

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ELETROTÉCNICA

THIAGO HUKUCHIMA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS
DO ÓLEO ISOLANTE MINERAL EM TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUIÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2014

THIAGO HUKUCHIMA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS
DO ÓLEO ISOLANTE MINERAL EM TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação de Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Bacharel em Engenharia Elétrica”.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2014



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Curso de Engenharia Industrial Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thiago Hukuchima

Análise estatística das características físico-químicas do óleo isolante mineral em transformadores de distribuição

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 01/08/2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchlo - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Sergio Augusto Oliveira da Silva - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho a meus familiares, amigos e a minha amada esposa que foram meus maiores incentivadores para minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus Pai por sempre me guiar, exortar e me amar. Mostrando-me seu imenso cuidado e carinho em tantos momentos da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Ricardo e Suely, por tantos sacrifícios dispendidos, aconselhamentos e pelo infinito amor.

À minha irmã Marcela e cunhado João Marcos, por tantos momentos, conquistas e lembranças compartilhados. Laços estes que jamais serão perdidos.

À minha esposa Bárbara, pessoa que me acompanhou, ensinou, aconselhou e apoiou em todos os momentos da minha vida. Obrigado Bárbara por sempre acreditar em mim, motivar-me e por teu imenso e sincero amor.

Aos amigos que fizeram parte desta caminhada, meu muito obrigado!

Ao meu orientador Marco Antonio. Obrigado professor pelas demonstrações de amizade, atenção e apoio.

E, finalmente, aos senhores Lourival Mainardes e Marcos A. Pereira, pessoas que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Hukuchima, T. **ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO ÓLEO ISOLANTE MINERAL EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO**. 2014. 91 f. Trabalho de conclusão de curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

Este trabalho foi concebido com a finalidade de se efetuar uma análise estatística das características físico-químicas do óleo isolante mineral utilizado em transformadores de distribuição. A análise é exclusivamente voltada para o isolante dielétrico líquido, avaliando sua graduação cromatográfica de acordo com a deterioração de seus atributos físico-químicos. A Inferência Estatística é ferramenta utilizada para auxiliar no tratamento dos dados, uma vez que seus conceitos e metodologias são compatíveis com o estudo em questão.

Palavras-chave: Transformador de Distribuição, Inferência Estatística, Isolante Dielétrico Líquido, Óleo Isolante Mineral, Cromatografia.

ABSTRACT

Hukuchima, T. **STATISTICAL ANALYSIS OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF THE MINERAL INSULATING OIL USED IN DISTRIBUTION TRANSFORMERS.** 2014. 91 f. Trabalho de conclusão de curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.

This study was carried out in order to statistically analyze physico-chemical characteristics of mineral insulating oils used in distribution transformers. Such analysis is exclusively aimed at the dielectric insulating fluid, evaluating its chromatographic graduation according to the deterioration of its physical-chemical attributes. Statistical Inference is the tool used for drawing conclusions from the data obtained in the process, since its concepts and methodologies are compatible with the study in question.

Palavras-chave: Distribution Transformer, Statistical Inference, Dielectric Insulating Fluid, Mineral Isolating Oil, Chromatography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Molécula do óleo Ascarel	18
Figura 2 - Síntese da molécula PCB	19
Figura 3 - Molécula do óleo silicone	20
Figura 4 - Molécula OIV	22
Figura 5 - Molécula de carácter naftênico	23
Figura 6 - Moléculas de substâncias parafínicas.....	24
Figura 7 - Moléculas de carácter aromático	24
Figura 8 - Influência sobre a rigidez dielétrica do óleo isolante	37
Figura 9 - Influência de impurezas sólidas sobre a rigidez dielétrica do óleo isolante	38
Figura 10 - Exemplo de célula de ensaio com eletrodo de disco	41
Figura 11 - Tensiômetro para medir tensão interfacial	43
Figura 12 - Titulador Coulométrico	46
Figura 13 - Medidor de número de neutralização do óleo isolante.....	49
Figura 14 - Modelo da curva normal.....	56
Figura 15 - Curva de distribuição normal para estimação de nível de confiança	58
Figura 16 - Curva de Gauss para o teste de rigidez dielétrica na graduação cromatográfica: 0,5	66
Figura 17 - Curva de Gauss para o teste de teor de água na graduação cromatográfica: 0,5	67
Figura 18 - Curva de Gauss para o teste de tensão interfacial na graduação cromatográfica: 0,5	67
Figura 19 - Curva de Gauss para o teste de índice de neutralização na graduação cromatográfica: 0,5	68
Figura 20 - Curva de Gauss para o teste de rigidez dielétrica na graduação cromatográfica: 1,0	68
Figura 21 - Curva de Gauss para o teste de teor de água na graduação cromatográfica: 1,0	69
Figura 22 - Curva de Gauss para o teste de tensão interfacial na graduação cromatográfica: 1,0	69
Figura 23 - Curva de Gauss para o teste de índice de neutralização na graduação cromatográfica: 1,0	70
Figura 24 - Curva de Gauss para o teste de rigidez dielétrica na graduação cromatográfica: 1,5	70
Figura 25 - Curva de Gauss para o teste de teor de água na graduação cromatográfica: 1,5	71
Figura 26 - Curva de Gauss para o teste de tensão interfacial na graduação cromatográfica: 1,5	71
Figura 27 - Curva de Gauss para o teste de índice de neutralização na graduação cromatográfica: 1,5	72

Figura 28 - Curva de Gauss para o teste de rigidez dielétrica na graduação cromatográfica: 2,0	72
Figura 29 - Curva de Gauss para o teste de teor de água na graduação cromatográfica: 2,0	73
Figura 30 - Curva de Gauss para o teste de tensão interfacial na graduação cromatográfica: 2,0	73
Figura 31 - Curva de Gauss para o teste de índice de neutralização na graduação cromatográfica: 2,0	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio para óleo mineral isolante.....	25
Tabela 2 - Especificações dos OIMs do Tipo A e Tipo B	28
Tabela 3 - Padrão de cores para classificação do OIM.....	36
Tabela 4 - Parâmetros estatísticos referentes à análise físico-químico de rigidez dielétrica	60
Tabela 5 - Parâmetros estatísticos referentes à análise físico-químico de teor de água.....	61
Tabela 6 - Parâmetros estatísticos referentes à análise físico-químico de tensão interfacial	62
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos referentes à análise físico-químico de índice de neutralização.....	63
Tabela 8 - Intervalo de confiança para a média de grau colorimétrico 0,5, com NC=95%.	64
Tabela 9 - Intervalo de confiança para a média de grau colorimétrico 1,0, com NC=95%.	64
Tabela 10 - Intervalo de confiança para a média de grau colorimétrico 1,5, com NC=95%.	64
Tabela 11 - Intervalo de confiança para a média de grau colorimétrico 2,0, com NC=95%.	64
Tabela 12 - Número de elementos contidos no intervalo $\pm 1\sigma$	76
Tabela 13 - Número de elementos contidos no intervalo $\pm 2\sigma$	76
Tabela 14 – Médias populacionais para grau cromatográfico 0,5	78
Tabela 15 - Médias populacionais para grau cromatográfico 1,0.....	78
Tabela 16 - Médias populacionais para grau cromatográfico 1,5.....	78
Tabela 17 - Médias populacionais para grau cromatográfico 2,0.....	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.2 PROBLEMA	14
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivos Gerais.....	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 JUSTIFICATIVA	15
2 MATERIAIS ISOLANTES	17
2.1 LÍQUIDOS ISOLANTES	17
2.2.1 Óleo Ascarel.....	18
2.2.2 Óleo a base de silicone	20
2.2.3 Óleo Isolante Vegetal (OIV).....	21
2.2.4 Óleos Minerais	22
2.2.4.1 Hidrocarbonetos Naftênicos (Tipo A).....	23
2.2.4.2 Hidrocarbonetos parafínicos (Tipo B)	24
2.2.4.3 Hidrocarbonetos aromáticos.....	24
2.2.5 Propriedades físico-químicas e caracterização do óleo mineral.....	25
2.2.5.1 Propriedades físicas	26
2.2.5.2 Propriedades elétricas.....	27
2.2.5.3 Especificações do OIM novo	27
2.2.5.4 Processo de degradação e envelhecimento do OIM.....	30
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	34
3.1 MÉTODO DE AMOSTRAGEM DO OIM.....	34
3.2 MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL DO ÓLEO	35
3.3 ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA	37
3.3.1 Aparelhagem	38
3.3.2 Amostragem e preparação da célula.....	40
3.3.3 Procedimento	40
3.4 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA TENSÃO INTERFACIAL (TIF)	41
3.4.1 Aparelhagem	42
3.4.2 Amostragem	42

3.4.3 Procedimento	43
3.5 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA.....	44
3.5.1 Amostragem	45
3.5.2 Aparelhagem	45
3.5.3 Procedimento	46
3.6 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE (NÚMERO) DE NEUTRALIZAÇÃO	47
3.6.1 Aparelhagem	48
3.6.2 Amostragem e procedimentos.....	49
4 MÉTODO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA	51
4.1 MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL.....	51
4.2 MEDIDAS DE DISPERSÃO	53
4.3 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE.....	54
4.4 DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	55
4.5 TEOREMA DO TAMANHO AMOSTRAL E LIMITE CENTRAL	57
4.6 ESTIMATIVA DO INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA ARITMÉTICA.....	57
5 ANÁLISE DE RESULTADOS	59
5.1 MEDIDAS DE POSIÇÃO E DISPERSÃO DAS AMOSTRAS	60
5.2 GRAU DE CONFIANÇA, MARGEM DE ERRO E MÉDIA POPULACIONAL	63
5.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	65
5.4 VALIDAÇÃO DAS HIPÓTESES DE NORMALIDADE	75
5.5 SÍNTESE DE RESULTADOS.....	77
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
6.1 TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS.....	81
ANEXO A	87
ANEXO B – DISTRIBUIÇÃO NORMAL PARA ESCALA Z.....	91

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são componentes fundamentais em sistemas CA – corrente alternada – de potência (FITZGERALD, 2006). São máquinas que possuem a capacidade de transferência e conversão de energia elétrica para diferentes níveis de tensão e corrente elétrica (CHAPMAN, 2005). Essa propriedade confere versatilidade e empregabilidade em diversas aplicações (HUBERT, 2009) sendo utilizada em plantas de geração, distribuição, transmissão e, até mesmo, no uso doméstico (SILVA et al., 2012). Os transformadores refrigerados a líquido isolante podem ser classificados em: pedestal, subestação, submersível e poste (TARDIVO *apud* PÉREZ, Pedro Avelino: 2001).

O líquido isolante utilizado em transformadores exerce dupla função: resfriar e isolar (MORA, 2003). Contudo, estas características devem ser respeitadas, pois se constitui como fator limitante na utilização deste equipamento, cujo uso inadequado comprometeria a segurança quando em operação (RAS, 1991). Dessa forma, planos de manutenção devem ser empregados, os quais são fundamentados em procedimentos de inspeções, testes e ações periódicas em intervalos de tempo sugeridos pelos próprios fornecedores ou determinados de acordo com a experiência prática (MORAIS, 2004). Em prol da manutenção do óleo isolante, análises paramétricas referentes às suas condições físico-químicas devem ser realizadas (NBR 10576/2012).

Nesta monografia serão analisados os ensaios de cromatografia, rigidez dielétrica, tensão interfacial, teor de água e índice de neutralização, os quais podem ser classificados como os mais relevantes devido à capacidade e funcionalidade ao detectar impurezas no óleo. Por este motivo, é importante que as concessionárias de energia e consumidores industriais tenham o conhecimento, para planejar e disponibilizar recursos e projetos financeiros para essa finalidade.

Assim, o presente estudo tem como objetivo a análise experimental e estatística das características físico-químicas de amostras do óleo isolante mineral (OIM) provenientes de transformadores de distribuição.

1.2 PROBLEMA

O correto funcionamento e a maior longevidade dos equipamentos requer que os mesmos sejam instalados e utilizados conforme suas grandezas nominais. Ao tratar de transformadores de distribuição, o líquido isolante constitui-se como um dos principais elementos construtivos, pois exerce dupla função: resfriar – através da convecção e radiação – e isolar – através da sua rigidez dielétrica. Caso ocorra uma elevação térmica, os materiais isolantes iniciam um processo de carbonização lenta dos componentes que estão em contato com os condutores. Como consequência, ocorre o acúmulo dessas decomposições sob os enrolamentos das bobinas e no fundo do tanque. Isso impede a dissipação efetiva do calor e eleva consideravelmente a temperatura interna (MORA, 2003).

Em vista deste aquecimento, ocorre também o aumento da temperatura do líquido isolante (RAS, 1991). Por conseguinte, a substância isolante vagarosamente se degenera, contaminando-se com gases, ácidos e suspensões coloidais (FOFANA et al., 2011). Assim a capacidade que o líquido resfriante possui em dissipar este calor, determina os critérios limites de carga e vida útil de um transformador (RAS, 1991). Diante disso, pode-se considerar que as características do líquido isolante limitam a capacidade do transformador, forçando-o a atuar dentro de uma faixa de temperatura cuja vida útil é determinada pela degradação do isolamento dielétrico.

1.3 OBJETIVOS

Esta seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos, expondo o escopo deste trabalho.

1.3.1 Objetivos Gerais

Realizar uma análise estatística das características físico-químicas do óleo isolante mineral em um lote de 30 amostras para cada graduação colorimétrica, a qual servirá de base comparativa para futuros planos de manutenção.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar as condições cromatográficas do OIM e correlacioná-las com as características físico-químicas do OIM como: rigidez dielétrica, tensão interfacial, teor de água e índice de neutralização.
- Efetuar análise estatística dos parâmetros físico-químicos do OIM e verificar a sua distribuição gaussiana.
- Elaborar, através de análises experimentais e ferramentas estatísticas, critérios avaliativos para a verificação e manutenção do OIM.

1.4 JUSTIFICATIVA

O OIM é um hidrocarboneto obtido do refino do petróleo. Considera-se que seja a substância mais utilizada em transformadores e equipamentos elétricos. Calcula-se que 95% dos equipamentos presentes na planta das empresas distribuidoras de energia elétrica no Brasil o utilizam (THOMAZ et al., 2005). Isso ocorre graças ao seu baixo custo e a disponibilidade no mercado quando comparado com outros líquidos isolantes a base de silicone e óleos vegetais (ROUSE, 1998).

De acordo com Finocchio (2010), os transformadores quando projetados e construídos devem manter os limites prescritos em normas e atenderem às necessidades específicas de utilização, pois os parâmetros característicos de funcionamento da máquina são preestabelecidos de acordo com as condições de serviço, seja este de caráter dinâmico ou estático. Assim sendo, através do estado do equipamento, pode-se determinar a necessidade de manutenção e o período no qual a mesma deve ocorrer (MORAIS, 2004).

Diante deste fato, planos de manutenção preventiva em transformadores costumam ser usualmente empregados. Esses procedimentos consistem basicamente em inspeção, teste e ações periódicas em intervalos de tempo sugeridos pelos próprios fornecedores ou determinados de acordo com a experiência prática. Contudo, a manutenção realizada com a obrigatoriedade de a máquina estar desenergizada, muitas vezes prejudica a planta industrial produtivamente, além da inutilização da mão de obra, tempo e dinheiro. (MORAIS, 2004).

Em prol da importância da manutenção do OIM, análises paramétricas referentes às suas condições físico-químicas devem ser realizadas. Segundo ABNT NBR 10576 (2012), as principais são: cromatografia (cor e aparência), teor de água, rigidez dielétrica, tensão interfacial, índice de neutralização (acidez), fator de perdas dielétricas, resistividade, teor inibidor, contagem de partículas, estabilidade à oxidação, ponto de fulgor, compatibilidade, ponto de fluidez, densidade, viscosidade, bifenilas policloradas e enxofre livre corrosivo.

Entretanto, somente os cinco primeiros ensaios serão avaliados, uma vez que estes testes são suficientes para a detecção de oxidação, partículas suspensas e umidade, indicando o grau de tratamento deficiente ou contaminação. Outros testes citados anteriormente devem ser periodicamente executados. Mas, um operário especializado, ao retirar uma amostra do óleo para um teste de rotina, consegue identificar muitas das propriedades pelo simples manuseio. Cabe ainda salientar, que o óleo quando apresentar-se com a qualidade comprometida, deve ser substituído por um produto novo ou tratado pelo processo de regeneração, secagem ou aditivação (OLIVEIRA; COGO; ABREU, 1984). Por este motivo, é importante que as concessionárias de energia e consumidores industriais elaborem um plano de manutenção para verificação da situação do óleo de seus equipamentos.

Assim, este trabalho tem como finalidade a análise experimental e estatística do óleo isolante mineral para se avaliar as características físico-químicas com o objetivo de elaboração de critérios avaliativos que auxiliem o setor de manutenção na verificação da qualidade do óleo utilizado.

2 MATERIAIS ISOLANTES

O rápido crescimento industrial juntamente com o aumento da demanda de energia elétrica impulsiona, aperfeiçoa e, até mesmo, sobrecarrega os recursos energéticos dos sistemas de potência (BAPURAMASHIVA; CHAUDHARI; BHATIA, 2012). Essa crescente demanda de energia é consumida nas mais diversas áreas (industriais, pesquisas laboratoriais, bélicas), mas que se tornaram essenciais para o desenvolvimento humano. Assim sendo, a diversidade de situações utilizando grandes potenciais elétricos criou a necessidade de se pesquisar sobre isolamento e os perfis dos campos eletrostáticos (NAIDU; KARMAJU, 1996).

Evidentemente, os materiais isolantes apresentam avanços tecnológicos. Entretanto, nenhum material é superior a outro em todas as características. Em outras palavras, mesmo com o surgimento de novos produtos, estes também apresentam pontos negativos. Assim, cabe ao profissional, analisar e chegar a uma conclusão quanto à conveniência ou não de se utilizar determinado produto (SCHMIDT, 2011).

Os principais materiais isolantes utilizados são de origem gasosa, sólida, líquida, ou a combinação destes (NAIDU; KARMAJU, 1996). Contudo, nesta monografia será enfatizado o mais utilizado em transformadores de potência na atualidade: o óleo isolante mineral (OIM). Estudos apontam como a substância mais utilizada em transformadores e equipamentos elétricos. Segundo Thomaz et al. (2005), 95% dos equipamentos presentes na planta das empresas distribuidoras de energia elétrica no Brasil fazem o uso desse material isolante. Isso decorre do seu baixo custo e disponibilidade no mercado quando comparado com outros líquidos isolantes (ROUSE, 1998).

2.1 LÍQUIDOS ISOLANTES

Líquidos isolantes para transformadores são substâncias de baixa viscosidade destinada à refrigeração e isolação elétrica. Estes tem a capacidade de transferir o calor gerado por efeito Joule nos componentes internos até as paredes do tanque. São caracterizados também por uma elevada rigidez dielétrica, que, ao impregnar-se nos elementos isolantes, aumentam a capacidade de resistir à ruptura dielétrica (MAMEDE FILHO, 2005).

Os líquidos isolantes, devido às suas propriedades, são considerados mais empregáveis que isolamentos efetuados por gases ou sólidos. Pode-se comprovar ao confrontar líquidos e gases, ao efetuar a análise dielétrica destes dois materiais serão observados que a capacidade do líquido de resistir à ruptura dielétrica é mais elevada. Além disso, o líquido, assim como os gases, tem a capacidade de preencher um volume a ser isolado completamente, diferentemente do sólido. Estas particularidades conferem às substâncias liquefeitas a capacidade de transferência de calor por convecção natural dez vezes mais eficiente que o ar ou nitrogênio (NAIDU; KARAMAJU, 1996).

Todavia, não existe no mercado, um líquido cujas características cumpram com todas as propriedades necessárias para atuar como isolante nos mais diversos sistemas elétricos (SCHMIDT, 2011). Porém alguns produtos químicos, tais como o óleo mineral isolante, o ascarel, a base de silicone e mais recentemente o óleo vegetal, são usados como fluido isolante em equipamentos de potência (GOMES, 2006). Contudo, estas três últimas substâncias citadas não serão detalhadas nesta monografia por não satisfazerem o escopo da pesquisa.

2.2.1 Óleo Ascarel

O ascarel é uma substância de origem petrolífera cuja fórmula empírica é formada por carbono, hidrogênio e cloro na proporção $C_{12}H_{10-n}Cl_n$. A variável “n” indica o número de átomos de cloro que varia entre 1 a 10 unidades. Este isolante consiste em uma mistura homogênea de bifenilas policloradas (PCB). Devido à predominância desta molécula, a denominação PCB tornou-se o nome genérico dado à classe destes compostos. A Figura 1 apresenta a estrutura geral da molécula (GOMES, 2006).

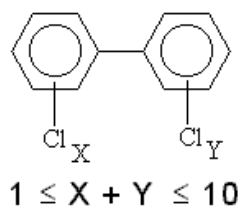


Figura 1 - Molécula do óleo Ascarel
Fonte: Gomes, 2006

A síntese deste fluido inicia-se a partir do refino e destilação fracionada do petróleo para obtenção do benzeno. Após este processo efetua-se a reação do benzeno com moléculas de chumbo a 750°C resultando em bifenilas. As bifenilas, por sua vez, na presença do cloro e do catalisador cloreto férrico originam os PCBs. A Figura 2 apresenta a reação química da síntese desta substância (COELHO *apud* BAIRD, 2010).

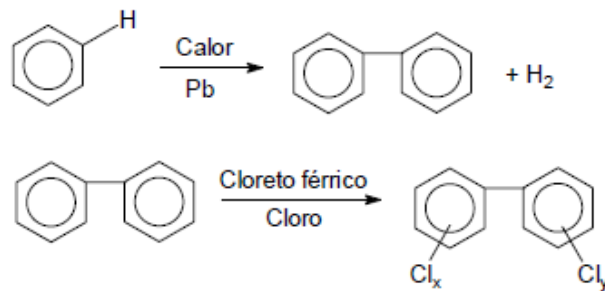


Figura 2 - Síntese da molécula PCB
Fonte: COELHO *apud* BAIRD, 2010

A utilização deste líquido isolante começou a partir do ano de 1932. Em 1934 milhares de transformadores foram fabricados nos Estados Unidos da América (EUA) com o intuito de substituir o óleo isolante mineral (LEOPOLDINO, 2011). Isso ocorreu, segundo Gomes (2006), devido às atrativas características físico-químicas apresentadas:

- Não são inflamáveis.
- Não oxidantes e resistentes ao ataque ácido ou básico.
- Não atacam os metais.
- Baixa volatilidade.
- Baixa solubilidade em água.
- Solúveis em solventes orgânicos.
- Isolantes elétricos.
- Condutores de calor.
- Alta estabilidade química e térmica.
- Baixa pressão de vapor à temperatura ambiente.

Entretanto, apesar destes atributos, o ascarel começou a apresentar problemas. Observou-se que ao expor este óleo a arcos elétricos, o composto sofria decomposição resultando em substâncias tóxicas bioacumulativas e carcinogênicas (LEOPOLDINO, 2011). Assim em 1976 um projeto de lei foi sancionado nos EUA com uma série de ações judiciais para o manuseio e eliminação deste produto tóxico. O Brasil por sua vez, apenas em 1981, promulgou a proibição à comercialização e uso do PCB em todo território nacional (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE).

2.2.2 Óleo a base de silicone

Após a adoção das leis de proibição e eliminação dos PCBs, o óleo de silicone tornou-se uma alternativa bastante atrativa para reutilização de transformadores preenchidos com o ascarel (ANTONELLO et al., 2007). Isso ocorreu devido à ampla gama de viscosidades, pontos de ebulição e baixo ponto de solidificação deste dielétrico. Outra característica importante refere-se à viscosidade que não se modifica diante de bruscas variações de temperatura. Sendo utilizados como lubrificantes em máquinas que trabalham a temperaturas muito altas ou baixas (SCHIMIDT, 2010).

Em relação às características físico-químicas, este óleo apresenta caráter neutro perante grande maioria dos elementos, conferindo grande estabilidade química e lenta oxidação. É uma substância hidrofóbica, ou seja, repele água, evitando perda da isolação dielétrica quando em serviço (CARRETEIRO; MOURA, 1998).

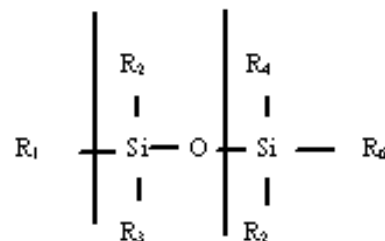


Figura 3 - Molécula do óleo silicone
Fonte: FINOCCHIO, 1997

A fórmula molecular deste isolante é apresentada na Figura 3, no qual os grupos R são compostos por hidrogênios ou radicais metila, fenila, vinila, alquila ou radicais fenila ou alquila substituídos. Os grupos R_2 e R_3 são radicais metila ($-CH_3$) chamados de polidimetilsilixanos (FINOCCHIO, 1997).

Segundo o ponto de vista ambiental, este óleo também apresenta bons atributos, pois não é absorvido pela cadeia alimentar, além de decompor-se no solo através de catalisadores naturais ou pela ação da própria luz (FINOCCHIO, 1997). Contudo, a sua dissiminação é prejudicada por fatores econômicos, uma vez que o óleo silicone apresenta um preço muito elevado quando comparado ao óleo mineral (CARRETEIRO; MOURA, 1998).

2.2.3 Óleo Isolante Vegetal (OIV)

Os óleos isolantes vegetais ou óleo éster natural são sintetizados a partir de grãos oleagenosos por processos mecânicos e químicos como: cozimento, prensagem mecânica, descortificação, descascamento, trituração, laminação ou extração por solvente. Ao final, obtém-se o óleo denominado bruto que é submetido aos processos de refinamento de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização (STOCCO, 2009).

Quimicamente, o óleo vegetal é formado por acilgliceróis, mostrado na Figura 4, que se originam do processo de condensação entre ácidos graxos e glicerol (tri-álcool), resultando em ésteres de ácidos graxos. Estes compostos podem ser classificados em mono, di ou triacilgliceróis, dependendo da quantidade de moléculas de ácido graxo que se associam covalentemente ao glicerol, formando ésteres de ácido graxo. Cabe salientar que os triacilgliceróis podem ser formados por cadeias de ácidos graxos iguais ou diferentes entre si, e, dependendo da origem a matéria-prima, pode ser saturada ou insaturada (UHREN, 2007).

A utilização dos óleos isolantes vegetais (OIV) iniciou-se com a substituição do OIM no reenchimento de transformadores em operação. Experimentos utilizando óleos de origem vegetal demonstraram um bom desempenho dielétrico de mesma magnitude aos OIMs, à base de silicone e ao ascarel. A capacidade térmica também se apresentou superior, segundo Bingenheimer, Del Fiacco e Rapp (2011) o fluido, historicamente, não apresentou incidentes com incêndio, reduzindo os custos em relação à proteção incendiária. Em

relação à sustentabilidade e proteção ambiental este isolante apresentou-se mais atrativo, pois é reciclável e prontamente biodegradável devido a sua origem ser de recursos renováveis (LEOPOLDINO, 2011).

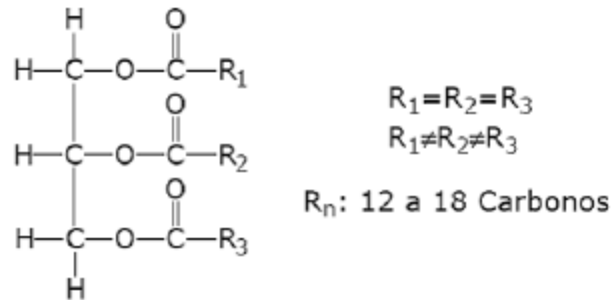


Figura 4 - Molécula OIV
Fonte: UHREN, 2007

Todavia, a única barreira que impede a utilização deste tipo de dielétrico encontra-se no seu valor de comercialização, cujo custo é duas a três vezes superiores ao valor do OIM, entretanto através do seu emprego e concorrência de fabricação este valor possa ser abatido futuramente, contribuindo para sua disseminação (UHREN, 2007).

2.2.4 Óleos Minerais

O óleo isolante mineral é amplamente utilizado em equipamentos elétricos. Pode-se encontrá-lo em transformadores, reatores, religadores, disjuntores, cabos elétricos, capacitores e outros (CARDOSO, 2005). Este material foi patenteado no ano de 1887, sendo que a utilização como óleo isolante em transformadores ocorreu no ano de 1982 (GOMES, 2006).

O OIM consiste em uma complexa mistura de hidrocarbonetos (KRISHNAMOORTHY, 1991). Para sua obtenção, o petróleo natural é submetido a uma destilação, na fração de 300°C a 400°C (FRANCH, 2010). O resultado são óleos isolantes, óleos lubrificantes e, como resíduo, o asfalto. Uma vez obtido os subprodutos, aplica-se a refinação e purificação com a finalidade de se eliminar hidrocarbonetos não saturados (que são focos de formação de produtos contaminadores), ácidos e impurezas contendo enxofre (SCHMITD, 2011). A

padronização e o grau de beneficiamento são selecionados de acordo com os limites especificados pelos padrões dos transformadores (ROUSE, 1998).

Contudo, mesmo após um rígido processo industrial, não se pode considerar como um composto puro, mas sim uma mistura de hidrocarbonetos, os quais possuem de 19 a 23 átomos de carbono, com massa molecular variante entre 270 a 310 u.m.a. A qualidade e adequação destes materiais têm sido melhoradas ao longo dos anos. Isso ocorre em virtude da melhora nos processos de refino e preparo dos produtos finais, além de um constante aprimoramento em relação aos projetos dos equipamentos elétricos (GOMES, 2006).

Segundo Messias (1993), após o processamento industrial específico, o produto final apresenta uma gama variada de hidrocarbonetos que é decorrente do petróleo cru, entretanto a predominância majoritária de um tipo de estrutura determina as características físico-químicas do OIM. Dentre estes, três são predominantes:

2.2.4.1 Hidrocarbonetos Naftênicos (Tipo A)

Hidrocarbonetos naftênico, denominado comercialmente como óleo isolante mineral do tipo A (MESSIAS, 1993), são formados por carbonos saturados de cadeias fechadas denominados ciclo alcanos. É também conhecido, alternativamente, como ciclo-parafínico (POLLITT, 1941). Cujas moléculas têm de cinco a seis anéis naftênicos, e cadeias laterais parafínicas e alifáticas (MILASCH, 1998). Um exemplo é demonstrado na Figura 5.

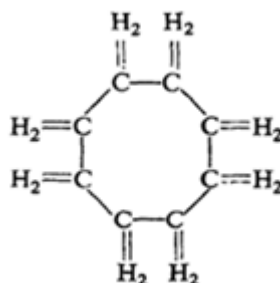


Figura 5 - Molécula de caráter naftênico
Fonte: POLLITT, 1941

2.2.4.2 Hidrocarbonetos parafínicos (Tipo B)

Os hidrocarbonetos parafínicos, denominado comercialmente de óleo isolante mineral do tipo B (MESSIAS, 1993), são aqueles que apresentam carbonos saturados, em cadeias abertas, podendo ser essas cadeias ramificadas ou lineares (POLLITT, 1941). De acordo com Milasch (1998), a fórmula química geral que representa esse hidrocarboneto é: $(CH_2)_n-CH_3$ (cujo n varia de 2 a 27). Exemplos dessas moléculas são apresentas na Figura 6

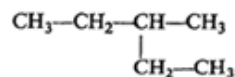
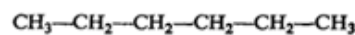


Figura 6 - Moléculas de substâncias parafínicas
Fonte: POLLITT, 1941.

2.2.4.3 Hidrocarbonetos aromáticos

Hidrocarbonetos aromáticos são cadeias fechadas que apresentam carbonos insaturados de formação benzênica (MESSIAS, 1993). Podem ser encontrados no óleo moléculas mononucleares e polinucleares, podendo ser estes últimos, dinucleares, trinucleares e tetranucleares (MILASCH, 1998). Popularmente as fórmulas químicas moleculares da Figura 7, são denominadas: (a) ciclo benzeno, (b) ciclo naftênico e (c) ciclo antraceno, respectivamente (POLLITT, 1941).

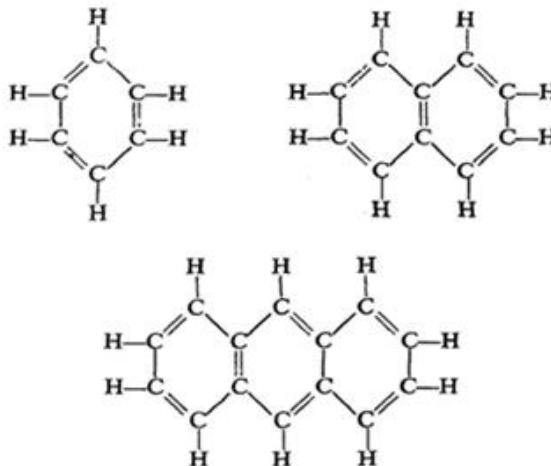


Figura 7 - Moléculas de carácter aromático
Fonte: POLLITT, 1941

2.2.5 Propriedades físico-químicas e caracterização do óleo mineral

O óleo isolante é especificado e caracterizado por um conjunto de dados resultantes de ensaios físico-químicos de origem laboratorial e de campo que avaliam o comportamento e condições do óleo isolante. A Tabela 1 apresenta uma série de ensaios, bem como as respectivas normas técnicas que preconizam os procedimentos para análise (NBR10576, 2012).

Tabela 1 - Ensaio para óleo mineral isolante

Propriedade	Grupo⁴⁾	Norma
Cor e aparência	1	ABNT NBR 14483
Rigidez dielétrica	1	ABNT NBR IEC 60156
Teor de água	1	ABNT NBR 10710
Índice de neutralização (acidez)	1	ABNT NBR 14248
Tensão interfacial	1	ABNT NBR 6234
Fator de perdas dielétricas	1	ABNT NBR 12133
Resistividade	3	ASTM D-1169
Teor de inibidor ³⁾	2	ABNT NBR 12134
Partículas (contagem de partículas)	2	ABNT NBR 14275
Estabilidade à oxidação	3	ABNT NBR 10504 ASTM D-2112
Ponto de fulgor ²⁾	3	ABNT NBR 11341
Compatibilidade ²⁾	3	ABNT NBR 14274
Ponto de fluidez ²⁾	3	ABNT NBR 11349
Densidade ²⁾	1	ABNT NBR 7148
Viscosidade ²⁾	3	ABNT NBR 10441
Bifenilas policloradas (PCB)	3	ABNT NBR 13882
Enxofre corrosivo ¹⁾	3	ABNT NBR 13882

¹⁾ Exigido apenas sob circunstâncias especiais; ver a subseção aplicável

²⁾ Não essencial, mas pode ser utilizado para estabelecer identificação do tipo

³⁾ Restrito a óleos inibidos

⁴⁾ O grupo 1 possui ensaios de rotina, o grupo 2 possui ensaios complementares e o grupo 3 possui ensaios investigáveis especiais.

Fonte: NBR 10576/2012.

De acordo com Milasch (1998), corroborando com a classificação da NBR10576/2012, as propriedades do óleo mineral podem ainda ser classificadas:

2.2.5.1 Propriedades físicas

As principais propriedades físicas consideradas na análise de óleo, segundo Milasch (1998), são:

- Cor: o óleo quando novo apresenta coloração transparente ou amarelo-pálida. O escurecimento ocorre na medida em que o mesmo se deteriora.
- Ponto de fulgor: é a menor temperatura na qual se formam vapores inflamáveis na superfície do óleo e são identificadas pela formação de um lampejo quando em presença de uma chama.
- Ponto de fluidez: corresponde a menor temperatura na qual o óleo, em condições perfeitamente estabelecidas, escoar.
- Densidade: a densidade do óleo encontra-se, normalmente em torno de 0,9°C a 15°C.
- Viscosidade: caracteriza-se pela resistência que o óleo oferece ao escoamento contínuo sem turbulência, inércia ou outras formas. A transferência de calor para o meio ambiente, esta intimamente relacionada com a viscosidade.
- Ponto de anilina: designa a temperatura em que há separação da anilina de uma mistura de anilina e óleo. Relaciona-se, de certa forma, com a propriedade de dissolver materiais com os quais entra em contato e com seu conteúdo aromático.
- Tensão interfacial: Na superfície de separação entre o óleo e a água forma-se uma força de atração entre as moléculas dos dois líquidos é chamada de tensão interfacial, sendo medida em dina/cm. A diminuição deste valor indica o início da deterioração do óleo.
- Solubilidade da água no óleo: a água pode estar presente no óleo sob a forma dissolvida, em suspensão (não dissolvida) ou livre (depositada). A quantidade de água em solução de óleo depende da temperatura e do grau de refino. Ou seja, quanto maior a temperatura, maior a quantidade de água que pode ser dissolvida

no óleo. E quanto maior o grau de refino, menor será a solubilidade em água.

2.2.5.2 Propriedades elétricas

As principais propriedades elétricas, segundo Milasch (1998), são:

- Fator de potência (FP): o fator de potência do óleo isolante pode ser obtido a partir do cosseno do ângulo de fase ou seno do ângulo de perdas do mesmo. O FP aumenta de valor na medida em que a deterioração progride. Indicando uma idéia da intensidade de corrente que flui pelo óleo a medida da deterioração e contaminação do mesmo.
- Rigidez dielétrica: corresponde a tensão alternada na qual ocorre uma descarga disruptiva na camada do óleo situada entre dois eletrodos e em condições perfeitamente determinadas. Este teste consiste no ensaio que toda a pesquisa será desenvolvida. Assim sendo, uma descrição mais detalhada será dedicada posteriormente.

2.2.5.3 Especificações do OIM novo

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) tem como atribuição o estabelecimento das especificações e a garantia de suprimentos derivados de petróleo em todo o território nacional. Tem como responsabilidade também, a defesa dos interesses dos consumidores em relação ao preço, qualidade e oferta de produtos. Considerando que o óleo isolante mineral é um componente essencial para o bom desempenho dos transformadores no suprimento de energia elétrica às residências, comércio e indústrias, este órgão tem o dever de especificar e manter atualizadas os padrões que os OIMs do tipo A e B devem atender (ANP Nº36, 2008).

O regulamento técnico fornece uma tabela com as especificações dos óleos isolantes mineirais novos. Segundo a norma, estas substâncias devem atender na íntegra os requisitos estabelecidos, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações dos OIMs do Tipo A e Tipo B

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITES	
		TIPO A	TIPO B
Aspecto		Claro, límpido e isento de impurezas.	
Cor ASTM, máx.,		1,0	
Massa específica a 20°C	kg/m ³	861,0 - 900,0	860,0 máx.
Ponto de fluidez, máx.(1)	°C	-39	-12
Viscosidade cinemática, máx. (2)	mm ² /s (cSt)		
a 20°C		25,0	
a 40°C		12,0	
a 100°C		3,0	
Ponto de fulgor, mín.	°C	140	
Índice de neutralização, (IAT), máx.	mg KOH/g	0,03	
Água, máx (3)	mg/kg	35	
Cloretos	-	Ausente	
Bifenila Policlorada (PCB)	mg/kg	Não detectável	
Carbono aromático	% massa	Anotar	
Enxofre corrosivo	-	Não Corrosivo	
Enxofre total, máx.	% massa	Anotar	
Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos, máx.	% massa	3,0	
Fator de perdas dielétricas, máx. (4)			
a 25° C e	%	0,05	
a 90° C, ou		0,40	
a 100° C		0,50	
Rigidez dielétrica			
Eletrodo de disco, mín., ou	kV	30	
Eletrodo de calota, min		42	
Rigidez dielétrica a impulso - Eletrodos (agulha/esfera), mín.	kV	145	
Tendência à evolução de gases	µL/min	Anotar	
Tensão interfacial a 25° C, min.	mN/m	40	
Aditivo inibidor de oxidação DBPC (5)			
Óleo não inibido	% massa	Não detectável	
Óleo inibido, máx.		0,33	
Estabilidade a oxidação			

Índice de neutralização (IAT), máx.	mg KOH/g	0,40
Borra, máx.	% massa	0,10
Fator de perdas dielétricas, a 90°C, máx.	%	20
Estabilidade a oxidação 164 horas		
Índice de neutralização (IAT), máx.	mg KOH/g	0,4
Borra, máx.	% massa	0,2
Bomba rotativa (RBOT), min.	Minutos	220
ENSAIOS COMPLEMENTARES		
Óleo não inibido		
Estabilidade a oxidação		
Índice de neutralização (IAT), máx.	mg KOH/g	0,40
Borra, máx.	% massa	0,10
Fator de perdas dielétricas, a 90°C, máx.	%	20
Óleo inibido		
Estabilidade a oxidação 164 horas		
Índice de neutralização (IAT), máx.	mg KOH/g	0,4
	% massa	0,2
Bomba rotativa (RBOT), min.	Minutos	220

Fonte: ANP Nº36, 2008

A resolução ANP Nº36, 2008, prevê ainda algumas observações que cabem ser salientadas:

1. Outros limites de ponto de fluidez poderão ser aceitos mediante acordo entre comprador e vendedor
2. O OIM estará especificado se atendidos os limites estabelecidos dentre as três temperaturas citadas.
3. Este limite não se aplica a produtos transportados em navios ou caminhões tanques, em que possa ocorrer absorção da umidade. Neste caso, deverá ser processado tratamento físico adequado para atendimento do limite especificado no presente regulamento técnico.
4. O fator de perdas dielétricas do OIM deverá atender ao limite estabelecido para 25° e, adicionalmente a uma das temperaturas adicionais citadas: 90°C ou 100°C.

5. Este ensaio deverá ser executado em espectrofotômetro de infravermelho por transformadas de Fourier (FTIR)
6. Somente é permitida a adição do aditivo antioxidante di-butil-paracresol – DBPC. Qualquer outra substância química, além do DBPC, deliberadamente adicionada ao óleo isolante para melhorar desempenho das características da tabela acima, como por exemplo, antiespumantes, anticarregamento eletrostático, outros antioxidantes, passivadores de metal, anticorrosivos, depressores de ponto de fluidez, deverá ser previamente acordada com o comprador e deverá constar do respectivo certificado de qualidade.

Dessa forma, ficam estabelecidos os parâmetros aos quais os óleos isolantes minerais devem prescrever para que nenhuma penalidade de natureza civil ou jurídica possa ser aplicada mediante irregularidades.

2.2.5.4 Processo de degradação e envelhecimento do OIM

Basicamente, o OIM caracteriza-se como uma mistura de hidrocarbonetos (HC) (saturados e aromáticos) em maior proporção, e de não hidrocarbonetos (como compostos de nitrogênio, enxofre e de oxigênio), apresentando uma cor amarelo-pálido, porém transparente. O processo de degeneração do fluido inicia-se com o transformador em operação, onde é submetida a arcos e descargas elétricas, a ação do calor e ao oxigênio dissolvido no óleo. (ARANTES, 2005).

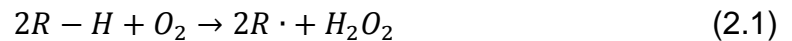
A degradação e envelhecimento resultam, invariavelmente, no comprometimento das propriedades físicas, químicas e elétricas, ocasionando deterioração das propriedades isolantes do óleo, aceleração do processo de degradação da celulose e formação de borra, que consiste em um material insolúvel que se deposita nos mais variados componentes do transformador e compromete a dissipação do calor (STOCCO, 2009).

Segundo a American Society of Testing and Materials (ASTM), o processo de oxidação do óleo inicia-se quando o oxigênio entra em contato com HC instáveis e com catalisadores como o cobre e ferro provenientes do próprio transformador. O oxigênio reagente são as moléculas que circulam livremente no interior do

equipamento, no óleo ou são produtos da degradação da celulose que também fornecem este elemento (MILASCH 1998).

As reações de oxidação seguem a seguinte sequência:

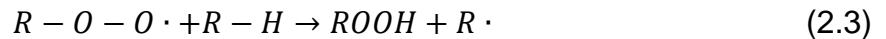
1. Formação de radical livre – início da reação em cadeia (Equação 2.1).



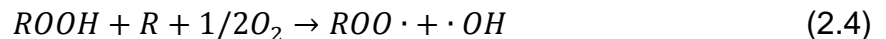
2. Formação de radical peróxido – Continuação da reação em cadeia (Equação 2.2).



3. Formação de hidroperóxido – Continuação da reação em cadeia (Equação 2.3).



4. Transformação do hidroperóxido em radical peróxido – continuação da reação em cadeia. (Equação 2.5).



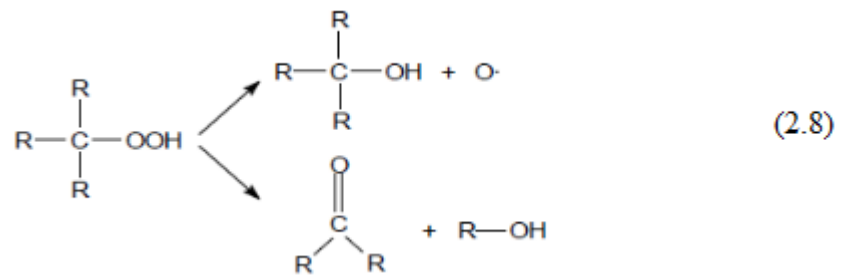
5. Combinação dos radicais formados – término da reação em cadeia (Equações 2.6, 2.7 e 2.8).



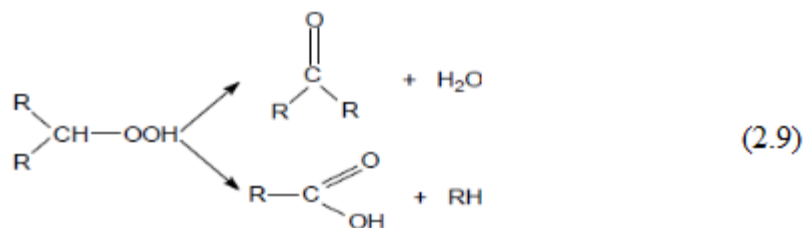
As etapas 2, 3 e 4 do processo de peroxidação formam uma reação em cadeia. A etapa 1 é a etapa mais demorada de todo o processo, pois é a reação do hidrocarboneto com o oxigênio. Para que este se inicie, é necessária uma parcela energética, seja esta fotoquimicamente ativada ou por ação térmica. Assim, inúmeros radicais livres são formados, dando origem aos peróxidos. Estes por sua vez, contribuem na formação dos hidroperóxidos e novos radicais peróxidos que formarão novos hidroperóxidos fechando o mecanismo em cadeia (STOCCO, 2009).

Os hidroperóxidos podem ainda decompor-se e formar aldeídos, cetonas e alcoóis que pode ser oxidados e formar ácidos carboxílicos e éteres (MILASCH, 1998). Como por exemplo:

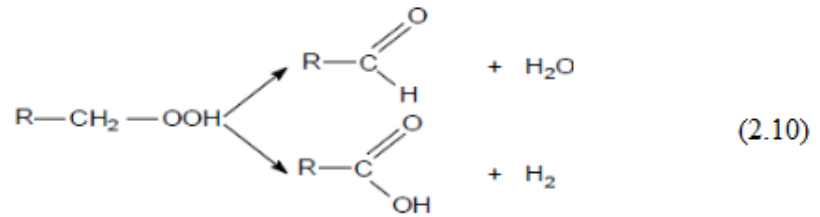
1. Formação de álcool e cetona a partir de hidroperóxido terciário



2. Formação de cetona e ácido a partir de hidroperóxidos secundário



3. Formação de aldeído e ácido a partir de peróxidos primários

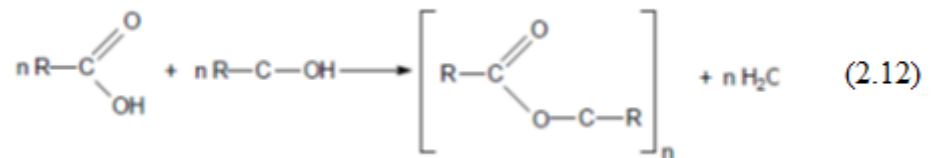


Finalmente, no processo final de degradação do OIM, ocorrem reações de polimerização, ou seja, várias moléculas reagem formando um composto de alta massa molar (mais pesado que o óleo) que se deposita sobre os componentes internos do transformador em forma de borra prejudicando a transferência de calor (STOCCO, 2009). Este produto pode apresentar caráter:

1. Apolar (polimerização via radical livre)



2. Polar e ácido (polarização de ácidos e alcoóis)



Como estes compostos são oxigenados e com polaridade molecular, acabam sendo maus isolantes elétricos além de serem catabolisadores na degradação do papel (MILASCH, 1998).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Esta seção apresenta os métodos experimentais utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Cabe ressaltar, que este é um capítulo com caráter informativo e construído de forma sucinta, uma vez que as análises físico-químicas foram obtidas de empresas especializadas.

Todavia as ações abordadas seguem as diretrizes estabelecidas pelos órgãos regulamentadores nacionais e internacionais para efetuar corretamente os procedimentos de cunho experimental. Além disso, estas normas definem as regras mínimas de segurança, seja para o operador ou para possíveis contaminações ambientais e amostrais, objetivando o desenvolvimento de um serviço de qualidade.

3.1 MÉTODO DE AMOSTRAGEM DO OIM

A coleta das amostras deve ser efetuada segundo as orientações da norma técnica da ABNT NBR 8840/2013 – Guia para amostragem de líquidos isolantes. Esta norma prevê a amostragem de uma série de equipamentos que fazem uso de líquidos isolantes. Todavia, focando-se no escopo deste trabalho, apenas a coleta do óleo isolante mineral dos transformadores é explicitada. Desta forma, os seguintes procedimentos foram seguidos:

1. Primeiramente, efetua-se a seleção dos dispositivos de amostragem. Estes dispositivos consistem em vidros no padrão âmbar, com volume de 2 litros e fechados com tampas plásticas resistentes à ação do fluido.
2. Para a limpeza, utiliza-se o solvente tricloroetano (metilclorofórmio) para lavagem e, em seguida, devem ser secos em estufa a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 30 minutos.
3. Para efetuar a coleta, retira-se a proteção da válvula do transformador e, com auxílio de um tecido limpo e sem fiapos, remove-se toda a sujeira e poeira visíveis.
4. Em seguida, a válvula deve ser aberta, deixando o fluido escoar vigorosamente por três vezes o volume da tubulação que dá acesso

ao dreno. Este procedimento é efetuado para garantia de limpeza da tubulação e para a obtenção do líquido mais contaminado do trafo.

5. Outro procedimento adotado para obtenção da amostra caracteriza-se pelo uso da válvula inferior do transformador. As amostras devem ser retiradas através deste dreno com o intuito de se obter a porção do líquido com maior grau de degradação.
6. Em seguida, as amostras devem ser identificadas e enviadas até o laboratório para se efetuar os ensaios físicos químicos.

3.2 MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO VISUAL DO ÓLEO

A determinação da cor de produtos do petróleo é utilizada para controle de produção, que é uma característica importante de qualidade, visto ser a cor o primeiro item de observação da qualidade do produto. Em outros casos, a cor serve como indicador do grau de refino do material. Entretanto, quando a faixa de cor de um produto em particular é conhecida, uma variação fora da faixa estabelecida pode indicar possível contaminação com outro produto. No entanto, a cor nem sempre é um guia confiável de qualidade do produto e não deve ser usada indiscriminadamente em especificações de produtos (ABNT NBR 14483, 2005).

A cor de um óleo isolante é determinada pela luz transmitida e é expressa por um valor numérico baseado na comparação com uma série de padrões de cores. De fato, não é uma propriedade crítica, mas pode ser útil para avaliação comparativa. Para exemplificação, um número de cor que aumenta rapidamente ou é muito alto pode ser uma indicação de deterioração ou contaminação do óleo. Além da cor, a aparência do óleo também pode sinalizar turbidez ou sedimentos, que podem indicar a presença de água livre, borra insolúvel, carbono, fibras, sujeira ou outros contaminantes (NBR 10576, 2012).

Segundo a norma NBR 10576 (2012), este teste é considerado uma técnica de campo que oferece apenas uma estimativa rápida da condição do óleo, possibilitando a classificação do fluido em serviço. Outro fator bastante significativo diz respeito à eliminação de qualquer alteração das propriedades amostrais, seja esta por umidade, temperatura ou erro humano, decorrente da contaminação em razão do transporte para um laboratório ou durante seu armazenamento.

O procedimento para se efetuar a análise colorimétrica, consiste na comparação da tonalidade do corpo de prova com o auxílio de uma paleta de cores com uma escala padronizada de 0,5 a 8,0. A amostra de óleo é colocada em um recipiente tubular com uma altura de 50 mm ou mais. Assim, expõe-na a um foco de luz indireto (solar ou artificial) e analisa-se a cor do fluido, comparando-as. Deve-se, verificar atentamente o indício de alguma nebulosidade que denota umidade, de corpos suspensos ou de lodo, que indica a contaminação da amostra. Para uma boa classificação da amostra, tratando-se de fluido isolante, este deverá apresentar uma característica cristalina, limpa e brilhante (ASTM D1524, 1999).

Assim, com o objetivo de se padronizar as possíveis cores apresentadas pelos fluidos dielétricos, o órgão estadunidense de normatização ASTM – *American Society for Testing and Materials* – sintetizou uma tabela de cores para classificação do OIM, a qual é adotada associação brasileira de normas 14483 (2005).

Tabela 3 - Padrão de cores para classificação do OIM

Cor ASTM	Coordenadas de cromaticidade ¹⁾ Sistema USC			Transmitância luminosa T _w (Fonte padrão CIE ²⁾ C)
	r	G	b	
0,5	0,462	0,473	0,065	0,86 ± 0,06
1,0	0,489	0,475	0,036	0,77 ± 0,06
1,5	0,521	0,464	0,015	0,67 ± 0,06
2,0	0,552	0,442	0,006	0,55 ± 0,06
2,5	0,582	0,416	0,002	0,44 ± 0,04
3,0	0,611	0,388	0,001	0,31 ± 0,04
3,5	0,640	0,359	0,001	0,22 ± 0,04
4,0	0,671	0,328	0,001	0,152 ± 0,022
4,5	0,703	0,296	0,001	0,109 ± 0,016
5,0	0,736	0,264	0,000	0,081 ± 0,012
5,5	0,770	0,230	0,000	0,058 ± 0,010
6,0	0,805	0,195	0,000	0,040 ± 0,008
6,5	0,840	0,159	0,000	0,026 ± 0,006
7,0	0,877	0,123	0,000	0,016 ± 0,004
7,5	0,915	0,085	0,000	0,0081 ± 0,0016
8,0	0,956	0,044	0,000	0,0025 ± 0,0006

¹⁾ A tolerância para as coordenadas de cromaticidade é $\pm 0,006$

²⁾ *Commission Internationale de l'Eclairage (International Commission on Illumination)*

Fonte: ABNT NBR 14483 (2005)

A Tabela 3 explicita na primeira coluna, a classificação de cores. Da segunda a quarta coluna, nota-se as coordenadas *RGB* (do inglês: *red, green, blue*) que identificam a tonalidade cromatográfica e, por fim, a última coluna, indica a capacidade luminosa que atravessa a amostra.

3.3 ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA

A tensão de ruptura do líquido isolante trata-se de um ensaio funcional, pois permite a detecção de contaminantes, partículas em suspensão tais como celulose, partículas condutoras e água. Determina deste modo, a contaminação ou o grau de tratamento deficiente que prejudica a propriedade dielétrica. Assim, pode-se caracterizar o termo tensão de ruptura como a capacidade do líquido em resistir à tensão elétrica sem romper o dielétrico (MESSIAS, 1993).

Para exemplificação, de acordo com Milasch (1998), um óleo que tenha uma quantidade de água dissolvida a *120ppm* a *75°C*, tem sua rigidez dielétrica diminuída 26,5%. A solubilidade da água no óleo é proporcionalmente crescente ao aumento da temperatura, quando a temperatura do óleo diminui, uma parte da água que estava dissolvida passará para o estado livre e sua rigidez terá um valor ainda mais baixo. A Figura 8 apresenta este comportamento.

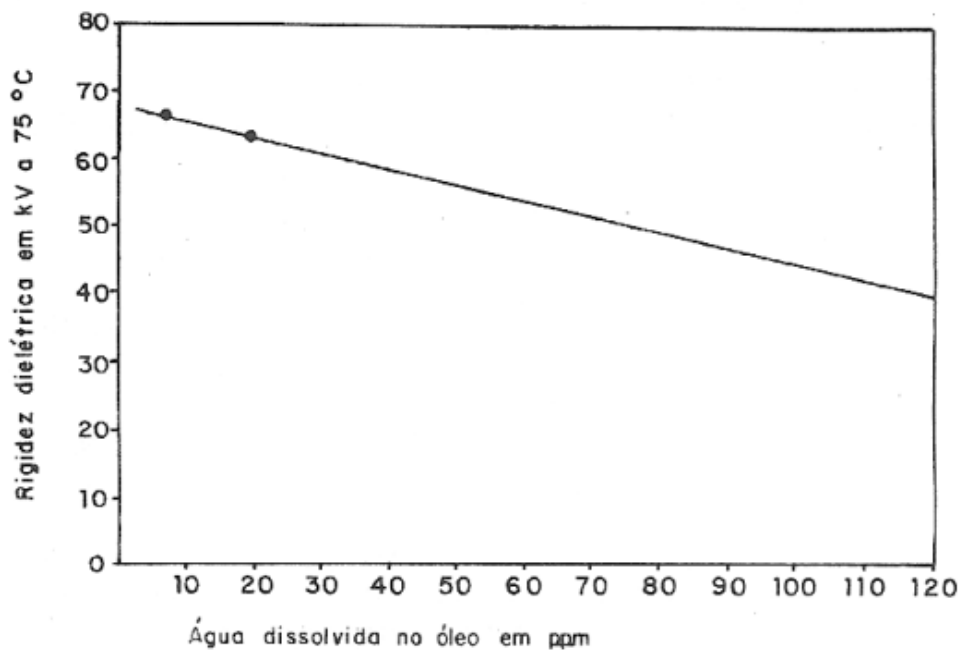


Figura 8 - Influência sobre a rigidez dielétrica do óleo isolante
Fonte: MILASCH (1998)

Em relação às partículas sólidas, a diminuição do caráter dielétrico é proporcional às partículas sólidas em suspensão (MILASCH, 1998), como exibido pela Figura 9.

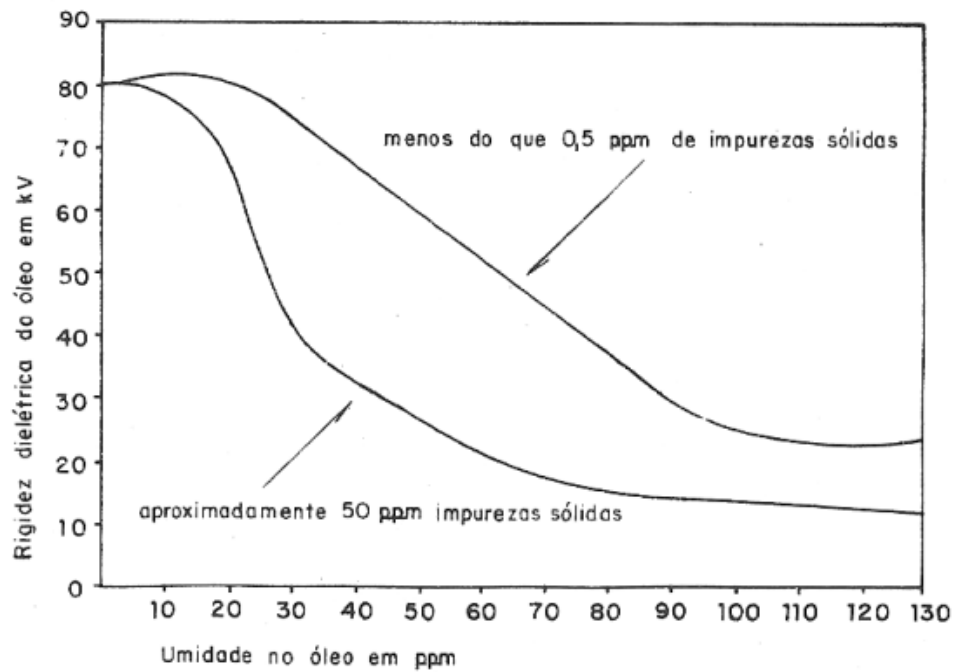


Figura 9 - Influência de impurezas sólidas sobre a rigidez dielétrica do óleo isolante
Fonte: MILASCH (1998).

Portanto, o óleo deve ser verificado periodicamente para evitar a sua contaminação, pois pode prejudicar grandemente o funcionamento do equipamento elétrico e diminuir sua vida útil.

Assim, com a finalidade de se determinar a rigidez dielétrica do OIM, foi empregada a norma técnica: ABNT NBR IEC 60156/2004 – Líquidos isolantes elétricos – Determinação da rigidez dielétrica à frequência industrial. Segundo esta norma, os seguintes equipamentos e procedimentos são solicitados:

3.3.1 Aparelhagem

Segundo a NBR IEC 60156/2004, para fazer essa análise, é necessária à utilização dos seguintes equipamentos:

- Célula de ensaio: confeccionada em vidro ou plástico transparente, com volume de 300 a 900 mililitros.

- Eletrodos: em forma de disco, confeccionado em cobre, bronze, latão ou aço inoxidável (polidos). Construtivamente, o disco deve possuir diâmetro de *25 milímetros* e espessura de *3 milímetros* com arestas vivas. A instalação na célula de ensaio deve ser na posição horizontal e distanciados *2,54 milímetros* entre si e submersos em uma profundidade de *40 milímetros*. Periodicamente, os eletrodos devem ser polidos para remoção de depósitos superficiais de carbono ou produtos de oxidação.
- Transformador: a tensão do ensaio é obtida pelo uso de um transformador-elevador alimentado por uma fonte de baixa tensão a *60 Hertz*, que é aumentada gradualmente por processo manual ou por controle automático.
- Sistema de proteção: consiste em um equipamento para evitar a decomposição do óleo no instante de ruptura. Assim, deve-se instalar uma resistência limitadora da corrente em série com a célula de ensaio. O circuito primário do transformador de alta tensão deve ser protegido por um disjuntor atuado pela corrente de fluxo originada pela ruptura da amostra e com um lapso de tempo não maior que *20 milissegundos*. O disjuntor deve ser ajustado com uma bobina de disparo, por falta de tensão, para proteger o equipamento.
- Regulador de tensão: a elevação da tensão pode ser efetuada por autotransformador de faixa variável, divisor de tensão tipo resistência, gerador de regulação de campo ou regulador de indução.
- Medição de tensão de ensaio: para esta norma, a magnitude de tensão de ensaio é o seu valor eficaz obtido através de um voltímetro calibrado contra um dispositivo de esfera e conectado à saída do transformador. Caso o dispositivo esfera interfira nos resultados, deve-se desconectá-lo durante o ensaio real.

3.3.2 Amostragem e preparação da célula

O ensaio de rigidez dielétrica é um teste extremamente sensível às menores contaminações da amostra, e devem ser coletadas por pessoas qualificadas e com experiência no manuseio do óleo isolante.

Para a preparação da célula, é necessário que se efetue a limpeza e lavagem com óleo novo e limpo. Imediamente antes do uso para ensaio, a célula é enxaguada com o óleo a ser ensaiado (várias vezes quando possível).

O recipiente contendo a amostra deve ser cuidadosamente agitado e invertido várias vezes, de maneira a assegurar, ao máximo, uma distribuição homogênea das impurezas contidas no líquido. Logo que possível, a substância deve ser vertida, vagarosamente na célula para evitar a formação de bolhas de ar.

A temperatura do líquido deve ser a mesma do ambiente, preferencialmente nas proximidades de 20°C (de 15°C a 20°C).

3.3.3 Procedimento

O procedimento consiste em aplicar uma tensão crescente e regular – em torno de 3kV/m – partindo-se do zero até ocorrer a ruptura do dielétrico, em frequência de 60 Hertz . Caso ocorra um arco, o disjuntor deve abrir o circuito em, no máximo, 20 milissegundos . A tensão de ruptura é a tensão atingida durante o ensaio no momento que ocorrer o arco entre os eletrodos. No ensaio, a primeira aplicação da tensão deve ser executada o mais breve possível, ou no máximo, 3 minutos após o preenchimento da célula (NBR 6869/1989).

Ainda, conforme a NBR IEC 60156/2004, seguir-se-á o procedimento denominado “ensaio de rotina”, no qual se efetua um único enchimento da célula e realiza-se 5 ensaios consecutivos com um minuto de intervalo. A média aritmética das cinco determinações é considerada como a rigidez dielétrica da amostra (Equação 3.1).

Para validar o experimento, por meio de critérios estatísticos, o desvio padrão não deve apresentar-se muito elevado. Esta comprovação é efetuada obtendo-se o valor da diferença entre os valores máximos e mínimos multiplicada por três (NBR IEC 60156/2004). O valor obtido não deve ser superior ao valor mais próximo do valor mínimo das cinco determinações (Equação 3.2).

$$\bar{R} = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)/5 \quad (3.1)$$

$$\delta = 3 * (R_{max} - R_{min}) \quad (3.2)$$

Então, o valor comprovado deve ser apresentado em quilovolts. Um exemplo da célula de ensaio é representado na Figura 10.

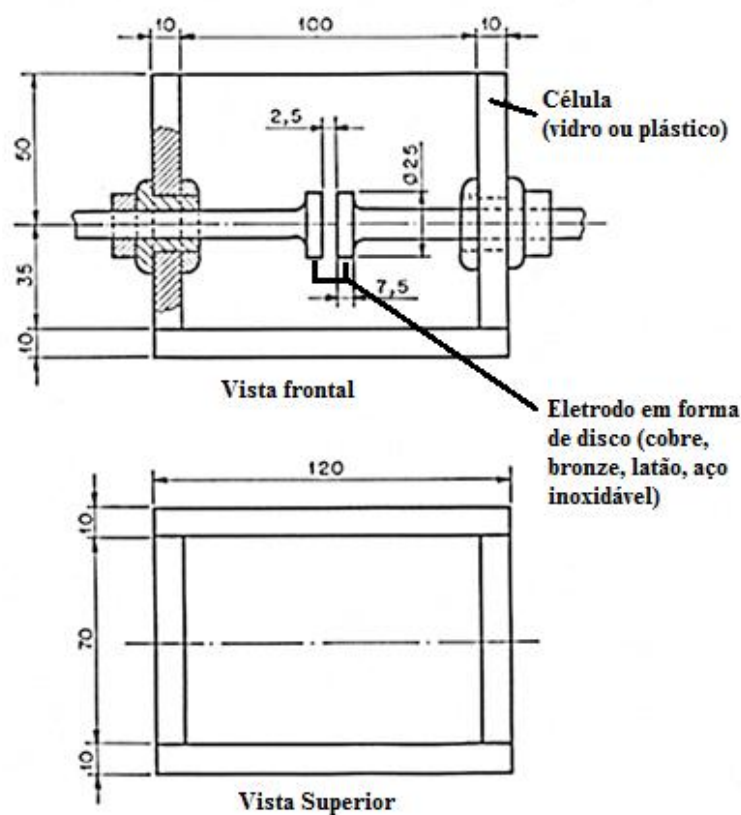


Figura 10 - Exemplo de célula de ensaio com eletrodo de disco
Fonte: NBR IEC 60156/2004

3.4 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA TENSÃO INTERFACIAL (TIF)

O teste de tensão interfacial é um ensaio para se determinar a tensão na interface óleo-água. Este ensaio é empregado para detectar se há produtos decorrentes da deterioração do óleo e de contaminantes polares solúveis que são provenientes da degradação de isolações sólidas e dos corpos com os quais o OIM entra em contato. A presença destes compostos diminui a TIF do isolante dielétrico, sendo expressa pela medida dina/cm (MILASCH, 1998).

A TIF possui uma característica bastante sensível à contaminação. Isto pode ser verificado durante os estágios iniciais de envelhecimento, período o qual apresenta uma rápida progressão, mas que tende a se estabilizar quando a deterioração mostra-se moderada. Assim, deve-se atentar a problemas de incompatibilidade com alguns materiais como: vernizes, gaxetas, etc., ou durante o enchimento do transformador com óleo. É necessário, também, considerar a ação em transformadores sobrecarregados, cuja deterioração apresenta-se mais rápida (NBR 10576, 2012).

De acordo com NBR 6234 (1965), a tensão interfacial é determinada medindo-se a força necessária para destacar um anel plano, de fio de platina, da superfície do líquido de tensão superficial mais elevada, isto é, da interface água-óleo. Para calcular a tensão interfacial, a força assim medida é corrigida por um fator de determinação que depende da força aplicada, das massas específicas de ambos os meios, água e óleo, e das dimensões do anel.

3.4.1 Aparelhagem

Para a execução deste teste, a norma referente responsável, solicita os seguintes equipamentos (conforme Figura 11):

- Tensiômetro – basicamente, consiste em um fio de torsão na qual será aplicada a força. Este fio, em uma de suas extremidades será ligado a um anel e na extremidade oposta, será conectada a um disco com escalas graduadas em dinas por centímetro.
- Anel: construído de platina com circunferência de *40* ou *60 milímetros* soldada a uma alça do mesmo material.
- Recipiente de amostragem: béquer de vidro tendo um diâmetro de no mínimo *45 milímetros*.

3.4.2 Amostragem

Os recipientes de amostragem devem ser previamente limpos e lavados com nafta ou benzol e, posteriormente, enxaguados com metiletilcetona e água

destilada. Em seguida, deve-se imergí-lo em uma solução quente de ácido crômico e, novamente, enxaguado com água corrente ou destilada.

O anel de platina deve ser submetido a um processo semelhante, contudo, após o enxague com metiletilcetona, deve-se aquecê-lo ao rubro na parte oxidante de uma chama de gás.

Neste momento, o recipiente está apto a receber o OIM, contudo, deve-se filtrá-lo utilizando um papel-filtro com *150 milímetros* de diâmetro, de porosidade média.



Figura 11 - Tensiômetro para medir tensão interfacial
Fonte: Milasch, 1998

3.4.3 Procedimento

Para a realização do ensaio, são introduzidos *50 a 75 mililitros* de água destilada no recipiente de vidro. Então, coloca-se o béquer sob uma plataforma ajustável do tensiômetro e o anel de platina, suspenso. Desta forma, ajusta-se a plataforma até que o anel fique imerso na água a uma profundidade máxima de *5 milímetros* e no centro do recipiente. Neste momento, o óleo amostral deve ser vertido sobre a água até se obter uma camada de *10 milímetros*, atentando-se para que o anel não toque a interface óleo-água. Assim, deixa-se a mistura descansar por *30 segundos* e, então, inicia-se o teste de ruptura baixando a plataforma vagarosamente. No momento em que ocorrer a ruptura, ou seja, no momento em que o houver a passagem do anel pelo limiar óleo-água, o disco graduado do tensiômetro acusará um valor que será, posteriormente, utilizado para obter a tensão

interfacial da amostra, sendo aplicado na equação 3.3 e, em seguida na equação 3.4.

$$F = 0,7250 + \sqrt{\frac{0,01452P}{C^2(D-d)}} + 0,04534 - \frac{1,679}{R/r} \quad (3.3)$$

$$TIF = P.F \quad (3.4)$$

Onde:

P é a leitura da escala em *dinas/cm*, quando a película se rompe.

F é o fator que converte a leitura da escala, em *dinas/cm*, em tensão interfacial

C – circunferência do anel em *centímetros*.

D – Massa específica da água em 25°C, em *g/mL*.

d – Massa específica da amostra a 25°C, em *g/mL*.

R – Raio do anel, em *centímetros*.

r – raio do fio do anel, em *centímetros*.

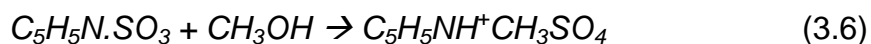
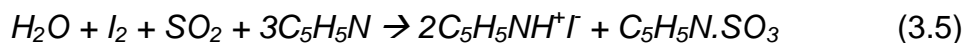
Os resultados obtidos deverão ser expressos em *dinas/cm*.

3.5 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA

A água pode ser considerada uns dos maiores inimigos da isolação de um transformador. A determinação do teor de umidade consiste em um bom parâmetro para obter uma estimativa do processo evolutivo de deterioração da isolação, tanto líquida quanto sólida. Por exemplo, um teor de umidade acima de 50ppm no OIM, pode ser considerado um nível crítico que indica a necessidade de sua eliminação, pois, seguramente, a isolação sólida que é constituída de papel, estará com excesso de umidade, acelerando o processo de degradação da celulose (MILASCH, 1998).

Segundo a norma NBR 10710 (2006) denominada: Líquido isolante elétrico – Determinação do teor da água, o método mais aceito, atualmente, consiste na titulação coulométrica de *Karl Fischer*. Neste método a amostra é misturada a uma solução de base/álcool de íons de iodo e dióxido de enxofre. O reagente

original é expresso pelas reações químicas 3.5 e 3.6 que utiliza piridina e metanol, sendo expressas da seguinte maneira:



Neste método o iodo é gerado eletroliticamente e reage com a água proporcionalmente à quantidade de eletricidade (elétrons), conforme demonstrado na reação 3.7:



Desta forma, é possível determinar que um mol de iodo reaja com um mol de água o que equivale a *10,72 Coulomb*. A partir deste princípio, é possível determinar a quantidade de água, pois, é necessária uma quantidade de eletricidade específica para efetuar a eletrólise completamente, sendo essa quantidade diretamente proporcional à quantidade de água (NBR 10710, 2006).

3.5.1 Amostragem

De acordo com a NBR 10710 (2006), a amostragem para este teste, deve ser efetuada meticulosamente, pois o líquido isolante é muito sensível à umidade. Assim, desde seu transporte até o momento de teste, o dielétrico não deve ser exposto discricionosamente, mas deve seguir todos os preceitos ditados pela NBR 8840 (1992).

Contudo, devido à aparelhagem para este teste ser específica, a norma não lista uma sequência de materiais e procedimentos padronizados a serem seguidos.

3.5.2 Aparelhagem

Os tituladores coulométricos de *Karl Fischer* disponíveis comercialmente são diferentes para cada fabricante. Assim, será utilizado como modelo de exemplificação o disponibilizado na norma vigente. Este aparelho é guarnecido com

um recipiente de titulação, eletrodos de platina, câmara geradora e agitador magnético, sendo representada na Figura 12.

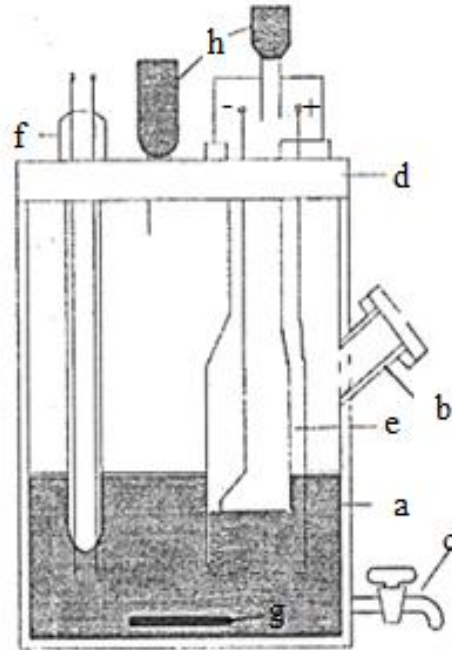


Figura 12 - Titulador Coulométrico
Fonte: NBR 10710 (2006)

Onde:

- a) Recipiente de titulação (compartimento anódico).
- b) Ponto de injeção da amostra.
- c) Torneira de drenagem.
- d) Tampa de politetrafluoretileno.
- e) Conjunto do gerador (compartimento catódico).
- f) Eletrodos duplos de platina para medição do potencial.
- g) Barra magnética.
- h) Tubos de secagem.

3.5.3 Procedimento

O procedimento para realização da titulação segue-se conforme a configuração da célula eletrolítica. Basicamente, a célula conta com dois compartimentos conectados por um diafragma poroso. O compartimento anódico

contém a mistura de reagente-solvente onde ocorre a inserção da amostra (solução anódica). Em contrapartida, o compartimento catódico (conjunto do gerador) contém o reagente anidro (solução catódica). Em ambos os lados do diafragma estão localizados os eletrodos para eletrólise. Desta forma, quando o processo chega ao fim, ou seja, quando o iodo gerado por eletrólise reage com a água completamente o par de eletrodos é despolarizado, alterando a relação corrente/tensão que é utilizada para ativar o indicador do ponto final e parar o integrador de corrente. Neste momento o integrador de corrente integra a corrente consumida durante a eletrólise, calculando a quantidade de água equivalente, exibindo a massa de água em microgramas (μg) (NBR10710, 2006).

Diante disso, o teor de água da amostra é obtido, utilizando-se a equação 3.8.

$$\text{Teor de água} = \frac{m}{M} \quad (3.8)$$

Onde:

m é a quantidade de água titulada, em microgramas.

M é a massa de líquido isolante, em gramas.

Teor de água é a quantidade de água em miligramas por quilograma [ppm].

3.6 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE (NÚMERO) DE NEUTRALIZAÇÃO

O teste de índice de neutralização consiste, basicamente, em medir os componentes ácidos ou básicos presentes no dielétrico. A alteração do pH do OIM indica a formação de produtos decorrentes de oxidação, em conjunto com a água e contaminantes sólidos. Esta alteração do óleo afeta drasticamente o caráter dielétrico e os componentes construtivos do transformador como, por exemplo, os materiais de origem celulósica e as peças metálicas do chassi do trafo (NBR10576, 2012).

A detecção da alteração do pH de um óleo em serviço é um indicador claro de desgaste do mesmo. O teste para determinação do número de

neutralização consiste em determinar o número de miligramas de *KOH* ou *HCl* necessários para neutralizar *1 grama* do óleo que se encontra alterado (MILASCH, 1998).

A norma NBR 14248 (2009) fornece as diretrizes para a execução deste teste. Assim, todos os tópicos subsequentes serão embasados nas orientações por ela homologadas.

3.6.1 Aparelhagem

Para realização deste teste, serão necessários os seguintes equipamentos:

- Buretas calibradas de vidro. Com capacidade de *50 mililitros*, graduadas em subdivisões de *0,1 mililitros*. Com capacidade de *10 mililitros*, graduadas em *0,05 mililitros* ou com *5 mililitros* de capacidade, graduadas em subdivisões de *0,02 mililitros*.
- Frasco Erlenmeyer de vidro transparente com capacidade de *250, 500 e 2000 mililitros*.
- Funil de separação de vidro com *250 mililitros* de capacidade.
- Funil de vidro sinterizado ou de porcelana de porosidade fina.
- Peneira de *150 micrometros (100 mesh)*.
- Provetas de vidro transparente com capacidade de *100 mililitros* e subdivisões de *2 mililitros* e com capacidade de *10 mililitros* com subdivisões de *0,5 mililitros*.
- Balança calibrada com capacidade adequada e resolução mínima de *0,0001 gramas*.

A Figura 13 demonstra um analista efetuando o ensaio de determinação do índice de neutralização.

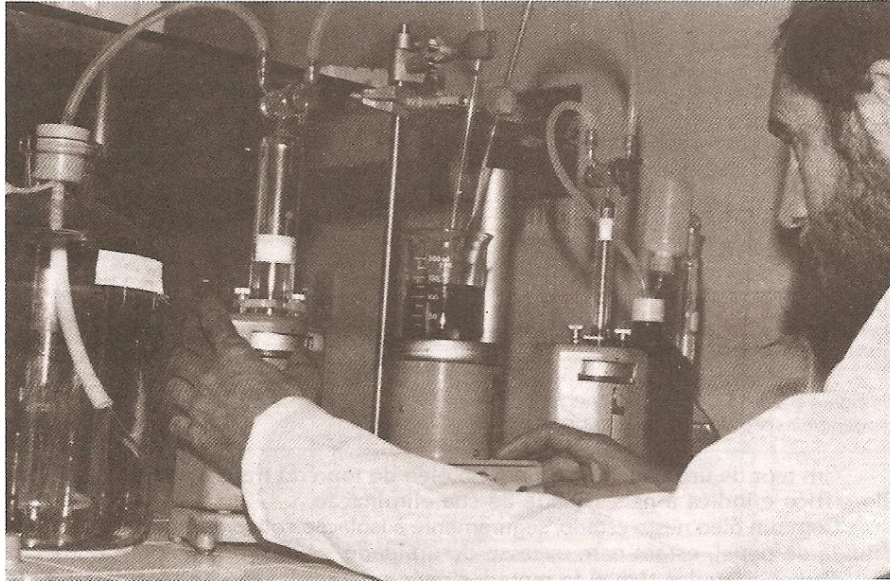


Figura 13 - Medidor de número de neutralização do óleo isolante
Fonte: Milasch, 1998.

3.6.2 Amostragem e procedimentos

O procedimento para a preparação da amostra de OIM deve ser seguido rigorosamente, uma vez que os sedimentos existentes são de procedências ácidas ou básicas. Desta forma, para preparação das amostras, deve-se aquecer o óleo a $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ agitando vigorosamente o frasco para que os sedimentos sejam homogeneamente dispersos. Logo em seguida, deve-se passar toda a alíquota através de uma peneira de $150\mu\text{m}$ para eliminar as partículas maiores de sedimento. Nesta fase, uma quantia pré-determinada deste conteúdo é transferido para um Erlenmeyer. Então, adiciona-se um solvente de titulação e uma solução indicadora constituída de tolueno, água e álcool isopropílico anidro para determinar o caráter da amostra. Caso a mistura apresente uma cor verde ou castanho-esverdeado a amostra possui padrão básico, se apresentar uma cor alaranjada, seu padrão é ácido (NBR 14248, 2009).

Assim, tendo o conhecimento do caráter da mistura, adiciona-se aos poucos a solução de $\text{KOH } 0,1\text{ mol/L}$ caso a mistura seja ácida, ou $\text{HCl } 0,1\text{ mol/L}$ caso a mistura seja básica, utilizando uma proveta graduada. Deve-se adicionar a mistura antagonista, até o momento em que ocorrer a “viragem da cor”, ou seja, quando a solução alaranjada passar a ser castanho-esverdeado ou, quando castanho-esverdeado passar para alaranjado. Neste momento, realiza-se a titulação em branco, juntando $0,5$ mililitros de solução indicadora de p-naftolbenzeína a 100

mililitros de solvente de titulação e titular com solução de *KOH* 0,1 mol/L ou *HCl* 0,1 mol/L, fazendo adições iguais ou menores a 0,1 *mililitros*, anotando-se o volume de solução necessário para atingir o ponto de viragem. A partir do momento que se tem estes resultados, é possível determinar o número de acidez ou basicidade fazendo-se o uso da equação 3.9.

$$Nr = [(A - B) \cdot C_1 \cdot 56,1]/m \quad (3.9)$$

Onde:

A é o volume de solução de *KOH* ou *HCl* utilizado com a titulação da amostra em mililitros [*mL*].

B é o volume de solução de *KOH* ou *HCl* utilizado com a titulação do branco em mililitros [*mL*].

*C*₁ é concentração da solução-padrão de *KOH* ou *HCl*, em moles por litros [*mol/L*].

m é a massa da amostra, em gramas (g).

Os resultados devem ser expressos com duas casas decimais para números menores que 1,0 *miligramas* de *KOH/g* ou *HCl/g* e com uma casa decimal para números iguais ou maiores que 1,0 *miligramas* de *KOH/g* ou *HCl/g*.

4 MÉTODO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise das características físico-químicas das amostras dos óleos isolantes minerais serão efetuadas fazendo uso de ferramentas estatísticas. Os conceitos teóricos que serão aplicados pretendem, através de um conjunto limitado, caracterizar o todo a partir do qual tais dados foram obtidos (GUIMARÃES; CABRAL, 2007).

Para melhor compreensão, o termo estatística consiste em uma ciência que se preocupa com a coleta, organização, análise e interpretação de dados experimentais, visando à tomada de decisões (LARSON; FARBER, 2009). Entretanto, dois conceitos fundamentais da estatística devem ser conhecidos: a população e a amostra. A população é o conjunto de elementos delimitados por uma característica em comum. A amostra por sua vez, é um subconjunto da população, cujos elementos serão todos examinados para efeito do estudo estatístico (FALCO, 2008).

A análise estatística objetiva a obtenção de hipóteses a partir da população de origem, ou seja, partindo-se de uma amostra. Esta é a definição da estatística indutiva, cuja análise e interpretação de parte de uma população induzem conclusões de um todo. Porém, o processo de generalização do método intuitivo está associado a uma margem de incerteza. Evidentemente, não são gerados resultados absolutamente exatos (FALCO, 2008). Assim, a utilização de técnicas de análise como as medidas de tendência central e de dispersão tornam-se indispensáveis.

4.1 MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL

As medidas de tendência central caracterizam-se como um grupo de ferramentas que visam à descrição de grupos como um todo. Isto é, esta qualificação deve sintetizar da melhor maneira possível o comportamento do conjunto do qual ele é originário. Contudo, nem sempre os dados estudados têm uma boa estimativa, ou seja, o valor pode não representar os dados obtidos fidedignamente. Por isso, a média, mediana e moda são consideradas medidas de tendência central, pois delimitam os dados em torno de valores centrais.

A média aritmética é calculada a partir da somatória de entradas dividida pelo número de entradas. O resultado obtido será representado pelo símbolo \bar{x} (leia-se: “x barra”) quando referido a uma média amostral e μ quando relacionado a uma média populacional (LARSON; FARBER, 2009). Pode-se considerar essa medida como a mais utilizada em aplicações matemáticas, pois pode ser aplicado a quaisquer conjuntos de números, e para tal, um valor único é obtido. Deste modo, a média aritmética, torna-se um dado essencial no estudo em particular. Contudo, cabe salientar que devido a esta característica, pode conduzir a erros de interpretação perante alguns casos, pois a média é sensível a cada um dos valores do conjunto, inclusive aos extremos (ROSETTI et al., 2008). Em outras palavras, quando alguns poucos valores contrastam significativamente do restante dos elementos do conjunto, o resultado final pode ser acometido induzindo a conclusões equivocadas a respeito do conjunto. Assim, deve-se atentar a valores extravagantes e isolados, pois influenciam grandemente no valor da média (LARSON; FARBER, 2009).

Em decorrência desta situação, aconselha-se a aplicação de outra medida de posição, a mediana (*md*). Esta medida caracteriza-se como à grandeza que divide o conjunto, desde que se organize em ordem crescente, em duas partes iguais cada um com o mesmo número de elementos. Ou seja, significa que abaixo da mediana devem estar 50% dos elementos e os outros 50% do caso analisados devem estar acima dessa medida (DA SILVA et al., 1999). Caso o número de observações for par, a mediana será a média dos dois valores centrais (ROSSETTI et al., 2008).

Em relação à última medida de tendência central, a moda, traduz o valor do conjunto que mais se repete entre os dados obtidos (FALCO, 2008). Sendo, particularmente, útil na mensuração de variáveis quantitativas discretas. Cabe ressaltar o fato de que as variáveis quantitativas podem sofrer uma classificação dicotômica. Segundo da Silva (1999), existem variáveis discretas e contínuas. O primeiro caso traduz valores que formam um conjunto finito ou enumerável de números, geralmente inteiros. A segunda classe refere-se a variáveis contínuas que podem assumir qualquer valor, pertencendo ao intervalo de números reais e sendo resultante de uma mensuração.

4.2 MEDIDAS DE DISPERSÃO

As medidas de dispersão são utilizadas para medir o grau de variabilidade, ou dispersão dos valores observados em torno da média aritmética. Além disso, medem a representatividade da média e evidenciam o nível de homogeneidade e heterogeneidade dentro de cada grupo analisado (FALCO, 2008). As medidas mais conhecidas são a amplitude total, variância e desvio padrão.

A amplitude representa a medida mais simples de variabilidade. Equivale à diferença entre os valores máximo e mínimo de uma população ou amostra. Todavia, o fato de se considerar apenas os valores extremos, sujeita esta medida a resultados infielis, ou seja, uma vez os dados estejam comprometidos com valores atípicos o resultado final pode apresentar-se incoerente. Outro fator também relevante reflete-se ao número de observações, pois os dados podem apresentar-se mais dispersos para um conjunto maior de dados quando comparada a uma amostra menor de mesma origem (ROSSETTI et al., 2008). Entretanto, esta medida contribui na identificação do nível de credibilidade e uniformidade dos dados da amostra sugerindo a deduções que auxiliem na confiabilidade da pesquisa.

A variância e desvio-padrão são medidas que se baseiam em desvios de observações de um conjunto de dados em relação à média. Entretanto, dado que o somatório dos desvios simples em relação à média é igual a zero é necessário trabalhar com os desvios quadráticos, os quais consideram um desvio negativo como sendo igual a um desvio positivo de mesma magnitude. Define-se então, a variância como sendo a “média dos desvios quadrados em torno da média”, o que corresponde em termos algébricos à equação 4.1, cujo símbolo S^2 denota a variância amostral – correlativamente, tratando-se de uma população a variância é denotada por σ^2 . Os termos x_i e \bar{x} representam, respectivamente, valor da amostra e valor da média aritmética amostral.

$$S^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1) \quad (4.1)$$

Neste momento, é importante ressaltar, que em determinados casos, a equação 4.1, pode apresentar-se diferente do exposto neste trabalho. Isso ocorre, pois ao tratar populações, o termo divisor “ $n-1$ ” é substituído apenas por n (SILVA et. al., 1999). Contudo, este é um procedimento justificável, pois, ao tratar um grande

número de indivíduos, como no caso de uma população, a diferença de um elemento é insignificante. Contudo, tratando-se de uma amostra, esta mudança pode fornecer uma melhor estimativa (BUSSAB; MORETTIN, 2011).

Por fim, uma vez encontrada a variância, o desvio padrão pode ser rapidamente encontrado. Por definição, esta medida de dispersão caracteriza-se por ser a raiz quadrada positiva da variância. Novamente, quando relacionada a amostras é denotada por S , e para população, denotada por σ (LARSON; FARBER, 2009).

4.3 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE

A função densidade de probabilidade é utilizada com o objetivo de se fornecer uma estimativa probabilística associada a uma variável aleatória contínua X . Esta função é descrita de acordo com as seguintes equações:

$$f(X) \geq 0 \quad (4.2)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(X)dx = 1 \quad (4.3)$$

$$P(a \leq X \leq b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(X)dx = k \quad (4.4)$$

De acordo com Montgomery e Runger (2003), ao analisar a função $f(X)$, verifica-se que a mesma é utilizada para efetuar o cálculo de uma área. Cujas variáveis X possui possibilidade de assumir uma posição dentro do intervalo $[a, b]$. A equação 4.2 é responsável por restringir esta probabilidade a apenas números positivos. A função densidade, por sua vez, tem a característica de limitar a análise na área definida, cujos valores extrapolados são igualados a zero. A equação 4.3, indica que a área total sob a curva $f(X)$, será sempre igual ao valor unitário e, por fim, a equação 4.4, indica que a probabilidade sob a curva no intervalo $[a, b]$ é igual a área k sob a curva.

4.4 DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Dentre as várias metodologias de distribuição de probabilidade contínua, a distribuição normal, apresenta-se como uma das mais requisitadas, sendo aplicada em pesquisas científicas e tecnológicas. Isso ocorre, pois grande parte das variáveis contínuas de interesse prático segue esse modelo matemático. Além disso, sua estreita relação com o Teorema do Limite Central que é à base das estimativas e dos testes realizados sobre a média de uma população qualquer, assegura que a distribuição amostral siga uma distribuição normal, independente da distribuição da variável em estudo (TAVARES, 2011).

Outro fator atrativo desta metodologia apoia-se no fato de necessitar apenas de 2 parâmetros para ser calculada: a média aritmética e o desvio padrão. Segundo Levine, Berenson e Stephen (2000) é possível afirmar que a média aritmética \bar{x} caracteriza-se por ser a medida de posição central mais estável de uma amostra. E esta, por sua vez, pode ser considerada o parâmetro mais próximo da média populacional μ , pode-se, então, concluir que \bar{x} é a melhor estimativa de μ que pode ser obtida em uma amostra. Logo, é correto dizer que X possui distribuição normal, ou distribuição gaussiana, com média populacional μ e variância σ^2 , se a função probabilidade de X for representada pela equação 4.5, onde $-\infty < \mu < +\infty$ e $\sigma^2 > 0$ (BOLFARINE, 2010).

$$f(X; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(X-\mu)}{\sigma}\right]^2}, -\infty < x < \infty \quad (4.5)$$

A equação 4.5 é a responsável pela geração das curvas gaussianas, cujo formato remete a um sino, apresentando formato simétrico em relação ao ponto central que é determinado pela média amostral \bar{x} . A Figura 14 exhibe um modelo dessa curva.

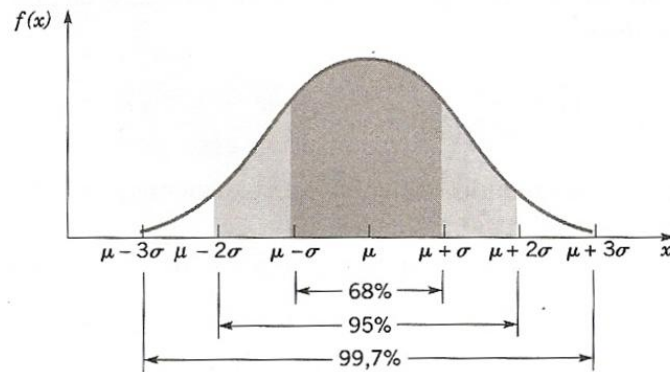


Figura 14 - Modelo da curva normal
Fonte: MONTGOMERY; RUNGER, 2003.

De acordo com Larson e Farber (2010) esta curva prolonga-se infinitamente pelo eixo horizontal, aproximando-se do eixo das abscissas de maneira assintótica. Matematicamente falando, $f(X; \mu, \sigma) \rightarrow 0$ quando $X \rightarrow \pm\infty$. Observa-se também que $\mu - \sigma$ e $\mu + \sigma$ são pontos de inflexão da curva, ou seja, são pontos nos quais a curva muda sua concavidade.

Todavia, a característica mais interessante deste método matemático apresenta-se na possibilidade de se obter um valor probabilístico para qualquer variável normalmente distribuída tomando-se apenas dois pontos quaisquer e calculando-se a área sob a curva normal. Portanto, torna-se possível a padronização das porcentagens, as quais se apresentam grafadas na Figura 14 (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Isso é possível, pois independente da variável contínua X normal, as Equações 4.2, 4.3 e 4.4 são aplicáveis.

$$P(\mu - \sigma \leq X \leq \mu + \sigma) = 0,6827 \quad (4.6)$$

$$P(\mu - 2\sigma \leq X \leq \mu + 2\sigma) = 0,9545 \quad (4.7)$$

$$P(\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma) = 0,9973 \quad (4.8)$$

Assim, se a variável esta inserida em um contexto de distribuição normal, pode-se afirmar que, aproximadamente 68,27% de seus valores podem ser encontrados no intervalo $\pm 1\sigma$. De semelhante modo, é plausível afirmar que cerca de 95,45% das amostras podem ser encontradas no intervalo de $\pm 2\sigma$. E, em torno de 99,73 está contida em $\pm 3\sigma$ (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Assim é indubtable a possibilidade de se calcular a probabilidade de uma curva normal utilizando-se uma tabela padronizada e elaborada para esta finalidade. Contudo, faz-se necessário a conversão dos valores da distribuição normal em seu respectivo valor Z , cuja média é tida como referência ou origem, correspondendo sempre à zero. O valor de desvio padrão por sua vez, assume valor unitário como medida de afastamento a contar do ponto de origem (LARSON; FARBER, 2010). Assim, a conversão pode ser obtida utilizando-se a equação 4.9.

$$Z = (X - \mu)/\sigma \quad (4.9)$$

4.5 TEOREMA DO TAMANHO AMOSTRAL E LIMITE CENTRAL

A inferência estatística caracteriza-se como uma importante ferramenta matemática, pois a partir de seus resultados é possível fazer afirmações sobre as características de uma população baseando-se apenas no resultado de uma amostra (BUSSAB; MORETTIN, 2011). O teorema de limite central colabora com o objetivo deste trabalho, uma vez que sua teoria afirma que não há limites máximos de elementos para uma amostra. Assim, independente deste número, a distribuição de amostragem da média pode se apresentar mais de uma curva de distribuição normal, de maneira indiferente à grandeza de distribuição de valores individuais de uma população (LEVINE; BERENSON; STEPHAN, 2000).

Todavia, amostras, demasiadamente, numerosas de elementos podem dificultar o processo de análise, exigindo muito tempo de estudo. Portanto, é interessante conhecer a quantia mínima suficiente para se realizar o estudo de inferência. Assim, de acordo com Larson e Farber (2009) e outros estatísticos, uma amostra é considerada suficientemente grande quando esta apresentar pelo menos 30 elementos. Isto decorre, pois a distribuição de amostragem da média aritmética é distribuída de maneira aproximadamente normal para este tamanho amostral.

4.6 ESTIMATIVA DO INTERVALO DE CONFIANÇA DA MÉDIA ARITMÉTICA

O nível de confiança, basicamente, pode ser classificado como a probabilidade de que um intervalo estimado esteja inserido dentro de uma média populacional μ . De acordo com o teorema do limite central, quando o número de

amostras possui 30 elementos, a amostragem das médias amostrais caracteriza-se por ser uma distribuição normal. Assim, o nível de confiança é a área sob a curva normal padrão entre os valores críticos, $-Z_\alpha$ e Z_α . Ao visualizar o gráfico da Figura 15, pode-se observar que a área hachurada α é a porcentagem da área sob a curva normal entre $-Z_\alpha$ e Z_α . A área remanescente é $(1 - \alpha)$, então a área em cada cauda é $(1/2) \cdot (1 - \alpha)$. Para exemplificação, se $\alpha = 90\%$, então 5% da área está à esquerda de $-Z_\alpha = 1,645$ e 5% da área está à direita de $Z_\alpha = 1,645$ (LARSON; FARBER, 2009).

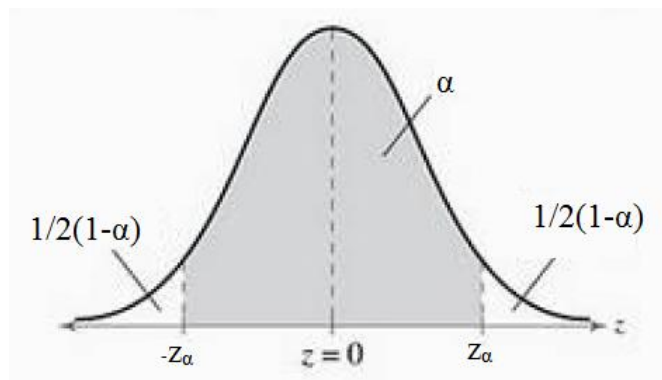


Figura 15 - Curva de distribuição normal para estimação de nível de confiança
Fonte: LARSON; FARBER, 2009.

Cabe ressaltar que o valor correspondente a área $1/2(1 - \alpha)$ até o centro de uma distribuição normal padronizada é $Z_{(\alpha/2)}$. Cujos valores podem ser encontradas no anexo B de acordo com o nível de confiança adotado.

Assim, para se estimar o intervalo de confiança, é necessário se obter a margem de erro E da amostragem, tendo-se o conhecimento prévio do valor do desvio padrão e do número de elementos da amostra, sendo aplicada na equação 4.10 (LARSON; FARBER, 2009).

$$E = Z_{(\alpha/2)} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.10)$$

Ao obter os valores destes dados, utilizando a equação 4.11, o intervalo de confiança pode, finalmente, ser expresso:

$$\bar{x} - E < \mu < +\bar{x} + E \quad (4.11)$$

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

O escopo para o levantamento de dados de uma pesquisa estatística deve ser estudado profundamente, pois na maioria dos casos, a análise detalhada de uma população demonstra-se inviável em decorrência do grande número de indivíduos. Devido a essa característica, ou seja, ao grande número populacional, optou-se por trabalhar com reduzidos grupos amostrais dos óleos isolantes minerais. Todavia, é importante salientar que o conjunto de elementos que será tratado não deve ser exageradamente reduzido, pois o resultado pode ser impreciso e pouco confiável. Por outro lado, caso seja uma amostra demasiadamente grande, a análise se apresentará dispendiosa tanto no âmbito econômico quanto no cronológico. Deste modo, embasando-se no teorema do limite central, o tamanho amostral foi definido contendo, no mínimo, 30 exemplares de cada população. Isto decorre do fato de que o tamanho amostral se torna grande o suficiente, a distribuição de amostragem de média se aproxima da distribuição normal. Assim sendo, uma vez que o foco do trabalho consiste em definir e analisar a distribuição normal das características físico-químicas de diferentes classes cromatográficas do OIM, supõe-se que essa porção de elementos seja suficiente.

As informações a respeito da cromatografia do óleo isolante mineral são fundamentadas pela NBR 14883. Conforme detalhado no capítulo 3, esta norma classifica o nível de cor do óleo de 0 a 8, sendo incrementada gradualmente na razão 0,5. Entretanto, devido à dificuldade em se obter os laudos físicos-químicos, foi efetuada a análise apenas até a graduação 2,0. Isto decorre da dificuldade em se encontrar transformadores com isolantes dielétricos demasiadamente escurecidos. Assim, a partir da graduação 2,0, os óleos são submetidos a tratamentos termo-vácuos, regeneração, aditivação ou a substituição caso apresentem alguma discrepância de suas características físico-químicas. O “envelhecimento” laboratorial também foi ponderado, contudo, segundo especialistas que forneceram os dados para este trabalho, afirmaram que as propriedades apresentariam resultados infielis, pois os OIMs não seriam submetidos às condições ambientais comuns aos aplicados nos transformadores de distribuição. Foram reconhecidas informações de 120 laudos físico-químicos, obtidos de uma empresa privada. As subseções seguintes serão dedicadas à exibição e ao tratamento de dados submetendo-as a análise estatística.

5.1 MEDIDAS DE POSIÇÃO E DISPERSÃO DAS AMOSTRAS

As Tabelas de 4 a 7 foram contruídas com o intuito de refinar e facilitar a análise de comparação dos dados. Cada tabela refere-se a um teste aos quais as amostras de OIM foram submetidas, sendo então expostos segundo o grau da variação cromatográfica. A primeira coluna apresenta os parâmetros estatísticos, dentre eles, são listados as medidas de posição tais como: média, mediana e amplitude; e como medidas de dispersão: a variância, desvio padrão e desvio médio. As colunas de 2 a 5 evidenciam a graduação cromatográfica de 0,5 a 2,0. As Tabelas de 4 a 7 são dispostas desta forma.

A Tabela 4 indica os parâmetros estatísticos referentes a análises físico-químico do teste de rigidez dielétrica. Ao analisar a principal medida de posição, a média, verifica-se um comportamento condizente ao apresentado pela literatura. Nota-se que conforme o grau cromatográfico do OIM aumenta, a rigidez dielétrica é diminuída. Isso é justificado, pois a saturação da cor indica o envelhecimento do OIM, juntamente com a contaminação com água e a degradação dos componentes internos do transformador.

Tabela 4 - Parâmetros estatísticos referentes à análise físico-químico de rigidez dielétrica

Cromatografia	0,5	1,0	1,5	2,0
Valor máximo	86,300	88,000	87,000	87,000
Valor mínimo	26,700	12,800	16,900	11,300
Amplitude	59,600	75,200	70,100	75,700
Mediana	59,000	58,950	57,300	50,650
Média	59,273	57,023	56,096	49,277
Desvio médio	12,613	15,268	17,944	19,492
Variância	262,331	392,565	506,944	557,499
Desvio padrão	16,197	19,813	22,515	23,611

Contudo, os altos índices apresentados pelos desvios padrão, desvio médio e variância, indicam quão distante da média os dados estão. A discrepância destes dados é justificada ao analisar os dados de valores máximos e mínimos que nos fornece a amplitude total. Este dado nos informa a dispersão de um ponto central, ou seja, quanto maior o valor de amplitude, maior a variabilidade da amostra, visto que a variância é o desvio padrão elevado ao quadrado. Portanto,

pode-se aumentar a dificuldade em se afirmar um valor de medida de posição central para representar o conjunto de uma forma adequada.

Neste momento, é importante atentar-se a outra medida de posição: a mediana. Esta é uma medida de posição deveras semelhante à média. Ao tratar uma população normalmente distribuída, a média e mediana deveriam apresentar resultados, teoricamente, iguais. Assim, em relação a este caso, cujos valores de pico e mínimo distinguem-se significativamente, a mediana fornece um valor confiável, pois informa exatamente o valor central.

Ao confrontar os valores de média e mediana na Tabela 4, verifica-se que mesmo com valores de amplitude tão elevados, a média ainda se mostra confiável. Entretanto, conforme a grau de coloração torna-se mais elevado, maior é o distanciamento da média com a mediana, o que é justificado pelo aumento de partículas contaminantes e isto, influencia significativamente nas propriedades estatísticas da rigidez dielétrica.

A Tabela 5 fornece os parâmetros referentes à análise físico-química de teor de água. A água é um dos principais fatores que afetam o parâmetro de rigidez dielétrica. Ao confrontar os valores médios das Tabelas 4 e 5, é possível verificar que há interação entre estas duas propriedades. De fato, é necessário considerar ainda a degradação dos componentes internos e, também, do próprio isolante dielétrico. Isto pode ser considerado ao analisar os dados na graduação cromatográfica 2,0, cujo desvio padrão e variância apresentam um valor mais significativo.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos referentes à análise físico-químico de teor de água

Cromatografia	0,5	1,0	1,5	2,0
Valor máximo	11,000	17,000	15,000	23,000
Valor mínimo	2,000	4,000	4,000	2,000
Amplitude	9,000	13,000	11,000	21,000
Mediana	7,000	7,000	8,000	7,000
Média	6,167	7,400	7,967	8,667
Desvio médio	1,811	2,293	2,104	4,422
Variância	4,626	8,593	7,551	33,195
Desvio padrão	2,151	2,931	2,748	5,762

Em relação à Tabela 6, os dados de tensão interfacial, foram os que apresentaram a média e a mediana mais próxima, confirmando a consistência dos dados. As medidas de dispersão também não se apresentaram demasiadamente alterados e podem ser condicionadas segundo a amplitude total dos valores.

Novamente, ao confrontar com os dados da análise de tensão interfacial com as Tabelas 4 e 5, é possível verificar suas correlações. A tensão interfacial é estimada ao medir a tensão na interface óleo-água. Os produtos decorrentes da deterioração do óleo e os componentes polares solúveis provenientes da isolação dos componentes sólidos provocam o abaixamento da tensão interfacial do dielétrico, pois muitas destas substâncias possuem o caráter hidrofílico. Assim, equiparando os parâmetros de TIF com o teor de água e rigidez dielétrica, observa-se que quanto maior a quantidade de água, menor a TIF e menor a rigidez dielétrica do óleo.

Tabela 6 - Parâmetros estatísticos referentes à análise físico-químico de tensão interfacial

Cromatografia	0,5	1,0	1,5	2,0
Valor máximo	46,500	43,900	43,100	39,800
Valor mínimo	28,200	27,900	24,900	24,900
Amplitude	18,300	16,000	18,200	14,900
Mediana	42,300	35,550	32,950	30,450
Média	40,223	35,883	32,573	31,147
Desvio médio	4,396	3,256	3,542	3,140
Variância	30,659	15,692	18,521	14,637
Desvio padrão	5,537	3,961	4,304	3,826

Enfim, a Tabela 7 evidencia os dados estatísticos da análise físico-químicos de índice de neutralização. Ao analisar a média apresentada, e comparando aos dados da Tabela 6, verifica-se e comprava-se como relatado no Capítulo 3, a existência de produtos provenientes da decomposição de isolação sólida, de massa isolante dos terminais de cabos ou de buchas dos transformadores.

Assim, pode-se confirmar que, o aumento do índice de neutralização, contribui com a diminuição da tensão interfacial. Conseqüentemente, o teor de água é aumentado devido à presença de substâncias hidrofílicas e, de um modo geral, a rigidez dielétrica é diminuída. Assim, cabe salientar que a graduação cromatográfica

também é aumentada, caracterizando-o como um indicativo relevante no campo de coleta do isolante dielétrico.

Tabela 7 - Parâmetros estatísticos referentes à análise físico-químico de índice de neutralização

Cromatografia	0,5	1,0	1,5	2,0
Valor máximo	0,095	0,093	0,090	0,094
Valor mínimo	0,003	0,003	0,008	0,006
Amplitude	0,092	0,090	0,082	0,088
Mediana	0,021	0,018	0,027	0,033
Média	0,022	0,029	0,031	0,040
Desvio médio	0,016	0,021	0,014	0,023
Variância	0,000	0,001	0,000	0,001
Desvio padrão	0,022	0,026	0,019	0,028

5.2 GRAU DE CONFIANÇA, MARGEM DE ERRO E MÉDIA POPULACIONAL

A subseção anterior foi desenvolvida utilizando-se ferramentas estatísticas de medidas de posição e dispersão. Todavia, estas medidas oscilam de acordo com os elementos integrantes da amostra. Quando se objetiva apresentar a média de uma amostra em questão, o parâmetro a ser empregado denomina-se média populacional μ . Assim, com a finalidade de se delimitar o valor da média populacional, uma estimativa de intervalo deve ser concebida, tornando-se possível induzir o valor de μ para um determinado grau de confiança. Afinal, este é o papel da inferência estatística que consiste basicamente, em analisar os resultados apresentados por uma amostra e generalizá-lo para toda uma população.

Portanto, primeiramente, é importante considerar que a estimação da média populacional deve seguir algumas considerações. O primeiro fator a se considerar é denominado nível de confiança (NC) que é definido como 95%. O segundo e terceiro fator são os valores de desvio padrão e o número de indivíduos da amostra, respectivamente. Com estes dados, é originada a margem de erro E da média amostral para cada teste físico-químico segundo o seu grau de coloração o qual é calculado aplicando-se a equação 4.9.

Ao utilizar a tabela de distribuição normal padronizada no anexo B, verifica-se que, para o nível de confiança $NC = 95\%$, o parâmetro Z é igual a 1,96. O número de elementos da amostra consiste em $n = 30$ e o desvio padrão para cada

teste físico-químico previamente calculado na subseção 5.1, torna-se possível encontrar os valores da margem de erro através da equação 4.10.

Assim que obtido os valores da margem de erro E , é possível visualizar o intervalo de confiança para cada média amostral. As Tabelas de 8 a 11 foram geradas com o intuito de facilitar a visualização e interpretação dos dados. Estas tabelas foram contruídas segundo o seu grau de cromatografia. A primeira coluna dispõe as análises físico-químicas. As colunas de 2 a 4 apresentam os dados de desvio padrão, margem de erro e média amostral, respectivamente. Já a quinta coluna, apresenta a média populacional com 95% de grau de confiança (NC).

Tabela 8 - Intervalo de confiança para a média de grau colorimétrico 0,5, com NC=95%.

Cor: 0,5	Desvio padrão	Margem de erro	Média amostral	Média populacional
Rigidez dielétrica	16,197	5,796	59,273	53,477 < μ < 65,069
Índice de neutralização	0,022	0,008	0,022	0,014 < μ < 0,030
Teor de H ₂ O	2,151	0,770	6,167	5,397 < μ < 6,937
Tensão interfacial	5,537	1,981	40,223	38,242 < μ < 42,204

Tabela 9 - Intervalo de confiança para a média de grau colorimétrico 1,0, com NC=95%.

Cor 1,0	Desvio padrão	Margem de erro	Média amostral	Média populacional
Rigidez dielétrica	19,813	7,090	57,023	49,933 < μ < 64,113
Índice de neutralização	0,026	0,009	0,029	0,020 < μ < 0,038
Teor de H ₂ O	2,931	1,049	7,400	6,351 < μ < 8,449
Tensão interfacial	3,961	1,417	40,223	38,806 < μ < 41,640

Tabela 10 - Intervalo de confiança para a média de grau colorimétrico 1,5, com NC=95%.

Cor 1,5	Desvio padrão	Margem de erro	Média amostral	Média populacional
Rigidez dielétrica	22,515	8,057	56,096	48,039 < μ < 64,153
Índice de neutralização	0,019	0,007	0,031	0,024 < μ < 0,038
Teor de H ₂ O	2,748	0,983	7,967	6,984 < μ < 8,950
Tensão interfacial	4,304	1,540	32,573	31,033 < μ < 34,113

Tabela 11 - Intervalo de confiança para a média de grau colorimétrico 2,0, com NC=95%.

Cor 2,0	Desvio padrão	Margem de erro	Média amostral	Média populacional
Rigidez dielétrica	23,611	8,449	49,277	40,828 < μ < 57,726
Índice de neutralização	0,028	0,010	0,040	0,030 < μ < 0,050
Teor de H ₂ O	5,762	2,062	8,667	6,605 < μ < 10,729
Tensão interfacial	3,826	1,369	31,147	29,778 < μ < 32,516

Contudo, cabe ainda esclarecer o significado de $NC = 95\%$. Isto quer dizer que, ao coletar outras amostras com 30 elementos cada, segundo o grau de

coloração, 95% contemplariam o valor da média populacional μ indicado nas Tabelas de 8 a 11.

Com a finalidade de exemplificação, tomando-se a Tabela 8, e o teste de rigidez dielétrica, pode-se afirmar que a média aritmética populacional estará contida no intervalo (53,477 a 65,069) com um grau de confiança de 95%.

5.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A distribuição de Gauss, também conhecida como distribuição normal caracteriza-se por ser uma das ferramentas mais aplicadas na estatística indutiva. Isto decorre, pois o modelo matemático possibilita o cálculo de probabilidades dentro de certos limites a partir da equação 4.5.

Ao analisar esta equação, observa-se que para ter o conhecimento da probabilidade de ocorrência de uma variável contínua X é necessário ter o conhecimento prévio do valor da média e do desvio padrão, assim como da constante neperiana e .

Para a construção das curvas de Gauss foi utilizado o *software* Microsoft Excel. Este programa possui um pacote de ferramentas que auxiliam na construção de tabelas e gráficos. Contudo, este aplicativo não possui uma ferramenta dedicada exclusivamente para a construção destas curvas. Entretanto, é possível manusear os dados e com o auxílio do assistente de gráficos gerarem os gráficos de distribuição normal.

As Figuras de 16 a 31 apresentam os gráficos que estão dispostos de acordo com o grau de coloração de forma crescente. E, como classificação secundária, de acordo com as análises físicos-química.

Ao visualizar o gráfico, é possível identificar características típicas de um gráfico de distribuição normal. A principal se caracteriza pela curva em formato de sino e, ao prolongar-se pelo eixo das abscissas para $\pm\infty$, observa-se que a curva tende a zero. As escalas X e Z , também foram detalhadas, com o intuito de facilitar a assimilação dos valores probabilísticos a que se referem. Isto é possível, pois os valores padronizados para $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$ e $\pm 3\sigma$ são diretamente associados às probabilidades conhecidas (lembrando as equações 4.6, 4.7 e 4.8).

Outra característica importante destes gráficos remetem-se as áreas hachuradas. Essas áreas indicam porcentagens padronizadas, ou seja, no intervalo

de $\pm 1\sigma$ – coloração mais saturada – corresponde à porcentagem de 68,27%. Em relação ao intervalo $\pm 2\sigma$ – área hachurada em sua totalidade – corresponde a 95,45% das observações. E, por fim, a área restante que não se encontra hachurada, sendo que o intervalo de $\pm 3\sigma$ também está inserido neste intervalo. Os gráficos referentes às Figuras 16 a 31, também estão configuradas de modo semelhante, podendo ser interpretadas pela mesma análise.

A Figura 16 exibe as curvas de distribuição de Gauss para o teste de rigidez dielétrica segundo o grau de coloração 0,5. Observando-se a região hachurada – 26,880 a 91,667 – pode-se concluir que 95,45% das observações podem ser encontradas neste intervalo. Assim sendo, ao analisar outra amostra com laudos físico-químicos referentes ao teste de rigidez dielétrica com grau de coloração 0,5, 95,45% das amostras serão encontradas neste intervalo de valores.

De maneira similar, a Figura 17 reporta-se a curva normal referente ao teste de teor de água com graduação cromatográfica 0,5. Neste caso, a região hachurada no intervalo de 1,865 a 10,864 terão 95,45% de probabilidade de ocorrência. Caso se deseje diminuir este intervalo, pode-se delimitar a área hachurada com maior saturação, ou seja, no intervalo $\pm 1\sigma$, pode-se prever que 68,27% das amostras, encontrar-se-ão entre 4,016 a 8,318 ppm.

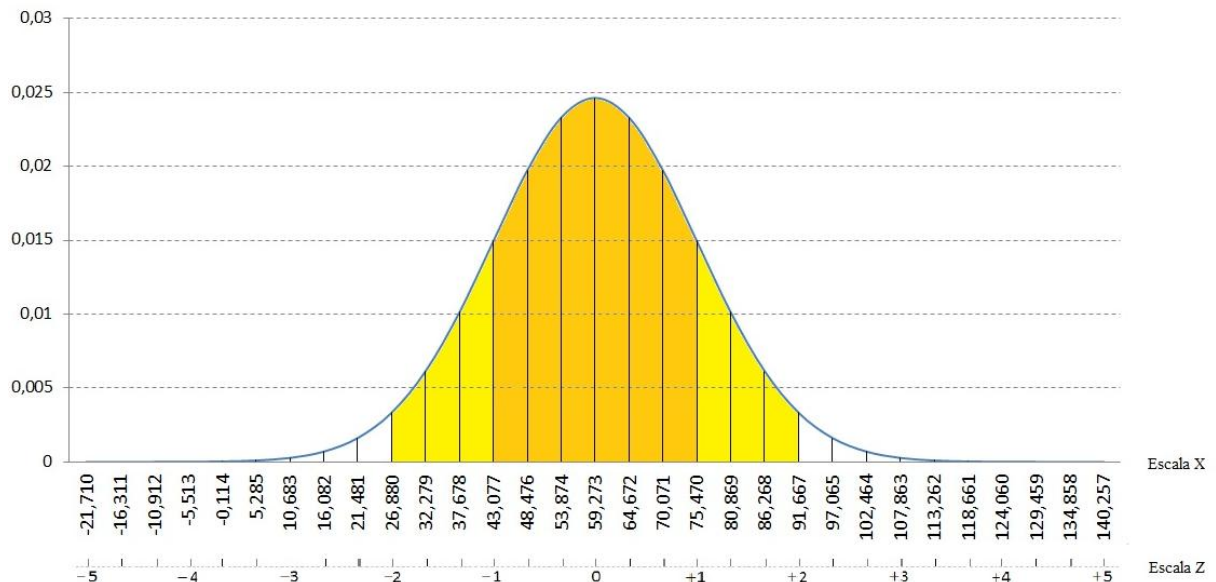


Figura 16 - Curva de Gauss para o teste de rigidez dielétrica na graduação cromatográfica: 0,5

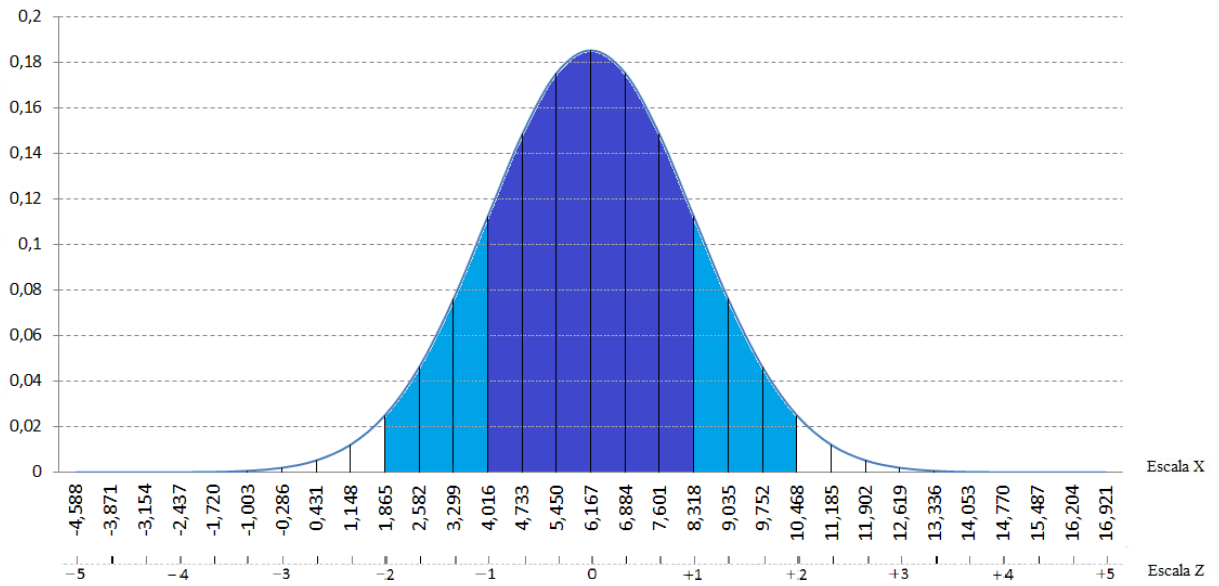


Figura 17 - Curva de Gauss para o teste de teor de água na graduação cromatográfica: 0,5

As Figuras 18 e 19 correspondem aos testes de tensão interfacial e índice de neutralização, respectivamente. Ambas correspondentes a graduação cromatográfica 0,5.

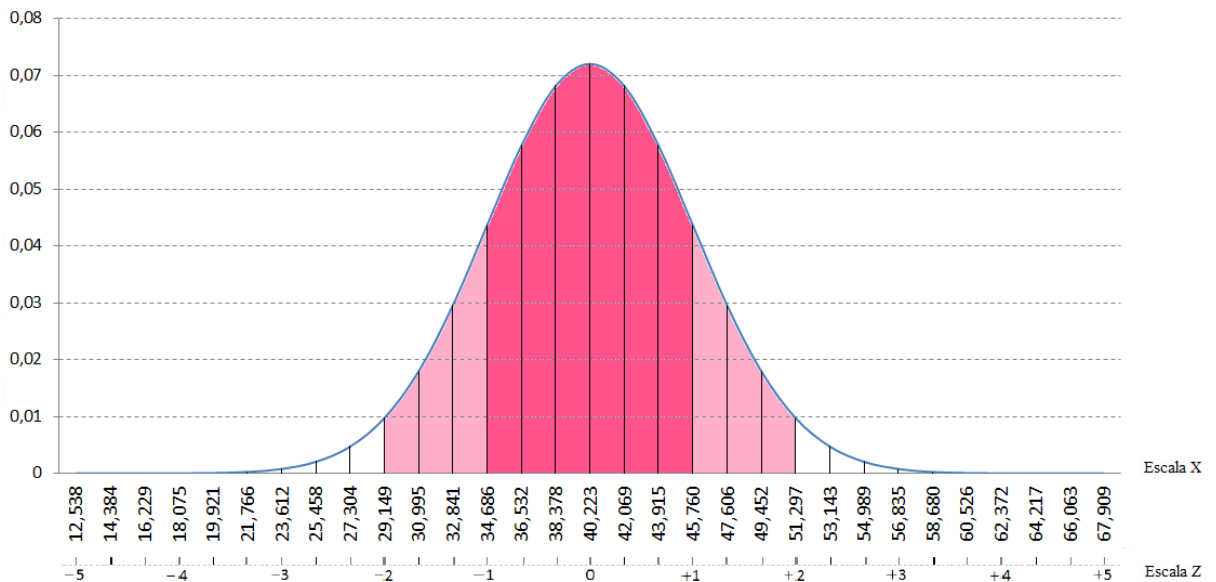
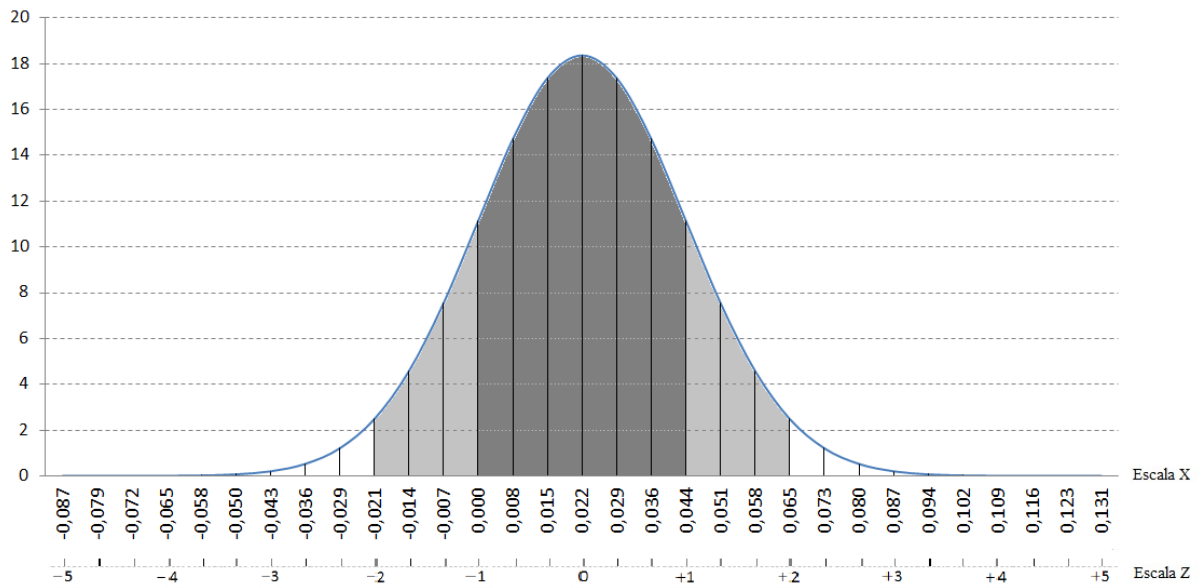
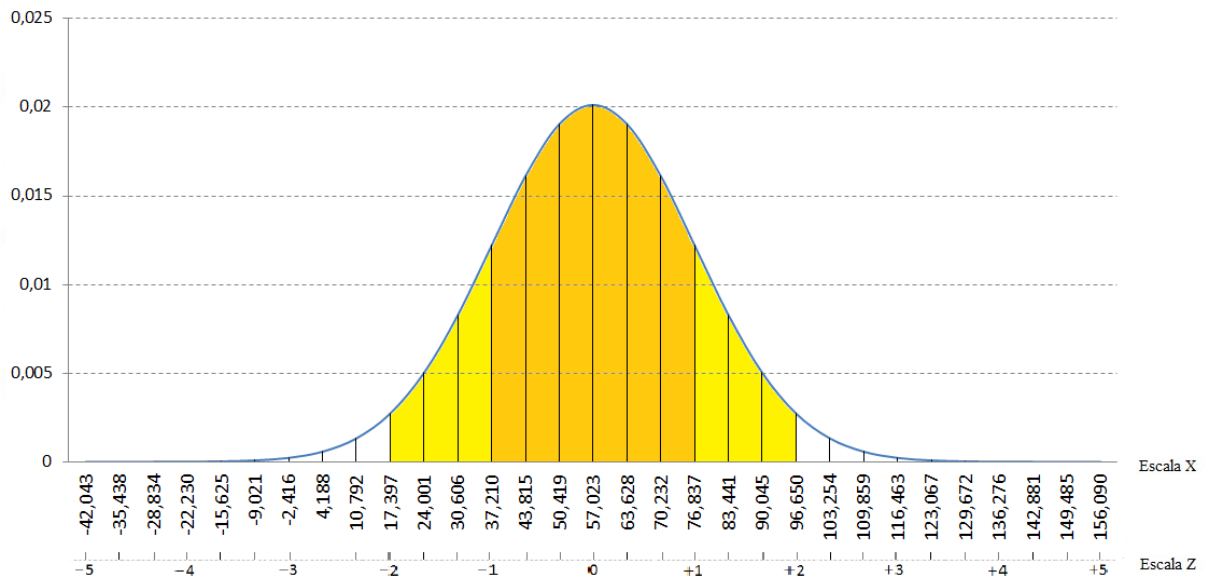


Figura 18 - Curva de Gauss para o teste de tensão interfacial na graduação cromatográfica: 0,5



As Figuras de 20 a 23 são curvas de Gauss com graduação de cor 1,0. Novamente, estes gráficos são dispostos segundo a análise físico-química, sendo dispostos na seguinte ordem: rigidez dielétrica, teor de água, tensão interfacial e índice de neutralização.



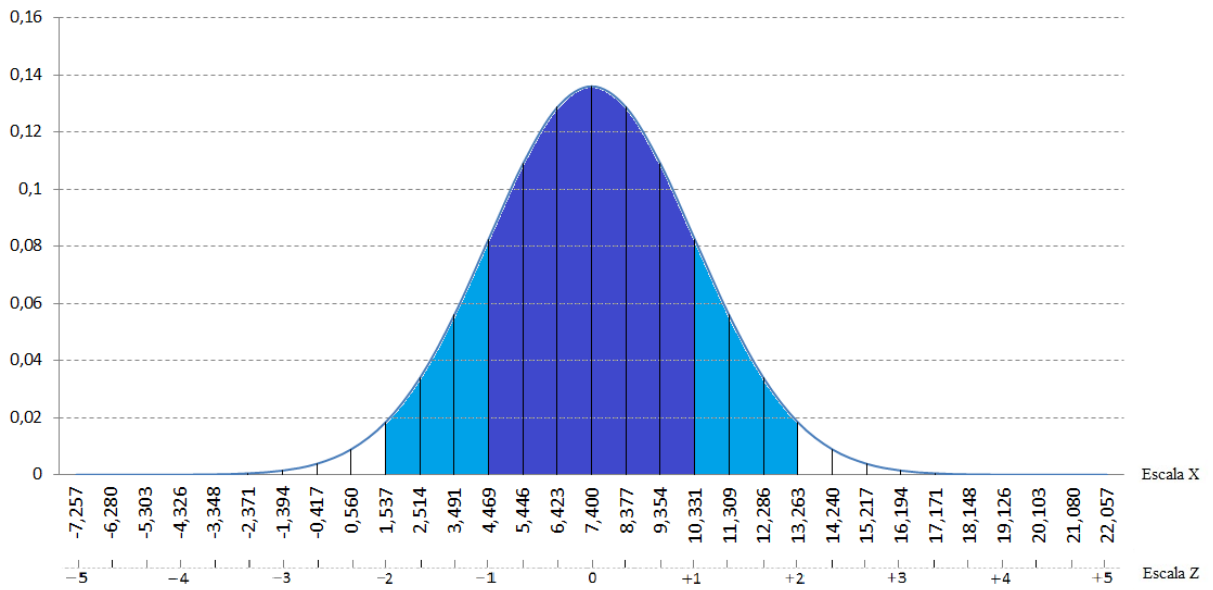


Figura 21 - Curva de Gauss para o teste de teor de água na graduação cromatográfica: 1,0

Cabe lembrar, que, com o auxílio das curvas de distribuição normal e a utilização de tabela especial (como a tabela padronizada da escala Z), é possível calcular as probabilidades dentro de certos limites, eliminando a tarefa de se realizar cálculos trabalhosos a todo tempo.

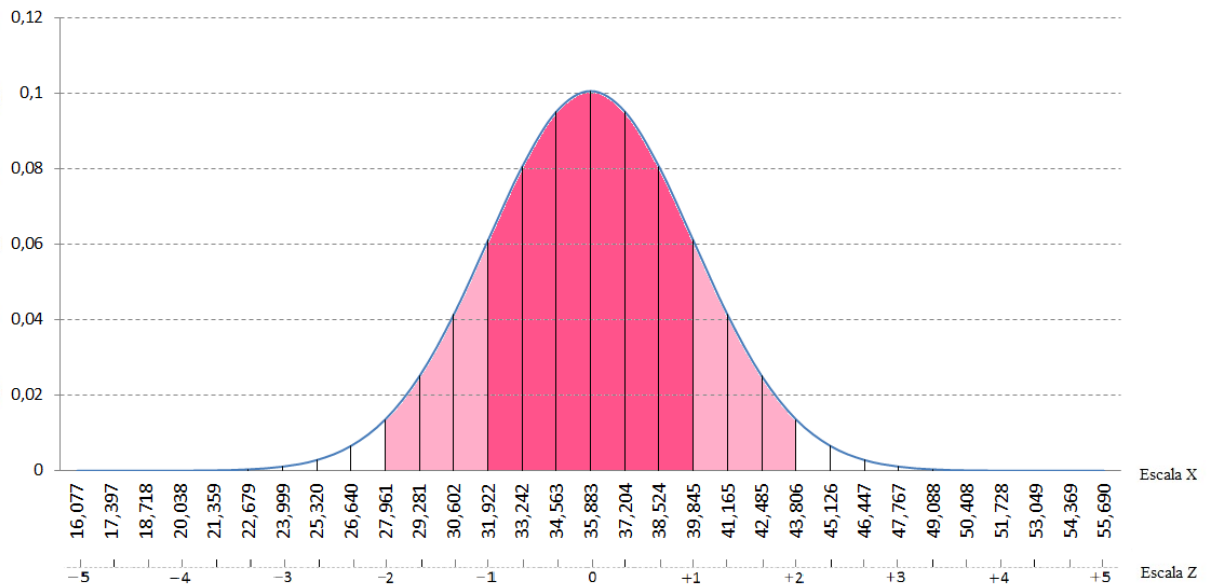


Figura 22 - Curva de Gauss para o teste de tensão interfacial na graduação cromatográfica: 1,0

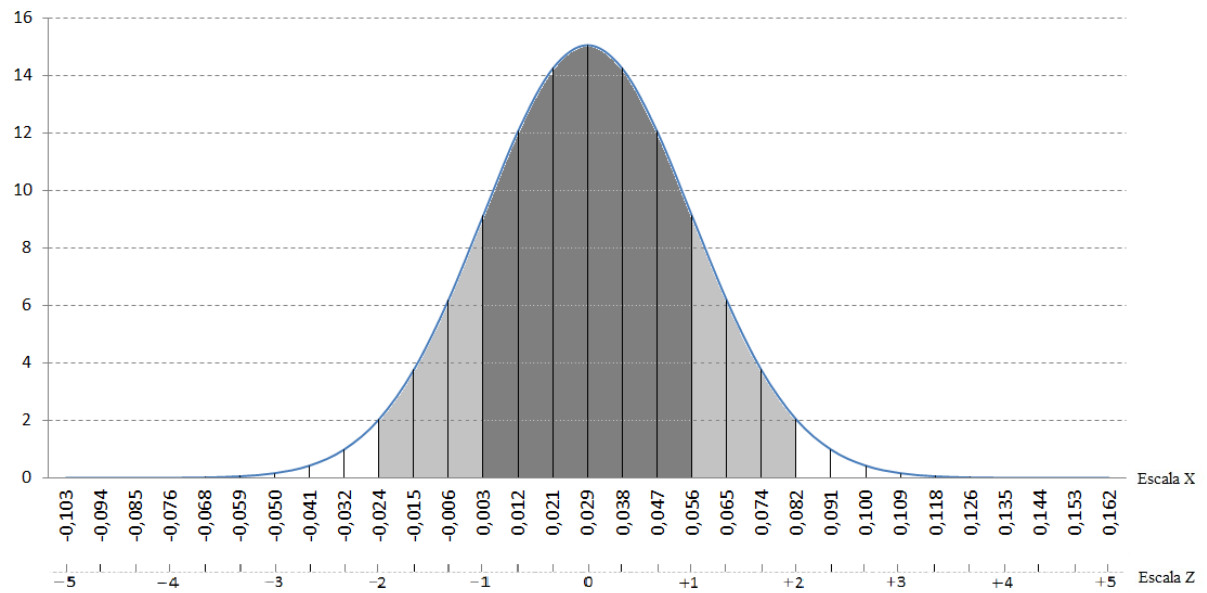


Figura 23 - Curva de Gauss para o teste de índice de neutralização na graduação cromatográfica: 1,0

Outra característica que também deve ser destacada consiste no fato de que, independente dos valores de μ e σ , os valores sob as curvas sempre manterão sua unidade de grandeza padrão.

As Figuras 24 a 27 são pertencentes às análises físico-químicos com intensidade de cor 1,5.

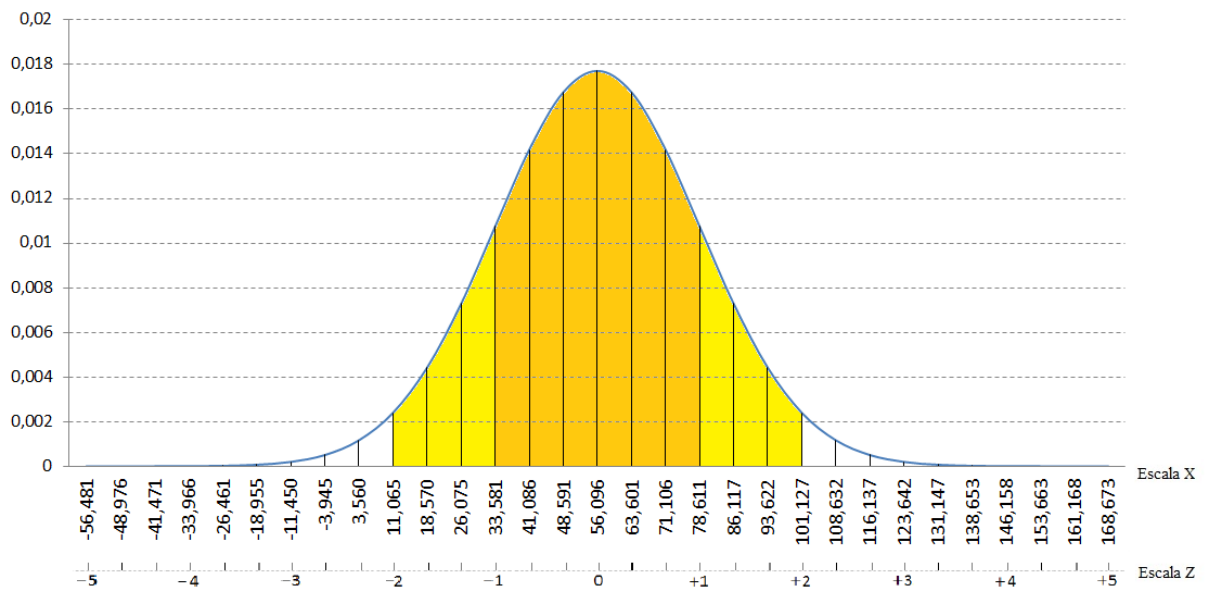


Figura 24 - Curva de Gauss para o teste de rigidez dielétrica na graduação cromatográfica: 1,5

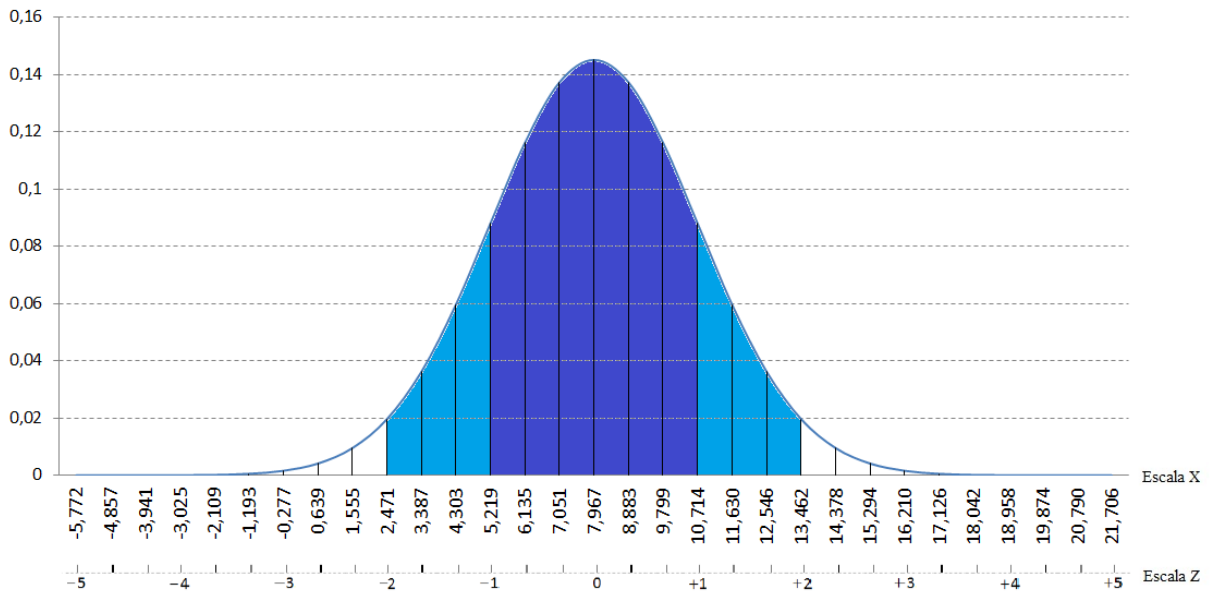


Figura 25 - Curva de Gauss para o teste de teor de água na graduação cromatográfica: 1,5

Caso seja necessário ter o conhecimento de diferentes probabilidades, munindo-se da equação 4.9, é possível transformar a variável da escala X em um valor da escala Z. Basta então, utilizar a tabela do anexo B e verificar qual o valor correspondente.

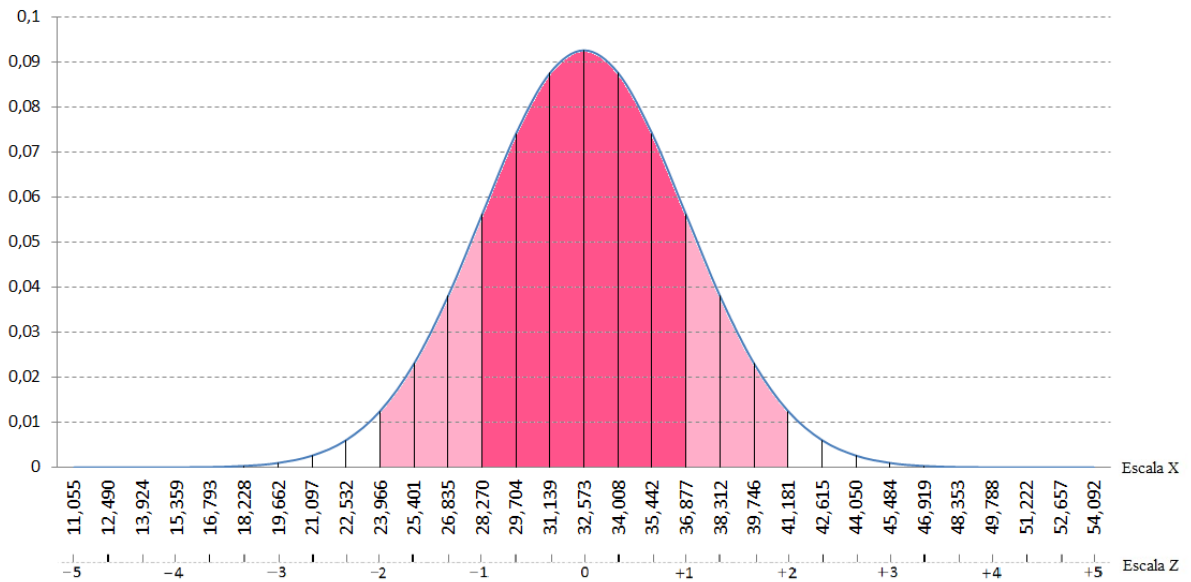


Figura 26 - Curva de Gauss para o teste de tensão interfacial na graduação cromatográfica: 1,5

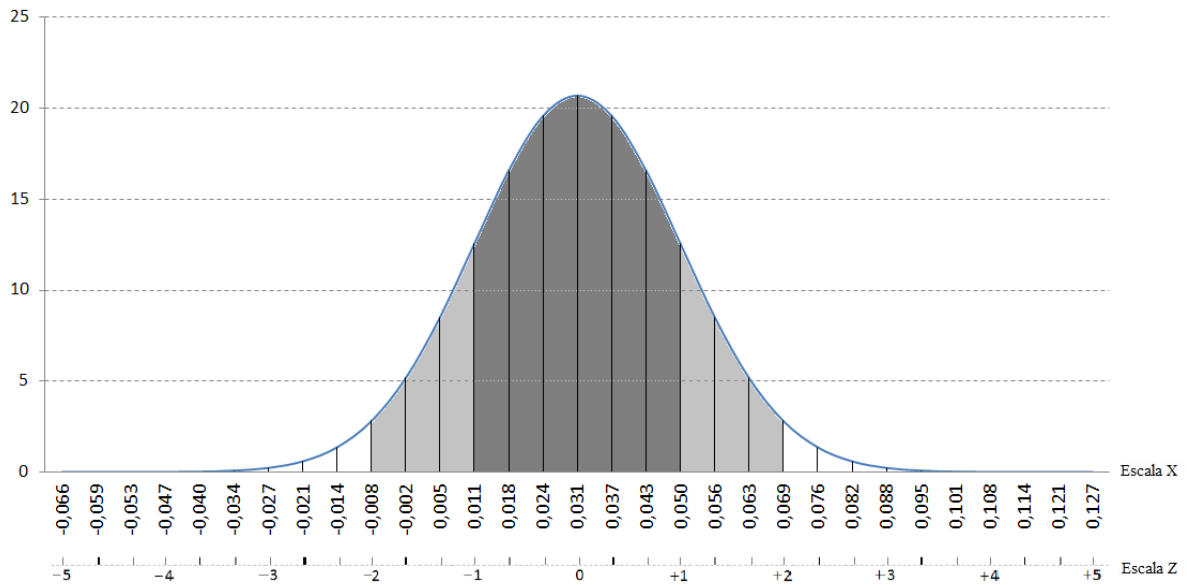


Figura 27 - Curva de Gauss para o teste de índice de neutralização na graduação cromatográfica: 1,5

As Figuras de 28 a 31 são pertencentes aos gráficos de graduação cromatográfica 2,0.

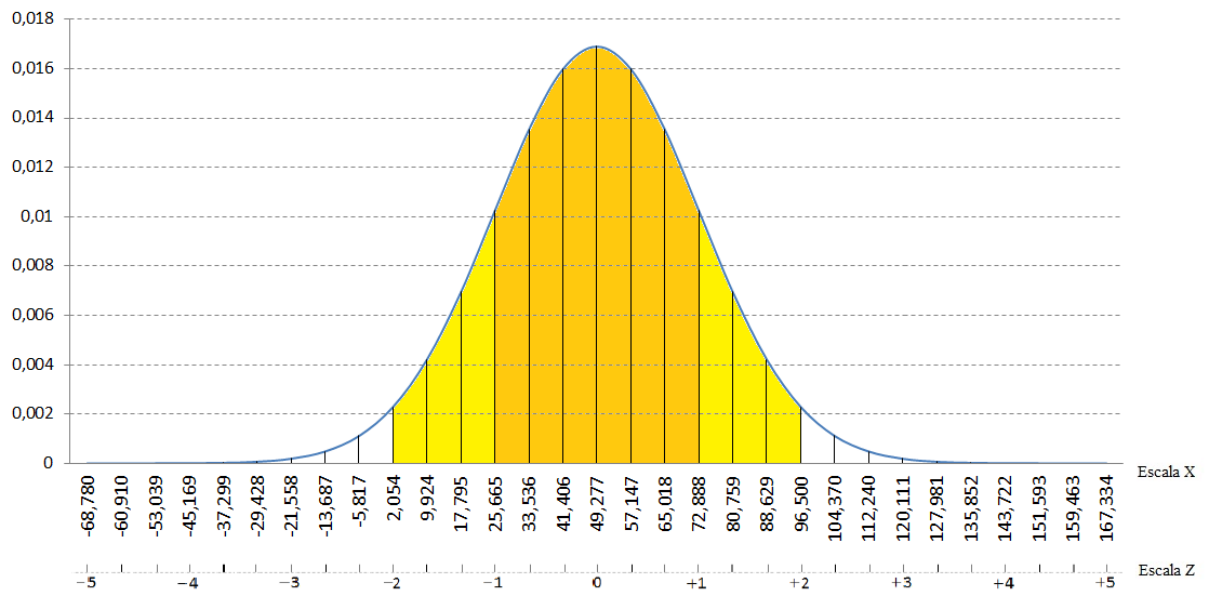


Figura 28 - Curva de Gauss para o teste de rigidez dielétrica na graduação cromatográfica: 2,0

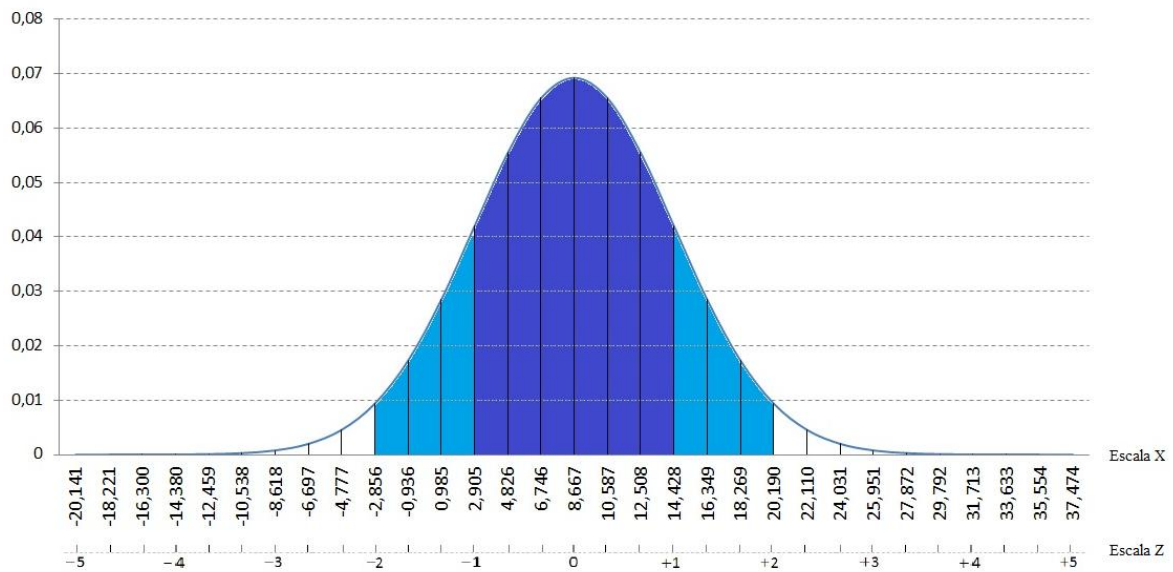


Figura 29 - Curva de Gauss para o teste de teor de água na graduação cromatográfica: 2,0

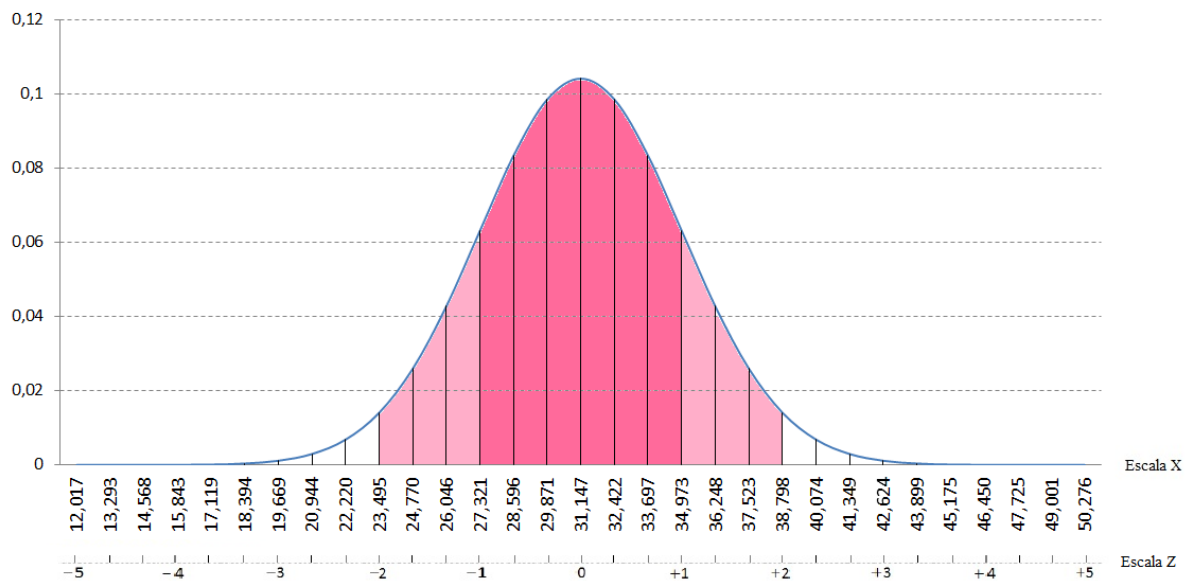


Figura 30 - Curva de Gauss para o teste de tensão interfacial na graduação cromatográfica: 2,0

Ao analisar os gráficos, pode-se observar que o valor de pico ocorre quando a variável X é igual ao valor de μ - quando a derivada primeira é igual à zero. A equação 4.5 é então reduzida para $(\sigma\sqrt{2\pi})^{-1}$. Assim, pode-se constatar que $f(x)$ é inversamente proporcional ao desvio padrão σ , sendo que é esta variável que determina a forma da curva, ou seja, quanto maior o valor, maior será o achatamento de sua distribuição normal, indicando valores mais dispersos da média. Por outro lado, quanto menor o valor, mais esguia a curva se apresentará,

representando a concentração dos valores de X nas proximidades do valor da média.

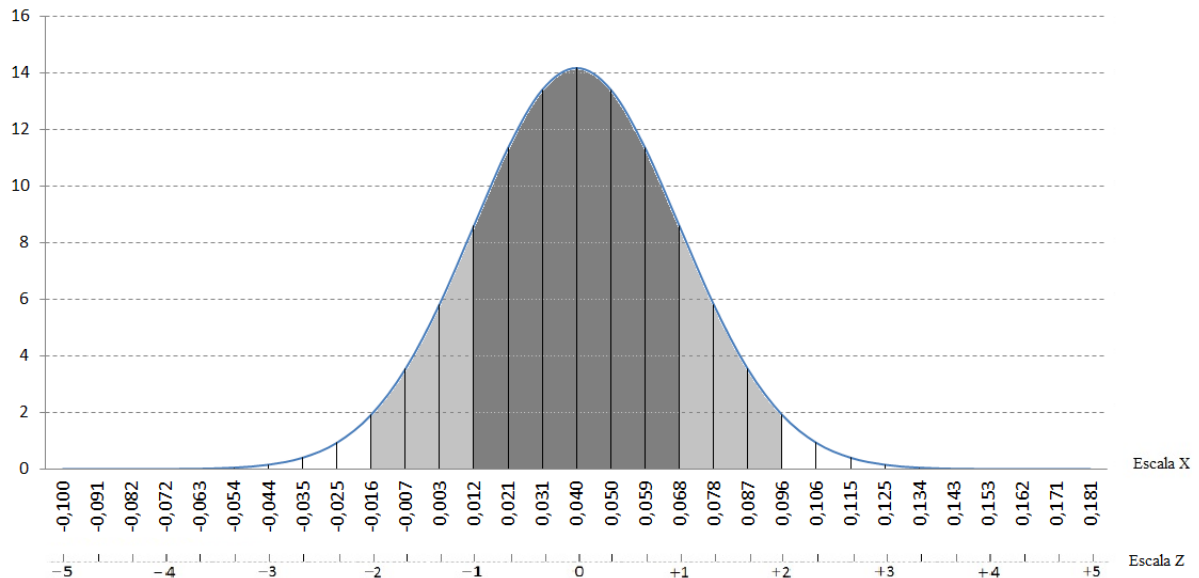


Figura 31 - Curva de Gauss para o teste de índice de neutralização na graduação cromatográfica: 2,0

Ao analisar e confrontar os gráficos relativos ao teste de rigidez dielétrica é possível observar que suas amostras apresentam-se mais dispersas à medida que o grau de coloração do óleo é incrementado. Isto é um fator justificável, pois, uma vez que o isolante dielétrico é degradado, maiores são as incidências de partículas de H_2O , de produtos provenientes do próprio óleo e da degradação dos componentes internos do transformador. O conjunto destes fatores acaba refletindo na característica gráfica, a qual se apresenta mais achatada. Além disso, outro fator preponderante que influencia na maior dispersão amostral, consiste na diminuição da média da rigidez dielétrica. Isto ocorre, pois esta medida apresenta-se menor, caso um grupo dos elementos contituíntes apresentem valores menores ou, caso alguns indivíduos isolados, apresentem valores demasiadamente pequenos.

Em relação aos gráficos de tensão interfacial, nota-se que ocorre o inverso dos parâmetros de rigidez dielétrica, ou seja, os gráficos apresentam-se menos dispersos conforme ocorre o aumento da pigmentação do óleo. Fator este, que justifica a concentração dos elementos em torno de uma média e confirma o motivo dos gráficos de tensão interfacial apresentar-se com picos mais elevados, pois, pigmentações mais concentradas do óleo mineral, indicam maior grau de

contaminação. Entretanto, ressalta-se que, apesar destes gráficos apresentarem valores mais altos para a distribuição normal, não quer dizer que as médias dos testes de tensão interfacial, seguiriam o mesmo padrão, pois de acordo com seu caráter físico-químico, o TIF deve diminuir.

Já os gráficos de teor de água e índice de neutralização, infelizmente, não se podem concluir muito a respeito de sua distribuição normal. Ambos apresentam-se ora mais dispersos ora menos. Estes resultados podem ter sido influenciados pelo fato dos isolantes dielétricos terem sido submetidos a processos de secagem, regeneração ou aditivação. Posturas comuns a nível industrial, para a manutenção preventiva de transformadores, uma vez que o descarte indiscriminado do OIM, além de aumentar muito o custo para manutenção do trafo, influencia também na degradação ambiental. Contudo, pode-se observar que as médias de ambas as características físico-químicas, aumentam em decorrência do escurecimento do óleo mineral. Confirmando mais uma vez, o que foi apresentado na literatura.

5.4 VALIDAÇÃO DAS HIPÓTESES DE NORMALIDADE

Esta seção tem por objetivo realizar uma abordagem evidenciando o conjunto de características levantadas segundo a teoria de distribuição normal e, desta forma, avaliar a eficiência e aplicabilidade destas técnicas frente à classificação das amostras de óleos isolantes minerais segundo os testes físico-químicos que foram aplicados. O levantamento de dados foi fundamentado pelo teorema do limite central, na qual, para uma distribuição normal, 30 elementos aleatórios comporiam satisfatoriamente uma amostra. Provido dos dados amostrais, foram gerados os gráficos das Figuras 16 a 31.

É possível verificar a semelhança com a curva fornecida pela literatura na Figura 14, cuja sinuosidade pode ser prontamente verificada em todos os gráficos. Outra característica também inerente à teoria de distribuição normal pode ser observada no intervalo de $\pm 1\sigma$, ou seja, 68,27% das amostras deveriam ser encontradas nesta faixa de dados. Para tanto, 30 elementos amostrais, 20,47 elementos deveriam ser encontrados no intervalo definido.

Assim, tomando-se por base o gráfico de rigidez dielétrica com cromatografia 0,5, verifica-se que 20 amostras estão contidas no intervalo definido, representando um valor muito próximo ao que o modelo teórico determina. De

semelhante modo, estes cálculos podem ser aplicados aos outros conjuntos amostrais. Para facilitar a visualização do leitor, as Tabelas 12 e 13 foram construídas. A primeira coluna indica os testes físico-químicos avaliados, as colunas 2 a 5 referem-se aos números de indivíduos segundo o grau de cromatografia, conforme indicado na primeira linha.

Ao analisar a Tabela 12, constata-se que os dados que mais divergiram dos padrões para a distribuição normal, foram os testes de rigidez dielétrica e o teste de tensão interfacial. Pode-se ainda, verificar que estes dados mostraram-se ainda mais dispersos conforme se aumenta a saturação da cor do OIM. Novamente, ao considerar a degradação do dielétrico e a sua contaminação, o que influencia diretamente na diminuição de destas duas características físico-químicas.

Tabela 12 - Número de elementos contidos no intervalo $\pm 1\sigma$

Cromatografia	0,5	1,0	1,5	2,0
Rigidez dielétrica	20	20	15	16
Teor de água	24	23	22	22
Tensão interfacial	23	21	19	17
Índice de neutralização	27	25	25	19

Em relação aos dados apresentados pela Tabela 13, nota-se que os valores são mais concisos, pois apenas em uma amostra, o teste se afastou significativamente do esperado pela teoria.

Tabela 13 - Número de elementos contidos no intervalo $\pm 2\sigma$

Cromatografia	0,5	1,0	1,5	2,0
Rigidez dielétrica	29	28	30	30
Teor de água	29	29	28	29
Tensão interfacial	28	29	29	29
Índice de neutralização	28	27	29	30

Entretanto estes dados, expressam-se de uma maneira geral, bastante coerentes, visto que ocorre uma forte interação entre as quatro características destacadas.

Outro aspecto que também é intrínseco ao modelo matemático de normalidade, remete-se aos eixos das abcissas, as quais são prolongadas para $\pm\infty$.

Pode-se observar que o *software* Excel avaliou valores muito próximos de zero (2×10^{-3}), comprovando a proximidade da curva em relação ao eixo horizontal.

Perante os resultados apresentados, pode-se considerar que o comportamento é condizente ao modelo matemático de distribuição normal. De fato, devem-se levar em consideração as divergências existentes, mas, considerando-se a correlação entre os dados amostrais e, principalmente, o fato de ser um sistema real, os resultados apresentados são satisfatórios, uma vez que os gráficos apresentaram as características de distribuição normal bem definidas.

5.5 SÍNTESE DE RESULTADOS

Diante do exposto, torna-se possível a construção das tabelas 14 a 17, as quais sintetizam os dados avaliativos do OIM referente a cada ensaio físico-químico de acordo com a graduação cromatográfica. Na primeira coluna, são discriminados os testes físico-químicos avaliados. A segunda e terceira colunas apresentam as médias amostrais e médias populacionais, respectivamente. A quarta coluna apresenta os valores considerados aceitáveis segundo a normatização da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e a quinta, apresenta as unidades de medidas. Com isso é possível verificar, segundo a classificação cromatográfica, as médias populacionais e compará-las com os valores estabelecidos pela ANP.

Ao analisar os valores das médias amostrais dos ensaios físico-químicos, observa-se que a partir da graduação cromatográfica 1,0, as amostras devem ser submetidas aos testes analíticos. Isto pode ser observado ao averiguar as médias amostrais, as quais se encontram próximos aos limites estabelecidos pela ANP. Porém, ao analisar a média populacional, constata-se que os índices de tensão interfacial e teor de água podem apresentar-se fora dos padrões estabelecidos.

Da mesma maneira, ao verificar as graduações 1,5 e 2,0, verifica-se que os valores demonstram-se mais distantes dos níveis referenciados conforme ocorre a saturação cromatográfica do OIM, o que torna possível deduzir que óleos com coloração acima do grau 1,0 devem ser submetidos às análises avaliativas.

Tabela 14 – Médias populacionais para grau cromatográfico 0,5

Cor: 0,5	Média amostral	Média populacional	Referência	Unidade
Rigidez dielétrica	59,273	53,477 < μ < 65,069	42 (min)	[kV]
Índice de neutralização	0,022	0,014 < μ < 0,030	0,03 (máx)	[mgKOH/g]
Teor de H ₂ O	6,167	5,397 < μ < 6,937	8 (máx)	[ppm]
Tensão interfacial	40,223	38,242 < μ < 42,204	40 (min)	[mN/m]

Tabela 15 - Médias populacionais para grau cromatográfico 1,0

Cor 1,0	Média amostral	Média populacional	Referência	Unidade
Rigidez dielétrica	57,023	49,933 < μ < 64,113	42 (min)	[kV]
Índice de neutralização	0,029	0,020 < μ < 0,038	0,03 (máx)	[mgKOH/g]
Teor de H ₂ O	7,400	6,351 < μ < 8,449	8 (máx)	[ppm]
Tensão interfacial	40,223	38,806 < μ < 41,640	40 (min)	[mN/m]

Tabela 16 - Médias populacionais para grau cromatográfico 1,5

Cor 1,5	Média amostral	Média populacional	Referência	Unidade
Rigidez dielétrica	56,096	48,039 < μ < 64,153	42 (min)	[kV]
Índice de neutralização	0,031	0,024 < μ < 0,038	0,03 (máx)	[mgKOH/g]
Teor de H ₂ O	7,967	6,984 < μ < 8,950	8 (máx)	[ppm]
Tensão interfacial	32,573	31,033 < μ < 34,113	40 (min)	[mN/m]

Tabela 17 - Médias populacionais para grau cromatográfico 2,0

Cor 2,0	Média amostral	Média populacional	Referência	Unidade
Rigidez dielétrica	49,277	40,828 < μ < 57,726	42 (min)	[kV]
Índice de neutralização	0,040	0,030 < μ < 0,050	0,03 (máx)	[mgKOH/g]
Teor de H ₂ O	8,667	6,605 < μ < 10,729	8 (máx)	[ppm]
Tensão interfacial	31,147	1,771 < μ < 4,509	40 (min)	[mN/m]

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A idealização deste trabalho foi motivada pela dificuldade enfrentada pelos manutentores em se avaliar as condições do óleo isolante mineral quando em campo de trabalho. O principal objetivo consistiu, basicamente, na proposição de uma ferramenta de avaliação confiável que permitisse uma estimativa rápida das condições do OIM.

Para tanto, foi apresentado primeiramente, um estudo conceitual a respeito dos líquidos isolantes, informando suas composições e características físico-químicas, seus efeitos no meio ambiente e sua aplicabilidade. No Capítulo 2, foi explanado sobre as metodologias aplicadas, segundo normas da ABNT, como ferramentas avaliativas do OIM. Dentre elas, o teste de cromatografia, rigidez dielétrica, tensão interfacial, teor de água e índice de neutralização. Estes testes foram separados segundo o seu teste cromatográfico para classificação geral das amostras, em sequência avaliou-se os testes de rigidez dielétrica, tensão interfacial, teor de água e índice de neutralização, fazendo-se o uso de ferramentas estatísticas. O modelo matemático escolhido para tratamento de dados foi a inferência estatística, cuja gama de métodos e conceitos proporcionou as diretrizes para a confecção deste trabalho.

Em relação aos dados, necessitou-se adquiri-los de empresas especializadas na avaliação das características físico-químicas. Isto é justificável devido ao alto grau metodológico na coleta e condução dos testes, os quais, uma vez não respeitados, poderiam influenciar grandemente os resultados finais. Foi possível a obtenção de 120 laudos, os quais satisfazem a grandeza amostral suficiente para avaliar as quatro primeiras graduações cromatográficas do OIM, ou seja, de 0,5 a 2,0.

Com a utilização dos dados coletados, foram obtidos as medidas de posição central e medidas de dispersão para os testes de rigidez dielétrica, tensão interfacial, teor de água e índice de neutralização. Utilizando-se as medidas de posição central, possibilitou-se a observação da característica tendenciosas das análises. Por sua vez, as medidas de dispersão, apresentaram uma estimativa da variabilidade amostral. Tendo o conhecimento de tais dados, foi efetuada a construção dos gráficos de distribuição normal ou gaussiana, os quais permitem a

estimação probabilística de se encontrar uma amostra em uma determinada população, dentro de um grau de confiança previamente estipulado.

Como resultado, foram possíveis às sínteses de tabelas de médias populacionais, dispostos na seção 5.5. Estas tabelas podem se caracterizar como um guia prático para os manutentores se fundamentarem ao visualizarem a cor apresentada pelo OIM, uma vez que a tabela apresenta um intervalo parametral populacional estimado segundo seu grau de coloração. Além disso, colabora com a confiabilidade desta estimativa, podem-se utilizar as curvas de Gauss, apresentadas nas Figuras 16 a 31, as quais confirmam a característica distributiva normal dos elementos amostrais para todas as análises levantadas.

Ao analisar as Tabelas 14 a 17, pode-se concluir que a partir da graduação cromatográfica 1,0 os óleos isolantes mineirais devem ser submetidos a análises experimentais para avaliar suas condições físico-químicas. Constata-se também, que na medida em que ocorre a saturação cromatográfica as características físico-químicas apresentam-se mais deterioradas. Pode-se então, deduzir que em níveis acentuados de coloração o óleo isolante mineral apresenta níveis intoleráveis de utilização.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

As perspectivas de trabalhos futuros contemplam a realização destas análises para graduações do OIM acima da graduação cromatográfica 2,0, as quais contribuiriam com a construção mais detalhada dos critérios avaliativos do OIM em campo.

Além disso, poderia se simular o envelhecimento laboratorial do OIM sob um ambiente climatizado, o qual simularia as condições de operação de um transformador refrigerado a óleo. Cabe também a utilização de outras ferramentas para análises paramétrais, uma vez que os dados amostrais possuem grande interação físico-química.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP N°36**. Rio de Janeiro, 2008.

AMERICAN STANDARD FOR TESTING METHOD. **ASTMD1524**: Visual Examination of used electrical insulating oils of petroleum origin in the field. EUA, 1999.

ANTONELLO, I.; HUMERES, E.; SOUZA, I. G.; DEBACHER, N. A. Determinação de ascarel em óleo isolante de transformadores. **Revista química nova**, Vol. 30, No. 3, p 709-711, 2007.

ARANTES, J. G. Diagnóstico de Falhas em Transformadores de Potência pela Análise de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante Através de Redes Neurais. 115f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6234**: Método de tensão interfacial. Rio de Janeiro, 1965.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6869**: Líquidos isolantes elétricos – Determinação da rigidez dielétrica (eletrodos de disco). Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR8840**: Guia para amostragem de líquidos isolantes. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10576**: Guia para acompanhamento de óleo mineral isolante de materiais elétricos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10710**: Líquido isolante elétrico – Determinação do teor de água. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14248**: Produtos do petróleo – Determinação do número de acidez e basicidade – Método do indicador. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14248**: Líquidos isolantes elétricos – Determinação da rigidez dielétrica à frequência industrial. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14483**: Determinação da Cor – Método do cromatográfico ASTM. Rio de Janeiro, 2005.

BAPURAMASHIVA, U.; CHAUDHARI, S.; BHATIA, A. K. Experimental investigation of iso-paraffinic oil for application in high voltage power transformers. **Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceedings of the 10th International Conference on, IEEE**, p 24-28, 2012.

BINGENHEIMER, D.; DEL FIACCO E.; RAPP, K. Benefícios do Uso de Fluidos de Ésteres Naturais nos Sistemas de Isolamento. **21º Congresso internacional de redes elétricas de distribuição**. Frankfurt, Alemanha, 2011.

BOLFARINE, H.; SANDOVAL, M. C. **Introdução à inferência estatística**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Matemática, 2010.

BUSSAB, W. de O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 7. ed. São Paulo: Saraiva, 2011.

CARRETEIRO, R. P.; MOURA, C. R. S. **Lubrificantes e lubrificação**. Rio de Janeiro: LTC, 1975.

CARDOSO, P. M. **Adaptação de um sistema de medição de gases dissolvidos em óleo mineral isolante para monitoramento**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005

CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 4a ed. Nova York: McGraw-Hill, 2005.

COELHO, A. N. **Determinação de bifenilas policlorados em leite em pó e ingestão diária estimada para pré-escolas**. 80f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Santa Maria. Santa Maria, 2010.

FALCO, J. G. **Estatística aplicada**. Cuiabá: EdUFMT. Curitiba: UFPR, 2008

FINOCCHIO, M. A. F. **Ascarel um risco ocupacional e suas alternativas de substituição**. 52f. Monografia (Especialização) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 1997.

FINOCCHIO, M. A. F. **Determinação da Temperatura de Enrolamentos de transformadores a Seco e de suas Perdas Totais Baseado em Redes Neurais Artificiais**. 99f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2010.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com introdução a Eletrônica de Potência**. 6a ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FOFANA, I.; N'CHO, J. S.; OLIVARDES-GALVAN, J. C.; ESCARELA-PEREZ, R.; GEORGELAKIS, P. S. **Comparative studies of the stabilities to oxidation and electrical discharge between ester fluids and transformer oils**. North American Power Symposium, EUA, 2011.

FRANCH, V. S. **Avaliação da compatibilidade de óleos vegetais isolantes com materiais internos do transformador**. 128f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

GOMES, A. L. **Desenvolvimento e aplicação de espumas uretânicas para absorção de bifenilas policloradas em óleo mineral isolante**. 117f. Dissertação (Mestrado Profissional) – Instituto de Engenharia do Paraná. Curitiba, 2006.

GUIMARÃES, R. C.; CABRAL, J. A. S. **Estatística**. 2a ed. Espanha: McGraw-Hill, 2007.

KRISHNAMOORTHY, P. R.; KRISHNANWAMY, K. R.; VIJAYAKUMARI, S. KUMAR, K. Ageing of mineral oils: a diagnostic study. **Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceedings of the 3rd International Conference on, IEEE**, Vol. 1, p 59-62, 1991.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. 4a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LAURENTINO, A. C. **Estudo do comportamento da oxidação de óleo mineral isolante**. 36f. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

LEOPOLDINO, R. **Estudos sobre Gases Dissolvidos em Óleos Vegetais Isolantes. Influência de Arco Elétrico e Superaquecimento**. 89f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Paulo/Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011

LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística: teoria e aplicações usando Microsoft Excel em português**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

HUBERT, C. I. **Electric machines: theory, operation, applications, adjustment and control**. 2a ed. Índia: Pearson Education, 2009.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MESSIAS, J. R. **Guia prático de ensaios físico-químicos na manutenção de transformadores em óleo**. São Paulo: Ícone, 1993.

MILASCH, M. **Manutenção de transformadores em líquidos isolante**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MORA, J. F. **Máquinas Eléctricas**. 5a ed. Madrid: McGraw-Hill, 2003.

MORAIS, D. R. **Ferramenta inteligente para detecção de falhas incipientes em transformadores baseada na análise de gases dissolvidos no óleo isolante**. 112f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V. **High Voltage Engineering**. 2a ed. EUA: McGraw-Hill, 1996.

OLIVEIRA, J. C. de; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. de. **Transformadores: teoria e ensaios**. 1a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

POLLITT, A. A. Mineral oils for transformers and switchgear. **Electrical Engineers – Part I: General, Journal of the Institution of, IEEE**, Vol. 89, No. 20, p 366 – 367, 1942.

RAS, E. **Transformadores de potencia, de medida y de protección**. 7a ed. Espanha: Vanguard Gràfic, 1991.

ROSSETTI, J. P.; GALVÃO, A.; BRESSAN, A. A.; et al. **Finanças corporativas**. Teoria e prática empresarial no Brasil. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

ROUSE, T. O. Mineral Insulating Oil in Transformers. **Electrical Insulation Magazine, IEEE**, Vol. 14, No. 3, p 6-16, 1998.

SCHMIDT, W. **Materiais Eléctricos: Isolantes e Magnéticos**. Vol. 2. 3a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

SILVA, C. R.; CARVALHO, M. W. N. C.; CONRADO, L. S.; FOOK, M. V. L.; LEITE, K. P. S. Caracterização físico-química e dielétrica de óleos biodegradáveis para

transformadores elétricos. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol. 16, No. 2, p. 229-234, 2012.

STOCCO, M. B. C. **Avaliação do Potencia de Aplicação de Óleos Vegetais Como Fluidos Isolantes em Transformadores de Distribuição da Rede Elétrica**. 129f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009

TARDIVO, M. A. **Uma aplicação de redes neurais artificiais para estimação da elevação de temperatura de transformadores monofásicos de distribuição imersos em líquido isolante**. 103f. Dissertação (Pós-graduação). Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2012.

TAVARES, M. **Estatística aplicada à administração**. Departamento de ciências da administração. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

THOMAZ, M. S.; LIMA, I. A.; ROMANO, C. A.; OLIVEIRA, I. L.; STADLER, C. C.; GUEIBER, D. Aspectos sobre responsabilidade ambiental e tratamento de resíduos de óleo isolante mineral em uma empresa de energia elétrica do sul do Brasil. **IX Simpósio Internacional Processo Civilizador**. Brasil, 2005.

WILHELM, H. M.; TULIO, L.; UHREN, W. Produção e uso de óleos vegetais isolantes no setor elétrico. **Revista Engenharia**, No. 592, p. 120-124, 2009.

ANEXO A

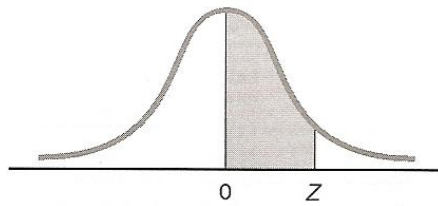
Classificação cromatográfica: 0,5			
Rigidez Dielétrica	Tensão Interfacial	Teor de água	Índice de Neutralização
26,7	28,2	2	0,003
29,1	28,9	3	0,003
30,1	29,2	3	0,003
41	31,1	3	0,003
43,3	31,5	4	0,003
43,9	32,1	4	0,003
50,8	36,7	4	0,003
51	39	4	0,003
52	39,8	4	0,006
52,8	39,8	5	0,006
53,2	41,4	5	0,008
53,8	42	6	0,011
56,4	42	6	0,011
57,8	42,2	7	0,011
58	42,2	7	0,02
60	42,4	7	0,022
60,3	42,5	7	0,023
62,3	42,9	7	0,023
62,3	43,1	7	0,025
62,7	43,2	7	0,025
64,2	43,4	7	0,027
70,2	43,4	8	0,029
71,1	43,6	8	0,031
73,1	44,1	8	0,032
78,6	44,6	8	0,034
80	44,8	8	0,035
81,6	45,3	8	0,041
82,4	45,3	8	0,045
83,2	45,5	9	0,076
86,3	46,5	11	0,095

Classificação cromatográfica: 1,0			
Rigidez Dielétrica	Tensão Interfacial	Teor de água	Índice de Neutralização
12,8	27,9	4	0,003
14,2	29,1	4	0,006
21	30,2	4	0,006
42	31	4	0,006
42	31,1	4	0,006
42,5	32,5	5	0,008
44,8	33	5	0,008
45	33,1	5	0,008
45	33,7	5	0,01
46,4	33,9	6	0,011
50,9	34,3	6	0,011
53,7	34,4	6	0,014
54	34,8	6	0,014
55	35,2	6	0,017
57,1	35,4	7	0,017
60,8	35,7	7	0,019
61,8	36,6	8	0,02
62	37,7	8	0,025
62	37,9	8	0,029
62,1	37,9	8	0,031
62,4	38,2	8	0,031
63	38,5	9	0,041
72,3	38,7	10	0,048
79	38,8	10	0,048
81	39,2	10	0,053
82	39,3	10	0,062
82	40,7	10	0,07
82	41,5	10	0,083
83,9	42,3	12	0,084
88	43,9	17	0,093

Classificação cromatográfica: 1,5			
Rigidez Dielétrica	Tensão Interfacial	Teor de água	Índice de Neutralização
16,9	24,9	4	0,008
18,3	25,9	4	0,011
23,6	26,9	4	0,011
23,9	27,3	5	0,011
24	27,5	5	0,011
24,5	28,8	5	0,011
30,8	28,8	6	0,012
42,8	29,3	6	0,014
43,4	29,4	6	0,017
50,7	29,5	6	0,02
52,08	29,6	7	0,022
53,2	31,3	7	0,023
56	31,4	7	0,025
56	32,3	8	0,025
57	32,8	8	0,025
57,6	33,1	8	0,028
61	33,3	9	0,031
61,8	33,5	9	0,031
62	33,8	9	0,034
62,1	34,5	9	0,034
63	34,6	9	0,034
74	36	9	0,035
79	36,4	9	0,039
80,4	36,6	10	0,039
81	37,1	10	0,045
83	37,1	10	0,048
85,8	37,3	10	0,051
86	37,4	10	0,062
86	37,7	15	0,07
87	43,1	15	0,09

Classificação cromatográfica: 2,0			
Rigidez Dielétrica	Tensão Interfacial	Teor de água	Índice de Neutralização
11,3	24,9	2	0,006
13,1	25,6	2	0,008
14,1	26	3	0,011
18	26,1	3	0,011
22	26,3	4	0,011
23,2	26,9	4	0,011
25,1	27,9	4	0,014
30	28,1	4	0,017
31	28,9	4	0,02
36	29,5	6	0,022
40,5	30	6	0,022
42	30,1	6	0,025
43,2	30,3	7	0,025
48	30,3	7	0,031
50	30,4	7	0,031
51,3	30,5	7	0,034
52,3	30,6	7	0,036
52,6	31,7	8	0,036
54,2	31,9	8	0,043
59,8	33,1	8	0,044
60,9	33,6	9	0,05
61	33,8	9	0,059
70	34,2	10	0,062
74,7	34,4	13	0,065
76	34,7	14	0,065
80	35,6	18	0,08
82	35,8	18	0,088
84	36,4	19	0,091
85	37	20	0,093
87	39,8	23	0,094

ANEXO B – DISTRIBUIÇÃO NORMAL PARA ESCALA Z



Os dados representam a área sob a distribuição normal padronizada, desde a média aritmética até Z

Z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,0000	0,0040	0,0080	0,0120	0,0160	0,0199	0,0239	0,0279	0,0319	0,0359
0,1	0,0398	0,0438	0,0478	0,0517	0,0557	0,0596	0,0636	0,0675	0,0714	0,0753
0,2	0,0793	0,0832	0,0871	0,0910	0,0948	0,0987	0,1026	0,1064	0,1103	0,1141
0,3	0,1179	0,1217	0,1255	0,1293	0,1331	0,1368	0,1406	0,1443	0,1480	0,1517
0,4	0,1554	0,1591	0,1628	0,1664	0,1700	0,1736	0,1772	0,1808	0,1844	0,1879
0,5	0,1915	0,1950	0,1985	0,2019	0,2054	0,2088	0,2123	0,2157	0,2190	0,2224
0,6	0,2257	0,2291	0,2324	0,2357	0,2389	0,2422	0,2454	0,2486	0,2518	0,2549
0,7	0,2580	0,2612	0,2642	0,2673	0,2704	0,2734	0,2764	0,2794	0,2823	0,2852
0,8	0,2881	0,2910	0,2939	0,2967	0,2995	0,3023	0,3051	0,3078	0,3106	0,3133
0,9	0,3159	0,3186	0,3212	0,3238	0,3264	0,3289	0,3315	0,3340	0,3365	0,3389
1,0	0,3413	0,3438	0,3461	0,3485	0,3508	0,3531	0,3554	0,3577	0,3599	0,3621
1,1	0,3643	0,3665	0,3686	0,3708	0,3729	0,3749	0,3770	0,3790	0,3810	0,3830
1,2	0,3849	0,3869	0,3888	0,3907	0,3925	0,3944	0,3962	0,3980	0,3997	0,4015
1,3	0,4032	0,4049	0,4066	0,4082	0,4099	0,4115	0,4131	0,4147	0,4162	0,4177
1,4	0,4192	0,4207	0,4222	0,4236	0,4251	0,4265	0,4279	0,4292	0,4306	0,4319
1,5	0,4332	0,4345	0,4357	0,4370	0,4382	0,4394	0,4406	0,4418	0,4429	0,4441
1,6	0,4452	0,4463	0,4474	0,4484	0,4495	0,4505	0,4515	0,4525	0,4535	0,4545
1,7	0,4554	0,4564	0,4573	0,4582	0,4591	0,4599	0,4608	0,4616	0,4625	0,4633
1,8	0,4641	0,4649	0,4656	0,4664	0,4671	0,4678	0,4686	0,4693	0,4699	0,4706
1,9	0,4713	0,4719	0,4726	0,4732	0,4738	0,4744	0,4750	0,4756	0,4761	0,4767
2,0	0,4772	0,4778	0,4783	0,4788	0,4793	0,4798	0,4803	0,4808	0,4812	0,4817
2,1	0,4821	0,4826	0,4830	0,4834	0,4838	0,4842	0,4846	0,4850	0,4854	0,4857
2,2	0,4861	0,4864	0,4868	0,4871	0,4875	0,4878	0,4881	0,4884	0,4887	0,4890
2,3	0,4893	0,4896	0,4898	0,4901	0,4904	0,4906	0,4909	0,4911	0,4913	0,4916
2,4	0,4918	0,4920	0,4922	0,4925	0,4927	0,4929	0,4931	0,4932	0,4934	0,4936
2,5	0,4938	0,4940	0,4941	0,4943	0,4945	0,4946	0,4948	0,4949	0,4951	0,4952
2,6	0,4953	0,4955	0,4956	0,4957	0,4959	0,4960	0,4961	0,4962	0,4963	0,4964
2,7	0,4965	0,4966	0,4967	0,4968	0,4969	0,4970	0,4971	0,4972	0,4973	0,4974
2,8	0,4974	0,4975	0,4976	0,4977	0,4977	0,4978	0,4979	0,4979	0,4980	0,4981
2,9	0,4981	0,4982	0,4982	0,4983	0,4984	0,4984	0,4985	0,4985	0,4986	0,4986
3,0	0,49865	0,49869	0,49874	0,49878	0,49882	0,49886	0,49889	0,49893	0,49897	0,49900
3,1	0,49903	0,49906	0,49910	0,49913	0,49916	0,49918	0,49921	0,49924	0,49926	0,49929
3,2	0,49931	0,49934	0,49936	0,49938	0,49940	0,49942	0,49944	0,49946	0,49948	0,49950
3,3	0,49952	0,49953	0,49955	0,49957	0,49958	0,49960	0,49961	0,49962	0,49964	0,49965
3,4	0,49966	0,49968	0,49969	0,49970	0,49971	0,49972	0,49973	0,49974	0,49975	0,49976
3,5	0,49977	0,49978	0,49978	0,49979	0,49980	0,49981	0,49981	0,49982	0,49983	0,49983
3,6	0,49984	0,49985	0,49985	0,49986	0,49986	0,49987	0,49987	0,49988	0,49988	0,49989
3,7	0,49989	0,49990	0,49990	0,49990	0,49991	0,49991	0,49992	0,49992	0,49992	0,49992
3,8	0,49993	0,49993	0,49993	0,49994	0,49994	0,49994	0,49994	0,49995	0,49995	0,49995
3,9	0,49995	0,49995	0,49996	0,49996	0,49996	0,49996	0,49996	0,49996	0,49997	0,49997

(continua)

Fonte: Levine, Berenson, Stephan (2000).