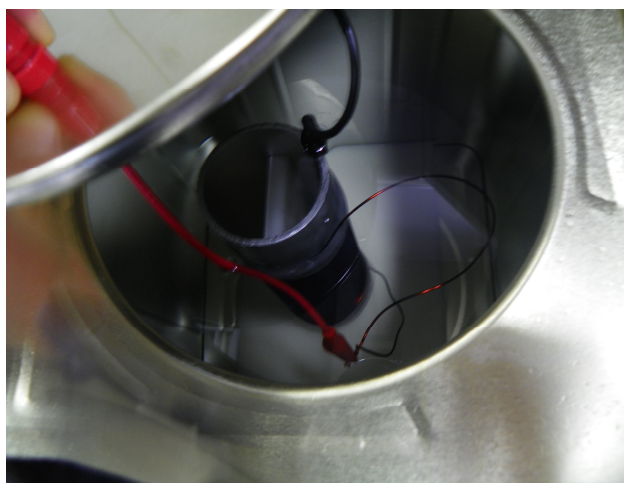


Figura 29 – Amostra de papel isolante (bobina) imersa em óleo isolante

4.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.2.1 ANALISADOR DE IMPEDÂNCIA (SOLARTRON)

As medidas no domínio da frequência foram realizadas utilizando o analisador de impedância, marca Solartron, modelo 1260 (FRA) e interface dielétrica Solartron modelo 1296. Os equipamentos utilizados para realização das medidas podem ser visualizados na Figura 30.



Figura 30 – Solartron modelo 1260 (FRA) e interface dielétrica Solartron modelo 1296

4.2.2 CÉLULA DE MEDIÇÃO PARA AMOSTRAS DE PAPEL ISOLANTE

A célula de medição utilizada nos ensaios de espectroscopia dielétrica nas amostras de papel isolante, marca Solartron, modelo 12962, está mostrada na Figura 31.

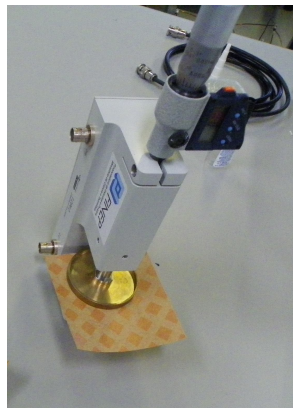


Figura 31 – Célula de medição utilizada nos ensaios de espectroscopia dielétrica em amostras de papel isolante

4.2.3 CÉLULA DE MEDIÇÃO PARA AMOSTRAS DE ÓLEO ISOLANTE

A célula de medição utilizada nos ensaios de espectroscopia dielétrica nas amostras de óleo isolante, marca Solartron, modelo 12964, está mostrada na Figura 32.



Figura 32 – Célula de medição utilizada nos ensaios de espectroscopia dielétrica em amostras de óleo isolante

4.2.4 ESTUFA PARA CONTOLE DE UMIDADE E TEMPERATURA NAS MEDIÇÕES NO PAPEL ISOLANTE

Para estabilização de temperatura e umidade das amostras de papel e do sistema de medição utilizou-se estufa marca Weiss com circulação forçada de ar, modelo WK 111, a qual pode ser vista na Figura 33. O tempo aproximado para estabilização do sistema foi de 6 horas.



Figura 33 – Estufa da marca Weiss, modelo WK 111

4.2.5 AQUECIMENTO TÉRMICO DO ÓLEO ISOLANTE

Para aquecimento do óleo isolante utilizou-se de uma resistência elétrica portátil de 1000 W, 220 V, para aquecer líquidos. A resistência portátil pode ser vista na Figura 34.



Figura 34 – Resistência portátil para aquecimento de líquidos

4.2.6 CONTROLE DA TEMPERATURA NAS MEDIÇÕES DO PAPEL ISOLANTE IMERSO EM ÓLEO MINERAL ISOLANTE

Para estabelecer um controle de temperatura dentro da cuba de medição utilizou-se um controlador de temperatura da marca Omron, modelo E5CW – R1P,

com sensor de temperatura PT-100. O controlador de temperatura pode ser visto na Figura 35.



Figura 35 – Controlador de temperatura Omron modelo E5CW – R1P

4.2.7 ESTUFA À VACUO

A estufa a vácuo da marca Yamato, modelo ADP 21 utilizada para secagem do papel isolante pode ser vista na Figura 36.



Figura 36 – Estufa da marca Yamato, modelo ADP 21

4.3 MÉTODO DAS MEDIDAS

4.3.1 MEDIÇÃO DE ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA

As medidas no domínio da frequência foram realizadas utilizando o analisador de impedância, marca Solartron, modelo 1260 (FRA) e interface dielétrica Solartron modelo 1296. O instrumento mede as propriedades dielétricas dos materiais em função da frequência. Através do estudo das curvas obtidas é possível fazer uma distinção entre os diferentes tipos de fenômenos.

Aplica-se uma tensão senoidal com frequência da ordem de mHz até MHz, sobre uma sinal de tensão que pode variar de 1 mV a 7 V, nas medições realizadas nesta dissertação aplicou-se 2 V de tensão sobre as amostras. Esta tensão gera uma corrente que circula pelo objeto. A impedância (módulo e ângulo) pode ser precisamente calculada através da medida da tensão e da corrente. Assim, vários parâmetros podem ser calculados, tais como: capacitância (C), fator de potência (PF), fator de dissipação ($\tan \delta$), capacitância complexa (C' e C'') e permissividade complexa (ϵ' e ϵ'').

A impedância é calculada utilizando a lei de Ohm:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} \quad (50)$$

Onde \dot{Z} , \dot{U} e \dot{I} são grandezas complexas. A tensão é medida por um voltímetro e a corrente é medida por um amperímetro ou eletrômetro que atua como conversor corrente-tensão. Os sinais analógicos (tensões) são convertidos para sinais digitais que são utilizados nos cálculos subsequentes.

4.3.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NAS AMOSTRAS DE PAPEL ISOLANTE

Para determinação do teor de umidade contido nas amostras de papel isolante nas medições à seco utilizou-se como parâmetro a curva desenvolvida por Jeffries [27], a qual correlaciona a umidade relativa do ar com o teor de umidade nas amostras de papel isolante.

4.3.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NO PAPEL ISOLANTE IMERSAS EM ÓLEO ISOLANTE

A determinação do teor de umidade nas amostras de papel procede-se a partir da correlação entre o teor de água no óleo isolante e o teor de umidade no papel, através das curvas de Griffin [29] e Nielsen.

Para determinação do teor de umidade no óleo isolante utilizou-se titulação Karl Fischer, este é o método analítico mais usado para aferir o teor de água em solventes. O método consiste na titulação de uma amostra diluída tipicamente em metanol, com o reagente Karl Fischer, que é uma solução contendo iodo, dióxido de enxofre e um amina. Com a presença de água esses reagentes são consumidos rapidamente correlaciona-se com o teor de água na amostra analisada. O ponto final da titulação pode ser detectado visualmente pela mudança de cor provocada pelo iodo [41].

Foram coletadas amostras de óleo mineral isolante da cuba de medidas e os ensaios para determinação do teor de umidade nas amostras de óleo isolante foram realizados no laboratório de análises físico-químicas do LACTEC.

4.3.4 PROCEDIMENTO PARA AS MEDIÇÕES NAS AMOSTRAS DE PAPEL ISOLANTE

1. Amostra de papel colocada em estufa à vacuo apresentada na seção 4.2.7 com 40°C por 7 dias para que toda umidade do papel fosse removida;
2. Inserção da amostra na estufa apresentada na seção 4.2.4 para estabilização de temperatura e umidade entre o papel e o ambiente por aproximadamente 6 horas;
3. Realização das medidas de espectroscopia dielétrica.

4.3.5 PROCEDIMENTO PARA AS MEDIÇÕES NAS AMOSTRAS DE ÓLEO ISOLANTE

As amostras foram inseridas na célula de ensaio para fluidos isolantes apresentada na seção 4.2.3 e posteriormente realizaram-se as medidas de espectroscopia dielétrica.

4.3.6 PROCEDIMENTO PARA AS MEDIÇÕES NAS AMOSTRAS DE PAPEL IMERSAS EM ÓLEO ISOLANTE

1. Bobina de papel com fio de cobre nú foi colocada em estufa à vacuo com 40°C por 7 dias para que toda umidade do papel fosse removida;
2. Aquecimento do óleo isolante a 30°C na cuba de medição;
3. Inserção da bobina na cuba de medição para estabilização de temperatura e umidade entre o papel e o óleo por aproximadamente 72 horas;
4. Realização das medidas de espectroscopia dielétrica;

As medições nas amostras de papel imerso em óleo isolante foram realizadas em uma cuba de medição, visando eliminar ruídos externos, bem como estabelecer um controle de umidade e temperatura. O sistema de medição pode ser verificado na Figura 37.

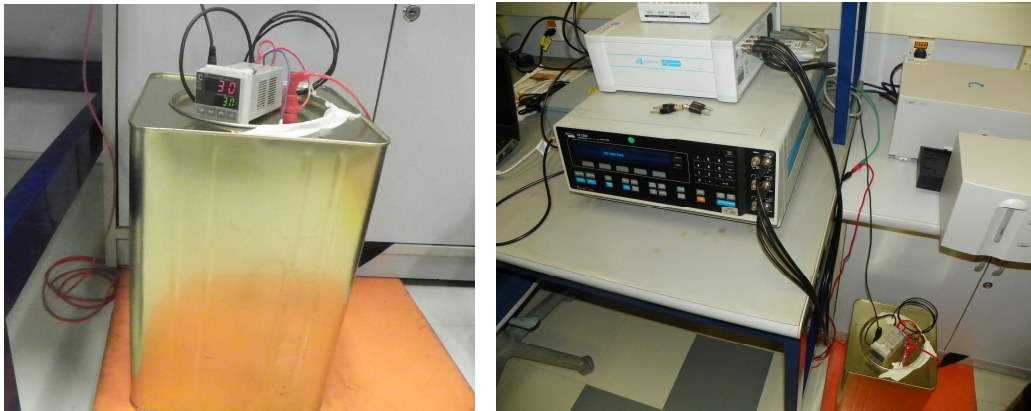


Figura 37 – Sistema para medição de amostras de papel imersas em óleo isolante com controle de temperatura [vista frontal (à esq.) e superior (à dir.)]

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MEDIÇÕES DE ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA EM PAPEL ISOLANTE

5.1.1 MEDIÇÕES VARIANDO-SE A UMIDADE COM TEMPERATURA CONSTANTE

Realizaram-se medições de espectroscopia dielétrica em amostras de papel isolante em três níveis de temperaturas, 30°C, 50°C e 70°C, em três níveis de umidade relativa do ar, 20%, 40% e 70% dentro da estufa, a fim de observar os efeitos em função das diferentes situações impostas.

As amostras de papel isolante foram ensaiadas após permanecerem por 6 horas dentro de uma estufa, tempo este para que se estabilizasse o teor de umidade nas amostras de papel e no ambiente de medida, nos níveis pré-estabelecidos.

Os valores de teor de umidade do papel isolante foram obtidos através da curva de equilíbrio apresentada por Jeffries como descrito no item 4.3.2. Os teores de umidade das amostras de papel isolante avaliadas estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Teor de umidade em amostras de papel isolante

Umidade Relativa do ar (%)	Teor de Umidade no papel (%)		
	30 °C	50 °C	70 °C
20%	3.4	2.9	2.4
40%	5.3	4.5	4
70%	8.4	7.5	6.9

Na Figura 38 estão indicados em vermelho os valores apresentados na Tabela 2.

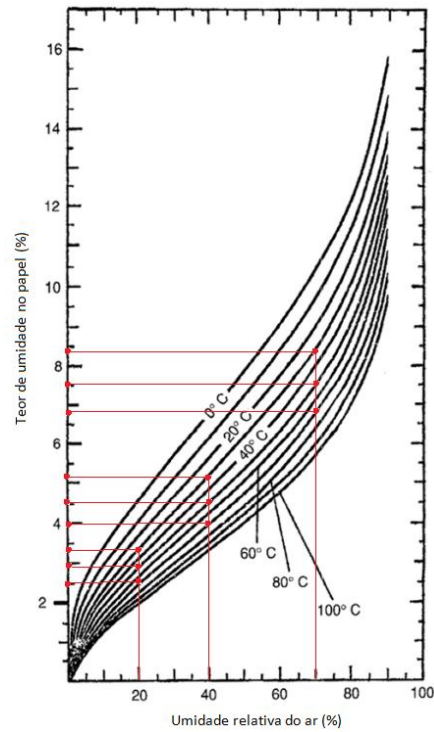
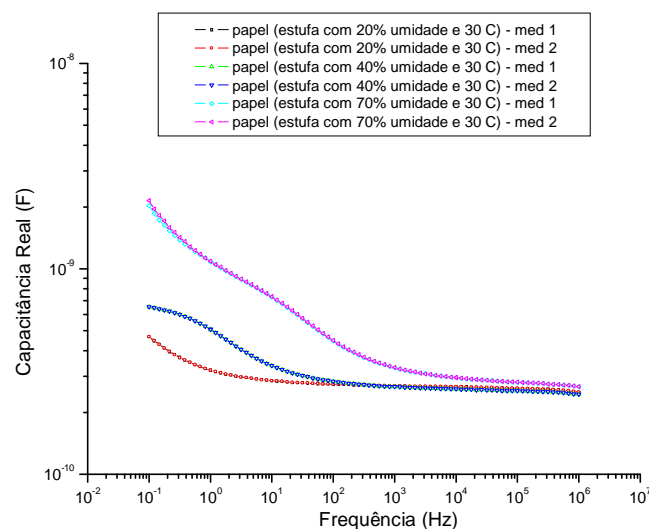


Figura 38 – Teores de umidade obtidos através da curva de Jeffries

Os gráficos da Figura 39 apresentam as curvas de capacitância real, capacitância imaginária e tangente delta em função da frequência, para as medições realizadas em amostras de papel isolante com umidade relativa do ar de 20%, 40% e 70%, com temperatura de 30 °C.

Teor de umidade no papel nas medições com Ur à 20% (30°C) = 3,4%
 Teor de umidade no papel nas medições com Ur à 40% (30°C) = 5,3%
 Teor de umidade no papel nas medições com Ur à 70% (30°C) = 8,4%



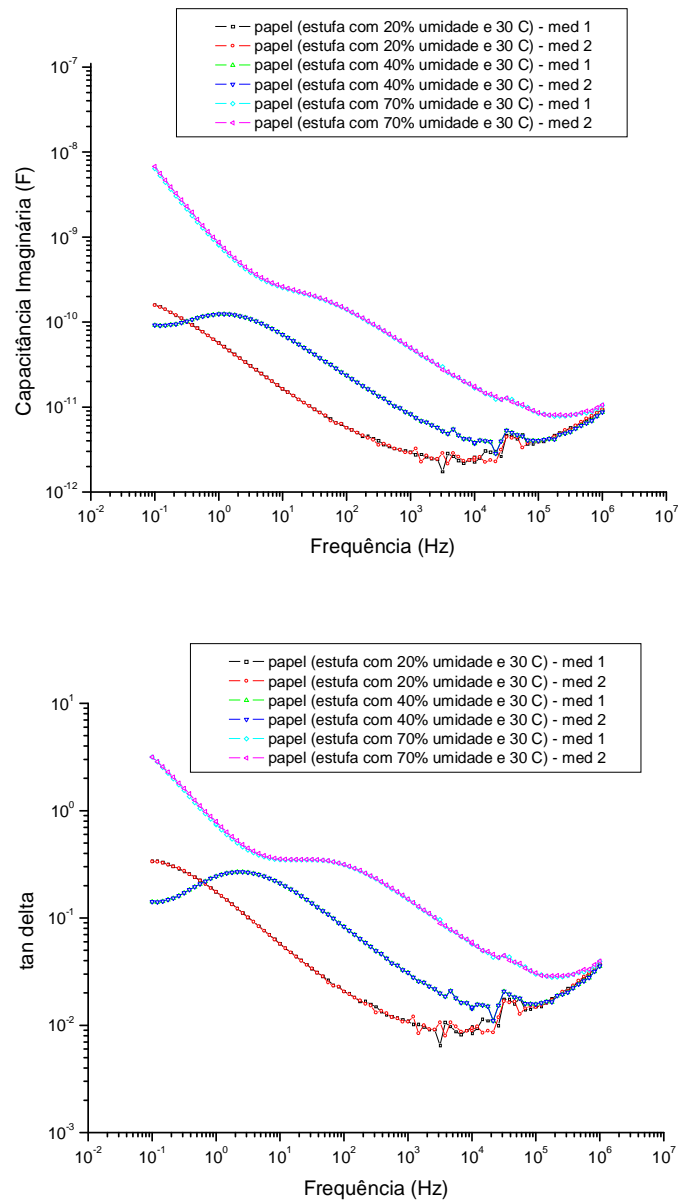


Figura 39 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel kraft isolante com umidade variada para uma temperatura de 30 °C

Analisando-se os gráficos da Figura 39, para a amostra de papel ensaiada com umidade relativa do ar de 20%, nota-se que a parte real da capacitância reduz a amplitude em função do aumento da frequência. Analisando a curva da tangente delta, percebe-se que existe um pico em aproximadamente 0,1 Hz.

Este pico no espectro da tangente delta em baixas frequências está relacionado com o acúmulo de cargas superficiais sobre as superfícies sólidas, referido no modelo de Maxwell-Wagner. A posição, em função da frequência, deste pico depende da condutividade no material, geometria do isolamento, temperatura e umidade [20].

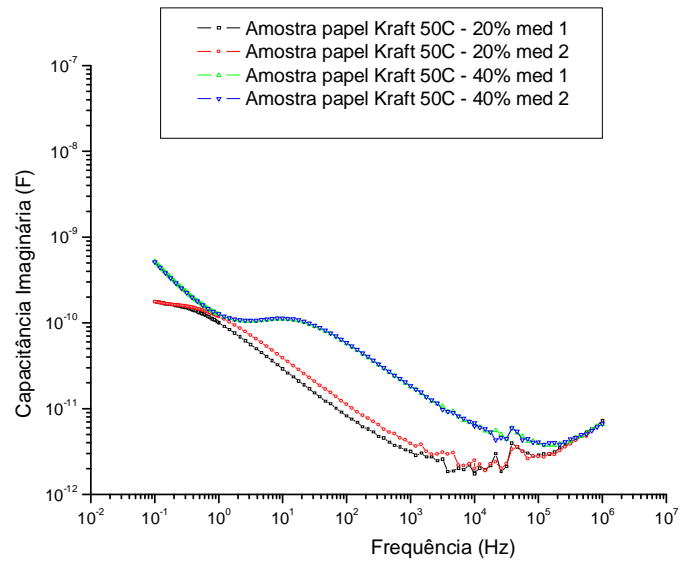
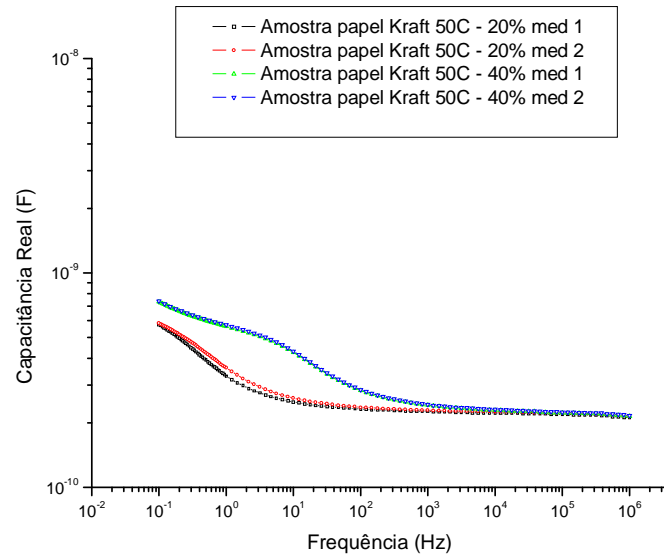
Para as medições realizadas na estufa com umidade relativa do ar de 40%, nota-se na curva da tangente delta que os picos, observados nas medições realizadas com umidade relativa de 20%, são deslocados para frequências de ordem superior, fato este confirmado nas medições realizadas nas amostras de papel isolante com umidade relativa de 70%.

Em resumo, à medida que se aumenta o teor de umidade presente das amostras de papel isolante avaliadas, ocorre um deslocamento do pico observado no espectro da tangente delta para frequências de ordem superior.

Na comparação entre as medições realizadas, observaram-se variações nas amplitudes das curvas à medida em que se aumentou a umidade das amostras. As perdas dielétricas aumentam porque a molécula de água é polar e ao elevar o conteúdo de água do isolamento, provoca-se um aumento na componente de armazenamento (parte real da capacitância) e na componente de perdas do material (parte imaginária da capacitância), como visto nos gráficos da Figura 40. Adicionalmente outros fenômenos físicos e químicos também podem conduzir ao aumento dos processos de polarização e condução [33].

Adicionalmente, visando confirmar os resultados obtidos, foram realizadas medições variando-se a umidade em outros níveis de temperatura e os comportamentos observados foram similares, indicando uma tendência em função da variação da umidade, como pode-se observar na Figura 40 e na Figura 41, que apresentam os resultados da medição da capacitância real, capacitância imaginária e da tangente delta em função da frequência, para amostras de papel isolante, com umidade relativa de 20% e 40%, para as temperaturas de 50°C e 70°C, respectivamente.

Teor de umidade no papel nas medições com Ur à 20% (50°C) = **2,9%**
 Teor de umidade no papel nas medições com Ur à 40% (50°C) = **4,5%**



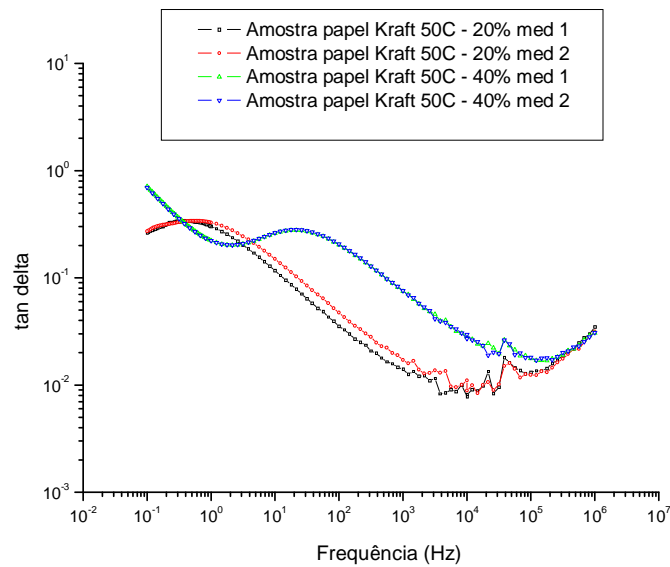
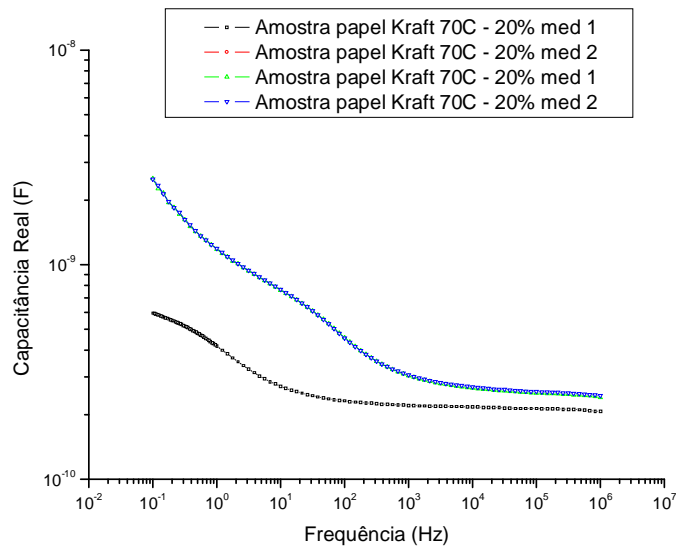


Figura 40 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel kraft isolante com umidade variada para uma temperatura de 50 °C

Teor de umidade no papel nas medições com Ur à 20% (70°C) = **2,4%**
 Teor de umidade no papel nas medições com Ur à 40% (70°C) = **4,0%**



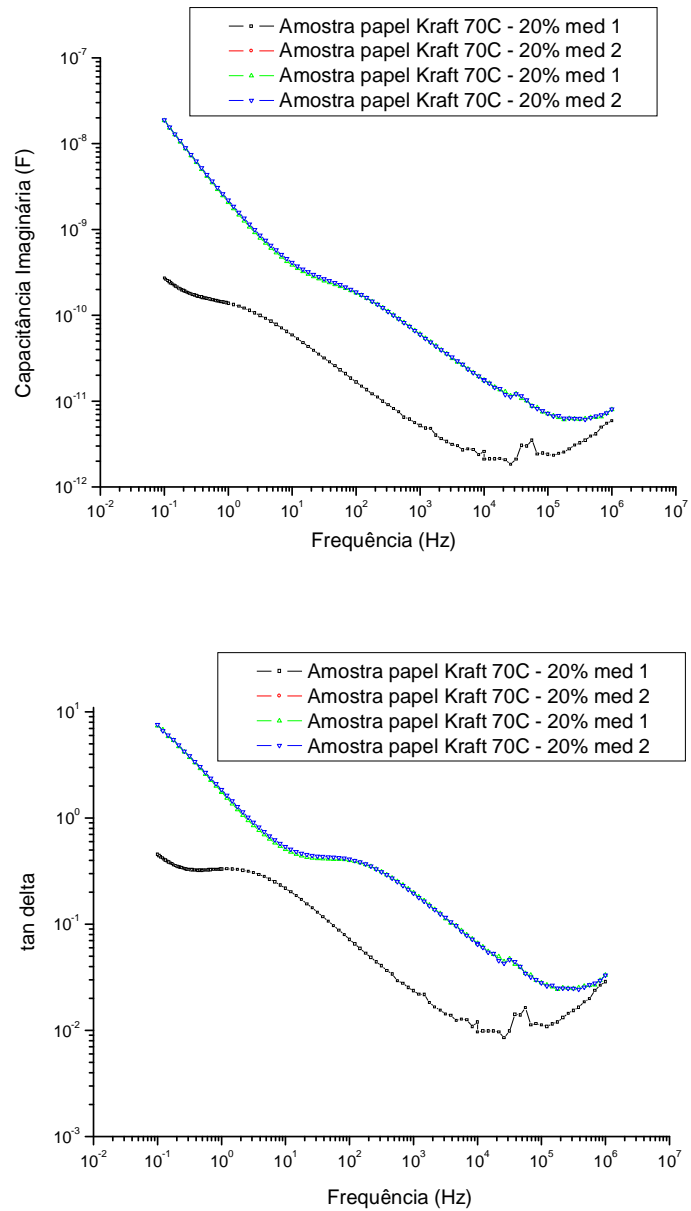
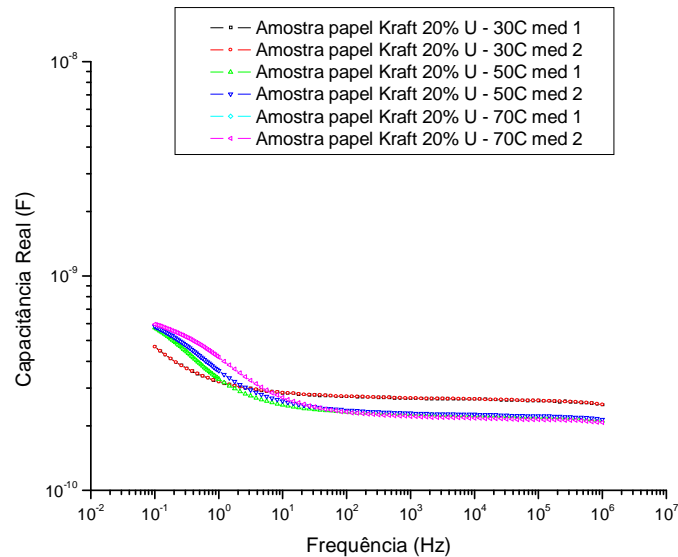


Figura 41 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel kraft isolante com umidade variada para uma temperatura de 70 °C

5.1.2 MEDIÇÕES VARIANDO-SE A TEMPERATURA COM UMIDADE CONSTANTE

Com o objetivo de avaliar a influência da temperatura na resposta dielétrica do papel isolante, foram realizadas medições com umidade relativa do ar controlada em estufa, variando-se a temperatura de medição. Os gráficos da Figura 42 apresentam os resultados da medição da capacitância real, capacitância imaginária e tangente delta em função da frequência, para as medições realizadas com umidade relativa de 20%, nas temperaturas de 30°C, 50°C e 70°C.

Teor de umidade no papel nas medições a 30°C (20%) = **3,4%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 50°C (20%) = **2,9%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 70°C (20%) = **2,4%**



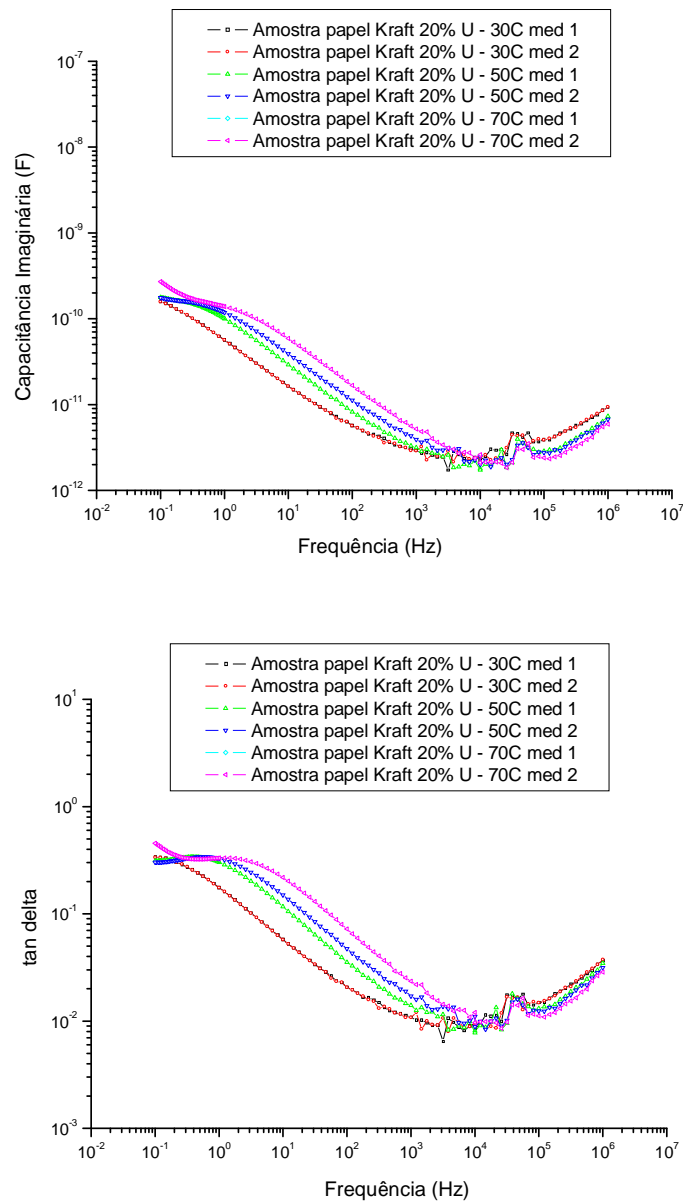


Figura 42 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel isolante ensaiadas com 20% de umidade relativa do ar, variando a temperatura de medição

Analisando os gráficos da Figura 42 para a situação com 30°C de temperatura, nota-se que a parte real da capacitância da amostra reduziu em pequena escala com o aumento da frequência. Pode-se observar que no espectro da tangente delta ocorreu um pico entre 0,1 e 1 Hz, processo este confirmado quando se observa a mudança do comportamento da curva da capacitância para a mesma faixa de frequência, na temperatura de 30°C.

Nas curvas obtidas para a amostra de papel, na medição realizada com 50°C de temperatura ocorreu um deslocamento do espectro para frequências de ordem superior em relação às curvas da medição a 30°C, com variações nos valores de capacitância, impedância e tangente delta.

Na medição realizada a 70°C pode-se observar nas curvas que o comportamento variou em relação às temperaturas de 30°C e 50°C. Os valores de capacitância, impedância e tangente delta se alteraram, além do deslocamento, pouco significativo, do pico observado na curva para frequências maiores. Ainda pode-se observar que a característica do espectro da tangente delta após a formação do pico em baixas frequências se alterou, indicando uma tendência de elevação nos valores de amplitude após a formação do pico.

Em resumo, observou-se que existe um deslocamento do pico existente no espectro da tangente delta para frequências maiores em função do aumento da temperatura. Cabe ressaltar que este deslocamento eleva os valores da tangente delta quando comparados em determinadas faixas de frequência.

Outro fato a ser destacado, é que à medida que a temperatura de medição se eleva, o pico observado na curva da tangente delta diminui de intensidade. Isto é um possível indicativo de que os mecanismos influenciados pela temperatura são termicamente ativados, ou seja, são dipolares, *trapping* ou *detrapping* de portadores de carga.

O comportamento da tangente de perdas dielétricas e o aumento dos valores de amplitude em função do aumento da temperatura podem estar associados:

- A elevação da temperatura em pequenas regiões da amostra, promovendo termicamente portadores de carga que passam a aumentar a componente de condução;
- Alteração dos gases presentes internamente no material, em pequenos vazios por exemplo.

A alteração do tipo de gás presente nos micro vazios pode ser explicada em função das reações químicas que ocorrem no processo térmico, que podem gerar como subprodutos gases. Os gases presentes nos micro vazios, em função do esforço térmico, podem sofrer alterações [42]. Com o aumento da temperatura, a quantidade de gases diminui em função de sua migração ao meio e o gás presente nos vazios poderá ser volatilizado, reduzindo a constante dielétrica dos mesmos.

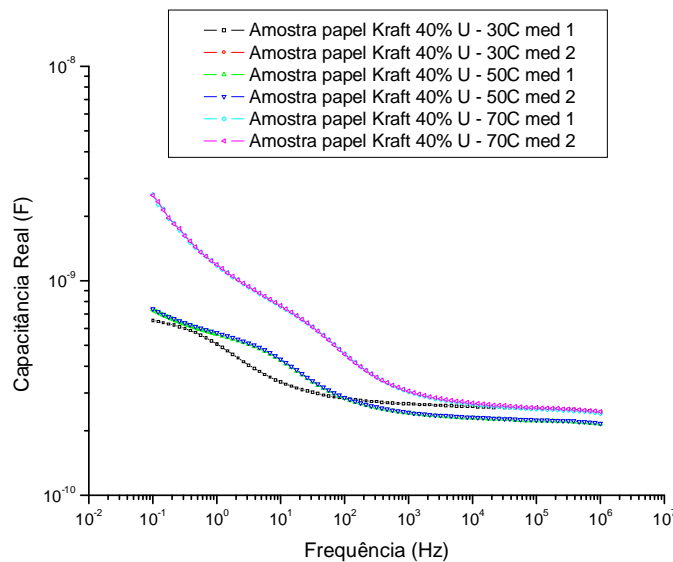
Este efeito associado aos demais mecanismos que influenciam sobre a condução do material podem explicar o fenômeno observado nos gráficos.

Outro fenômeno que pode ocorrer é o aquecimento local, que implicaria na promoção térmica de portadores de carga, que também contribuiriam para o aumento da componente resistiva.

Estes possíveis processos de condução além de explicarem o aumento da componente resistiva, podem estar associados a futuros processo de ruptura dielétrica e falha na isolação do material avaliado.

Com o objetivo de confirmar os resultados obtidos, realizaram-se medições variando-se a temperatura em outra situação de umidade (40%). Os gráficos da Figura 43 apresentam os comparativos da medição da impedância, capacitância e tangente delta em função da frequência, para amostras de papel isolante com umidade relativa de 40%, nas temperaturas de 30°C, 50°C e 70°C.

Teor de umidade no papel nas medições a 30°C (40%) = **5,3%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 50°C (40%) = **4,5%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 70°C (40%) = **4,0%**



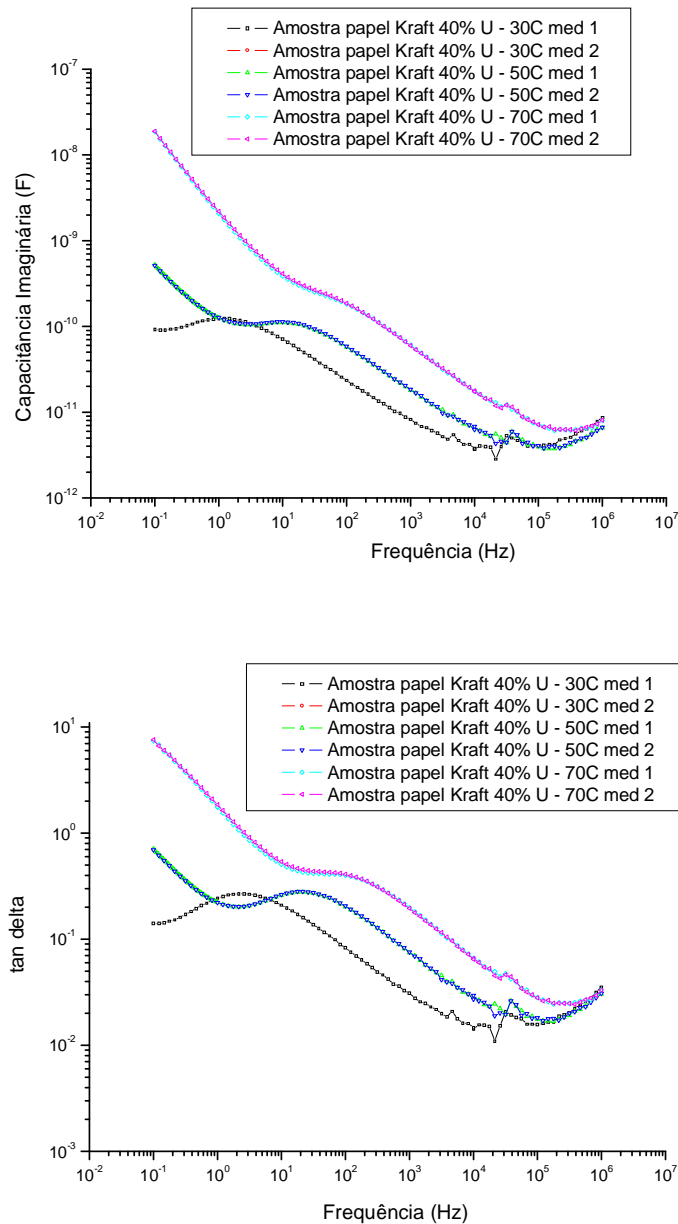


Figura 43 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real para amostras de papel isolante ensaiadas com 40% de umidade relativa do ar, variando-se a temperatura das medidas

Pode-se observar que os comportamentos observados em função da variação de temperatura foram semelhantes aos observados na situação com 20% de umidade, confirmando a tendência em função da variação de temperatura. Porém deve-se ressaltar que os fenômenos observados se pronunciaram em maior magnitude para esta situação de umidade.

5.1.3 MODELAGEM E SIMULAÇÕES

As curvas obtidas nas medições de espectroscopia dielétrica podem ser modeladas por uma disposição paralela de ramos, cada um contendo uma ligação em série de resistência e capacitância como visto na seção 2.2.5.

Através do simulador Quite Universal Circuit Simulator (QUCS) foi possível aferir o modelo teórico proposto para comparação com os resultados obtidos nas medições.

Os gráficos da Figura 44 e da Figura 45 mostram as curvas de capacitância, capacitância real e capacitância imaginária medidas com 30°C de temperatura e 20% de umidade relativa na estufa e as curvas de impedância, impedância real e impedância imaginária medidas com 30°C de temperatura e 20% de umidade relativa na estufa, obtidas de forma experimental e ajustadas pelo modelo, respectivamente.

Deve-se salientar que os parâmetros do modelo foram obtidos de forma empírica, referindo os valores de resistência e capacitância de cada ramo em função da relação na obtida na frequência angular (ω_0) para cada década, de acordo com os valores obtidos nas medições realizadas. Os dipolos são distribuídos de forma aleatória e têm associado constantes de tempo dadas por $T = R * C$.

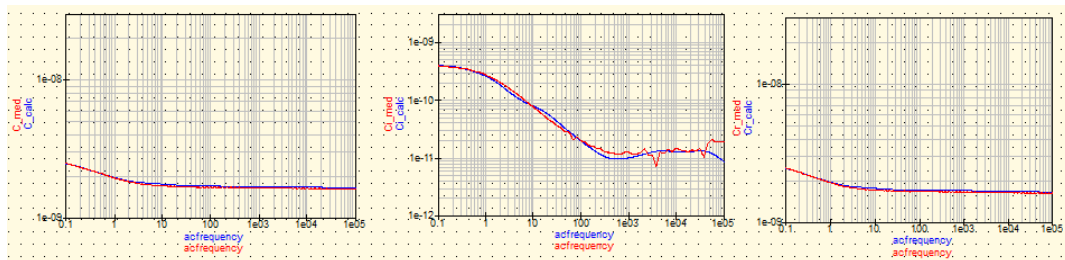


Figura 44 – Curvas de capacitância, capacitância imaginária e capacitância real obtidas de forma experimental e ajustada com o circuito RC paralelo para a amostra papel isolante ensaiada na estufa com 30°C e 20% de umidade relativa

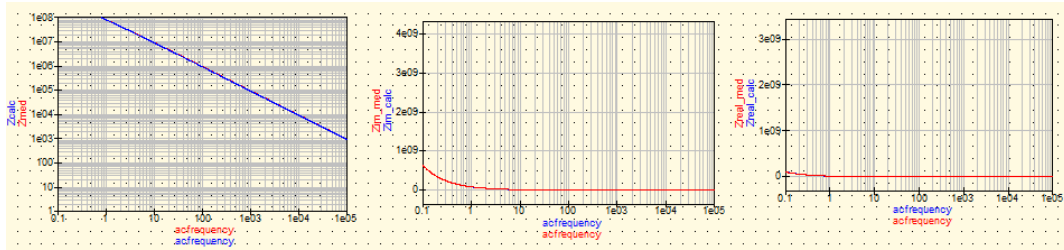


Figura 45 – Curvas de impedância, impedância imaginária e impedância real obtidas de forma experimental e ajustada com o circuito RC paralelo para a amostra papel isolante ensaiada na estufa com 30°C e 20% de umidade relativa

O circuito para ajuste das curvas obtidas de forma experimental e simulada está apresentado na Figura 46.

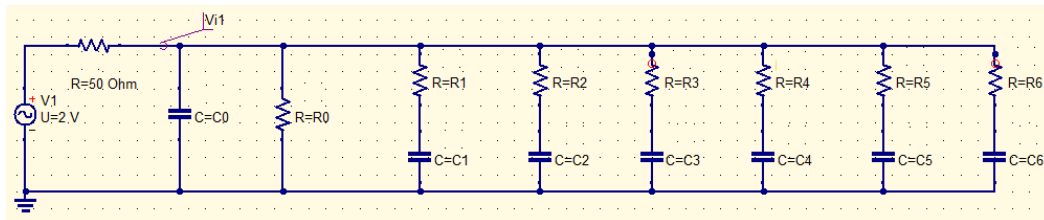


Figura 46 – Modelo de circuito equivalente RC paralelo para ajuste com a curva obtida nas medições

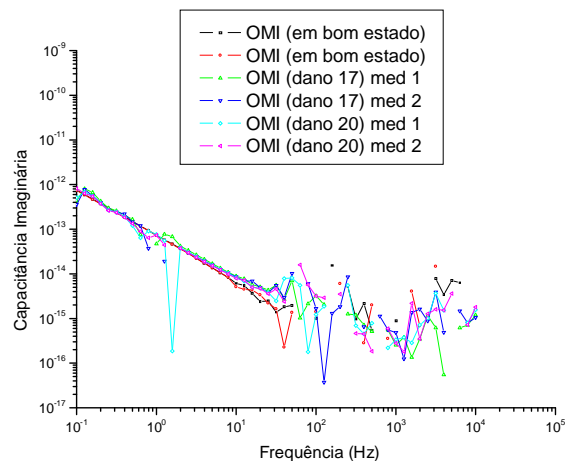
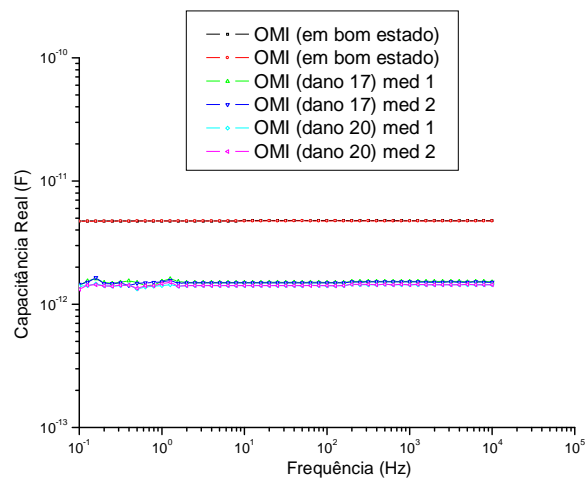
Com os gráficos da Figura 44 e da Figura 45 pode-se observar que foi possível ajustar as curvas de capacitância e impedância obtidas experimentalmente com as curvas ajustadas com modelo de circuito equivalente RC paralelo, proposto por Debye. O modelo foi ajustado com 6 ramos de RC a partir de R0. Com o modelo foi possível identificar os valores de cada componente da isolação.

Não foi possível ajustar as curvas resultantes nas medições de espectroscopia dielétrica realizados em amostras de papel isolante com 40% e 70% de umidade relativa dentro da estufa. Cabe ressaltar que o modelo de Debye foi desenvolvido baseado em respostas dielétricas de sistemas isolantes de papel e óleo. Na essência, todos os modelos propostos até agora têm sido derivado de uma abordagem baseada no modelo de Debye. A extensão do modelo para um isolamento composto apenas por papel isolante torna a tarefa de modelagem uma proposta complexa.

5.2 MEDIÇÕES DE ESPECTROSCOPIA DIELETRICA EM ÓLEO MINERAL ISOLANTE

Realizaram-se medições de espectroscopia dielétrica em amostras de óleo isolante novas (bom estado) e em amostras com indícios de degradação, classificadas de acordo com os relatórios técnicos emitidos pelo laboratório de análises físico-químicas do LACTEC. As amostras de óleo isolante degradado (número 17 e 20 - ver legenda) indicavam presença de hidrogênio, metano, monóxido de carbono e dióxido de carbono, características estas de superaquecimento no óleo isolante.

Os gráficos da Figura 47 apresentam os espectros da capacitância e da tangente delta em função da frequência, para as amostras de óleo mineral isolante com e sem indícios de degradação. As medições foram de 0,1 Hz a 1 MHz. As medidas foram realizadas em ambiente climatizado por ar condicionado a 23°C.



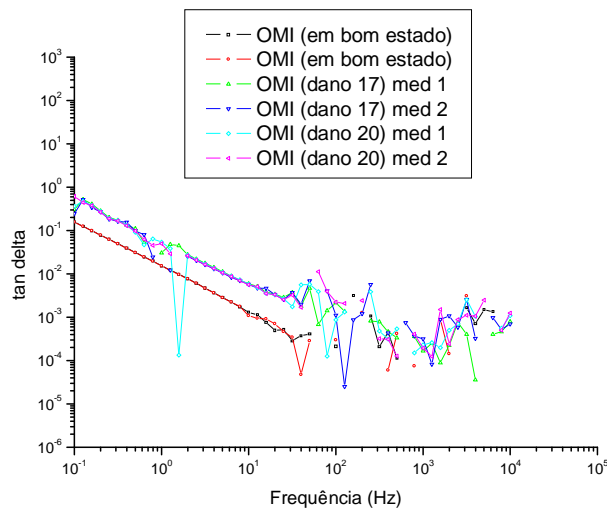


Figura 47 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária, tangente delta e impedância real em função da frequência em amostras de óleo mineral isolante

Analisando os gráficos da Figura 47, para a situação sem danos, nota-se que a impedância reduz em função do aumento da frequência e que a curva da parte real da capacitância é constante para quase todo o espectro de frequência. A curva da tangente delta, não apresentou picos na forma da onda em baixas frequências.

Nas medições realizadas nas amostras de óleo isolante com indícios de degradação notam-se variações nos valores de capacitância, impedância e tangente delta, tanto em amplitude, quanto nas formas de curva. As medições nas amostras com indícios de degradação revelaram uma redução na parte de armazenamento do material como pode ser visto na curva da parte real da capacitância. A componente de perdas não indicou alterações na amplitude dos valores.

5.3 MEDIÇÕES DE ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA EM PAPEL ISOLANTE IMERSO EM ÓLEO MINERAL ISOLANTE

5.3.1. MEDIÇÕES VARIANDO-SE A TEMPERATURA COM UMIDADE CONSTANTE

Aplicou-se a técnica de espectroscopia dielétrica em amostras de papel Kraft isolante, imersas em óleo mineral isolante, variando-se a temperatura com umidade constante, buscando avaliar a influência desta variável na resposta dielétrica do material. Foram ensaiadas amostras de papel isolante, em bobinas envoltas por fio de cobre nu, após permanecerem por aproximadamente 48 horas dentro da cuba de

medição, para que se estabilizasse o teor de umidade presente nas amostras de papel e no óleo isolante, bem como a temperatura nos níveis pré-estabelecidos.

As medições de espectroscopia dielétrica para avaliação do papel imerso em óleo isolante foram realizados em duas bobinas diferentes, denominadas como “bobina A” e “bobina B”. Com relação aos parâmetros, as medidas foram realizadas em 4 níveis de temperatura e 4 níveis diferentes de umidade.

Os níveis de teor de umidade no óleo mineral isolante foram obtidos por titulação de Karl Fischer e para correlação com o teor de umidade nas amostras de papel isolante utilizou-se os diagramas de Ommen e Griffin.

As medições na “bobina A” foram realizados no nível 1 de umidade no óleo isolante. Como os níveis de teor de umidade no papel, correlacionados com o nível 1 de umidade no óleo, foram considerados como “alto”, realizaram-se medidas em uma outra bobina, denominada como “bobina B”, a qual passou por um processo mais rigoroso de secagem do papel isolante antes de ser imersa no óleo isolante. Na “bobina B” realizaram-se medições em três níveis diferentes de umidade.

Os valores obtidos através do ensaio de teor de água no óleo isolante estão apresentados na Tabela 3. Os valores do teor de água presente nas amostras de papel isolante, obtidos através da correlação com as curvas de equilíbrio de Ommen e de Griffin estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 – Teores de umidade no óleo isolante

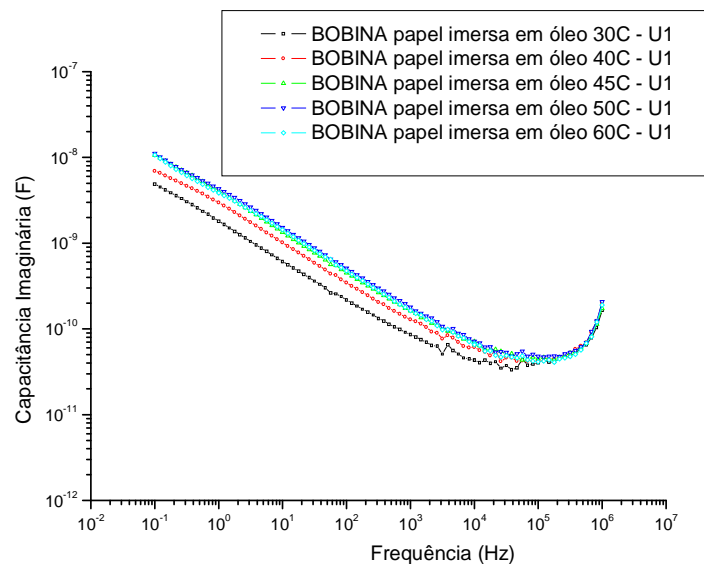
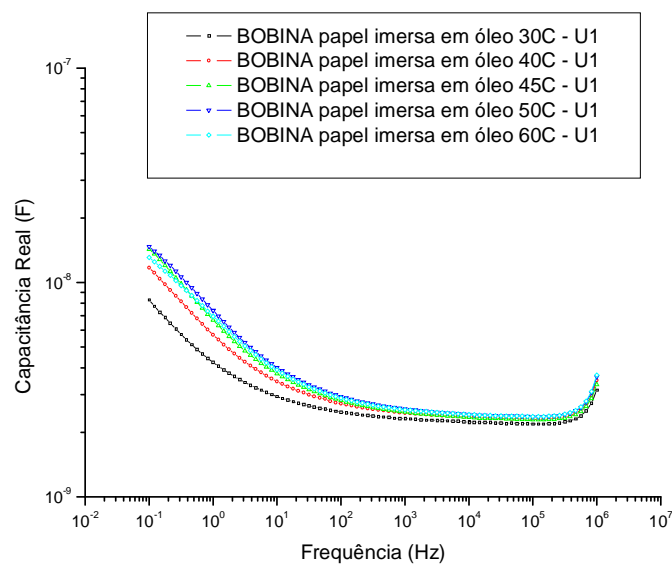
	Bobina de ensaio	Teor de água no ÓLEO isolante (ppm)						Média (ppm)
		Antes dos ensaios (a frio)	30 °C	40 °C	45 °C	50 °C	60 °C	
Umidade 1	Bobina A	21	25	25	25	27	27	25.8
Umidade 2	Bobina B	18	21	20	-	22	24	21.75
Umidade 3	Bobina B	26	27	-	-	-	-	27
Umidade 4	Bobina B	29	32	33	-	35	36	34

Tabela 4 – Teores de umidade no papel isolante obtidos através das curvas de equilíbrio de Ommen e Griffin

	Amostra	Teor de água no papel isolante (%)													
		Antes dos ensaios		30°C			40°C			50°C			60°C		
		Média	Ommen	Griffin	Média	Ommen	Griffin	Média	Ommen	Griffin	Média	Ommen	Griffin	Média	
Umidade 1	Bobina A	6.94	5.19	7.18	6.19	3.97	5.02	4.5	3.01	3.64	3.32	2.3	2.91	2.61	
Umidade 2	Bobina B	6.3	4.73	6.4	5.57	3.5	4.32	3.91	2.7	3.16	2.93	2.16	2.67	2.41	
Umidade 3	Bobina B	7.92	5.41	7.55	6.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Umidade 4	Bobina B	8.47	5.93	8.45	7.19	4.65	6.05	5.35	3.46	4.34	3.9	2.7	3.59	3.14	

Os gráficos da Figura 48 apresentam os resultados das medições da capacitância real, capacitância imaginária e tangente delta em função da frequência, para amostras de papel isolante imersas em óleo isolante nas temperaturas de 30°C, 40°C, 45°C, 50°C e 60°C para o nível de umidade 1.

Teor de umidade no papel nas medições a 30°C = **6,19%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 40°C = **4,50%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 50°C = **3,32%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 60°C = **2,61%**



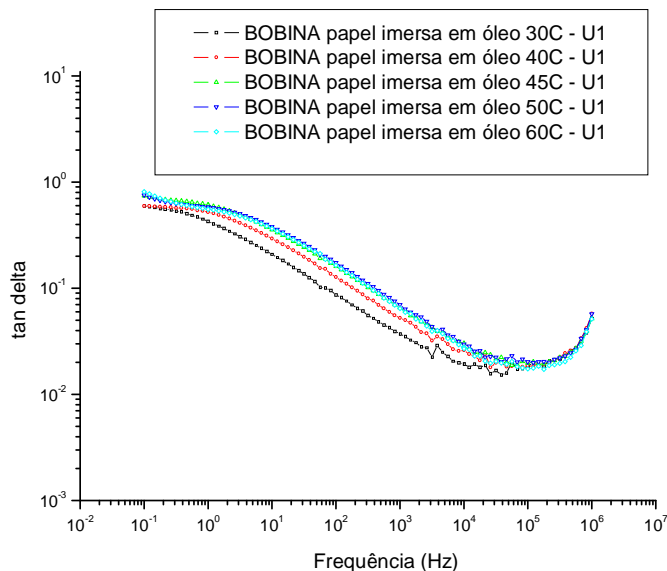


Figura 48 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária e tangente delta para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante

Analisando-se os gráficos da Figura 48, para a curva resultante da medição realizada com 30°C, nota-se que o espectro da parte real da capacitância reduz sua amplitude em função do aumento da frequência, para as medidas em todas as temperaturas.

Comparando as curvas em função da variação de temperatura pode-se observar na curva da capacitância que, em função do aumento da temperatura existe um aumento nos valores de amplitude em baixa frequência.

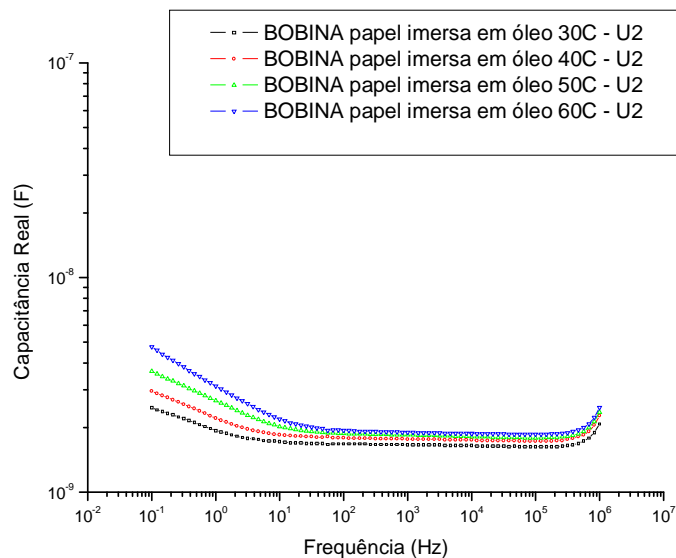
Analisando a curva da tangente delta para a medição realizada a 30°C, percebe-se a existência de um pico em aproximadamente 0,1 Hz e que com o aumento da temperatura é deslocado para frequências de ordem superior. O deslocamento do pico observado na curva para frequências de ordem superior eleva os valores da tangente delta quando comparados em determinadas faixas de frequência, elevando o fator de potência da amostra e indicando que o material pode estar em uma situação mais crítica.

Os deslocamentos do pico observado na curva, para frequências maiores, pode ser explicado com a teoria de Arrhenius [37], a qual permite calcular a variação da constante de velocidade de uma reação química com a temperatura. Os fenômenos observados em função da variação da temperatura, também podem ser explicados por uma possível elevação da temperatura em pequenas regiões da

amostra, promovendo termicamente portadores de carga e pela alteração dos gases presentes internamente no material.

Visando confirmar os resultados obtidos foram realizadas medições variando-se a temperatura em outros níveis de umidade e os comportamentos observados foram similares, indicando uma tendência em função da variação da temperatura. A Figura 49 e a Figura 50 apresentam os comparativos da medição da impedância, capacitância e tangente delta em função da frequência, para amostras de papel isolante imersas em óleo isolante, nos níveis 2 e 4 de umidade, com valores de teor de umidade apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4. No nível 3 de umidade foram realizadas medidas somente na temperatura de 30°C, assim os resultados para este nível de umidade estarão apresentados na seção 5.3.2.

Teor de umidade no papel nas medições a 30°C = **5,57%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 40°C = **3,91%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 50°C = **2,88%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 60°C = **2,41%**



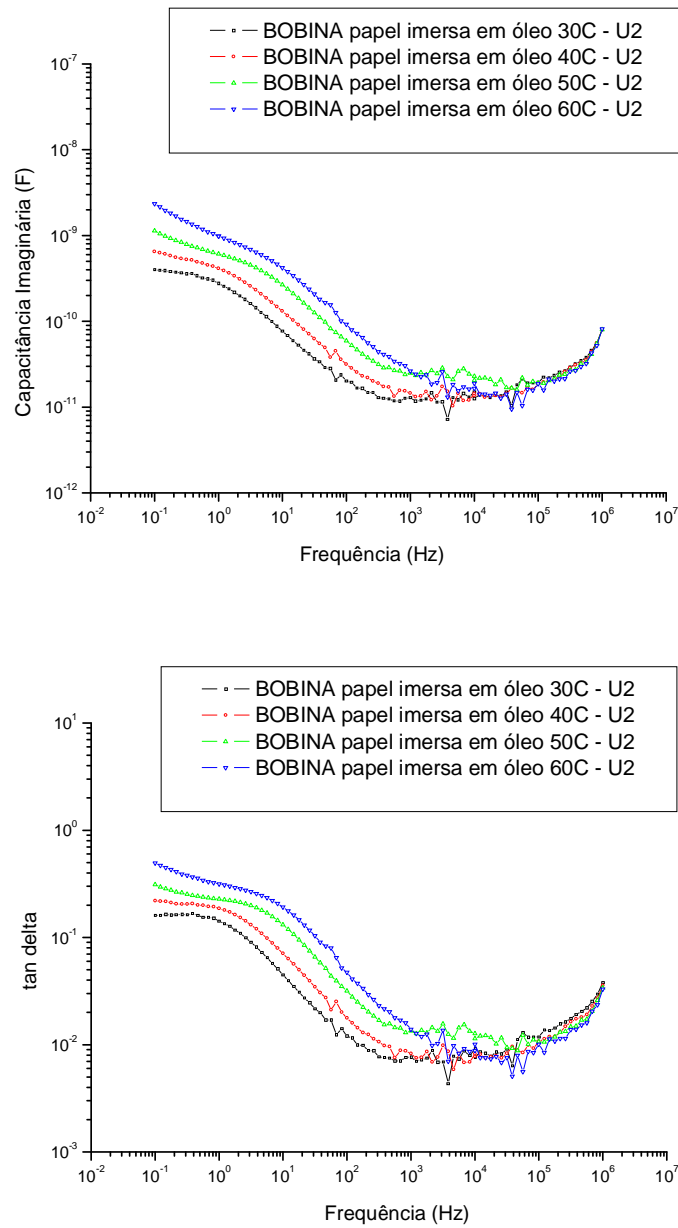
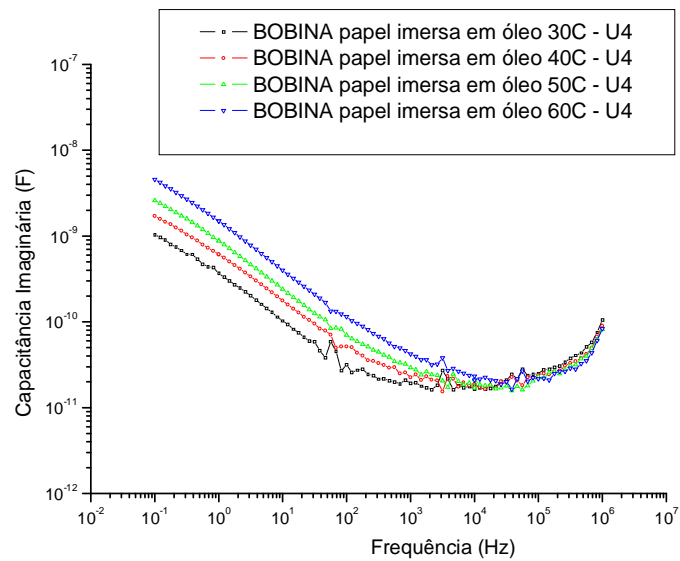
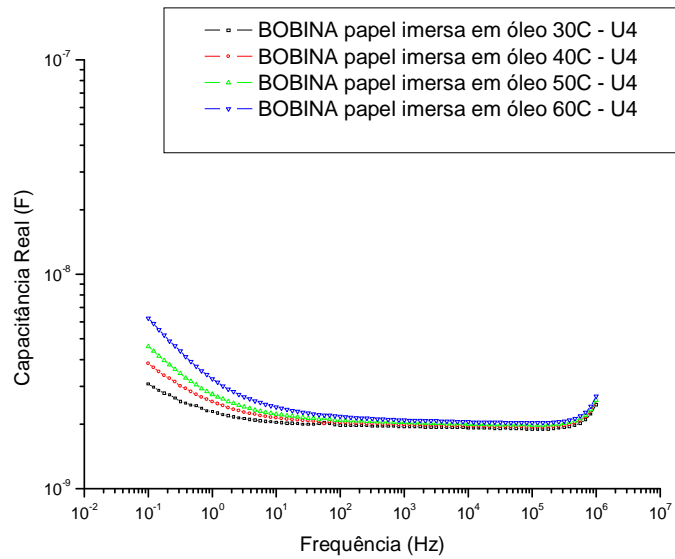


Figura 49 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária e tangente delta para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante

Teor de umidade no papel nas medições a 30°C = **7,19%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 40°C = **5,35%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 50°C = **3,90%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 60°C = **3,14%**



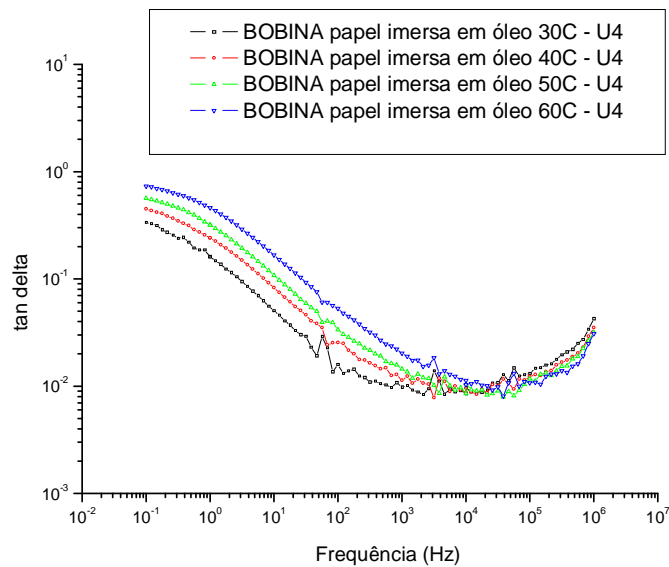


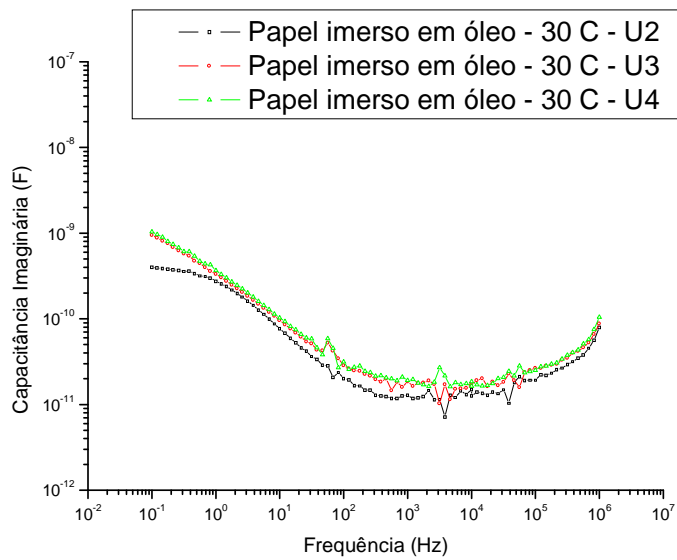
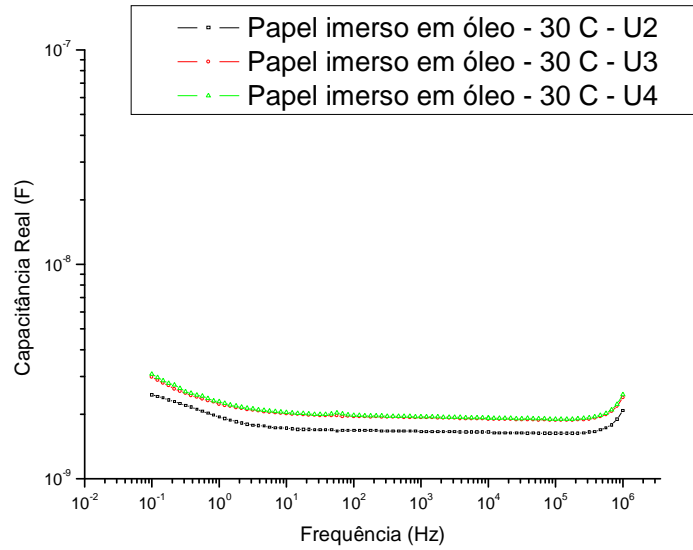
Figura 50 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária e tangente delta para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante

Pode-se observar que os comportamentos em função da variação de temperatura nos níveis 2 e 4 de umidade foram semelhantes aos observados no nível 1 de umidade, confirmando a tendência em função da variação de temperatura. Porém deve-se ressaltar que os fenômenos observados se pronunciaram em maior magnitude para esta situação de umidade, indicando uma situação mais crítica ou um aumento ainda maior nos processos de condução, considerando o sinergismo entre os fatores de umidade e temperatura.

5.3.2. MEDIÇÕES VARIANDO-SE A UMIDADE COM TEMPERATURA CONSTANTE

Os gráficos da Figura 51 apresentam os resultados da medição da capacitância real, capacitância imaginária e tangente delta em função da frequência, para as medidas realizadas na temperatura de 30°C em três níveis de umidade. Como citado no item 5.1.3.1 devido as medidas no nível 1 de umidade terem sido realizados em uma bobina diferente dos demais níveis de umidade, os resultados respectivos não estão inseridos nesta análise comparativa, pois a geometria do isolamento tem influência sobre a resposta dielétrica.

Teor de umidade no papel nas medições a 30°C (Umidade 2) = **5,57%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 30°C (Umidade 3) = **6,48%**
 Teor de umidade no papel nas medições a 30°C (Umidade 4) = **7,19%**



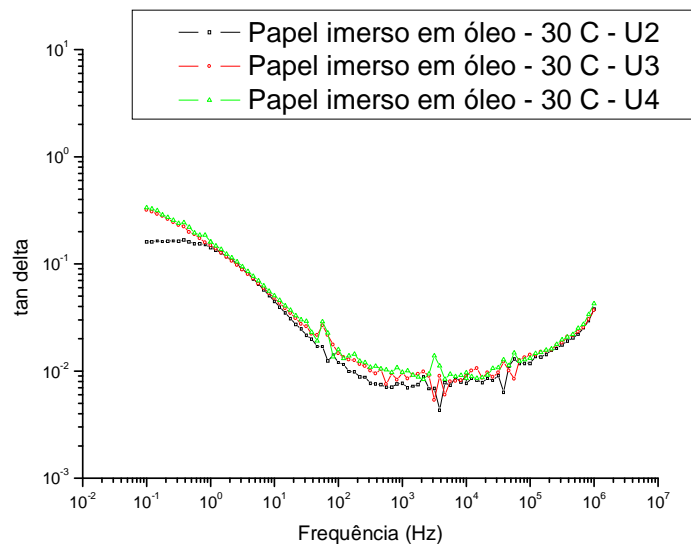


Figura 51 – Curvas de capacitância real, capacitância imaginária e tangente delta para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante nos níveis 2, 3 e 4 de umidade com temperatura de 30°C

Observa-se nos gráficos da Figura 51 que as curvas de capacitância real reduzem os valores de amplitude em pequena escala com o aumento da frequência e as curvas de impedância reduzem a amplitude em função do aumento da frequência. Analisando a curva da tangente delta, percebe-se que existe um pico na curva em 0,1 Hz. O pico visualizado no espectro da tangente delta no nível 2 é mais acentuado que nos demais níveis avaliados, ou seja, a medida que aumenta-se o teor de umidade no papel isolante, o pico diminui de intensidade. Este pico está relacionado com o acúmulo de cargas superficiais sobre a interface do material (homocargas e heterocargas). A posição e intensidade deste pico variam em função da umidade e da temperatura do sistema isolante [20].

5.3.3. MODELAGEM E SIMULAÇÕES

Através do simulador Quite Universal Circuit Simulator (QUCS) foi possível aferir o modelo teórico proposto para comparação com os resultados obtidos nas medições.

Visando determinar a influência da temperatura e da umidade nos parâmetros do circuito, foram modeladas as curvas para as quatro situações de temperatura (30°C, 40°C, 50°C e 60°C) em três situações de umidade. A análise comparativa das

respostas obtidas de forma experimental e simulada através do Quite Universal Circuit Simulator (QUCS), bem como o circuito para obtenção das curvas estão apresentadas da Figura 52 a Figura 54.

Os gráficos da Figura 52 mostram as curvas de capacitância, capacitância real e capacitância imaginária das medições realizados com 30°C de temperatura no nível 2 de umidade e os gráficos da Figura 53 mostram as curvas de impedância, impedância real e impedância imaginária ensaiadas com 30°C de temperatura no nível 2 de umidade obtidas de forma experimental e ajustadas pelo modelo, respectivamente.

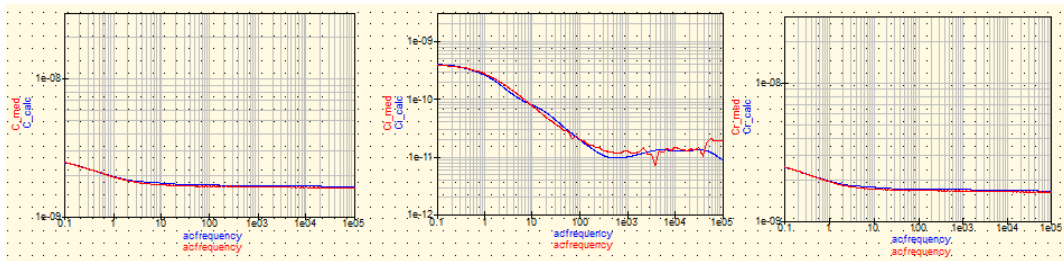


Figura 52 – Curvas de capacitância, capacitância imaginária e capacitância real obtidas de forma experimental e ajustada com o circuito rc paralelo para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante nas medidas realizadas com 30°C, no nível de umidade 2.

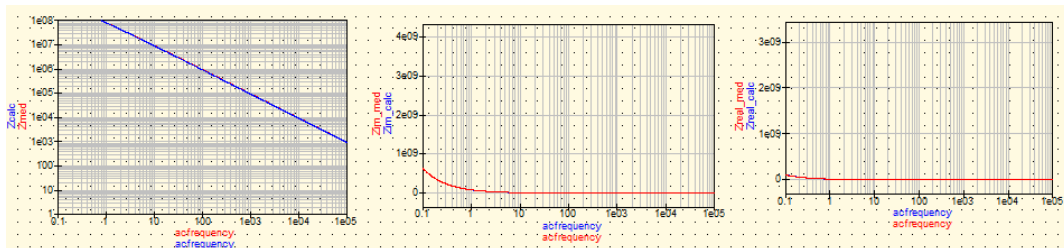


Figura 53 – Curvas de impedância, impedância imaginária e impedância real obtidas de forma experimental e ajustada com o circuito rc paralelo para a bobina de papel isolante com fio de cobre nu, imersa em óleo isolante nas medidas realizadas com 30°C, no nível de umidade 2.

O circuito equivalente para ajuste das curvas obtidas de forma experimental está apresentado na Figura 54.

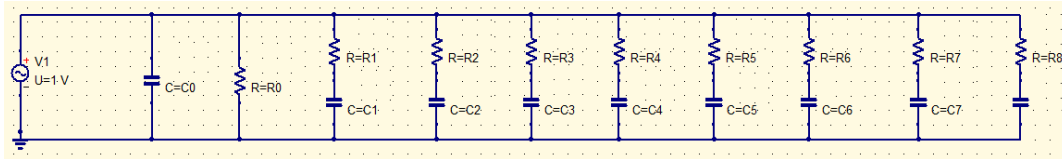


Figura 54 – Modelo RC paralelo utilizado para ajuste com curvas obtidas nas medições

Analisando os gráficos da Figura 52 e da Figura 53 pode-se observar que foi possível ajustar a curva obtida experimentalmente com o modelo de Debye RC paralelo, modelo este já discutido em muitos artigos como o modelo de referência para um sistema papel-óleo.

O modelo foi ajustado com 8 ramos de RC a partir de R_0 e os parâmetros do modelo foram obtidos de forma empírica, referindo os valores de resistência e capacitância de cada ramo em função da relação na obtida na frequência angular (ω_0) para cada década, de acordo com os valores obtidos nas medições realizadas.

Os gráficos da Figura 55 apresentam os comparativos dos valores de resistência presentes no circuito para os diferentes ramos presentes no isolamento.

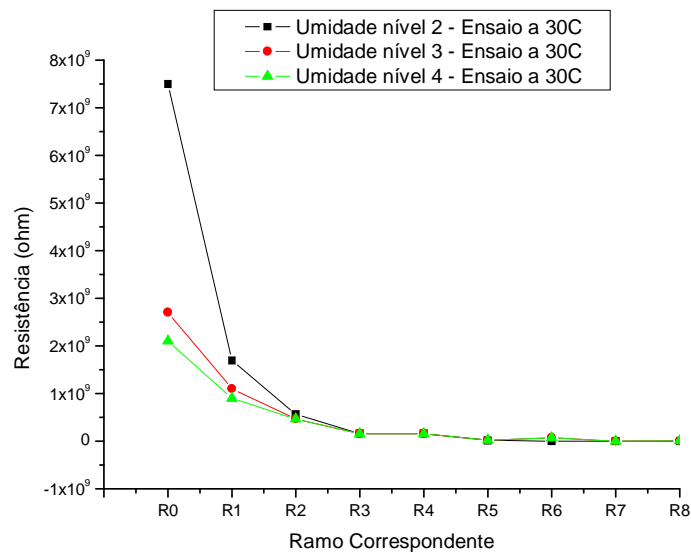


Figura 55 – Valores de resistência em função do ramo no circuito modelado nas medições a 30°C em três níveis de umidade

Pode-se observar nos gráficos da Figura 55 que os valores de resistência dos ramos iniciais são mais elevados em relação aos demais. Os dipolos são distribuídos de forma aleatória e têm associado constantes de tempo dadas por

$T = R * C$. Os ramos iniciais são correspondentes aos mecanismos com maior constante de tempo, justificando o seu valor elevado.

Os gráficos da Figura 56 e da Figura 57 apresentam os comparativos dos valores de resistência e capacitância em função da variação de temperatura para os quatro ramos com maior constante de tempo no nível 2.

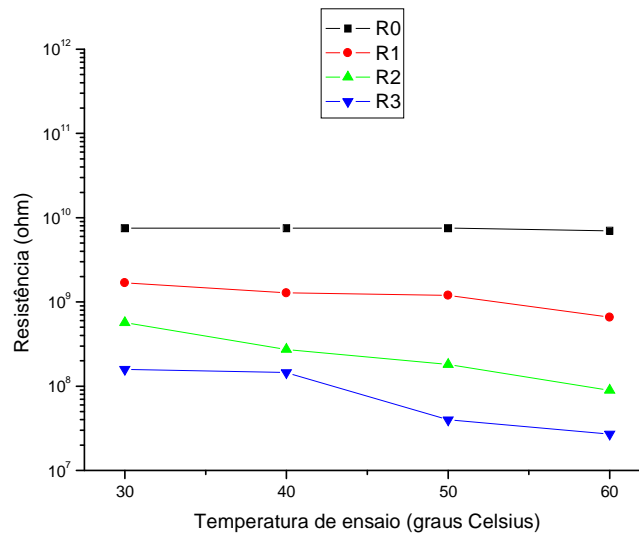


Figura 56 – Valores das resistências com maior constante de tempo de resposta em função da temperatura de medição no nível 2 de umidade

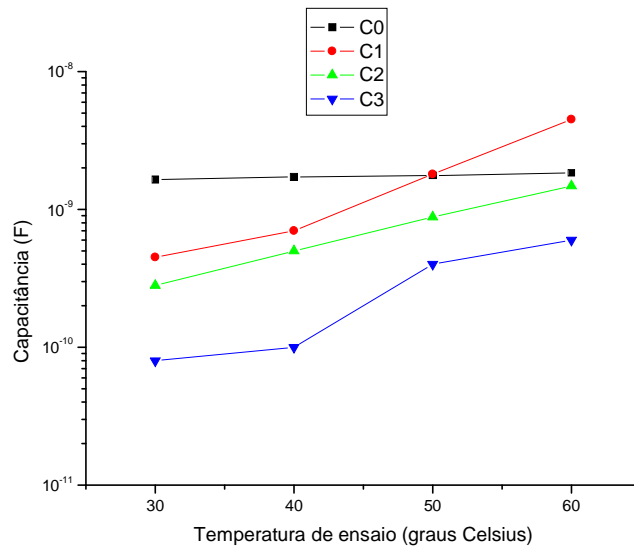


Figura 57 – Valores das capacitâncias com maior constante de tempo de resposta em função da temperatura de medição no nível 2 de umidade

As linhas visualizadas nos gráficos servem apenas para indicar uma tendência.

Analisando os gráficos da Figura 56 e da Figura 57 pode-se observar que à medida que se aumentou a temperatura da medição diminuíram-se os valores das resistências do ramo equivalente de resistências R_i . Deve-se ressaltar que a resistência R_0 não variou de forma significativa em função do aumento da temperatura de medição.

A redução da resistência com o aumento da temperatura é devido ao aumento da mobilidade dos portadores de carga internos ao isolamento. De acordo com a literatura a variação da resistência do ramo R_i está relacionada aos processos de orientação de dipolos internos ao material. Um isolamento de papel com baixo teor de umidade tende a aumentar os valores do ramo de resistências R_i e diminuir o valor das constantes de tempo [38].

Visando confirmar os resultados obtidos com a variação da temperatura de medição no nível 2 de umidade, elaboraram-se gráficos comparativos em outro nível de umidade (nível 4). A Figura 58 e a Figura 59 apresentam os comparativos dos valores de resistência e capacitância em função da variação de temperatura para os quatro ramos com maior constante de tempo no nível 4.

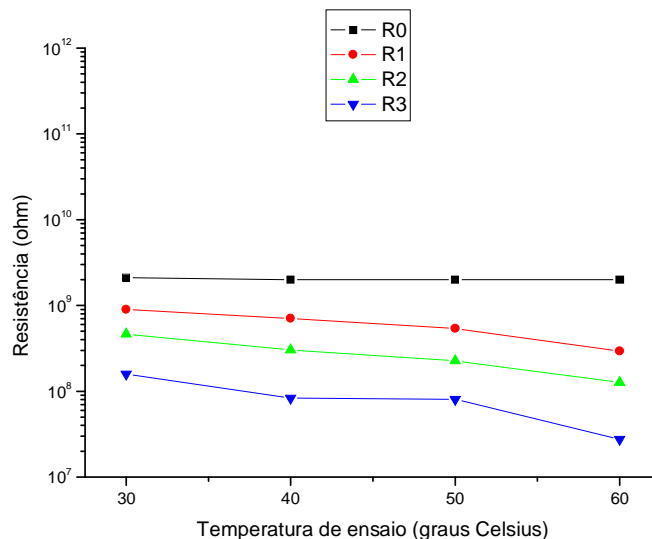


Figura 58 – Valores das resistências com maior constante de tempo de resposta em função da temperatura de medição no nível 4 de umidade

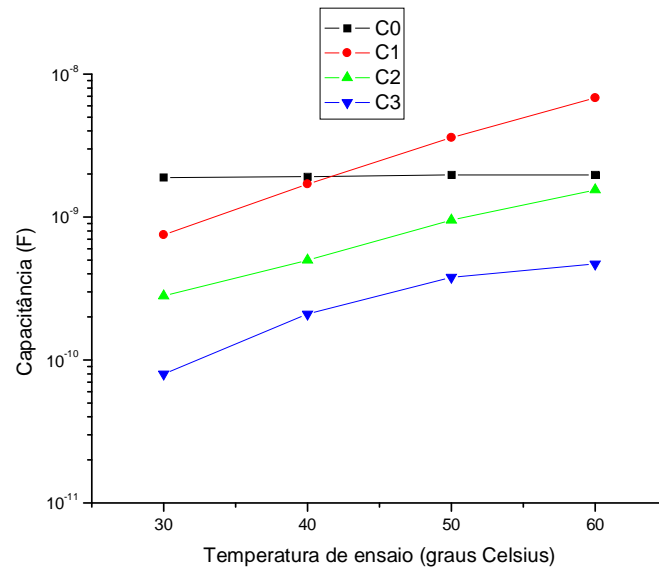


Figura 59 – Valores das capacitâncias com maior constante de tempo de resposta em função da temperatura de medição no nível 4 de umidade

Analisando os gráficos da Figura 58 e da Figura 59 pode-se observar que os valores dos parâmetros do modelo estão diretamente correlacionados com a situação estabelecida para o material na medição.

Os gráficos da Figura 60 apresentam os comparativos dos valores de resistência em função da variação da umidade atribuída para a medição, para os quatro ramos com maior constante de tempo nas medições realizadas com 30°C.

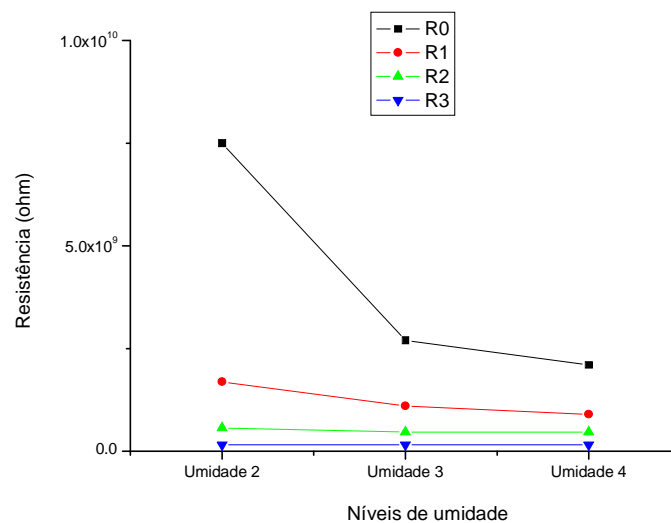


Figura 60 – Valores de resistência em função do nível de umidade imposto para a medição

Analisando os gráficos da Figura 60 pode-se observar que com a variação da umidade nas medições e consecutivamente do teor de umidade do papel isolante, a resistência R_0 varia de forma significativa. À medida que se tem um aumento no teor de umidade das amostras de papel isolante, os valores de resistência tendem a reduzir e consecutivamente o nível de isolamento do sistema também reduz.

A redução nos valores da resistência R_0 está associada ao aumento dos processos de condução presentes no material. As moléculas de água presentes na isolação de papel podem dissociar-se gerando ácidos no meio isolante e consecutivamente acelerando o processo de degradação da isolação. Devido ao processo de hidrólise iniciam-se os processos de cisão de cadeias. Estes mecanismos passam a contribuir para a elevação da corrente de condução [17].

O envelhecimento dos materiais presentes no sistema isolante dos transformadores pode resultar em alterações físicas e químicas na sua composição, por exemplo, a formação de pequenas moléculas dipolares e a mudança de solubilidade em água [17].

Dessa forma pode-se concluir que à medida que se aumenta o teor de umidade presente nas amostras, diminui-se a capacidade de isolamento do material, fato este comprovado através do estudo nos parâmetros do circuito em função das situações.

6 CONCLUSÕES

Nas medições de espectroscopia dielétrica em amostras de papel isolante observou-se que a resposta dielétrica reflete as variações em função da umidade e temperatura atribuídas para as medições. Observaram-se mudanças nos valores absolutos das perdas dielétricas e da capacitância em função da variação da temperatura e umidade no isolamento. A curva da parte real da capacitância apresentou um aumento considerável em função da absorção de água (umidade) e da temperatura sendo que as mudanças foram mais perceptíveis em baixas frequências. A curva da tangente delta, na condição de umidade elevada, apresenta um pico que tem intensidade em função do teor de umidade na amostra. Este pico se desloca no espectro com as variações de umidade e principalmente de temperatura atribuídas para as medições.

Através das medições de espectroscopia dielétrica em amostras de papel isolante imersas em óleo mineral isolante notou-se que a curva das perdas dielétricas depende da temperatura e da migração de umidade entre óleo e papel, que é em função da temperatura. O pico visualizado no espectro da tangente delta se desloca para frequências de ordem superior em função do aumento da temperatura e de acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar que a temperatura tem maior influência no deslocamento em função da frequência. Ambas as variáveis (umidade e temperatura) vão fazer com que ocorra um aumento nos valores das perdas dielétricas. Porém, nas medições de espectroscopia dielétrica pode-se observar que o pico observado na curva da tangente delta tem intensidade em função do teor de umidade da amostra.

Através da modelagem das curvas experimentais, ajustadas de acordo com o modelo proposto por Debye observou-se que em função do aumento do teor de umidade nas amostras de papel isolante, imersas em óleo mineral, a resistência do parâmetro R_0 variou de forma significativa. O valor de resistência do ramo equivalente R_i reduz em maior escala com o aumento da temperatura. Em resumo, os índices de resistência e capacitância presentes no modelo de Debye se mostraram uma ferramenta eficiente para identificar as variações em função da umidade e temperatura atribuídas para as medições.

Nas modelagens referentes às amostras de papel isolante seco foi possível ajustar as curvas de capacitância e impedância obtidas experimentalmente apenas em uma situação de temperatura e umidade. O ajuste foi obtido com modelo de circuito equivalente RC paralelo proposto por Debye.

Características particulares na resposta dielétrica dos materiais foram observadas nas medições, despertando o interesse quanto à possibilidade de aprofundamento dos estudos das medições de espectroscopia dielétrica como forma de quantificar a “qualidade” de um transformador de distribuição.

7 TRABALHOS FUTUROS

1. Medidas de espectroscopia dielétrica em combinações de materiais isolantes e posteriormente no equipamento completo;
2. Desenvolvimento de um modelo para transformadores de distribuição, para que através de medidas de espectroscopia dielétrica no processo de recebimento, estimar o estado da isolação em transformadores de distribuição;
3. Investigar técnicas elétricas não destrutivas para avaliação da qualidade da isolação de transformadores, variando-se a frequência de ensaio, em particular, dos materiais isolantes e processos de fabricação;
4. Realização de análises físico-químicas e gás-cromatografia em amostras de papel isolante utilizados em transformadores de distribuição;
5. Estudo de envelhecimento em amostras de materiais isolantes, como papel, óleo e vernizes isolantes aplicados em transformadores de distribuição;
6. Aperfeiçoamento no ajuste curvas obtidas de forma experimental com a de modelos encontrados na literatura por softwares.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- [1] Projeto de P&D, **Redução da taxa de falhas de transformadores de distribuição de classes 15 kV e 36,2 kV na COELBA**", realizado para a COELBA, 2010.
- [2] M. A. Ravaglio; J. C. Schaefer (LACTEC) - **Redução de perdas em transformadores de distribuição** - In: Efficiencia 98 - Seminário Internacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 1998.
- [3] M. Wang, A.J. Vandermaar, K.d. Srivastava, **Review of condition assessment of power transformers in service**, IEEE Electrical Insulation Magazine 18 (6) (2002).
- [4] MILASH, M. "Manutenção de transformadores em líquido isolante". Edgard Blücher Ltda.. 1984. 354p.
- [5] D'Almeida e Silva, V. L., Morais, R. M. "**Evolução de produtos de degradação do papel em óleo mineral isolante durante o envelhecimento térmico**". In: IV Seminário de materiais no setor elétrico, 4, 1994, Curitiba. Anais. Curitiba: 1994. 813 p.117-126.
- [6] Dupont – NOMEX electrical applications. Transformadores. Disponível na internet. <http://www.dupont.com/nomex/electapps/index.html>
- [7] Quadros, A.M. "**Papel Nomex utilizado em transformadores: avaliação das características e degradação térmica**". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006
- [8] CLARK, F. M. "**Insulating materials for design and engineering practice**". s. ed. New York, John Wiley and Sons, 1962. v.1. p.131 -209
- [9] Kowalski, Edemir Luiz, "**Estudo da borracha natural por meio de técnicas de caracterização de dielétrico**", Curitiba, 2006. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Paraná.
- [10] Botcher, C. J. F., Bordewijk, P. Theory of Electric Polarization: Dielectrics in time-dependent fields. 2. ed. Rev., v.2. Amsterdam: Elsevier, 1992.
- [11] Gross, B. **The Electret**. Endeavour, v. 30, p. 115, 1971
- [12] Marc Galop. **Food Characterization by Thermally Stimulated Current**. Thermold Instruments for Thermal Analysis , paper 003. Data de acesso 02/12/2004.
- [13] J.F. Mano and S. Lanceros-Mendez. **Simple versus Cooperative Relaxations in Complex Correlated Systems** . Journal of Applied Physics., v. 89, n. 3 , 2001.

-
- [14] **Electrets; Topics in Applied Physics**. Springer-Verlag , Second Edition, v. 33, 1987.
- [15] D. D. Hass. **Dielectric Sensing of Ceramic Particle Suspensions**. M.S. Thesis, University of Virginia, 1996.
- [16] Jonsher, A.K. **Dielectric Relaxation in Solids**. Chelsea Dielectric Press, London, 1983.
- [17] T. K. Saha and P. Purkait, "**Investigations of Temperature Effects on the Dielectric Response Measurements of Transformer Oil-Paper Insulation System**", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 23, pp. 252-260, 2008.
- [18] T. K. Saha P. Purkait and F. Müller, "**Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements**", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, pp. 149-157, 2006.
- [19] M. Koch and K. Feser, "**Reliability and influences on dielectric methods to evaluate the ageing state of oil-paper insulations**", 2nd Interen. Conf. on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials (APTADM), pp. 95-101, Wroclaw (Poland), 2004.
- [20] U. Gafvert, G. Frimpong, and J. Fuhr, "**Modeling of dielectric measurements on power transforms**", CIGRE, Paris, France, Paper No. 15/103, 1998.
- [21] V. Der Houhanessian, "**Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation System**", Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology, ETH, No. 12832, Zurich, Switzerland, 1998.
- [22] M.G. Carruthers et alli (Ferranti Transformer Division - UK) - "**Thermal rating of transformers - introduction of multiflow principle**" - In: IEE proc., 1969.
- [23] C. E. M. de Kujiper (Netherlands) - "**Design, tests and service considerations associated with temperature rise and temperature distribution in transformers**" - In: CIGRÉ, SC 12 proc., 1972.
- [24] M. Darveniza, T.K. Saha, **Investigations of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil-paper Insulation of Aged Transformers**, IEEE Transactions on Power Delivery 23 (6) (2003).
- [25] M. Koch, S. Tenbohlen: "**The Breakdown Voltage of Insulation Oil under the Influence of Humidity, Acidity, Particles and Pressure**", International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials APTADM, 26.-28.09.2007, Wroclaw.

-
- [26] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T. J. Painter: **“Aging of oil-impregnated paper in power transformers”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Jan. 2004 Volume: 19, Issue 1, p. 230- 239.
- [27] R. Jeffries, **“The sorption of water by cellulose and eight other textile polymers”**, Journal of the Textile Institute Transactions, vol. 51, no. 11,p. 441, 1960.
- [28] KARSAL, K., KERENYI, D., KISS, L. Large power transformer. [s. l.]: Elsevier, 1987 p.282-325.
- [29] Y. Du, M. Zahn, B. Lesieutre, A. Mamishev, and S. Lindgren, **“Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems”**, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 15, no. 1, pp. 11–20, 1999.
- [30] S. M. Gubanski, P. Boss, G. Csepes, V.D. Houhanessian, J. Filippini, P. Guinic, U. Gafvert, V. Karius, J. Lapworth, G. Urbani, P. Werelius, W. S. Zaengl: **“Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers”** CIGRÉ Task Force 15.01, Technical Brochure 254, Paris, 2004.
- [31] U. Gafvert, L. Adeen, M. Tapper, P. Ghasemi, B. Jonsson, **“Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostics of Power Transformers”**, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China June 21-26,2000.
- [32] W.S. Zaengl, **“Application of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment”**, IEEE Electr. Insul. Mag.,Vol. 19, No. 6, pp. 9-22, 2003.
- [33] M. Farahani, H. Borsi, E. Gockenbach, **“Dielectric Response Studies on Insulating System of High Voltage Rotating Machines”**, 20^a International Power System Conference, 2005.
- [34] T. K. Saha, J. H. Yew, Student Member and M. K. Pradhan, **“Effects of Moisture and Temperature on the Frequency Domain Spectroscopy Analysis of Power Transformer Insulation”** IEEE, 2008.
- [35] R.Bartnikas, **“Dielectric loss in insulating liquids”**, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1967 (2): pp33-54.
- [36] A. K. Jonscher: **“Dielectric Relaxation in Solids”** Chelsea Dielectrics Press, 1984.
- [37] S. Yang, M. Dong, G. Zhang and Z. Zhang, **“Condition Evaluation of Oil-paper Insulation based on Dielectric Spectroscopy”**, 2009 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.

-
- [38] I. Fofana, H. Hemmatjou, F. Meghnefi, M. Farzaneh, A. Setayeshmehr, H. Borsi, **“On the Frequency Domain Dielectric Response of Oil-paper Insulation at Low Temperatures”**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, No. 3; June 2010.
- [39] Cigre Task Force 15.01.09: **“Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers”**, Electra, No. 202, pp. 25-36, 2002.
- [40] A. Seytashmehr, I. Fofana, C. Eichler, A. Akbari, H. Borsi and E. Gockenbach, **“Dielectric Spectroscopic Measurements on Transformer Oil-Paper Insulation under Controlled Laboratory Conditions”**, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 1100-1111, 2008.
- [41] Reagent Chemicals: Specifications and Procedures: American Chemical Society Specifications, Official from January 1, 2006.
- [42] M. Nedjar; **Effect of Thermal Aging on the Electrical Properties of Crosslinked Polyethylene. Journal of Applied Polymer Science.** Vol 111, p. 1985-1990, 2009.