

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Luiz de Gonzaga Coelho Junior**

**MISTURA DE ÓLEO MINERAL E VEGETAL PARA USO EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**Fortaleza  
Agosto 2007**

**Luiz de Gonzaga Coelho Junior**

**MISTURA DE ÓLEO MINERAL E VEGETAL PARA USO EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

**Fortaleza  
Agosto 2007**

**Luiz de Gonzaga Coelho Junior**

**MISTURA DE ÓLEO MINERAL E VEGETAL PARA USO EM  
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Fortaleza, 17 de agosto de 2007.

---

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho  
Departamento de Engenharia Elétrica - UFC

---

Prof. PhD. Fernando Luis Marcelo Antunes  
Departamento de Engenharia Elétrica - UFC

---

Prof. PhD. Ruth Pastôra Saraiva Leão  
Departamento de Engenharia Elétrica - UFC

---

Prof. Dr. José Osvaldo Beserra Carioca  
Departamento de Engenharia de Alimentos - UFC

Dedico este trabalho  
a Deus, a minha esposa e a minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por ter me permitido ter condições de seguir em frente na minha vida, com muita disposição e saúde.

A minha família, pela forte presença no meu desenvolvimento, em especial a minha mãe, pela força de vontade em recuperar a saúde e seguir, como sempre, me incentivando nos estudos.

A minha esposa, pela ajuda e incentivo indiscutível para que eu seguisse sempre em frente nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho, que me orientou com muita dedicação e apoio, sempre me incentivando a novos desafios e oportunidades.

Ao LDPP (Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Processos) e seus colaboradores, pelo apoio incondicional que me concedeu durante todo o meu período de pesquisa e mestrado, em especial ao Prof. Dr. José Osvaldo Beserra Carioca.

À Universidade Federal do Ceará, por promover o incentivo à Pesquisa e à Pós-Graduação.

À COELCE (Companhia Energética do Ceará) e seus colaboradores, pela permissão concedida durante o período de finalização do mestrado.

A todos os professores e amigos que estiveram ao meu lado e me apoiaram durante o curso.

“A mente que se abre a uma nova idéia  
jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de óleo isolante dielétrico, formado pela mistura de óleo isolante mineral com óleo vegetal comum, para uso em transformadores de potência. O objetivo principal do trabalho é apresentar uma nova alternativa de mistura de óleo isolante para transformadores, composto de óleo mineral naftênico e óleo de soja, que mantém as mesmas características dielétricas e físico-químicas dos óleos minerais existentes no mercado. Para isso, foram utilizados critérios, como: oferta de mercado, produto com um bom percentual de ácidos graxos não saturados na composição e produto com um baixo custo final de compra. Além disso, ainda foram realizadas 3 misturas com diferentes proporções de óleos minerais, variando de 10% à 50%. A mistura que apresentou os melhores índices foi a composta por 90% de óleo mineral isolante e 10% de óleo de soja comum. Os resultados dos ensaios realizados na mistura são apresentados e então comparados aos diferentes tipos de óleos isolantes existentes. Nas comparações, tem-se como foco os óleos isolantes tipo vegetais atualmente existentes no mercado. Nos resultados apresentados, a mistura obteve índices satisfatórios aos exigidos pelas normas ABNT 5357 e ASTM D3487 para óleos minerais. Destacam-se, em alguns ensaios, como o de Ponto de Fluidez, que obteve  $-44^{\circ}\text{C}$  e o de Número de Acidez, que obteve 0.01, valores melhores do que os apresentados pelos óleos minerais convencionais. No entanto, as principais vantagens apresentadas por esta mistura estão no custo final do produto, que variou com uma redução final de até 5%. Além do estudo de caso, a dissertação aborda o comportamento do atual mercado de óleos isolantes, com ênfase nos últimos óleos vegetais desenvolvidos a nível mundial e também mostra futuras oportunidades de aprofundamento e desenvolvimento de novos conceitos e teorias sobre o assunto.

## **ABSTRACT**

This paper presents a proposal for dielectric insulating oil formed by the mixture of mineral insulating oil and vegetable oil common for use in electrical power transformers. The primary purpose of the work is to provide a new alternative mixture of insulating oil for transformers composed of mineral oil and soybean oil which keeps the same dielectrics and physical-chemical characteristics of mineral oils in the market. In order to that, were used criteria such as: provision of market, product with a good percentage of non-saturated oleic acids in the composition and product with a low purchase cost. Moreover, were implemented 3 mixtures with different proportions of mineral oils varying from 10% to 50%. The mixture that produced the best index was composed of 90% of mineral insulating oil and 10% of soybean oil common. The results of the tests are presented and then compared to different types of insulating oils available on the market. In the comparisons, has been a focus in vegetable oils currently on the market. In the results presented, the mixture got satisfactory index in standards required by ABNT 5357 and ASTM D3487 for mineral oils. In some assay, such as Pour Point, which obtained  $-44^{\circ}\text{C}$  and Acid Number, which got 0.01, values better than those produced by conventional mineral oils have been detached. However, the main advantages presented by this mixture are in the final product cost, which varied with a final reduction of up to 5%. Besides the case study, the dissertation approaches the behavior of the current market of insulating oils emphasizing recent vegetable oils developed at global level. This work also shows future opportunities for deepening and development of new concepts and theories on the subject.



### iii LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM.....	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DBO.....	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBPC (BHT).....	Dibutil-Paracresol (Butil Hidroxi Tolueno)
DGA.....	Capacidade de Detecção de Falta
DQO.....	Demanda Química de Oxigênio
EIA.....	<i>Energy Information Administration</i>
EPA.....	Agência de Proteção Ambiental ( <i>Environmental Protection Agency</i> )
EPE.....	Empresa de Pesquisa Energética
HMWH.....	Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular ( <i>High Molecular Weight Hydrocarbons</i> )
IEC.....	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE.....	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LDPP.....	Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Processos
NBR.....	Norma Brasileira
OCDE.....	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PADETEC.....	Parque de Desenvolvimento Tecnológico
PCB.....	Hidrocarbonetos Bifenilos Policlorados ( <i>Poly Chlorinated Biphenyls</i> )
PCDDs.....	<i>Poly Chlorinated Dibenzo-p-Dioxins</i>
PCDFs.....	<i>Poly Chlorinated Dibenzo Furans</i>
PDMS.....	Silicone ( <i>Dimethylsiloxanes</i> )
PIB.....	Produto Interno Bruto
POE.....	Éster Sintético ( <i>Synthetic Polyol Esters</i> )
TCB.....	Triclorobenzeno
UFC.....	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Projeções preliminares do consumo final de eletricidade no Brasil.....	1
Figura 1.2: Projeções de Geração Mundial de Energia Elétrica 2004 – 2030.....	2
Figura 1.3: Gráfico que sintetiza a Produção Mundial de Óleos Vegetais em toneladas.....	5
Figura 1.4: Gráfico que sintetiza a área plantada, em hectares, de produtos vegetais que produzem, como subprodutos ou não, óleos vegetais.....	6
Figura 1.5: Gráfico que sintetiza a produção de óleos e gorduras no Brasil durante o ano de 2006.....	6
Figura 2.1: Ilustração do transformador desenvolvido por William Stanley.....	8
Figura 2.2: Ilustração de advertências quanto ao uso dos Bifenilos Policlorados (PCBs) no Brasil e no Mundo.....	10
Figura 2.3: Ilustração de um transformador a seco, em resina epóxi.....	11
Figura 2.4: Principais marcos na história dos óleos isolantes.....	12
Figura 2.5: Esquema de geração e transmissão de energia elétrica.....	13
Figura 2.6: Ilustração típica de um transformador com duas bobinas.....	14
Figura 2.7: Desenho de uma das Bobinas do Transformador.....	16
Figura 2.8: Representação Esquemática da Estrutura da Celulose.....	17
Figura 2.9: Fluxo do Óleo Isolante na dissipação de calor.....	19
Figura 3.1: Estrutura Química dos óleos isolantes com cadeias lineares ou ramificadas, abertas e fechadas.....	24
Figura 3.2: Estrutura Química do óleo isolante formado por hidrocarbonetos parafínicos.....	25
Figura 3.3: Estrutura Química do óleo isolante formado por hidrocarbonetos naftênicos.....	26
Figura 3.4: Estrutura Química do óleo isolante formado por um composto bifenil clorado....	28
Figura 3.5: Estrutura Química típica do óleo isolante tipo Silicone.....	31
Figura 3.6: Estrutura Química do óleo isolante tipo POE.....	32
Figura 3.7: Estrutura Química de ligações ésteres que compõem a estrutura molecular de um triglicerídeo.....	33
Figura 3.8: Estrutura Química do óleo isolante tipo Triglicerídeos.....	34
Figura 3.9: Biodegradação aeróbica do óleo à base de éster natural (Envirotemp FR3) e do óleo de transformador convencional.....	36
Figura 4.1: Ilustração de um Vaso aberto tipo Cleveland utilizado em ensaios de Ponto de Fulgor.....	47

Figura 4.2: (a) Moléculas dotadas de um momento de dipolo elétrico permanente. (b) Alinhamento parcial dos dipolos.....	52
Figura 4.3: (a) Um átomo com uma nuvem eletrônica ao seu redor. (b) Momento de dipolo induzido de um átomo, devido ao campo elétrico.....	53
Figura 4.4: (a) Uma lâmina dielétrica com átomos neutros no interior da lâmina. (b) Campo elétrico aplicado, “esticando” os átomos e separando os centros de carga positiva e negativa. (c) O efeito resultante é a produção de cargas superficiais.....	53
Figura 4.5: (a) Representação gráfica de circuito elétrico equivalente a um dielétrico. (b) Representação vetorial do circuito elétrico equivalente a um dielétrico.....	54
Figura 4.6: (a) Representação esquemática do efeito da água na isolação, com o efeito de um campo elétrico. (b) Representação esquemática do efeito da água na isolação, sem o efeito de um campo elétrico.....	54
Figura 4.7: Representação gráfica de circuito elétrico equivalente a um dielétrico com a corrente de absorção “ $I_{da}$ ”.....	55
Figura 4.8: Representação gráfica do comportamento das correntes de um circuito elétrico equivalente de um dielétrico.....	56
Figura 5.1: Custo de produção da soja no Brasil e em alguns países produtores de soja.....	62

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C$	Capacitor
$\cos \varphi$	Fator de Potência
$E$	Tensão Senoidal Eficaz
$E$	Campo Elétrico Resultante no Interior de um Dielétrico
$E_0$	Campo Elétrico Inicial Aplicado
$E'$	Campo Elétrico Criado por Cargas Superficiais Induzidas
$G$	Condutância Equivalente da Resistência
$I$	Corrente Total
$I_c$	Corrente Capacitiva
$I_a$	Corrente de Absorção
$I_r$	Corrente Resistiva
$I_T$	Corrente Total do Circuito Equivalente de um Isolante com a Corrente de Absorção
$k$	Constante Dielétrica do Material
$R$	Resistor
$\text{tg } \delta$	Fator de Dissipação
$X_p$	Reatância Paralela do Circuito
$\omega$	Frequência do Circuito
$\varphi$	Ângulo formado pelas Correntes “ $I_r$ ” e “ $I$ ”
$\delta$	Ângulo formado pelas correntes “ $I_c$ ” e “ $I$ ”

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Número de espécies vegetais comercializadas por região do mundo.....	4
Tabela 2.1: Tabela do tempo de permanência de operação de componentes isolantes sólidos em um equipamento elétrico.....	18
Tabela 3.1: Composição típica de ácido graxo de alguns óleos vegetais.....	35
Tabela 3.2: Principais óleos ecológicos desenvolvidos ou em desenvolvimento.....	37
Tabela 3.3: Tabela analítica de diferentes tipos de isolações em um transformador padrão....	39
Tabela 4.1: Comparação entre as Normas Nacionais e Internacionais para óleos tipo Mineral (Naftênicos) e tipo Ésteres Naturais.....	43
Tabela 5.1: Diferentes proporções de Misturas de Fluidos Dielétricos Minerais com Óleos Vegetais.....	64
Tabela 5.2: Comparação dos valores dos ensaios para as diferentes proporções de Misturas de Fluidos Dielétricos Minerais com Vegetais.....	65
Tabela 5.3: Locais e Co-Responsáveis pela realização e aferição dos ensaios.....	66
Tabela 5.4: Comparação entre as Normas Nacionais e as Misturas 2, 3 e 4 realizadas para o estudo de caso.....	68
Tabela 5.5: Comparação dos valores dos ensaios para os diferentes tipos de Fluidos Dielétricos para transformadores.....	70
Tabela 5.6: Tabela comparativa dos principais tipos de óleos isolantes de base vegetal.....	74

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 Motivação</b> .....	1
1.1.1 Crescimento do consumo e produção de energia elétrica no Brasil e no Mundo.....	1
1.1.2 Demanda por equipamentos elétricos.....	3
1.1.3 Biomassa Brasileira.....	4
1.1.4 Produção de Óleos Vegetais no Brasil e no Mundo.....	5
<b>1.2 Plano da Dissertação</b> .....	7
<b>2. ÓLEOS ISOLANTES PARA TRANSFORMADORES</b> .....	8
<b>2.1 Revisão Histórica</b> .....	8
<b>2.2. Importância dos óleos isolantes no Transformador</b> .....	13
2.2.1 Componentes de um Transformador.....	14
2.2.1.1 Isolamento do Transformador.....	15
2.2.1.1.1 Isolamento Sólido.....	16
2.2.1.1.2 Isolamento Líquido.....	19
<b>2.3 Resumo do Capítulo</b> .....	21
<b>3. PRINCIPAIS TIPOS DE ÓLEOS ISOLANTES</b> .....	22
<b>3.1 Fluidos Minerais de Base Parafínica, Naftênica ou Mista</b> .....	23
3.1.1 Hidrocarbonetos Parafínicos.....	24
3.1.2 Hidrocarbonetos Naftênicos.....	25
3.1.3 Importância da aditivação de um óleo mineral.....	26
3.1.4 Questão ambiental para óleo mineral.....	27
<b>3.2 Fluidos minerais formados por Hidrocarbonetos Clorados (PCB)</b> .....	27
<b>3.3 Fluidos minerais formados por Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular (HMWH)</b> .....	29

<b>3.4 Fluidos do tipo Silicone (PDMS)</b> .....	30
<b>3.5 Fluidos do tipo Éster Sintético (POE)</b> .....	32
<b>3.6 Fluidos do tipo Éster Natural (óleos de base vegetal)</b> .....	33
3.6.1 Principais tipos de fluidos de base ecológica no mercado.....	37
3.6.2 Questão ambiental para óleo de base vegetal.....	38
<b>3.7 Resumo do Capítulo</b> .....	40
<b>4. PARÂMETROS DOS ÓLEOS ISOLANTES</b> .....	41
<b>4.1 Principais Normas para Óleos Isolantes</b> .....	41
4.1.1 Normas Nacionais e Internacionais.....	41
4.1.2 Análise comparativa entre as normas para óleos vegetais e óleos minerais.....	42
<b>4.2 Ensaios dos Óleos Minerais e Vegetais</b> .....	44
<b>4.2.1 Ensaios Físico-Químicos</b> .....	45
4.2.1.1 Cor.....	45
4.2.1.2 Densidade.....	45
4.2.1.3 Viscosidade.....	46
4.2.1.4 Ponto de Fulgor.....	46
4.2.1.5 Ponto de Combustão.....	47
4.2.1.6 Ponto de Fluidez.....	47
4.2.1.7 Tensão Interfacial.....	48
4.2.1.8 Índice de Neutralização (Número de Acidez).....	49
4.2.1.9 Teor de Água.....	49
4.2.1.10 Estabilidade à Oxidação.....	50
<b>4.2.2 Ensaios Elétricos</b> .....	51
4.2.2.1 Polarização.....	51
4.2.2.2 Circuito elétrico de um Dielétrico e a Corrente da Absorção.....	53
4.2.2.3 Fator de Dissipação (Fator de Potência).....	56
4.2.2.4 Rigidez Dielétrica.....	58
<b>4.3 Resumo do Capítulo</b> .....	59
<b>5. ESTUDO DE CASO: MISTURA DE ÓLEO MINERAL E VEGETAL PARA USO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA</b> .....	60
<b>5.1 Metodologia dos Ensaios e Resultados</b> .....	61
5.1.1 A escolha do óleo vegetal utilizado no estudo de caso.....	61

5.1.2 A escolha da norma utilizada no estudo de caso.....	63
5.1.3 A escolha dos procedimentos e ensaios aplicados no estudo de caso.....	63
5.1.4 A escolha da melhor proporção de óleo mineral dielétrico e óleo vegetal.....	64
<b>5.2 Estudo de Caso.....</b>	<b>68</b>
5.2.1 Análise comparativa entre os principais tipos de óleos isolantes.....	69
5.2.2 Análise comparativa entre os principais tipos de óleos isolantes vegetais.....	72
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>75</b>
<b>6.1 Comentários finais.....</b>	<b>75</b>
<b>6.2 Sugestões para desenvolvimentos futuros.....</b>	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>84</b>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

### 1.1.1 Crescimento do consumo e produção de energia elétrica no Brasil e no Mundo

O consumo final de eletricidade no Brasil atingiu em 2005 valor 4,2% superior ao ano de 2004. Até 2030, estima-se que o consumo total deva crescer a uma taxa anual de 4,5%, saindo do patamar de 375,2 milhões de MWh, em 2005, para 1,095 bilhão de MWh em 2030. A projeção foi apresentada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em seminário organizado pelo governo para apresentar as projeções para a demanda de energia que embasarão o Plano Nacional de Energia 2030. Este cenário de crescimento da demanda é tido como "referencial" pela EPE e baseia-se em uma projeção de crescimento da economia mundial de 3% ao ano e de uma expansão anual de 4,1% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (Figura 1.1). [1]

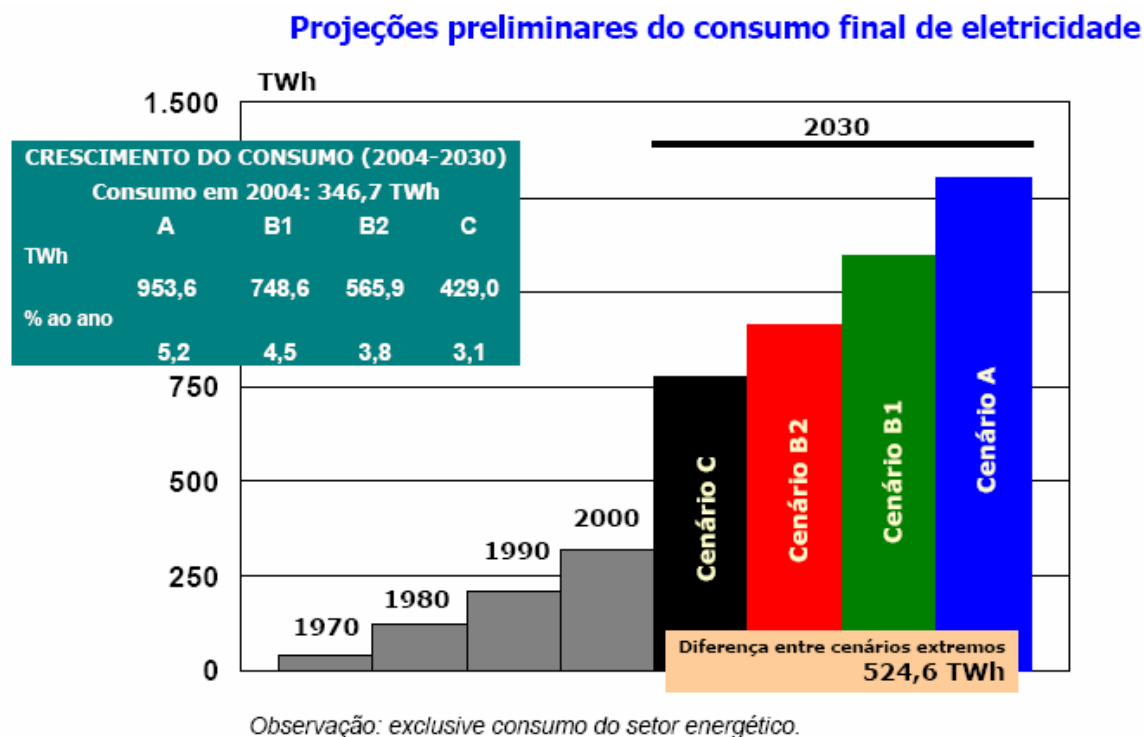


Figura 1.1: Projeções preliminares do consumo final de eletricidade no Brasil [1].

Na Figura 1.1 tem-se uma ilustração de um estudo apresentado pela EPE para o Ministério de Minas e Energia com 4 (quatro) possíveis cenários projetados para o Brasil no

ano de 2030. Para o cenário “C”, considerado o cenário menos otimista, o Brasil e o mundo estariam crescendo a taxas de 2,2% ao ano e a demanda doméstica por energia elétrica aumentaria a uma taxa anual de 3,1%, chegando em 2030 ao número de 775,7 milhões de MWh. Já para o cenário mais otimista, o de maior crescimento econômico, com o mundo se expandindo 3,8% ao ano e o Brasil 5,1% no mesmo período, o aumento da demanda por energia elétrica saltaria para 5,2%, chegando a 1,3 bilhão de MWh em 2030. Durante a apresentação do estudo, na sede do Ministério de Minas e Energia, a Eletrobrás afirmou que, se for confirmado o cenário referencial (que prevê consumo de 1,095 bilhão de MWh em 2030), seria necessário acrescentar entre 4,5 mil MW a 5 mil MW médios ao sistema por ano.[1]

No cenário mundial, as projeções de aumento de consumo e geração de energia elétrica não são diferentes. Estima-se que em 2030, estará se gerando em torno de 30,36 bilhões de MWh a nível mundial. Na Figura 1.2 são mostradas as projeções mundiais de geração de energia elétrica, com um horizonte até 2030.

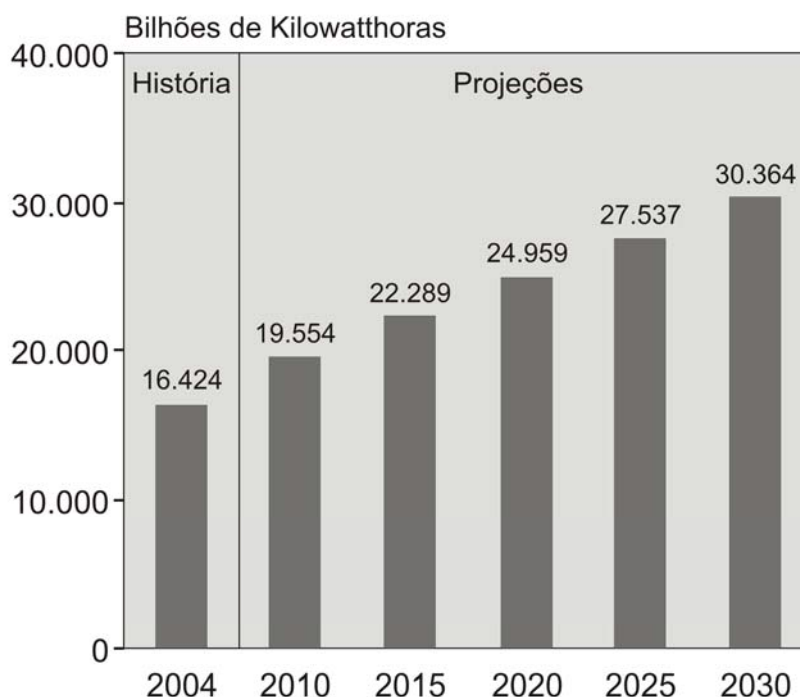


Figura 1.2: Projeções de Geração Mundial de Energia Elétrica 2004 – 2030. [2]

### 1.1.2 Demanda por equipamentos elétricos

Quando o consumo de energia elétrica aumenta, a demanda por maior produção de energia também aumenta, o que implica, conseqüentemente, numa maior demanda por uso de equipamentos elétricos. Diante disso, como dito anteriormente, a produção de energia elétrica está aumentando em todo o mundo e isso implica que os equipamentos usados na produção, transmissão e distribuição de eletricidade estão sujeitos a novas e mais exigentes condições de funcionamento. [3]

O ritmo da produção não só aumentou, mas a energia elétrica também está sendo produzida em ambientes cada vez mais difíceis, como por exemplo, em alto mar (parques eólicos *offshore*), em grandes altitudes ou nas florestas tropicais. [3] Onde quer que a energia elétrica seja produzida, ela tem que ser transmitida e distribuída aos seus consumidores.

No campo dos equipamentos de energia elétrica, as normas requeridas para os transformadores sempre foram muito exigentes, principalmente em termos de confiabilidade e expectativa de vida útil. Porém, como os atuais transformadores têm que funcionar em condições cada vez mais complexas, como em parques eólicos *offshore* ou ainda em ambientes submarinos das plataformas de petróleo, isso traz, conseqüentemente, mais implicações para os óleos de transformador.

O transformador pode ser considerado um dos equipamentos vitais e mais relevantes para o sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica como um todo. A cada dia, mais tecnologias são investigadas e desenvolvidas para que se preservem o bom funcionamento e confiabilidade dos sistemas elétricos de potência. "Anteriormente os transformadores trabalhavam de 60 a 70% da sua capacidade máxima, enquanto hoje trabalham constantemente à capacidade máxima. Obviamente isto resulta numa redução da sua vida útil", afirma Jürgen Scholz, proprietário da *EES Jürgen Scholz GmbH*, em Hamburgo, Alemanha. [4]

O fato da produção e distribuição de energia elétrica ocorrer em situações cada vez mais severas aumentou a preocupação de que os efeitos de sobrecarga no sistema elétrico sejam mais comuns e acentuados no futuro. Atualmente, o transformador é submetido a mais esforços do que anteriormente, funcionando por períodos mais prolongados e freqüentemente a cargas mais elevadas. [3]

Muitos produtores de energia e fornecedores de transformadores usam o mesmo óleo há muitos anos sem que se tenha ocorrido nenhuma falha. Os clientes escolhem naturalmente o óleo de transformador com base na experiência passada que, no caso dos óleos de

transformadores existentes, a escolha tem sido quase sempre bem sucedida. Então, por que mudar aquilo que é um verdadeiro sucesso? [3]

Obviamente que para esta pergunta, por muitos motivos, há diferentes respostas, que devem ser extensamente exploradas e compreendidas.

### 1.1.3 Biomassa Brasileira

No Brasil, a superfície do território nacional, quase toda localizada em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para a produção e o uso de produtos provenientes da biomassa em larga escala (Tabela 1.1). Os casos mais conhecidos são os do cultivo da cana-de-açúcar para produção de biocombustíveis e o da soja para exportação direta. [5], [2]

Tabela 1.1: Número de espécies vegetais comercializadas por região do mundo. [6]

<b>País e/ou Região</b>	<b>Número de Espécies</b>
Brasil	57.000
Colômbia	45.000
Venezuela	24.000
México	18.000
Peru	18.000
Austrália	26.000
USA & África do Sul	22.000
Indonésia	18.000
Europa	12.000
Japão	3.000

No Nordeste brasileiro, além da cana de açúcar, é possível cultivar mamona, amendoim, gergelim, babaçu, caju, entre outras oleaginosas. Somente para a mamona, existe uma área de mais de três milhões de hectares apta ao seu cultivo. Na região Norte, o dendê se configura como grande opção, pois existem mais de cinquenta milhões de hectares de áreas desmatadas, com aptidão para o seu plantio. A soja, o girassol, o algodão e a canola despontam como as principais alternativas para o Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.

### 1.1.4 Produção de Óleos Vegetais no Brasil e no Mundo

A produção mundial de óleos vegetais e graxos em 2006 foi de 147 milhões de toneladas. Deste total, 113,6 milhões de toneladas são óleos vegetais. O mercado cresce continuamente a taxas de, aproximadamente, 5% ao ano e, para o ano de 2007, a estimativa de aumento da produção é de 6,5 milhões de toneladas (Figura 1.3). [7]

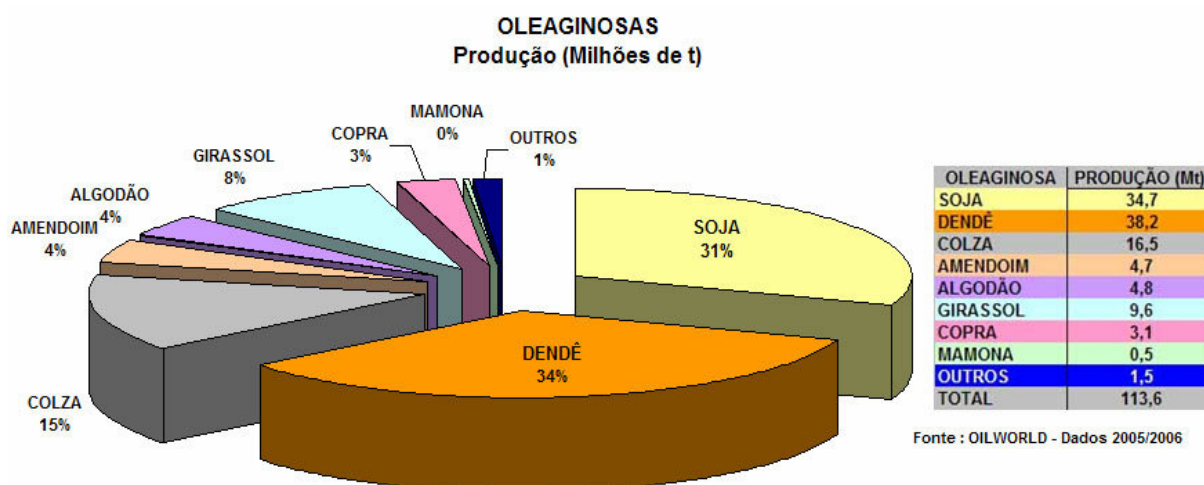


Figura 1.3: Gráfico que sintetiza a Produção Mundial de Óleos Vegetais em toneladas. [7]

No caso do Brasil, no ano de 2005 foram produzidos 7,4 milhões de toneladas de óleos vegetais e gorduras animais com predominância absoluta da soja, cuja produção de 5,7 milhões de toneladas representou, aproximadamente, 78% da produção nacional. Entretanto, excluídas as gorduras animais desta estatística, o óleo de soja representa 89% da produção nacional. A produção brasileira representa 5% da produção mundial e os excedentes exportáveis totalizam 2 milhões de toneladas. [7]

No entanto, no mundo, somente três plantas oleaginosas são produzidas em larga escala e têm importância no mercado internacional de óleos vegetais: a palma africana ou dendezeiro, a soja e a colza. Estas três representam, aproximadamente, 80% da produção total de óleos vegetais, que em 2005, foi de 113,6 milhões de toneladas. É importante registrar que a produção de óleo de palma/palmiste representou 34% da produção total, mas ocupou somente 4% das áreas agrícolas dedicadas à produção de óleos vegetais. [7]

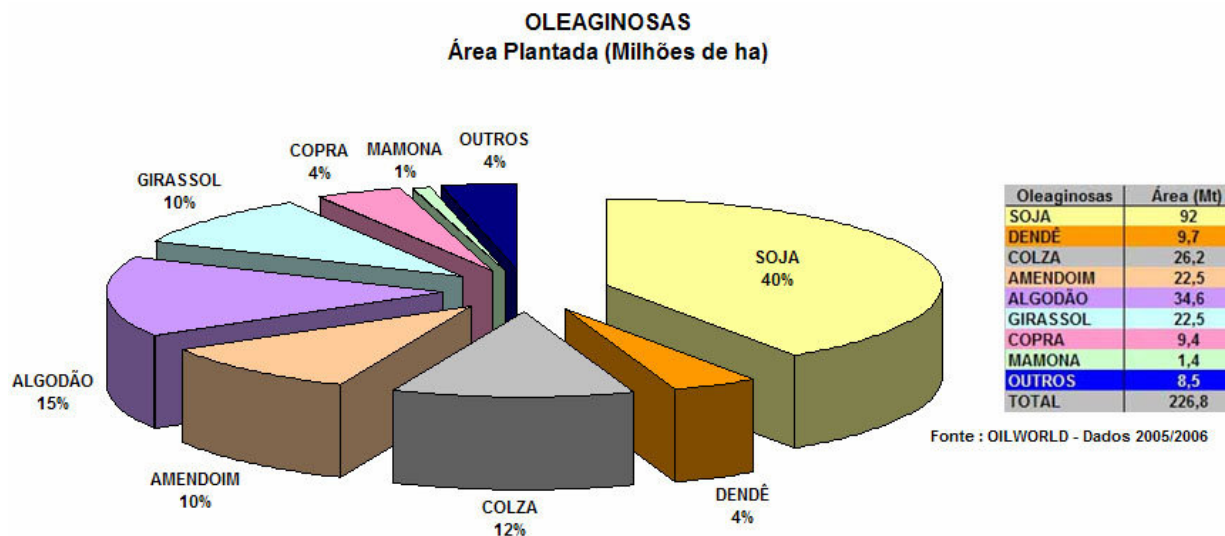


Figura 1.4: Gráfico que sintetiza a área plantada, em hectares, de produtos vegetais que produzem, como subprodutos ou não, óleos vegetais. [7]

O Brasil, sob o ponto de vista de mercado de óleos vegetais, pode ser caracterizado como um país com a “monocultura de soja” (Figura 1.5). No caso do dendezeiro, onde se têm as maiores áreas disponíveis para plantio, a produção é irrelevante e por não ser suficiente para atender o mercado interno, a importação em 2006 foi de 40% da produção nacional. O Brasil importa sistematicamente óleo de palma, palmiste, girassol e canola e precisa estimular a ampliação destas culturas.

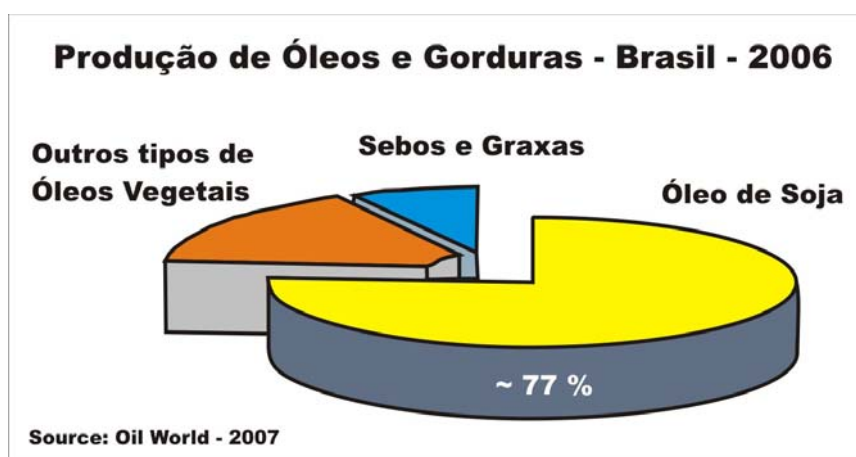


Figura 1.5: Gráfico que sintetiza a produção de óleos e gorduras no Brasil durante o ano de 2006. [7]

## 1.2 Plano da Dissertação

O objetivo do trabalho é apresentar um novo conceito em óleos dielétricos para transformadores de potência, apresentando as suas vantagens de uso.

Visando apresentar uma perspectiva global de como está se comportando o mercado mundial de óleos isolantes para transformadores, o trabalho levantou premissas para um melhor entendimento do assunto, como a expectativa de aumento da produção de energia elétrica mundial versus a demanda por novos transformadores.

No capítulo 1, é feita uma introdução ao trabalho desenvolvido na dissertação, apresentando as tendências nacionais e mundiais por demanda e consumo de energia elétrica. Também é apresentada a importância de novos desenvolvimentos tecnológicos nos equipamentos que compõem o sistema elétrico e o comportamento do mercado mundial de óleos vegetais.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão histórica sobre os óleos isolantes para transformadores, abordando suas principais funções em um transformador.

No capítulo 3, são descritos os principais tipos de óleos isolantes existentes a nível mundial e suas diferentes características, buscando abordar as motivações que levaram a desenvolver tais produtos.

No capítulo 4, são apresentados os principais parâmetros físico-químicos e elétricos que influenciam diretamente na qualidade de um óleo isolante. Nele, buscou-se tratar de parâmetros que são avaliados diretamente em normas químicas nacionais e internacionais para óleos dielétricos. Em seguida são descritas as principais normas, nacionais e mundiais, utilizadas para óleos isolantes, com uma análise comparativa entre elas. Dentre as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e *American Society for Testing and Materials* (ASTM), trabalhou-se somente com as dos óleos de base mineral e vegetal.

No capítulo 5, são expostas as premissas iniciais escolhidas para a montagem do estudo apresentado neste trabalho, o qual é uma mistura de óleos isolantes minerais com óleos vegetais. Em seguida, são mostrados os argumentos de escolha: do tipo de óleo vegetal que será estudado, da norma e dos ensaios escolhidos para o experimento, das proporções de óleos vegetais e minerais escolhidas, e dos resultados alcançados com suas respectivas vantagens competitivas perante as atuais propostas de valor do mercado.

Para o capítulo 6, são apresentados os comentários finais, as contribuições desta dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. ÓLEOS ISOLANTES PARA TRANSFORMADORES

### 2.1 Revisão Histórica

Por volta de 1876, não se sabia como transmitir a energia elétrica gerada em longas distâncias, sendo, na época, os sistemas em funcionamento de geração em corrente contínua. Somente em 1882, o norte-americano, inventor e empresário Thomas Alva Edison colocou em funcionamento o primeiro sistema de corrente contínua em Nova York e fundou a empresa *Edison Electric Company*. Em 1885, vislumbrando a dificuldade de transmissões de energia elétrica a longas distâncias, o americano George Westinghouse Jr. comprou os direitos da patente de Goulard-Gibbs para construir transformadores de corrente alternada e encarregou o engenheiro recém contratado, William Stanley, dessa tarefa. Pouco tempo depois, Stanley colocou em operação uma central em corrente alternada (*Westinghouse*) em *Great Barrington, Massachusetts*. O transformador contido nesta central apresentava (Figura 2.1) um desenho inovador perante os outros existentes até aquele período. O resultado foi de grande êxito e, de imediato, a empresa *Westinghouse* iniciou a fabricação e venda dos transformadores para distribuição de eletricidade em corrente alternada. Com as vantagens percebidas, os sistemas de corrente alternada se multiplicaram rapidamente e, já em 1887, houve a percepção da necessidade de melhora nos processos de transmissão. [8], [9]

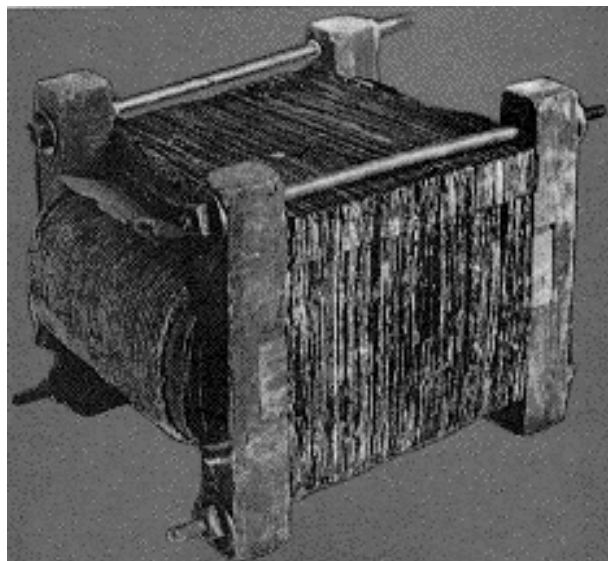


Figura 2.1: Ilustração do transformador desenvolvido por William Stanley e colocado em operação em março de 1886. [10]



Na fase inicial, os transformadores não possuíam líquidos isolantes dielétricos para os seus componentes, ou seja, eles eram isolados somente pela rigidez dielétrica do ar ambiente. Somente no início da década de 1890, as primeiras experiências com o uso de óleos dielétricos líquidos para isolação das partes internas do transformador passaram a ser realizadas pela indústria de transformadores de distribuição. A idéia de que os transformadores, usando óleo mineral como refrigerante dielétrico, pudessem ser menores e mais eficientes foi patenteada em 1882 pelo professor Elihu Thomson, mas levou-se mais uma década até que sua idéia fosse colocada em prática. Somente a partir de 1892, nos Estados Unidos, é que o uso de óleos dielétricos isolantes em transformadores passou a ser reconhecido.

No princípio, tanto a utilização de óleos vegetais como a de óleos minerais eram consideradas soluções, pois a busca por propriedades ideais dos dielétricos ainda estava no início. Porém, a necessidade de melhorias quanto à isolação e o rendimento dos transformadores passaram a ser mais exigidos. A companhia *General Electric* já havia inovado o segmento com um produto dielétrico mineral e a indústria focava suas atenções na determinação tanto das propriedades dielétricas como no desenvolvimento de um fluido mais apropriado para transformadores. As vantagens encontradas para o produto dielétrico mineral eram inúmeras. Em virtude das boas características físico-químicas, elas foram consideradas ideais devido às poucas adaptações necessárias e à boa estabilidade encontrada. Logo após a disseminação dos estudos sobre óleos minerais, em 1899, surgiu a primeira refinaria, que tinha por finalidade o preparo de óleos minerais isolantes específicos para transformadores. [8], [11]

Com o desenvolvimento tecnológico, as fábricas de transformadores se voltaram a atender à demanda mundial com produtos cada vez mais resistentes e evoluídos, deixando assim, o subproduto óleo isolante sob responsabilidade das indústrias petrolíferas. No início, os óleos minerais utilizados pela indústria eram de base essencialmente parafínica, no entanto, por volta de 1925, passou a se utilizar os de base naftênica, por causa do seu alto ponto de fulgor. Em 1929, a *Swan Chemical Company* iniciou a produção industrial dos bifenilos policlorados (PCBs) para o segmento de óleos isolantes.

Mais conhecido como *Askarel*, os PCBs foram sintetizados pela primeira vez em 1881 na Alemanha. Somente na década de 1930, os PCBs possuíam o perfil adequado que os grandes transformadores de transmissão exigiam. Os PCBs foram considerados óleos com características elétricas e físico-químicas superiores aos existentes naquele período. Além de serem considerados produtos imunes à combustão, os PCBs também possuíam ótima estabilidade química. O único

problema detectado na época era seu custo de produção, pois o deixava mais caro que o óleo mineral tradicional. Desta forma, o segmento dos PCBs passou a ser o dos transformadores especiais e, em específico, os de maior potência. [12]

Este quadro não sofreu mudanças até as décadas dos anos 60 e 70, quando são apresentados estudos conclusivos de que os PCBs provocam câncer e estão relacionados com um conjunto de transtornos reprodutivos e imunológicos. Uma vez declarados como produtos altamente cancerígenos, alguns países proibiram, estritamente, o uso e fabricação dos PCBs (Figura 2.2). No caso do Brasil, discussões foram abertas e, somente em 1981, o primeiro documento oficial do Governo (Portaria Interministerial nº 019, de 29 de janeiro de 1981) proibiu em todo o território nacional o uso e a comercialização dos óleos Ascaréis. Porém, somente em 1984, a nível do setor elétrico, se chegou à determinação de que as empresas que possuíam transformadores com PCB teriam a permissão de continuar seu uso até o final da sua vida útil. Já para o caso dos novos transformadores, alternativas diferentes de óleos isolantes teriam que ser adotadas. [9], [13], [14]



Figura 2.2: Ilustração de advertências quanto ao uso dos Bifenilos Policlorados (PCBs) no Brasil e no Mundo[14].

Em paralelo aos fatos acima citados, grandes investimentos e soluções surgiram. Entre as soluções, os fluidos sintéticos e os formados por hidrocarbonetos se mostraram ser as melhores opções de custo-benefício, apesar dos altos preços. Desenvolvidos somente na década dos anos 70, estas classes de óleos dielétricos buscavam suprir as necessidades de um mercado criado em função das qualidades existentes dos fluidos PCBs. Por se tratarem de isolantes desenvolvidos especificamente para substituir os PCBs, o custo de produção inviabilizou a aplicação destes em diversos tipos de transformadores, ocasionando, assim, um aumento considerável no custo final do produto aos consumidores. Entre os produtos mais marcantes, destacam-se os óleos formados por Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular (*High*

*Molecular Weight Hydrocarbons - HMWH*), que foram introduzidos em 1975 pela *Cooper Power Systems* (por exemplo: “R-Temp”). Outros tipos são os óleos tipo Silicone (*Dimethylsiloxanes - PDMS*), que foram introduzidos pouco tempo depois por diversas empresas do setor e os óleos tipo Éster Sintético (*Synthetic Polyol Esters - POE*), que foram introduzidos somente em 1984 também pela *Cooper Power Systems* nos Estados Unidos (por exemplo: *Envirotemp 200*). Por fim, o mercado mundial aceitou bem estas inovações, principalmente sob o ponto de vista da qualidade química dos óleos especiais, mas a problemática de custo de produção limitou uma maior aceitação por um período mais longo [14].

Paralelo a estes desenvolvimentos, a indústria de transformadores buscou outras soluções inovadoras. Apesar de já terem sido usadas no passado, essas soluções voltaram com a apresentação de projetos mais robustos e modernos, como os transformadores a seco (com a refrigeração pelo ar ambiente), usando impregnação a vácuo e um aumento das faixas de potência e tensão. Esta solução foi interessante do ponto de vista tecnológico, porém, devido ao alto custo agregado, limitou-se a aplicações especiais. (Figura 2.3)

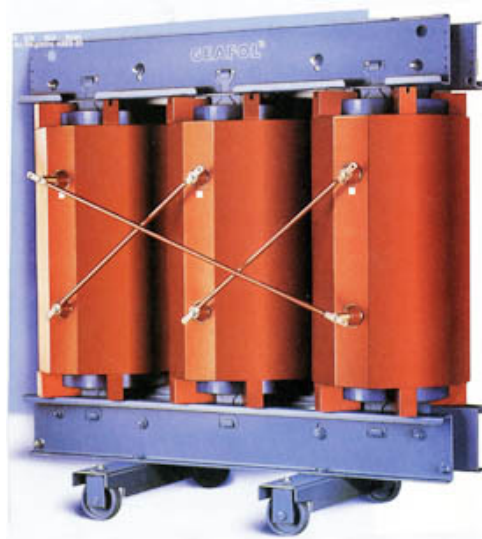


Figura 2.3: Ilustração de um transformador a seco, em resina epóxi. [15]

Após a década dos anos 80, diversos estudos foram realizados com maiores atenções às normas reguladoras que eram cada vez mais rígidas. Porém, na década de 1990, o surgimento de novos conceitos de âmbito mundial, tais como o da Química Verde, o dos produtos ecologicamente corretos e, principalmente, as tentativas de restrição ao uso de produtos provenientes do petróleo, levou as grandes companhias a refletirem soluções em benefício da sustentabilidade e do meio ambiente. No ano de 1996, foram iniciadas novas experiências

com óleos tipo Éster Natural, ou seja, óleos isolantes biodegradáveis ecologicamente corretos. As primeiras experiências com óleos a base de Éster Natural já tinham sido realizadas há mais de 100 anos. No entanto, naquela época, se optou pelos óleos minerais devido a sua baixa estabilidade à oxidação e aos altos valores de ponto de fluidez, permissividade e viscosidade [9] e, por estes motivos, os dielétricos vegetais ficaram esquecidos até os anos 90. Em 1998, a *Cooper Power Systems* iniciou a comercialização do seu produto, o FR3, do tipo Éster Natural em escala industrial e, pouco tempo depois, os órgãos reguladores mundiais entraram em contrapartida com o desenvolvimento de normas para validar ainda mais esta tecnologia [9]. Como exemplo, a “*ASTM D6871-03 - Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus*” surgiu com este fim. No caso do Brasil, até o presente momento se encontra em pauta de discussões a validação da primeira norma brasileira para “Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos” (3º Projeto 03:010.02-027). [16]

A figura 2.4 mostra os principais marcos históricos desde a invenção dos transformadores de distribuição, que detinham como dielétrico o ar, até o desenvolvimento dos óleos vegetais de melhor qualidade. A referida ilustração descreve os principais marcos que ocorreram ao longo das décadas.



Figura 2.4: Principais marcos na história dos óleos isolantes.

## 2.2 Importância dos óleos isolantes no Transformador

Os transformadores são equipamentos elétricos, estáticos que, por indução eletromagnética, possuem a habilidade de converter, em diferentes níveis, a tensão e corrente neles aplicadas por meio de dois ou mais enrolamentos eletricamente isolados com mesma frequência. Isto é, os transformadores têm por finalidade principal a transferência de energia elétrica em níveis diferentes de tensão e de corrente. Eles são geralmente empregados nas indústrias, na transmissão e na distribuição de energia elétrica e, como todo equipamento, devem ser projetados e construídos de modo a respeitarem os limites estabelecidos em normas e atenderem às necessidades específicas de utilização [17].

Desde a geração até a utilização final pelo consumidor, a energia elétrica normalmente passa por sucessivas transformações de tensão. Logo após a tensão alternada ser produzida, esta é elevada na subestação próxima à usina. A nova tensão é, então, transportada por longas distâncias até alcançar uma outra subestação próxima ao consumidor. Ali, o valor da tensão é reduzido e já é útil às indústrias, mas ainda deve ser diminuído um pouco mais para o uso doméstico. Desta forma, próximo às residências, existem transformadores que reduzem a tensão para 110 V ou 220 V. A figura 2.5 apresenta um esquema de geração e transmissão de energia elétrica [18], o qual mostra a importância dos transformadores.

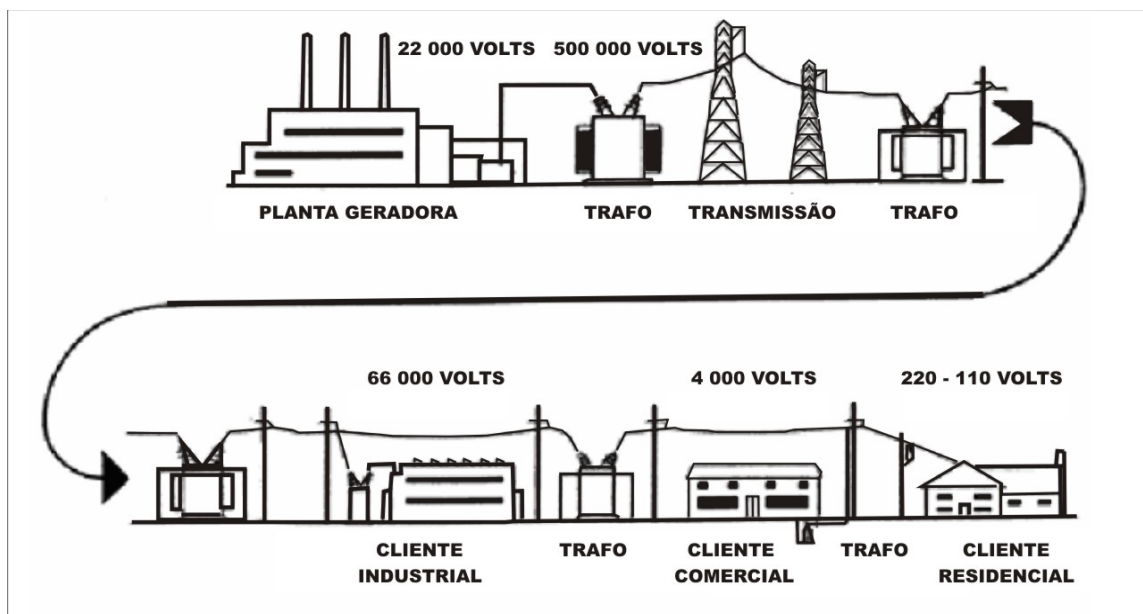


Figura 2.5: Esquema de geração e transmissão de energia elétrica. [19]

De maneira geral, a função do transformador é de reduzir as perdas de energia na transmissão de energia elétrica, por redução e elevação de níveis de tensões e corrente elétrica [20]. Estas perdas podem ser oriundas nos cabos e nos equipamentos de transmissão e distribuição do sistema. Quando tratamos especificamente do transformador, as perdas são devido às passagens de corrente elétrica pelas espiras de material condutor da bobina primária, que induzem um campo eletromagnético no núcleo de aço silício e que este, por sua vez, induz uma corrente elétrica na bobina secundária do transformador. A relação de transformação obtida é em função do número de espiras existentes em cada bobina. Na figura 2.6, tem-se a ilustração típica de um transformador com duas bobinas, uma primária e a outra secundária, e um núcleo de metal. Na bobina primária, a indicação da tensão é menor que na bobina secundária, exemplificando, assim, uma indução do campo eletromagnético no núcleo de metal. O isolamento elétrico entre as espiras é feito por meio de papel e/ou de outro isolante sólido, como os vernizes, colocado sobre a superfície do condutor.

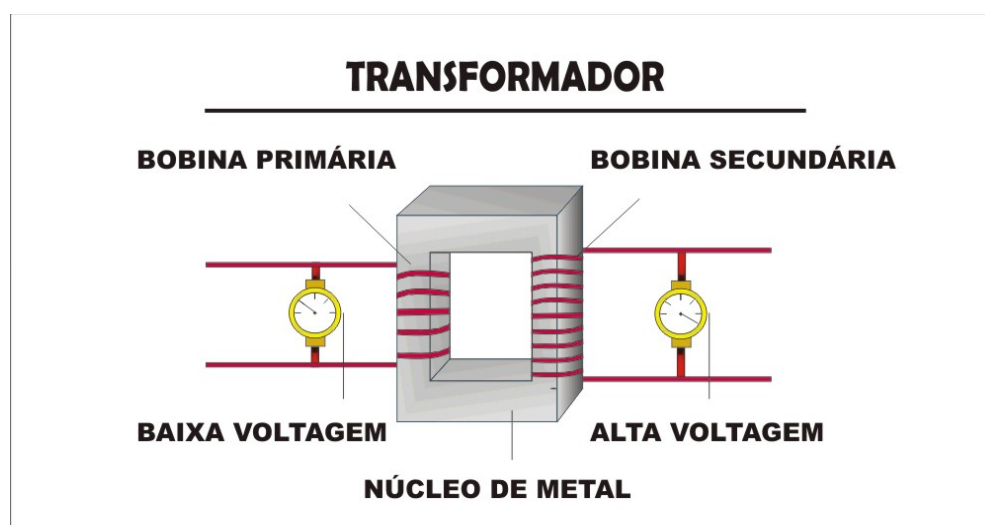


Figura 2.6: Ilustração típica de um transformador com duas bobinas.

### 2.2.1 Componentes de um Transformador

O transformador é um equipamento formado por diversos componentes que, em conjunto, formam um elemento estático de alto rendimento. Entre os principais componentes, destacam-se:

**Núcleo:** formado com chapas superpostas de liga de aço silício que, geralmente, são laminadas para que se reduzam as perdas inerentes às correntes de fuga. Por definição, o núcleo é um circuito magnético fechado através do qual há um acoplamento magnético entre

duas ou mais bobinas. Sob as condições de reversão do sentido do fluxo ou muitas pulsações por segundo, tais ligas possuem boas características elétricas e magnéticas.

**Bobina:** também conhecida como enrolamento, é formada por fios de cobre, retangulares ou redondos, revestidos por um material isolante que pode ser papel, vernizes ou resinas, ou combinações destes materiais. No isolamento entre os enrolamentos são colocadas barreiras de papelão ou de outro material adequado com a finalidade de reduzir as distâncias necessárias à isolação.

**Tanque e dispositivos trocadores de calor (radiadores):** geralmente são em aço revestidos por sistema de pintura adequada. No tanque fica inserida toda a estrutura intrínseca do transformador, como a parte ativa, o óleo isolante e outros componentes. Já os dispositivos trocadores de calor ou radiadores possuem uma relevância fundamental no desenvolvimento do projeto, sendo os principais dispositivos responsáveis pela transferência do calor interno do transformador para o meio externo.

**Parte Ativa:** formada pelo núcleo e bobinas, é montada no interior do tanque através do uso de estruturas de madeira, papelão prensado ou mesmo aço.

Outros componentes são empregados em menores quantidades, tais como as soldas à base de estanho, materiais de fixação em resina, papelão prensado e colas.

Para um bom funcionamento e desempenho do transformador, o sistema de isolação torna-se fundamental, pois a diminuição da vida útil dos transformadores está relacionada com a qualidade dos materiais dielétricos utilizados durante o processo de fabricação [21].

#### 2.2.1.1 Isolamento do Transformador

Considerado uma das principais partes do transformador, o sistema de isolamento é constituído, basicamente, por um óleo isolante e uma isolação sólida, o papel isolante elétrico. Há casos em que a isolação pode ser por meio de gases, como o ar ou o Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>) ou por meio de fluidos em estado líquido ou pastoso, como as resinas e os vernizes.



### 2.2.1.1.1 Isolamento Sólido

Na Figura 2.7, é mostrado um esquema de um núcleo de transformador, ilustrando o uso do papel. Os isolantes de base celulósica (papel Kraft, papelão Kraft, papel manilha e papelão com fibra de algodão) são utilizados na forma de finas camadas envolvendo os enrolamentos ou na forma de espaçadores e tubos de alta densidade, a fim de promover o isolamento entre níveis de tensão e entre fases [22]. Apesar da maior utilização do papel Kraft, quando se deseja resistência a altas temperaturas, emprega-se papel termo-estabilizado, que é um papel celulósico que sofre um tratamento especial [23]. Papel nomex (poliamida) também pode ser utilizado como espaçador, enchimento de bobinas, isolamento de terminais e outras aplicações suportando temperaturas da ordem de 180°C a 200°C. [24]

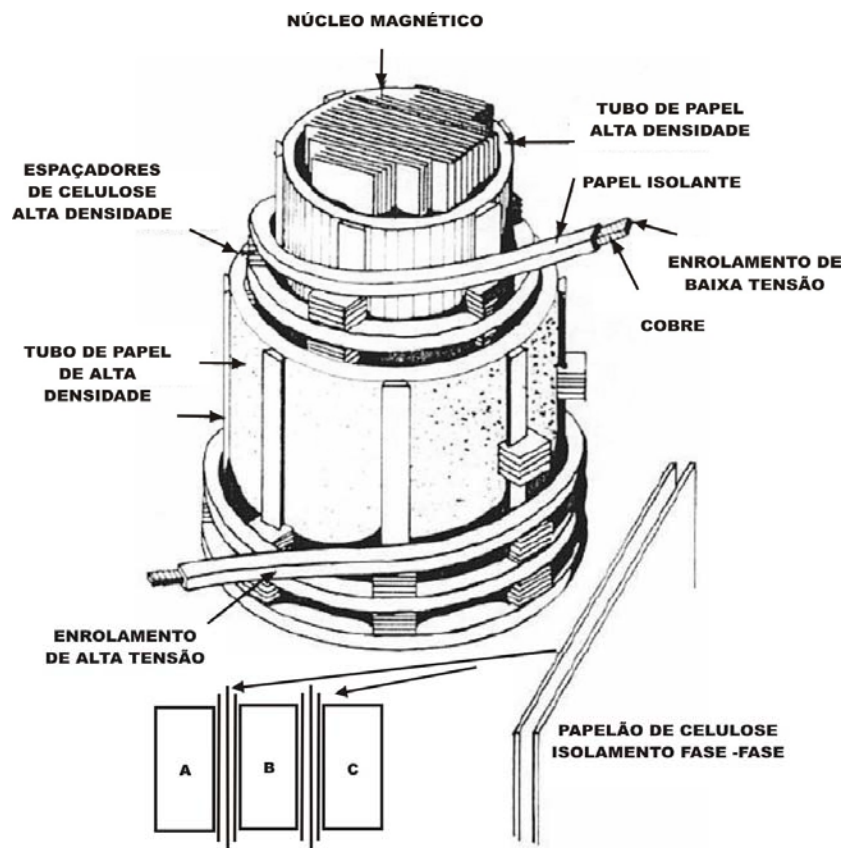


Figura 2.7: Desenho de uma das Bobinas do Transformador, ilustrando um núcleo magnético recoberto pelos enrolamentos de baixa e alta tensão, com seus respectivos componentes de isolamento. [25]

A Figura 2.8 mostra a estrutura molecular esquemática de uma celulose, sob a forma de papel ou papelão isolante elétrico, largamente utilizada nos transformadores como isolante sólido. A sua escolha foi estabelecida universalmente em função de alguns parâmetros, como



por exemplo, o baixo custo e fácil obtenção, além de boas propriedades elétricas e mecânicas quando imersa nos óleos isolantes. [21], [22]

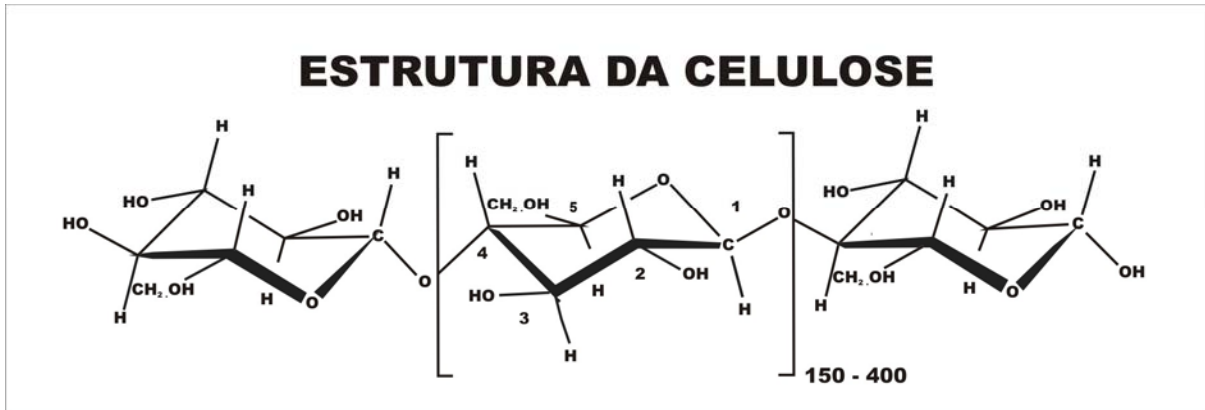


Figura 2.8: Representação Esquemática da Estrutura da Celulose [26]

A celulose é composta por diversas moléculas de hidrogênio, oxigênio e hidroxila. Em conjunto, a celulose permite realizar o isolamento dielétrico quando em contato com as partes internas e o óleo dielétrico do transformador. A sua decomposição pode ser acelerada com a presença de partículas de água, pois haverá novas ligações químicas das partículas da molécula da água com o papel isolante. A importância de tal decomposição é que as partículas de água possuem afinidades à polarização do isolante, o que é extremamente danoso ao isolamento elétrico.

Nas buchas cerâmicas capacitivas e não capacitivas de alta tensão é usado papel impregnado com óleo ou com resina. Nas buchas de menor tensão podem ser utilizados materiais cerâmicos ou poliméricos. [22]

A madeira laminada também é empregada em locais onde se requer resistência às solicitações mecânicas. Os vernizes compatíveis com o óleo também podem ser utilizados, em alguns casos, para o isolamento entre espiras. [24]

Também fazem parte do núcleo do transformador resinas e fibras, que são empregadas com a finalidade de fixação de componentes isolantes e magnéticos. Materiais elastoméricos e tintas compatíveis com o óleo mineral são utilizados com a finalidade de promover a vedação e proteção do transformador. [24], [25]

Por se tratar de materiais que são determinantes na definição do tempo de permanência de operação de um equipamento, os isolantes são classificados de acordo com sua temperatura – máxima – limite, como mostra a tabela 2.1. [17]

A tabela 2.1, organizada por classe de temperatura, traz, além de uma breve descrição dos materiais isolantes sólidos, a elevação de temperatura suportável por esses isolantes e o incremento de temperatura até o ponto máximo [17]. A diferença entre estas temperaturas está relacionada ao tempo de vida útil dos materiais, ou seja, ao processo de envelhecimento acelerado em que eles são submetidos. Para um material trabalhando em sua temperatura suportável, este terá uma vida útil garantida. No entanto, para um aumento de vida útil até o ponto máximo, o material sofrerá um processo de envelhecimento acelerado. Para o caso dos transformadores de distribuição com isolamento feito por meio de óleo isolante, a classe de temperatura é a A, com limite de 105 e elevação de temperatura de 60, ambas em graus Celsius.

Tabela 2.1: Tabela do tempo de permanência de operação de componentes isolantes sólidos em um equipamento elétrico.

<b>Classe de Temp.</b>	<b>Temp.- limite °C</b>	<b>Elevação de Temp.°C</b>	<b>Descrição dos Componentes</b>
<b>Y</b>	90	45	Materiais fibrosos, à base de celulose ou seda, não imersos em fluido isolante.
<b>A</b>	105	60	Materiais fibrosos, à base de celulose ou seda, impregnados com fluido isolante.
<b>E</b>	120	75	Fibras orgânicas sintéticas
<b>B</b>	130	80	Materiais à base de poliéster e poliamídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados.
<b>F</b>	155	100	Materiais à base de mica, amianto ou fibra de vidro, aglutinados com materiais sintéticos, silicones, poliésteres ou epóxis.
<b>H</b>	180	125	Materiais à base de mica ou fibra de vidro, aglutinados tipicamente com silicones de alta estabilidade térmica.
<b>C</b>	Acima de 180		Mica, vidro, cerâmica e quartzo sem aglutinantes.

### 2.2.1.1.2 Isolamento Líquido

Num transformador de distribuição, entende-se por isolamento líquido, o óleo isolante que tem por funções principais propiciar isolamento elétrico e permitir a transferência de calor (refrigeração) entre as partes componentes do transformador, nos índices pré-estabelecidos por normas e procedimentos. Como isolante elétrico, deverá substituir o ar entre as partes ativas, preenchendo todos os espaços vazios, e oferecer alta rigidez dielétrica e baixa condutividade [27].

Nos condutores, a resistência elétrica das bobinas causa, quando da passagem da corrente, aquecimento. O calor assim gerado ocasiona degradação térmica do material isolante e, portanto, é facilmente observado que, quanto mais eficiente for removido o calor, maior será a vida útil do isolante. Com isso, considera-se que uma das principais funções dos isolantes fluidos é a refrigeração das espiras de material condutor.

Na Figura 2.9, pode-se observar o caminho percorrido pelo óleo isolante para a dissipação de calor. Para tal dissipação, existem radiadores que, através da convecção, auxiliam na circulação do fluxo do óleo isolante na refrigeração. Há casos em que necessitam de mais refrigeração, então, acessórios, tais como os equipamentos de ventilação forçada, podem ser instalados para melhorar a eficiência.

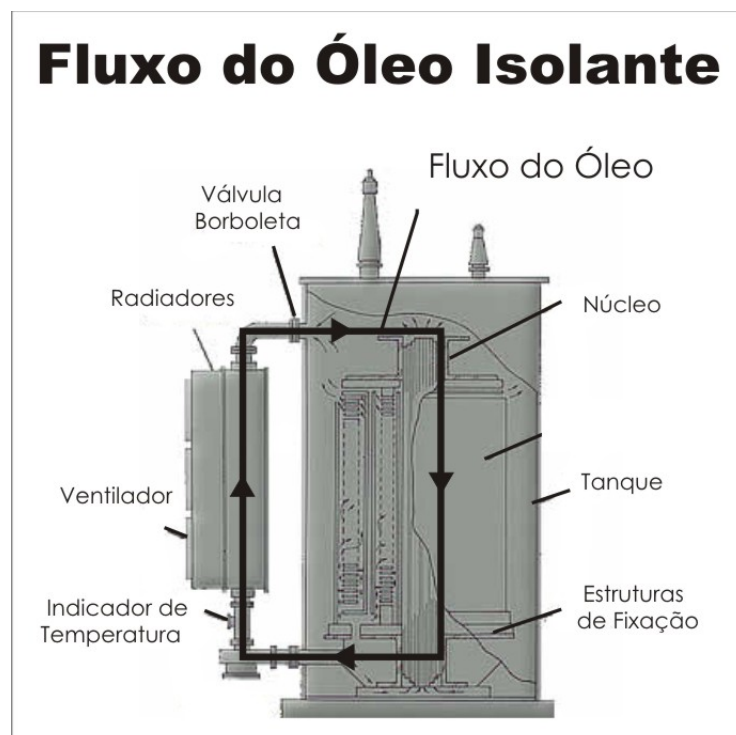


Figura 2.9: Fluxo do Óleo Isolante na dissipação de calor.

Outro importante ponto é na observação de que quanto melhores forem as características isolantes do fluido, mais econômico pode ser o projeto do transformador, podendo ocasionar, assim, uma redução na quantidade de isolantes sólidos e uma diminuição das distâncias entre as partes aterradas, espiras, núcleo e, principalmente, entre as bobinas.

No entanto, o óleo isolante deve, além de uma boa refrigeração e um bom isolamento, ter boas características químicas indiretas, as quais ocasionam maior segurança e estabilidade química ao transformador. Entre as principais características químicas, destacam-se:

- **Condutividade Térmica:** Nas observações das características isolantes, o óleo isolante deve atender tanto as exigências de materiais isolantes elétricos como também as de isolantes térmicos. Para compensar a deficiência natural da baixa condutividade térmica, é necessário que o líquido isolante tenha uma viscosidade tal que permita a sua rápida circulação entre as fontes de calor e o meio externo, principalmente à temperaturas acima do natural. Outros parâmetros essenciais para que se tenha uma boa condutividade térmica são os Pontos de Fluidez e os Índices de Viscosidades.

- **Compatibilidade do Material:** Os isolantes líquidos estão em constante contato com todos os demais materiais presentes no transformador. Este contato se dá em diferentes temperaturas e a compatibilidade do óleo aos materiais intrínsecos do transformador é fundamental para uma boa estabilidade elétrica e química do óleo. Os ensaios de Índice de Enxofre, Acidez e Enxofre Corrosivo são exemplos de ensaios de verificação desta compatibilidade do óleo com o material do transformador.

- **Resistência ao Fogo:** A segurança que os óleos isolantes devem proporcionar aos usuários é de fundamental importância. Para os transformadores instalados em locais onde há risco de incêndios e explosões, o risco deve ser minimizado e, para tal, a propriedade de resistência ao fogo é essencial. Assim, os transformadores instalados em locais de circulação de pessoas, como prédios residenciais e comerciais, instalações industriais internas e veículos, devem ter um meio isolante que, além das propriedades básicas, seja também resistente à chama. O Ponto de Fulgor é um parâmetro fundamental para tal característica.

- **Estabilidades Térmica e Química:** Devido os líquidos isolantes estarem em contato com todos os demais materiais presentes no transformador, estes materiais não devem sofrer ataques químicos por parte do líquido isolante de forma a não perderem suas propriedades originais. Tem-se assim a última característica básica dos óleos isolantes, a de estabilidade térmica e química. Tanto a Estabilidade à Oxidação como a Solubilidade são parâmetros que influenciam diretamente no tempo de vida do transformador.

- **Toxidez e Biodegradabilidade:** O mercado consumidor está cada vez mais sensível às particularidades de produtos ecologicamente corretos. O conceito de produtos ecologicamente corretos está em ascensão no mundo e, diante disso, há óleos isolantes que têm, entre suas propriedades mínimas essenciais, a baixa periculosidade e a necessidade de serem produtos renováveis e recicláveis. Estes óleos devem atender às exigências legais em relação ao meio ambiente e à saúde pública, dentre as quais [9]:

- ser essencialmente não-tóxico;
- ser biodegradável;
- produzir subprodutos de baixo risco devido à degradação térmica;
- ser reciclável, recondicionável e facilmente descartável;
- não ser classificado como material perigoso;

Na busca por materiais alternativos não-petrolíferos, estudos levam a produtos de baixa periculosidade e com melhores características ambientais, tendo-se concluído que as características encontradas nestes novos isolantes superam, em certos casos, até mesmo as dos óleos minerais altamente refinados [9].

### **2.3 Resumo do Capítulo**

Neste capítulo, foi descrita uma revisão histórica dos óleos isolantes para transformadores, apresentando a sua evolução ao longo da prática de uso. Na evolução, comentou-se, ainda, sobre as motivações para desenvolvimentos de novos tipos de óleos isolantes. Na descrição da importância do óleo isolante para o transformador, apresentaram-se os principais componentes isolantes do transformador de potência e a função do isolante líquido. Entre as principais características do isolante, destacam-se a toxidez e a biodegradabilidade, que recentemente são temas de seminários e workshops de química verde e sustentabilidade em todo o mundo.

### 3. PRINCIPAIS TIPOS DE ÓLEOS ISOLANTES

O óleo dielétrico pode ser de origem mineral, sintética ou vegetal. A escolha adequada de qual tipo de óleo deva ser aplicado no transformador depende, essencialmente, da necessidade e das exigências solicitadas pelas normas para o transformador. Cada tipo de óleo possui características intrínsecas a sua estrutura molecular, o que os diferencia quimicamente na forma natural. Estas características interferem diretamente nos parâmetros químicos e elétricos dos ensaios, ou seja, a estrutura molecular natural de cada tipo de óleo influencia diretamente na sua qualidade para uso em transformadores.

Dentre os principais tipos de óleos isolantes, podem ser citados:

- Os Fluidos minerais de base Parafínica, Naftênica ou Mista;
- Os Fluidos minerais formados por Hidrocarbonetos Clorados (PCB);
- Os Fluidos minerais formados por Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular (HMWH);
- Os Fluidos do tipo Silicone (PDMS);
- Os Fluidos do tipo Éster Sintético (POE);
- Os Fluidos do tipo Éster Natural (óleos de base vegetal).

Para os óleos dielétricos atenderem as normas exigidas pelos órgãos governamentais ou privados, muitas vezes há a necessidade de modificá-los quimicamente. Estas modificações geram custos ao produto final e, assim, ocasionam a necessidade de análises econômicas de custo-benefício para a industrialização do produto final.

Para cada tipo de óleo, na sua composição, existe uma base principal mais um ajuste com outros componentes químicos, os quais adequam o produto final a real necessidade desejada pelo transformador. Muitas vezes, esta adequação do produto é conhecida como aditivação do produto.

O processo de aditivação do óleo isolante é muito comum na indústria e, muitas vezes, é essencial para a adequação do óleo aos índices exigidos por norma. Um dos pontos em que a aditivação torna-se essencial é para melhorar a estabilidade química dos isolantes.

### **3.1 Fluidos Minerais de Base Parafínica, Naftênica ou Mista**

O óleo mineral isolante utilizado em transformadores é extraído do petróleo e suas características vão depender da natureza deste petróleo e do processo utilizado na sua produção. O óleo derivado do petróleo pode ser classificado como parafínico, naftênico, aromático ou de grupos intermediários de moléculas, sendo que os dois primeiros, historicamente, são os tipos de óleos mais utilizados. Uma importante característica dos óleos parafínicos é sua predominância na formulação dos óleos minerais naturais, devido a sua maior estabilidade à oxidação. Os naftênicos, por sua vez, têm maior aplicação em condições de baixa temperatura. [20]

Com a redução das fontes de petróleo naftênico ao longo do século, que tradicionalmente era o mais utilizado devido a sua capacidade de absorção de gás, a utilização do óleo parafínico foi se tornando cada vez maior.

Os óleos minerais parafínicos ou naftênicos, conhecidos também como convencionais, jamais ocultaram suas limitações químicas e elétricas para uso em transformadores especiais. Isto é, suas características são restritas quando tais óleos são utilizados em transformadores específicos, como os transformadores tipo subterrâneos ou submersíveis.

Na crescente expansão do mercado de energia, não somente em quantidade ou tamanho, mas principalmente geograficamente, o uso de transformadores especiais, principalmente para transmissão de energia elétrica, passou a ser bem maior. Com isso, as indústrias de óleos dielétricos desenvolveram diversas soluções para o mercado, mas o uso dos óleos dielétricos convencionais continuava a ser o de menor custo e o que atendia plenamente a maior participação de mercado. Ao longo de um século, os óleos minerais só passaram a ser contestados no início do século XXI, com a importância dada às questões ambientais, dentre estas, a biodegradabilidade e a sustentabilidade.

O óleo mineral isolante é constituído, em sua maioria, de uma mistura de hidrocarbonetos e de não hidrocarbonetos ou heterocompostos, em pequena proporção. Estima-se em cerca de 2.900 o número de compostos existentes no óleo mineral [22]. Mesmo com um elevado número de componentes em diferentes quantidades na composição de um óleo mineral, a sua caracterização para utilização como isolante não é feita somente por sua composição, mas por uma série de parâmetros físico-químicos. Assim, o estabelecimento de limites para estes parâmetros tem como objetivo alcançar uma uniformidade do comportamento do óleo como isolante e uma referência de qualidade para sua utilização.

Os hidrocarbonetos que compõem a maior parte dos óleos minerais isolantes podem ser classificados em três grupos: [28]

- Hidrocarbonetos parafínicos, que são hidrocarbonetos saturados, de cadeia aberta, linear ou ramificada (Figura 3.1);
- Hidrocarbonetos naftênicos, que são hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo até seis anéis, sendo que estes podem possuir uma ou mais cadeias laterais lineares ou ramificadas (Figura 3.1);
- Hidrocarbonetos mistos, que são hidrocarbonetos contendo a mistura de naftênicos e parafínicos.

Além da composição química processada dos óleos minerais, a sua aditivação é de extrema importância, pois o acréscimo de compostos orgânicos de enxofre termicamente estáveis, que são inibidores naturais do processo de oxidação, retarda o envelhecimento térmico do transformador.

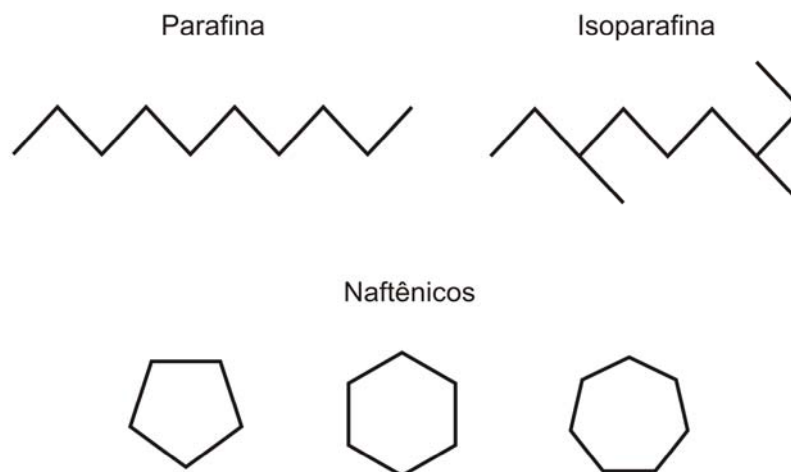


Figura 3.1: Estrutura Química dos óleos isolantes com cadeias lineares ou ramificadas, abertas e fechadas. [20]

### 3.1.1 Hidrocarbonetos Parafínicos

O nome "Parafina", de origem latina, indica que as ligações químicas são relativamente estáveis e resistentes e não podem ser modificadas facilmente com influências químicas. Sendo assim, as parafinas tendem a não oxidar em temperaturas ambientes ou até mesmo elevadas.

Os óleos do tipo parafínico são resistentes e não envelhecem facilmente ou somente oxidam de forma lenta. Eles contêm em sua composição química hidrocarbonetos parafínicos em maior



proporção, demonstram uma densidade menor e são menos sensíveis à alteração de viscosidade/temperatura.

A estrutura molecular dos parafínicos é formada por hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta linear ou ramificada, como é ilustrado na Figura 3.2.

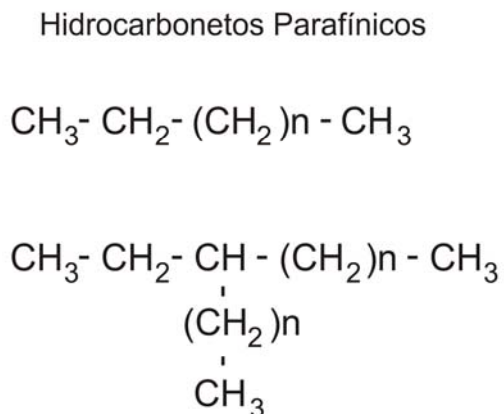


Figura 3.2: Estrutura Química do óleo isolante formado por hidrocarbonetos parafínicos. [28]

### 3.1.2 Hidrocarbonetos Naftênicos

Enquanto os hidrocarbonetos parafínicos formam em sua estrutura molecular cadeias, os naftênicos formam, em sua maioria, ciclos. Os naftênicos, em geral, são usados quando se necessita produzir lubrificantes para baixas temperaturas. A desvantagem dos naftênicos é sua incompatibilidade com materiais sintéticos e elastômeros. [20]

A estrutura molecular dos naftênicos é formada por hidrocarbonetos saturados policíclicos contendo até seis anéis, sendo que estes podem possuir uma ou mais ramificações laterais lineares (Figura 3.3).

### Hidrocarbonetos Naftênicos

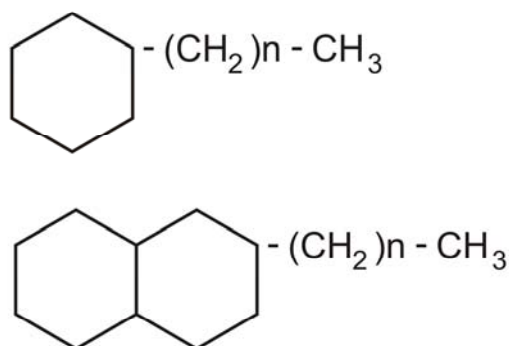


Figura 3.3: Estrutura Química do óleo isolante formado por hidrocarbonetos naftênicos cíclicos. [28]

#### 3.1.3 Importância da aditivção de um óleo mineral

Durante sua vida útil, os óleos utilizados em um transformador podem envelhecer de vários modos. O envelhecimento ocorre predominantemente quando as moléculas de óleo reagem com oxigênio formando produtos oxidados. Este processo depende da disponibilidade de oxigênio e da temperatura, portanto é mais pronunciado em transformadores abertos para a atmosfera e/ou quando forem sujeitos a cargas elevadas. Os produtos formados pelo processo de envelhecimento também são detectados na forma de ácidos, água, borra e através da deterioração correspondente das propriedades elétricas do óleo.

A oxidação do óleo é um processo sequencial com a formação inicial de aldeídos, álcoois e cetonas. Alguns destes compostos continuam a reagir formando ácidos, ésteres e compostos insolúveis no óleo (borras). Também se forma água em todas as etapas da oxidação. Os ácidos de baixo peso molecular são os que mais afetam a degradação da celulose. A maioria dos óleos dielétricos apresenta moléculas de enxofre, os quais desempenham um papel importante no processo de oxidação. Em algumas condições ambientais externas, as moléculas estáveis com enxofre podem se alterar, tornando-se assim mais reativas ao cobre, com exceção dos casos em que o cobre é envernizado. [20]

Para o caso dos óleos minerais refinados (processo utilizado na produção do óleo isolante) e usados com um teor relativamente médio de antioxidantes naturais, na grande maioria dos casos, a estabilidade à oxidação tem sido obtida através da adição de inibidores de oxidação sintéticos do tipo Dibutil-Paracresol (DBPC) BHT.

### 3.1.4 Questão ambiental para o óleo mineral

Generalizando, quanto mais simples as moléculas, mais rápida será a biodegradação, ou seja, quanto mais complexas forem as moléculas, mais difícil será a ruptura e conseqüentemente a degradação. Moléculas de união dupla, anéis aromáticos e heteroátomos degradam mais lentamente; já os alcanos, isto é, parafinas e naftenos, são os hidrocarbonos que são mais facilmente degradáveis pelas bactérias. As parafinas degradam um tanto mais facilmente do que os naftenos, parafinas retas mais facilmente do que as ramificadas e os naftenos com poucos anéis mais facilmente do que os naftenos com vários anéis. Os aromáticos são mais difíceis de serem rompidos pelas bactérias. Quanto menor a quantidade de anéis aromáticos, mais rápida é a biodegradação. O benzeno é o mais rapidamente degradável dos aromáticos, enquanto os poliaromáticos podem ser muito resistentes. [20]

Apesar dos óleos minerais serem biodegradáveis, o período de biodegradação deles é muito longo, o que, em tese, faz com que sejam considerados não biodegradáveis. (Figura 3.9) No caso dos óleos naftênicos ou parafínicos, o grau de poluição ambiental é devido, especificamente, a este longo prazo de biodegradação, como também ao ponto de serem provenientes de fontes não renováveis.

## 3.2 Fluidos minerais formados por Hidrocarbonetos Clorados (PCB)

Na sua composição, o Ascarel é formado por dois ciclos benzênicos onde alguns átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de cloro, numa quantidade variável de dois a dez, razão pela qual são tecnicamente chamados de bifenis policlorados (PCB). Já segundo a *American Society for Testing and Materials (ASTM) D-2864*, os Ascaréis são definidos como: “Um termo genérico para designar um grupo de hidrocarbonetos clorados, sintéticos, resistentes ao fogo, utilizados como isolantes elétricos líquidos. Esses hidrocarbonetos clorados têm a propriedade de, em presença de arco elétrico, produzir, predominantemente, gases de ácido clorídrico não combustível e gases combustíveis em quantidades menores” [22].

O Ascarel foi desenvolvido, em meados da década de 30, como alternativa para os óleos minerais utilizados em transformadores. Pertencendo a um grupo de compostos químicos, o Ascarel tem surgido a partir do uso disseminado da marca “Askarel”. Isso se explica pelo fato de que a popularização da marca acabou por confundi-la com o próprio produto.

Formado por um composto bifenil clorado, a sua fórmula estrutural é mostrada na Figura 3.4.

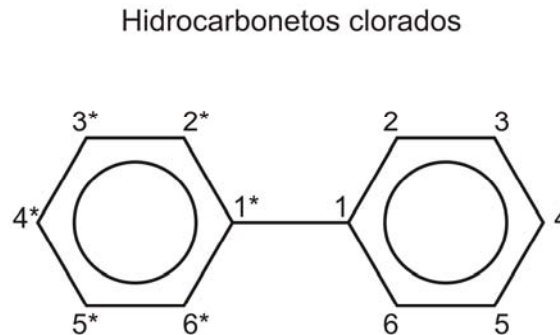


Figura 3.4: Estrutura Química do óleo isolante formado por um composto bifenil clorado. [22]

Entre os dielétricos que podem substituir o óleo mineral, o Ascarel se destaca, sobretudo, pelo fato de não ser inflamável. Além disso, se sobressai por apresentar boas qualidades dielétricas, como a elevada rigidez dielétrica, e térmicas, como a grande capacidade de absorção calorífica, que o torna resistente ao fogo. Por esta característica, recomendava-se empregá-lo em instalações onde as condições de segurança contra incêndios são exigidas, tais como em usinas hidrelétricas, subestações instaladas em solos, minas subterrâneas etc. [22]. Eles também apresentam estabilidades térmicas e químicas notáveis, principalmente nos parâmetros de “ponto de fulgor” e “estabilidade a oxidação”.

Existem 209 tipos diferentes de ascaréis, a depender do número de átomos de cloro que são introduzidos nas moléculas dos bifenis. Eles são conhecidos também por uma grande variedade de nomes comerciais. Quando usados como fluido isolante nos equipamentos elétricos, os ascaréis são misturados com triclorobenzeno (TCB), visando aumentar a sua fluidez, fator importante no processo de refrigeração dos equipamentos elétricos [22].

As propriedades de resistência à inflamabilidade e à propagação de chamas propiciaram ao Ascarel uma utilização preferencial em relação aos óleos minerais, como fluido isolante em transformadores e capacitores. Entretanto, apesar destas qualidades tão atraentes, o Ascarel revelou-se um material tóxico capaz de provocar nefastos efeitos sobre o meio ambiente. Esta desvantagem decorre do fato de ele ser uma substância não biodegradável e possuir uma indesejável persistência de seus compostos, ou seja, apresentar características de bioacumulação. [14]

Apesar de suas excelentes propriedades técnicas e da sua grande utilização, os PCBs foram proibidos de serem utilizados em razão da sua toxidez, que pode ser desencadeada de

duas maneiras: por poluição a quente ou poluição a frio. Em temperatura igual ou superior a 400°C onde há presença de oxigênio (condições de um incêndio, por exemplo), os Ascaréis podem ocasionar a formação de compostos altamente tóxicos, denominados dioxinas e furanos. Tal fenômeno é denominado poluição a quente que, diretamente, ocasiona danos ao meio ambiente e, conseqüentemente, aos seres vivos. [14]

Devido os PCBs não serem biodegradáveis e, em contrapartida, serem bioacumulativos nos tecidos vegetais e animais, eles possuem uma maior probabilidade de se inserirem em uma classe de processos de poluição a frio. Esta poluição pode ser entendida como uma dispersão dos PCBs no meio ambiente por meio de derrames, vazamentos *in natura* ou na forma dispersiva encontrada nos produtos industriais. Pelo fato de não serem biodegradáveis (permanecem intactos durante anos no meio ambiente) e serem bioacumulativos em tecidos vegetais e animais (são transferíveis do alimento para o consumidor), o risco para a saúde humana torna-se considerável.

Na década de 80, quando a população brasileira dava as primeiras demonstrações de conscientização e percepção da importância dos produtos ecologicamente corretos para o meio ambiente, especialistas em meio ambiente e órgãos governamentais denunciaram a periculosidade de uma substância química muito utilizada, desde os anos 30, como fluído dielétrico em transformadores e capacitores elétricos. [14] Em 1981, a legislação brasileira proibiu a utilização dessa substância, denominada cientificamente de PCB (Bifenilas Policloradas), ainda que, pela mesma lei, fosse permitida a utilização dos equipamentos já existentes até o final de sua vida útil – período médio de 40 anos. [29]

Em nível mundial, os primeiros sinais de que o Ascarel era altamente nocivo ao meio ambiente começaram a ser divulgados na década dos anos 60, mas somente nos anos 70 é que os primeiros órgãos competentes nos EUA (EPA) passaram a proibir o uso e a produção dos PCB's. Somente nos anos 80 os órgãos competentes Europeus passaram a realizar tais proibições quanto ao uso do Ascarel. [30]

### **3.3 Fluidos minerais formados por Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular (HMWH)**

Os óleos formados por Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular (HMWH) foram inicialmente desenvolvidos para substituir os óleos do tipo Ascarel, utilizados em transformadores de distribuição. Eles têm como principais características: boas qualidades elétricas, térmicas e de segurança e são considerados, essencialmente, não tóxicos e biodegradáveis, cumprindo, assim, os requisitos das normas ambientais. Os HMWH são

também compatíveis com as normas padrões de materiais isolantes, atendendo às especificações de óleos de "Alto Ponto de Fulgor", formados por Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular e considerados "Fluidos Dielétricos de Baixa Flamabilidade" [31].

Em diversos ensaios de resistência ao fogo, estes tipos de hidrocarbonetos se mostraram bastante resistentes ao fogo, assim como outros produtos substitutos do Ascarel. Desenvolvidos para minimizar os riscos ambientais e de saúde, eles foram classificados como não bioacumuladores. Na decomposição térmica, foi verificado que os dielétricos não produzem PCDF's (*Poly Chlorinated Dibenzo Furans*) ou PCDD's (*Poly Chlorinated Dibenzo-p-Dioxins*), mas em contrapartida, os Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular não podem ser recondicionados, podem, porém, ser reciclados ou refinados. Outra característica importante é que a fluidez dos hidrocarbonetos HMWH é considerada boa, possuindo um bom histórico de serviço em transformadores instalados em climas frios e quentes.

Um dos fluidos comerciais mais conhecidos é o "Rtemp", da empresa *Cooper Power System*, e o primeiro projeto piloto de transformador com Rtemp foi instalado em 1975. Segundo a *Cooper Power*, desde a energização do primeiro piloto, o óleo Rtemp está em mais de 120.000 transformadores, acumulando anos de experiência e serviços [9]. O monitoramento da operação dos transformadores com Rtemp, incluindo o piloto, tem demonstrado que o fluido Rtemp tem boa estabilidade, sem a formação de resíduos (borra) comuns em transformadores com óleo isolante convencional. Nas possibilidades de novas aplicações em transformadores, ele está apto a trabalhar em transformadores tipo *indoor*, submersíveis ou tipo *outdoor* [31]. Entre as principais desvantagens para tais produtos, destacamos o seu custo de produção e venda ao mercado, o que os impossibilitam de serem diretamente competitivos como os óleos minerais convencionais.

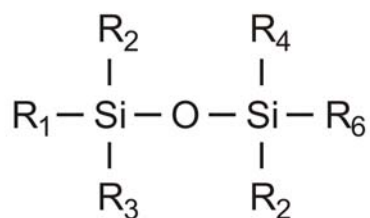
### **3.4 Fluidos do tipo Silicone (PDMS)**

Desenvolvido para suprir os PCB's na década dos anos 70, os óleos de silicone são líquidos incolores e transparentes que apresentam uma longa faixa de viscosidades e pontos de ebulição. Eles se destacam pela altíssima resistência contra temperaturas baixas, altas e envelhecimento, como também pelo seu comportamento favorável quanto ao índice de viscosidade. Utilizando-se das características básicas do silício, os silicones permanecem neutros perante a grande maioria dos elementos, o que lhes confere uma elevada estabilidade

química e, conseqüentemente, maior robustez ao envelhecimento. Ainda se apresentam repelentes à água, evitando assim perda de características isolantes (rigidez dielétrica e fator de potência), principalmente em serviço.

Segundo a ASTM, o “Óleo silicone é o termo genérico para designar uma família de líquidos do tipo polímeros organossilaxones utilizados como isolante elétrico”. Na sua fórmula geral, os grupos  $R_i$  podem ser hidrogênios ou radicais metila, fenila, vinila, aquila ou radicais fenila ou aquila substituídos (Figura 3.5). [22]

#### Óleo isolante tipo Silicone



$R_i$  ( $i = 1,2,3,\dots,6$ )

Figura 3.5: Estrutura Química típica do óleo isolante tipo Silicone [22]

Possuindo um ponto de chama bastante elevado (300°C e acima) e baixo ponto de solidificação (-100°C), a faixa de emprego dos óleos de silicone se situa entre -60°C e 200 °C, podendo ainda assim ser ampliada, sob certas condições. Mesmo com a variação da temperatura, sua viscosidade não se modifica na mesma proporção, tendo valores bem menores que os dos óleos minerais. A deterioração do óleo de silicone começa a 175°C, com a formação de ácidos e resíduos (borra), no entanto, mesmo assim, a sua estabilidade ao calor continua sendo superior a dos ascaréis e a do óleo mineral [28].

Uma característica peculiar dos óleos de silicone é que não são biodegradáveis, não se alteram e não são absorvidos pela cadeia dos organismos vivos. Em contato com o solo, decompõem-se e podem se transformar em  $SiO_2$  (areia) [22].

No mercado, o preço do óleo de silicone é, comparativamente, muito alto em relação ao óleo mineral, o que lhe posiciona na classe de óleos utilizados em usos específicos, ou seja, em transformadores especiais ou de força.

### 3.5 Fluidos do tipo Éster Sintético (POE)

Os fluidos dielétricos a base de éster sintético, também conhecidos como POE (*Synthetic Polyol Esters*), foram desenvolvidos na década dos anos 80 como alternativa aos óleos minerais que estavam no mercado (tipo Silicone e HMWH), e também para substituir os óleos tipo Ascarel ainda existentes. Com um custo relativamente alto, os POE's se limitaram a atender uma demanda de mercado em expansão de transformadores especiais. O alto custo sempre limitou o seu uso industrial em maior escala, deixando assim, cada vez mais limitada a sua disseminação no mercado mundial.

Os ésteres sintéticos são formados a partir da reação de álcoois com ácidos, podendo apresentar estruturas complexas como aquela indicada na Figura 3.6 [32]. Como exemplo de ésteres sintéticos, destaca-se o *Envirotemp® 200* da empresa *Cooper Power Systems*. Na sua composição, são identificadas cadeias não lineares de átomos, com ramificações mono-ácidas, e álcool penta-eritritol.

Éster Sintético (POE)

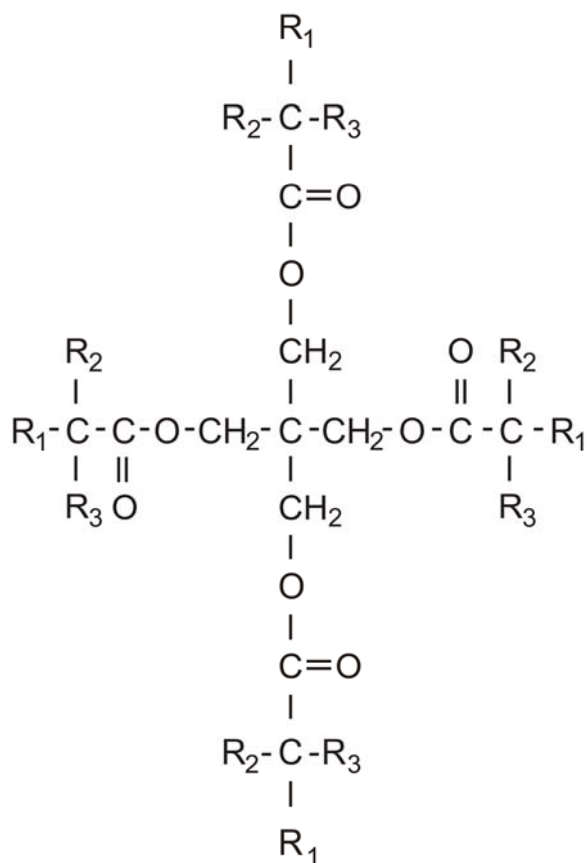


Figura 3.6: Estrutura Química do óleo isolante tipo POE. [8]



Entre as principais características, os POE's têm excelente estabilidade térmica, boas propriedades químicas em baixas temperaturas e ponto de fluidez próximo ao do óleo mineral convencional. Apesar de possuírem boa rigidez dielétrica e viscosidade, apresentam um ponto de combustão mais baixo e uma taxa de biodegradação mais lenta. E, mesmo possuindo um ponto de fluidez próximo ao do óleo mineral convencional, possuem uma gravidade específica não muito boa, em torno de 0,97, que está entre a gravidade específica da água e a do gelo. Isso pode promover a migração de qualquer água livre entre o fundo e o topo do óleo do transformador, nos casos em que tenha ocorrido supersaturação [9].

Desde 1984, os fluidos a base de ésteres sintéticos têm sido utilizados como substitutos dos Ascaréis em transformadores compactos para tração elétrica de trens, assim como em equipamentos científicos, como moduladores *Klystron*. Essas aplicações exigem propriedades como baixa viscosidade, alta lubrificação e baixo ponto de fluidez, que justificam o custo maior.

### 3.6 Fluidos do tipo Éster Natural (óleos de base vegetal)

Os Ésteres Naturais já foram utilizados há mais de um século, em 1892, e, na época, não tiveram seus estudos avançados devido ao baixo custo dos óleos minerais e do fato de estes apresentarem propriedades dielétricas e boa estabilidade [9]. Tendo base vegetal, esses óleos são derivados de diversos tipos de sementes / grãos ou frutas, entre as quais destacam-se a canola, a palma, a soja e o coco. Também são conhecidos como óleos vegetais.

Um exemplo típico de óleo vegetal é o conhecido quimicamente como triglicerídeos, devido às ligações ésteres (Figura 3.7). Os triglicerídeos são, basicamente, segmentos de ácidos graxos compostos por cadeias retas, tendo um número par de átomos de carbono. Isso é resultado natural da biossíntese dos ácidos graxos, em que moléculas são formadas por dois carbonos de cada vez, ou seja, os componentes dos ácidos graxos são longas cadeias lineares de carbonos 14–22, contendo de zero a três ligações duplas. A estrutura da Figura 3.8 é um triglicerídeo, em que os grupos  $R$ ,  $R'$  e  $R''$  consistem de cadeias de C8–C22 [33].

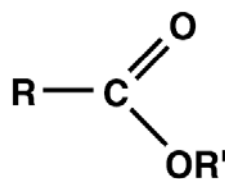


Figura 3.7: Estrutura Química de ligações ésteres que compõem a estrutura molecular de um triglicerídeo. [33]

Na sua composição, o éster natural é formado do óleo de sementes/grãos ou da fruta mais os aditivos para melhorar e adequar o produto final. Também podem ser constituídos por uma mistura de tri, di e monoacilgliceróis, ácidos graxos livres, glicolipídios, fosfolipídios, esteróis e outras substâncias. A maior parte destes constituintes é oxidável em diferentes graus, sendo que os ácidos graxos insaturados são as estruturas mais susceptíveis ao processo oxidativo. Eles são susceptíveis a diversos tipos de transformações químicas que se processam ao longo da fase de extração, durante o transporte ou na estocagem.

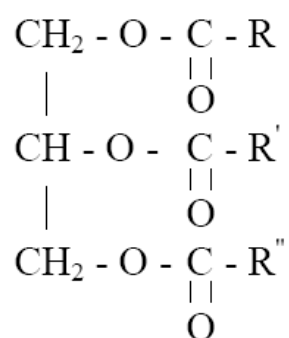


Figura 3.8: Estrutura Química do óleo isolante tipo Triglicerídeos. [33]

Com o aumento da demanda por opções viáveis ao óleo mineral, as pesquisas se intensificaram e foram avaliadas diversas misturas de óleos de classe comestível. Em 1993, a indústria de óleos sintéticos, *Cooper Power Systems*, avaliou duas dúzias de misturas e óleos de classe comestível. Alguns desses óleos continham uma alta porcentagem de ácidos graxos não saturados, que resultam em baixa viscosidade e melhores propriedades a baixas temperaturas. Outros óleos tinham uma grande porcentagem de tipos saturados, que são melhores quanto a estabilidade à oxidação (tabela 3.1). Era preciso equilibrar com cuidado a proporção entre os dois tipos de óleos. Assim, após ser encontrada a melhor forma de equilibrá-los, iniciou-se o passo seguinte: melhoria da oxidação e ponto de fluidez. [34]

Tabela 3.1: Composição típica de ácido graxo de alguns óleos vegetais [35]

Composição típica de ácidos graxos de alguns óleos vegetais				
Óleo Vegetal	Ácidos graxos Saturados %	Ácidos graxos Insaturados %		
		Mono-	Di-	Tri-
Canola	7.9	55.9	22.1	11.1
Milho	12.7	24.2	58	0.7
Caroço de Algodão	25.8	17.8	51.8	0.2
Amendoim	13.6	17.8	51.8	0.2
Oliva	13.2	73.3	7.9	0.6
Cártamo	8.5	12.1	74.1	0.4
Cártamo, oléico alto	6.1	75.3	14.2	-
Feijão-soja	14.2	22.5	51	6.8
Girassol	10.5	19.6	65.7	-
Girassol, oléico alto	9.2	80.8	8.4	0.2

Em 1994, esta mesma indústria, *Cooper Power Systems*, iniciou a seleção de aditivos para melhoria de desempenho e estabilidade à oxidação, e diversos materiais de classe comestível foram incluídos nos estudos de aditivos. Após a conclusão de testes de envelhecimento acelerado em pequena escala, foram determinadas a combinação e a quantidade de aditivos. Assim, no final, era possível usar materiais de classe comestível exclusivamente para os aditivos e ésteres básicos selecionados. [8]

Os triglicerídeos possuem, em geral, características naturais melhores em relação aos óleos minerais, tais como resistência ao fogo (ou de alto ponto de combustão), não toxidez, não bioacumulação e facilidade de ser biodegradável.

Destacam-se entre as principais características dos óleos vegetais as suas qualidades ambientais. Possuindo boas taxas de biodegradação (significa que a biodegradação é mais rápida nos ésteres naturais do que nos outros fluidos dielétricos), são considerados ambientalmente corretos, ou seja, possuem melhores índices de DBO e DQO (Demanda Química de Oxigênio) do que os óleos convencionais. Também possuem bons índices nos ensaios exigidos pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA, como o de Fácil Biodegradação e o Biodegradação Aquática (EPA OPPTS 835.3110). [8]

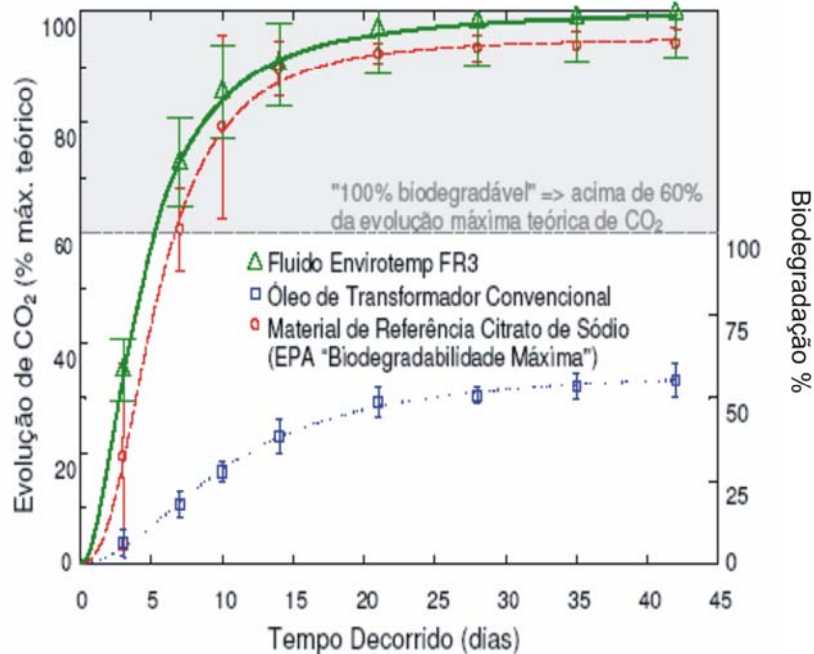


Figura 3.9: Biodegradação aeróbica do óleo à base de éster natural (Envirotemp FR3) e do óleo de transformador convencional [9]

Conforme o 3º projeto de norma para “Óleo Vegetal Isolante para Equipamentos Elétricos” de junho de 2006 da ABNT (Nº 03:010.02-027), o óleo vegetal isolante difere do óleo mineral isolante convencional e de outros fluidos resistentes ao fogo por ser um produto agrícola derivado de óleos vegetais, ao invés de refinado em reservas de petróleo ou sintetizado a partir de precursores orgânicos. Esta mesma norma define ainda que, para que um óleo seja considerado “Óleo Vegetal Isolante”, ele deve conter ligações ésteres, tipicamente de triglicerídeos. E ainda, sua formulação deve ser normalmente composta por uma base derivada de óleo de sementes/grãos e aditivos para melhoria de desempenho e classificada como resistente ao fogo (ou de alto ponto de combustão), o mesmo deve não ser tóxico, não bioacumulativo e ser facilmente biodegradável. [36]

Outras características ambientais importantes são que os fluidos naturais, em geral, podem ser rejuvenescidos, reciclados e facilmente descartáveis, obedecendo à classificação de óleos coberta no Ato de Regulamentação de Óleos Comestíveis dos EUA. Um dos testes de toxicidade mais sensíveis para as espécies aquáticas é o “Teste de toxicidade aguda a alevinos de trutas”, conforme o método 203 da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Sob esse método, mesmo pequenas quantidades de certos tipos de materiais de classe comestível podem levar a uma alta taxa de mortalidade dos alevinos. [9]

### 3.6.1 Principais tipos de fluidos de base ecológica no mercado

No final dos anos 1990, os primeiros óleos ecologicamente corretos, como os de base de éster natural, foram desenvolvidos no intuito de atender a um mercado consumidor cada vez mais exigente, principalmente com os conceitos de sustentabilidade e meio ambiente. Aproximadamente na metade da mesma década, surgiram os primeiros projetos pilotos de transformadores contendo óleo vegetal. No início, como somente um fabricante detinha um produto pronto para fabricação em escala comercial, pesquisas de outros produtos de base similar já se encontravam em andamento.

A aplicação de ésteres naturais em transformadores alcançou um equilíbrio, entre o transformador desejável e as propriedades ambientais externas, não encontrado em outros fluidos dielétricos. Uma atrativa fonte de ésteres naturais são os óleos de sementes comestíveis, uma *commodity* agrícola largamente disponível, utilizada principalmente em gêneros alimentícios e derivada de fontes renováveis, ao contrário dos óleos minerais. [9]

Na tabela 3.2 estão os principais tipos de óleos ecológicos desenvolvidos ou em desenvolvimentos em âmbito mundial. Pode-se verificar o nome do produto, a característica principal do mesmo e o produtor/centro de pesquisa.

Tabela 3.2: Principais óleos ecológicos desenvolvidos ou em desenvolvimento. [11]

<b>Nome</b>	<b>Tipo</b>	<b>Produtor / Centro de Pesquisa</b>
BIOTEMP®	Óleos provenientes do girassol, açafoa e semente de colza.	ABB Inc.
BIOTRANS®	Mistura de óleos de sementes de soja, parcialmente hidrogenadas, com uso de ésteres da palma ou de óleos do coco.	Cargill
Envirotemp®FR3	Óleo de sementes comestíveis. Podem ser usados independentemente ou combinados: soja, girassol e semente de colza.	Cooper Power Systems
ECO Natural Ester Fluid®	Mistura contendo ácido oléico e óleo de canola.	Dielectric Systems Inc. Fluids
Coconut oil®	Óleos provenientes do Coco.	University of Moratuwa, Sri Lanka

### 3.6.2 Questão ambiental para óleo de base vegetal

Hoje, os principais critérios na seleção de materiais não são apenas focados no seu desempenho ou na sua eficiência. Os custos ambientais e do ciclo de vida total também estão se tornando parte da análise. Materiais que serão aplicados como fluidos dielétricos devem atender às exigências mínimas tanto ambientais como de saúde. [8]

Esses materiais devem, por exemplo:

- ser essencialmente não-tóxicos;
- ser biodegradáveis;
- produzir subprodutos com degradação térmica admissível de baixo risco;
- ser recicláveis, recondicionáveis, facilmente descartáveis (recursos renováveis);
- não ser classificados como material perigoso pelas agências ambientais e de saúde.

A questão ambiental para os Óleos Isolantes Vegetais se tornou uma justificativa primordial para a sua investigação e desenvolvimento. Um produto deste âmbito teria como ponto fundamental a não toxidez e a biodegradabilidade, o que inviabilizaria a aditivação com produtos tóxicos ou de difícil biodegradabilidade. A aditivação, muitas vezes, é essencial para adequação do produto aos parâmetros mínimos das normas exigidas pelo mercado.

Uma maneira de mensurar a biodegradabilidade relativa pode ser pelo método de teste Biodegradação Aquática (EPA OPPTS 835.3110). Conforme mostrado na Figura 3.9, os refrigerantes dielétricos a base de materiais de classe comestível se degradam a uma taxa e grau similares às do material de referência da EPA (citrato de sódio), considerado o máximo biodegradável. A taxa de biodegradação do óleo de transformador convencional é muito mais lenta. [9]

Na tabela 3.3, tem-se uma breve classificação dos principais impactos ambientais gerados pelos diferentes tipos de óleos ou meios isolantes utilizados em transformadores de distribuição e/ou de força. Classificam-se os diferentes níveis de desempenho, indicando os de menor a maior impacto na seguinte seqüência: Excelente, Bom, Pobre e Falha. Há casos em que os impactos podem ter ou não atuações em determinados tipos de isolante.

Tabela 3.3: Tabela analítica de diferentes tipos de isolações em um transformador padrão. [37]

<b>Características de diferentes tipos de isolamento em transformadores de distribuição</b>					
<b>Característica</b>	<b>Óleo Mineral</b>	<b>Líquidos de Alta Resistência a Fogo</b>			<b>A Seco VPI/Resina</b>
		<b>HMWH</b>	<b>Óleo Silicone</b>	<b>Ester Natural</b>	
Eficiência	Bom	Bom	Bom	Bom	Pobre
Nível de Ruído	Bom	Bom	Bom	Bom	Pobre
Tempo de Vida do Isolamento	Bom	Bom	Bom	Excelente	Falha
Reciclável/Recondicionável	Bom	Bom	Falha	Excelente	Pobre
Registro do dispositivo de Segurança contra fogo	Pobre	Excelente	Bom	Excelente	Bom
Capacidade de detecção de Falta (DGA)	Bom	Bom	Falha	Bom	Pobre
Recuperação Natural / Conservação	Falha	Falha	Falha	Excelente	Pobre
Biodegradabilidade	Bom	Bom	Pobre	Excelente	Pobre
Dissolução do óleo por ações comestíveis (Ex: Peixes)	Não	Não	Não	Sim	N/A

Para as diferentes características expostas na tabela, indica-se entre as principais a Eficiência de um óleo ou meio isolante. Um isolamento com Eficiência indica que ele poderá ser utilizado em menores quantidades e maiores frequências, o que implica em redução de custos. Na mesma linha de pensamento, tem-se o Nível de Vida do Isolamento, ou seja, o tempo médio de vida do fluido ou meio isolante quando utilizado em condições normais de funcionamento; o Nível de Recondicionamento ou de Reciclagem do óleo ou meio isolante. Para as questões ambientais diretas, ou seja, as que impactam diretamente na natureza, tem-se: a Biodegradabilidade; a Dissolução do Óleo por Ações Comestíveis; ou seja, a capacidade de biodecomposição via ações comestíveis, como, por exemplo, por animais; e o Nível de Ruído impactado por um transformador que possui como isolante o respectivo óleo ou meio isolante.

Pode-se verificar que o óleo isolante a base de Éster Natural apresentou as melhores classificações, uma vez que este foi desenvolvido em cima de rígidos padrões de qualidade ambientais. Depois dos ésteres naturais, têm-se os HMWH, que falham justamente nos itens de “Recuperação Natural” e de “Dissolução do Óleo por Ações Comestíveis”.

### **3.7 Resumo do Capítulo**

Neste capítulo, foram descritas as principais características dos tipos de óleos isolantes para transformadores de potência existentes. Entre os principais tipos de fluidos isolantes, destacam-se os de origem mineral e os vegetais. Estes últimos, uma tendência para o próximo século. Apresentaram-se, ainda, os principais tipos de isolantes existentes no mercado, mostrando a importância desta classe de isolantes para o meio ambiente.

Em toda a estrutura do capítulo, apresentou-se uma fórmula química genérica do tipo de óleo isolante como também a sua evolução histórica ao longo do tempo.



## **4. PARÂMETROS DOS ÓLEOS ISOLANTES**

A determinação das propriedades físicas, químicas e elétricas dos óleos isolantes é de fundamental importância no intuito de garantir as condições operacionais mínimas necessárias para manter ou aumentar a vida útil dos transformadores.

Uma das maneiras de diagnosticar a qualidade dos óleos isolantes, novos ou em operação, é com a realização de ensaios estabelecidos pelas normas nacionais, como a ABNT NBR 5357, ou internacionais, como a ASTM D3487. Estes ensaios permitem diagnosticar alguns problemas, como por exemplo, os pontos que indicam a qualidade do isolamento e da refrigeração.

Na seqüência, faz-se um breve comentário sobre as principais normas para óleos isolantes minerais e vegetais, com uma análise comparativa entre as normas de óleos vegetais e óleos minerais. Em seguida são descritas as principais características dos parâmetros físicos, químicos e elétricos observadas nos óleos isolantes no sentido de monitorar a sua qualidade.

### **4.1 Principais Normas para Óleos Isolantes**

Normas Técnicas são documentos estabelecidos por consenso e aprovados por uma instituição ou organismo reconhecido. Estes fornecem, para uso comum e repetido, as regras, diretrizes ou características para os produtos, processos ou métodos de produção. As normas devem ser baseadas em resultados consolidados da ciência, da tecnologia e das experiências acumuladas, visando à otimização dos benefícios para as empresas e para a comunidade. A função básica das normas é estabelecer "o que" e "como fazer".

#### **4.1.1 Normas Nacionais e Internacionais**

No Brasil, as normas desenvolvidas tornam-se obrigatórias quando explicitadas em um instrumento do Poder Público (lei, decreto, portaria, normativa, etc) ou quando citadas em contratos. Entretanto, mesmo não sendo obrigatórias, as normas são sistematicamente adotadas em questões judiciais por conta do Inciso VIII do Art. 39 do Código de Defesa do Consumidor.

Para óleos dielétricos de base mineral para transformadores de potência, a norma geralmente utilizada pelo mercado é a ABNT NBR 5357. Já no caso dos óleos dielétricos de Éster Natural, em junho de 2006, o Comitê Brasileiro de Eletricidade junto com a Comissão de Estudo de Líquidos Isolantes Sintéticos e Naturais colocou no mercado o projeto de Norma 3º PROJETO 03:010.02-027. Esta Norma especifica o óleo vegetal isolante novo à base de éster natural para uso como dielétrico e refrigerante em equipamentos elétricos novos ou usados como, por exemplo, transformadores e equipamentos auxiliares, e estabelece orientações para sua embalagem, rotulagem, armazenamento e manuseio.

Assim como a ABNT, a ASTM internacional (*American Society for Testing and Materials*) é uma das maiores organizações voluntárias do mundo que desenvolve padrões técnicos para materiais, produtos, sistemas e serviços. Os 130 comitês técnicos da entidade são compostos por profissionais espalhados em mais de 100 países que desenvolvem padrões, que cobrem indústrias que utilizam os mais diversos materiais. Outra bastante conhecida é a IEC (*International Electrotechnical Commission*), que foi fundada em 1906 no Reino Unido, e, atualmente, é uma das organizações líderes globais que prepara e publica normas internacionais para tecnologias elétricas, eletrônicas e áreas relacionadas. As atividades da IEC servem de base para a normatização nacional e como referência para a elaboração de negócios e contratos internacionais. A IEC que trabalha com os transformadores de potência é a *IEC 60076-1:2000*.

Para o caso dos transformadores de potência, tem-se a ASTM D3487 para óleos de base mineral e a ASTM D6871 para óleos de base Éster Natural.

#### 4.1.2 Análise comparativa entre as normas para óleos vegetais e óleos minerais

A evolução tecnológica nas diversas áreas do conhecimento humano exige que as normas técnicas acompanhem e reflitam, de forma atualizada, esse desenvolvimento. Um trabalho incessante é a investigação das lacunas existentes no campo de normatização sobre uma determinada área ou setor, bem como a detecção da necessidade de revisão de normas técnicas existentes, visando adequá-las ao *status* tecnológico vigente e às demandas do mercado. No entanto, para cada tipo de óleo dielétrico, existe uma série de características intrínsecas que os distingue entre si, ou seja, a composição química desta classe de óleos varia sensivelmente entre os diferentes tipos.

Na tabela 4.1, tem-se um comparativo entre as normas ASTM para óleos minerais e as normas ASTM para óleos vegetais (tipo Éster Natural). Também, na tabela, são apresentados

os comparativos das normas nacionais, da ABNT, para óleos minerais e óleos vegetais, porém conhecidos como “3º PROJETO 03:010.02-027”.

Tabela 4.1: Comparação entre as Normas Nacionais e Internacionais para óleos tipo Mineral (Naftênicos) e tipo Ésteres Naturais.

Propriedade	Método	Óleo Mineral	Ester Natural	Método	Óleo Mineral	Éster Natural
	ASTM	ASTM D3487	ASTM D6871	ABNT	ABNT 5357	3º PROJETO 03:010.02-027
<b>Elétrica</b>						
Rigidez Dielétrica (kV)	D1816 (2mm)	≥ 35	≥ 35	NBR 6869 (2,5mm)	≥ 30	≥ 30
Fator de Dissipação (%)	25°C	≤ 0,05	≤ 0,20	D924	≤ 0,05	≤ 0,20
	100°C	≤ 0,30	≤ 4,00		≤ 0,40	≤ 4,00
<b>Química</b>						
Teor de Água (mg / kg)	D1533	≤ 35	≤ 200	NBR 10710	≤ 35	≤ 200
Número de Acidez (mg KOH / g)	D974	≤ 0,03	≤ 0,60	NBR 14248	≤ 0,03	≤ 0,60
<b>Física</b>						
Cor	D1500	≤ 0,50	≤ 1,00	NBR 14483	≤ 1,00	≤ 1,00
Exame Visual	D1524	limpo & brilhante	limpo & brilhante	-	-	claro & límpido
Densidade Relativa	D1298	≤ 0,91	≤ 0,96	NBR 7148	≤ 0,86	≤ 0,96
Ponto de Fulgor (°C)	D92	≥ 145	≥ 275	NBR 11341	≥ 140	≥ 275
Ponto de Combustão (°C)	D92	-	≥ 300	NBR 11341	-	≥ 300
Viscosidade (cSt)	100°C	≤ 15,0	≤ 15,0	NBR 10441	≤ 3,0	≤ 15,0
	40°C	≤ 50	≤ 50		≤ 12,0	≤ 40
Ponto de Fluidez (°C)	D97	≤ -40	≤ -10	NBR 11349	≤ -12	≤ -10
Tensão Interfacial (dyne / cm) a 25°C	D971	≥ 40	-	NBR 6234	≥ 40	-

Realizando-se uma análise comparativa entre as normas para óleos minerais e as para ésteres naturais, são verificados os principais pontos de divergências:

- Nos levantamentos realizados, em alguns parâmetros como o fator de dissipação, os índices mínimos solicitados por Ésteres Naturais são maiores que os dos óleos

minerais. Pode-se verificar que, aumentando o valor da temperatura ambiente do ensaio, há um aumento relativamente maior para os índices dos óleos vegetais se comparados com os índices dos óleos minerais. Isto é ocasionado devido às estabilidades elétrica dos óleos vegetais estarem mais susceptíveis a mudanças de temperatura que a dos óleos minerais. Para o caso dos óleos vegetais que não passam pelos processos de aditivção, esta instabilidade torna-se um ponto de maior relevância, uma vez que a aditivção busca garantir uma melhor estabilidade química dos óleos.

- Quanto ao teor de água, os óleos vegetais podem ter valores bem maiores que os dos óleos minerais. Esta observação poderia indicar que o óleo vegetal está mais vulnerável a passagens de correntes elétricas de fuga e / ou disruptivas. Porém, esta afirmação só é válida se os conteúdos de umidade dos óleos vegetais permanecerem acima dos seus pontos de saturação. No entanto, os óleos vegetais (éster natural) possuem, tipicamente, níveis de saturação de umidade muito mais alto que os óleos minerais, o que os permite terem índices de teor de água maiores que os óleos minerais. Estes maiores índices de teor de água pode ser benéfico por um outro ponto de vista, pois agem como agentes refrigerantes no transformador, ajudando a elevar o seu ponto de fulgor. [9]

- No caso das normas para óleos minerais nacionais e internacionais, tem-se a ABNT 5357 e a ASTM D3487. As mesmas são muito parecidas em termos de índices mínimos e máximos solicitados, poucas divergências são encontradas e muitas destas são influenciadas pelos locais de instalação dos transformadores, ou seja, pelo ambiente de aplicação. Dentre elas, o ponto de fluidez e a viscosidade.

- No caso dos óleos vegetais, as normas ASTM D6871 e o 3º PROJETO 03:010.02-027 são bem semelhantes, mostrando um alinhamento entre as principais características dos Ésteres Naturais, sendo irrelevante o local de instalação do transformador. As normas para transformadores com óleo vegetal possuem pontos de fluidez semelhantes, o que não diferencia o local geográfico de instalação do transformador.

## **4.2 Ensaio dos Óleos Minerais e Vegetais**

Para melhor compreensão dos ensaios utilizados para aferir a qualidade de um óleo isolante, dividiu-se os tipos de ensaios em duas categorias: a dos ensaios físico-químicos e a dos ensaios elétricos.

Adiante é explicada brevemente a importância de cada parâmetro dos ensaios para um óleo isolante, como também alguns pontos que são extremamente relevantes para o estudo de caso da dissertação.

#### **4.2.1 Ensaios Físico-Químicos**

O óleo isolante em transformadores é usado com o objetivo de atender a duas finalidades: garantir um bom isolamento entre os componentes do transformador e dissipar para o exterior o calor proveniente do efeito Joule nos enrolamentos, assim como do núcleo. Para que o óleo possa cumprir satisfatoriamente a estas duas condições, ele deverá ser testado, por meio de ensaios, para assim averiguar se está em boas condições de trabalho. [22]

Os ensaios físico-químicos são importantes para atestar tanto a qualidade dos óleos como para classificar que tipo de óleo está sendo avaliado. Muitos destes parâmetros indicam uma série de características que estão correlacionadas diretamente às principais funções do transformador como também à vida útil do mesmo. Todos estes parâmetros são necessários para verificação dos limites mínimos ou máximos exigidos na classificação de um bom isolante. Os principais parâmetros dos ensaios físico-químicos utilizados ao longo do trabalho são:

##### **4.2.1.1 Cor**

O ensaio de cor realizado no óleo isolante tem por principal função a indicação de contaminação e/ou oxidação do mesmo. Quando há uma rápida alteração na cor (cores mais intensas e escuras) tem-se um indicativo de piora na qualidade do óleo. O ensaio de cor é feito a partir de comparações com uma série de cores padrões já definidas. Este ensaio não é considerado um ensaio crítico, mas é um bom referencial na percepção da qualidade do óleo, principalmente em óleos minerais, pois quanto melhor for o refino do produto, mais clara e incolor será a cor final do produto.

##### **4.2.1.2 Densidade**

A densidade é a medida da quantidade de massa por volume dos materiais e por meio deste ensaio é identificado possíveis contaminações com solventes ou impurezas nos óleos

isolantes. Uma outra finalidade na determinação da densidade é a classificação do tipo de óleo mineral, ou seja, se ele é Parafínico ou Naftênico.

Para os óleos vegetais, a densidade se comporta de forma semelhante a dos óleos minerais.

#### 4.2.1.3 Viscosidade

A viscosidade é a medida da força necessária para o escoamento de um líquido, ou seja, é a resistência que o óleo oferece ao escoamento contínuo sem turbulência, inércia ou outras forças.

Este parâmetro é importante, pois a quantidade de calor que o óleo é capaz de transferir por hora, do transformador para o meio ambiente, depende da viscosidade. O óleo deve ter um valor de viscosidade adequado para que possa circular livremente pelas aletas (radiadores) de refrigeração, permitindo assim que o calor gerado pela parte ativa seja trocado com o meio ambiente por convecção natural e, ainda, tenha uma alta condutividade térmica.

Para o caso dos óleos vegetais, os ensaios de viscosidade cinemática devem ser realizados em, no mínimo, duas temperaturas citadas pelas normas. (ABNT - 3º PROJETO 03:010.02-027)

#### 4.2.1.4 Ponto de Fulgor

É a menor temperatura em que se formam vapores inflamáveis na superfície do óleo, que são identificados pela formação de um lampejo quando em presença de uma chama. O ensaio para determinação do ponto de fulgor é simples e informa os extremos da faixa de peso molecular dos componentes existentes no óleo avaliado. Neste ensaio, o peso molecular indica o grau de um componente químico em gerar vapores a uma determinada temperatura. A sistemática do ensaio (*Vaso Cleveland*, que é usualmente utilizado neste tipo de ensaio, mostrado na Figura 4.1) consiste em aquecer o óleo isolante e, simultaneamente, expô-lo à ação de uma chama próxima à superfície do produto. Com o aquecimento, os compostos voláteis presentes no óleo irão vaporizar até inflamarem sob a ação da chama. A temperatura onde ocorre a chama é o ponto de fulgor. Assim, pode-se concluir que este ensaio é uma determinação indireta da quantidade de compostos voláteis presentes na amostra do óleo. Quanto maior for o teor de compostos voláteis, menor será o ponto de fulgor. É estipulado um valor mínimo de temperatura como forma de garantir um teor máximo de compostos voláteis.



Figura 4.1: Ilustração de um Vaso aberto tipo Cleveland utilizado em ensaios de Ponto de Fulgor. [38]

Uma justificativa importante para este tipo de ensaio é quanto à necessidade de conhecimento da temperatura em que se formam os gases inflamáveis. Para os óleos vegetais, esta característica é importante, principalmente para aplicações em equipamentos especiais, que podem estar em classes de tensões elevadas. [36]

#### 4.2.1.5 Ponto de Combustão

O ponto de combustão é a menor temperatura na qual a amostra de óleo entra em combustão por pelo menos 5 segundos. Aquecendo-se o óleo até uma determinada temperatura, ele se inflama na presença de uma chama, este é o ponto de inflamação. Se a temperatura for elevada até outro valor determinado, o óleo se inflamará espontaneamente em contato com o ar, este é o ponto de combustão. O conhecimento dessas temperaturas é importante, pois o óleo pode ficar submetido, em operação, a faíscas elétricas ou a aquecimento exagerado.

#### 4.2.1.6 Ponto de Fluidiez

O procedimento do ensaio de ponto de fluidez consiste em resfriar uma amostra do óleo isolante até que cesse o seu escoamento pela ação da gravidade. A temperatura na qual isto ocorre é o ponto de fluidez. Em outras palavras, o ponto de fluidez é a temperatura mais baixa na qual o óleo, em condições perfeitamente estabelecidas, escoar. Estas condições podem ser situações de trabalho do transformador em não sobrecarga ou a vazio.

A determinação do ponto de fluidez permite identificar o tipo de óleo que está sendo

ensaiado, para o caso dos minerais, como também permite concluir que espécie de aparelhos e em que condições os óleos poderão ser utilizados. O ponto de fluidez deverá ser compatível com a temperatura do ambiente em que for instalado o transformador.

Para o caso do óleo vegetal isolante, o ponto de fluidez do óleo é importante como índice da temperatura mais baixa na qual o material pode ser esfriado, sem limitar seriamente seu grau de circulação. Alguns fluidos a base de óleo vegetal são sensíveis ao armazenamento prolongado em baixas temperaturas e seus pontos de fluidez podem não prognosticar adequadamente suas propriedades de escoamento em baixas temperaturas. [36]

#### 4.2.1.7 Tensão Interfacial

A tensão interfacial é a força necessária para que um anel de platina rompa a interface água-óleo, sendo uma medida indireta da concentração de compostos polares presentes no óleo. [22] Esta tensão é uma característica muito sensível à presença de contaminantes polares solúveis no óleo e aos produtos da deterioração oxidativa do óleo isolante.

Durante a utilização do óleo no equipamento, esta propriedade decresce de valor de maneira rápida e uniforme com o início da oxidação devido à formação de compostos polares como aldeídos, cetonas e ácidos, os quais apresentam grande interação com a água. Em seguida, decresce mais lentamente devido a um envelhecimento oxidativo do óleo em um estágio mais moderado. Valores diferentes dos solicitados por normas para esta característica podem indicar o momento ideal de regeneração ou substituição do mesmo.

O ensaio da tensão interfacial é realizado quando se coloca uma camada de óleo isolante sobre uma camada de água e, em seguida, faz-se um anel de platina imerso na água passar para a camada de óleo. A força necessária para fazer com que o anel rompa a superfície da água é tomada como a Tensão Interfacial Óleo/Água.

Um valor mínimo da ensaio de Tensão Interfacial garante baixos teores de substâncias oxigenadas e polares no produto. Isso é ocasionado devido à água trabalhar como um óxido de hidrogênio, portanto, um material altamente oxigenado e de elevada polaridade molecular. Assim, quanto mais puro for o óleo, menor será a interação com a camada de água e mais alto será o valor obtido para o ensaio. Este ensaio é de grande importância na avaliação das condições de operação no caso dos óleos minerais.

No caso dos óleos vegetais, os critérios de desempenho da tensão interfacial estão sendo avaliados segundo o 3º projeto de norma para “Óleo Vegetal Isolante para Equipamentos



Elétricos” da ABNT (Nº 03:010.02-027), portanto, os requisitos ainda não foram estabelecidos. [36]

#### 4.2.1.8 Índice de Neutralização (Número de Acidez)

O ensaio de índice de neutralização indica o teor de contaminantes e/ou dos constituintes de natureza ácida presentes no óleo. O valor encontrado no ensaio deve ser baixo e indica o grau de oxidação de um óleo. Este valor é usado para determinar se o óleo deve ser regenerado ou substituído, em conjunto com resultados obtidos em outros ensaios, tais como tensão interfacial e perdas dielétricas (fator de dissipação ou fator de potência). Em óleos isolantes minerais novos, o valor é muito baixo, praticamente ignorável.

O processo de geração de acidez ocorre durante a utilização do transformador, quando o óleo isolante passa a ser submetido a processos de oxidação, formando ácidos como produto final de degradação. Com a acidez do óleo, ocorre uma tendência natural de criação de produtos poluentes que, por final, além de polimerizarem o óleo, criam borra, podendo se depositar tanto na parte ativa ou nos trocadores de calor. Com a dificuldade de transferência de calor para o ambiente externo, há uma diminuição sensível da vida útil do transformador. O ensaio do índice de neutralização é simplesmente uma medida indireta do grau de oxidação do óleo.

Para o caso dos óleos vegetais, é necessário um baixo conteúdo de acidez total do fluido para minimizar a condução elétrica e corrosão metálica e aumentar a vida do sistema isolante. Os valores dos índices de neutralização típicos dos fluidos isolantes a base de óleo vegetal são normalmente mais altos do que os do óleo mineral isolante. [36]

#### 4.2.1.9 Teor de Água

A água é um produto indesejável para a composição do óleo isolante e pode ser proveniente da atmosfera (ex: problemas de vedação) ou do envelhecimento dos isolamentos celulósicos das partes internas do transformador.

Quando se tem um teor de água baixo, a composição do isolante permanece em estado de solução. Entretanto, quando se tem um teor acima de uma determinada concentração, uma parcela da água passa a não ser mais solúvel, permanecendo no estado livre. Para um óleo isolante, o ideal é ter baixos valores de teor de água para obter-se valores elevados de rigidez dielétrica e baixas perdas dielétricas nos sistemas isolantes. O elevado teor de água, além de

prejudicar as propriedades elétricas do óleo (Rigidez Dielétrica), acelera a deterioração química dos isolamentos celulósicos, agindo como catalisador, diminuindo a vida útil dos equipamentos.

O ensaio de teor de água consiste na determinação, através de reações químicas, da quantidade de água presente na amostra de óleo sob análise. Para o caso de óleos minerais isolantes, a água apresenta-se em quantidade de solubilidade muito baixa, devido à característica química de apolaridade. No caso dos óleos novos, o ensaio visa verificar a qualidade dos processos de fabricação e transporte e manuseio do óleo.

Para o caso de óleos isolantes não minerais, como os ésteres naturais, a umidade estará presente em quantidades maiores, pois a característica destes óleos é de serem menos apolares, o que propicia maiores afinidades a água. Em suma, o teor de água varia de acordo com a estrutura química do óleo isolante em questão, que pode ser mais ou menos apolar.

No caso dos óleos vegetais, é necessário se ter um baixo teor de água, para que o óleo apresente características mais apolares e, com isso, mantenha a umidade num valor distante do seu valor de saturação. Umidades com valores abaixo dos pontos de saturação são mais adequadas para indicar boa rigidez dielétrica e baixas perdas dielétricas nos óleos vegetais. Um dos propósitos da baixa umidade é aumentar a vida útil do sistema isolante e minimizar a corrosão metálica. A quantidade de água exigida para saturar o óleo vegetal isolante à temperatura ambiente é aproximadamente 20 vezes a do óleo mineral isolante. Esta afirmação permite que o óleo vegetal possua um índice de teor de água mais flexível que o do óleo mineral. Então, as comparações com óleo mineral isolante devem ser feitas à base de porcentagem de saturação (saturação relativa) ao invés de se usar conteúdo de água absoluto. [36]

#### 4.2.1.10 Estabilidade à Oxidação

O ensaio visa avaliar a estabilidade química de uma amostra de óleo em estudo. É muito importante observar que este ensaio não guarda nenhuma relação com o processo real de oxidação do isolante no transformador. Trata-se apenas de uma medida da qualidade de fabricação do produto e indica uma tendência à oxidação mais rápida ou mais lenta.

Após o ensaio, uma amostra do óleo é retirada do sistema e determina-se o teor de borra e o índice de acidez. A borra é um produto da oxidação dos hidrocarbonetos encontrado em óleos minerais. Os produtos ácidos, determinados pelo índice de acidez, são resultantes da

oxidação. A estabilidade a oxidação é indicada através destes dois produtos encontrados no óleo no final do ensaio.

No caso dos óleos vegetais, os requisitos para estabilidade à oxidação e métodos de ensaios apropriados para o óleo vegetal isolante ainda não foram estabelecidos, segundo o 3º projeto de norma para “Óleo Vegetal Isolante para Equipamentos Elétricos” da ABNT (Nº 03:010.02-027). Os critérios de desempenho da estabilidade à oxidação estão sendo avaliados e podem diferir para equipamentos com sistemas selados, como conservadores de óleo (acessório típico de um transformador de potência), ou sistemas abertos, principalmente pela tendência à oxidação dos óleos vegetais em presença de oxigênio. Para os aditivos inibidores à oxidação, estes podem ser acrescentados no óleo vegetal, de acordo com os métodos de análises recomendados pelos fabricantes dos aditivos.

#### **4.2.2 Ensaio Elétricos**

Para um líquido isolante cumprir as funções de isolamento em um transformador, ele deve atuar tanto como um bom isolante para pequenas correntes de fuga, como também evitando a criação de arcos elétricos entre as partes que apresentam diferenças de potenciais elétricos a determinadas tensões aplicadas. Os dois parâmetros elétricos que servem para verificar estas características são denominados de fator de potência e rigidez dielétrica.

A seguir, são explicados os conceitos de: polarização, um dos princípios que define um bom dielétrico; o circuito elétrico equivalente de um isolante, que é a forma equacional de um circuito isolante; e, por final, as características de fator de potência e rigidez dielétrica.

##### **4.2.2.1 Polarização**

Um dos principais processos, característico para qualquer dielétrico quando sobre ele atua uma tensão elétrica, é a polarização, ou seja, o deslocamento limitado de cargas ou a orientação das moléculas dipolares. Este fenômeno, que atua em um dielétrico, pode ser julgado tanto através do valor da constante dielétrica do material ( $k$ ) como do valor do ângulo de perdas dielétricas. Isto é, a polarização influencia diretamente as variáveis de constante dielétrica e o ângulo do fator de perdas. Se a polarização vem acompanhada de dissipação de energia, esta provoca o aquecimento do dielétrico. A maioria dos dielétricos é caracterizado

pelo deslocamento elétrico das cargas como uma função linear do campo elétrico que se cria no dielétrico.

Nos dielétricos polares, as moléculas de alguns dielétricos, como a água, têm momentos de dipolo elétrico permanentes, ou seja, interação entre duas moléculas que apresentam momento de dipolo elétrico instantaneamente induzido. Em tais materiais, os dipolos elétricos tendem a se alinhar com um campo elétrico externo (Figura 4.2). Pelo fato das moléculas estarem em constante agitação térmica, o alinhamento não é completo, mas aumenta quando a intensidade do campo aplicado é aumentada ou quando a temperatura é diminuída. [39]

Na Figura 4.2 (a), as moléculas estão dotadas de um momento de dipolo elétrico permanente, mostrando a orientação aleatória dos mesmos na ausência de um campo elétrico externo. Já na Figura 4.2 (b), um campo elétrico é aplicado, produzindo alinhamento parcial dos dipolos. A agitação térmica impede o alinhamento completo.

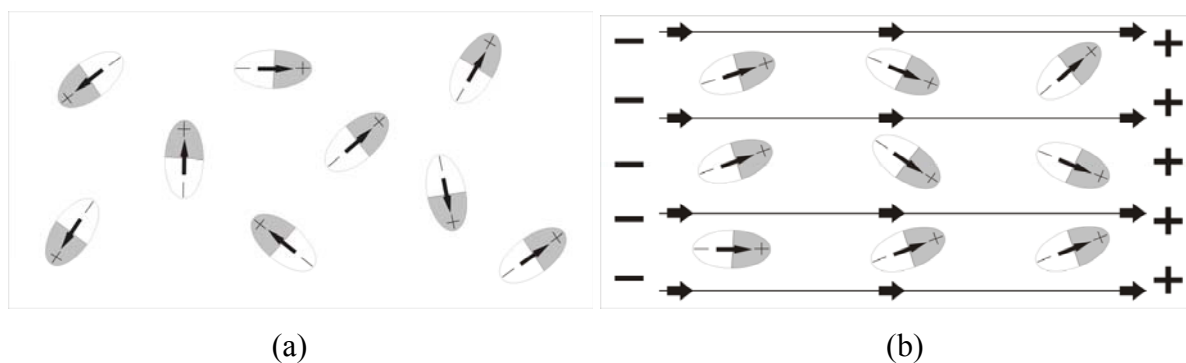


Figura 4.2: (a) Moléculas dotadas de um momento de dipolo elétrico permanente. (b) Alinhamento parcial dos dipolos. [39]

Nos dielétricos não-polares, ou seja, apolares, quer as moléculas tenham ou não momentos de dipolo elétrico permanentes, eles os adquirem por indução quando colocados num campo elétrico externo. Verifica-se que este campo externo tende a “esticar” a molécula, separando ligeiramente os centros de carga positiva e de carga negativa. [39]

Na Figura 4.3 (a), é mostrado um átomo com o núcleo com carga positiva e a nuvem eletrônica ao seu redor, os centros de carga positiva e negativa coincidem. Já na Figura 4.3 (b), o átomo é colocado num campo elétrico externo, e, conseqüentemente, as órbitas eletrônicas se deformam de modo que os centros de carga positiva e negativa não mais coincidem. Aparece, então, um momento de dipolo induzido. A distorção da figura está grandemente exagerada. [39]

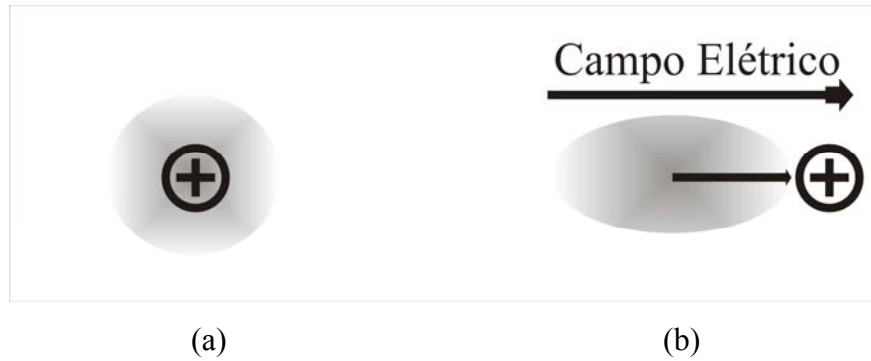


Figura 4.3: (a) Um átomo com uma nuvem eletrônica ao seu redor. (b) Momento de dipolo induzido de um átomo, devido ao campo elétrico. [39]

A Figura 4.4 (a) mostra uma lâmina dielétrica sem aplicação de nenhum campo elétrico externo. Na Figura 4.4 (b), um campo  $\mathbf{E}_0$ , da esquerda para a direita, é aplicado e seu efeito é separar ligeiramente os centros das distribuições de carga positiva e de carga negativa. O efeito total é uma acumulação de carga positiva sobre a face direita da lâmina e de carga negativa sobre a face esquerda. A lâmina como um todo permanece eletricamente neutra e, dentro da lâmina, não há excesso de carga em qualquer elemento de volume. [39]

A Figura 4.4 (c) mostra que as cargas superficiais induzidas aparecem de tal maneira que o campo elétrico  $\mathbf{E}'$ , criado por elas, se opõe ao campo elétrico aplicado  $\mathbf{E}_0$ . O campo resultante  $\mathbf{E}$  no interior do dielétrico, que é a soma vetorial de  $\mathbf{E}_0$  e  $\mathbf{E}'$ , aponta na mesma direção e no mesmo sentido de  $\mathbf{E}_0$ , mas tem módulo menor. Assim sendo, o efeito do dielétrico é enfraquecer o campo aplicado no interior do dielétrico. [39]

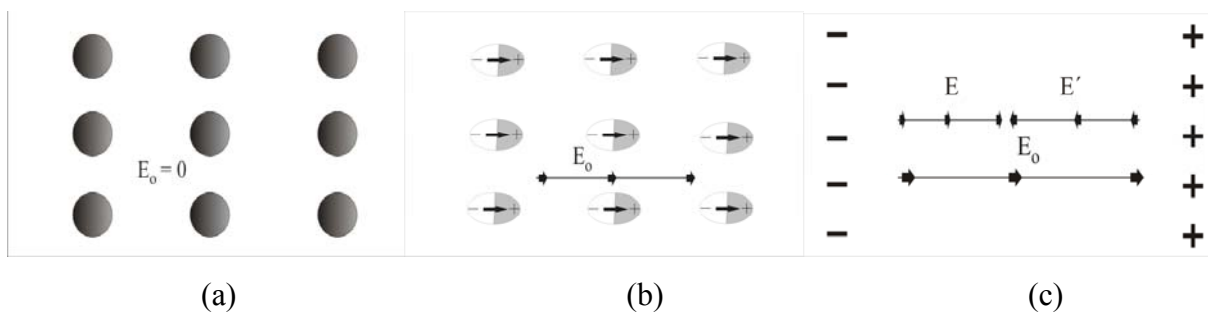


Figura 4.4: (a) Uma lâmina dielétrica com átomos neutros no interior da lâmina. (b) Campo elétrico aplicado, “esticando” os átomos e separando os centros de carga positiva e negativa. (c) O efeito resultante é a produção de cargas superficiais. [39]

#### 4.2.2.2 Circuito elétrico de um Dielétrico e a Corrente da Absorção

O circuito elétrico equivalente de um dielétrico é formado por um resistor e um capacitor ligados em paralelo. Na Figura 4.5 (a), tem-se a representação de circuito que possui

um resistor “R” de corrente “ $I_r$ ”, um capacitor “C” de uma corrente “ $I_c$ ” e uma corrente total “ $I$ ”. Já na Figura 4.5 (b), tem-se a representação vetorial do mesmo circuito, que possui uma corrente resistiva “ $I_r$ ”; uma corrente capacitiva “ $I_c$ ”; uma corrente total “ $I$ ”; um ângulo “ $\delta$ ” formado pelas correntes “ $I_c$ ” e “ $I$ ” e um ângulo “ $\varphi$ ” formado pelas correntes “ $I_r$ ” e “ $I$ ”.

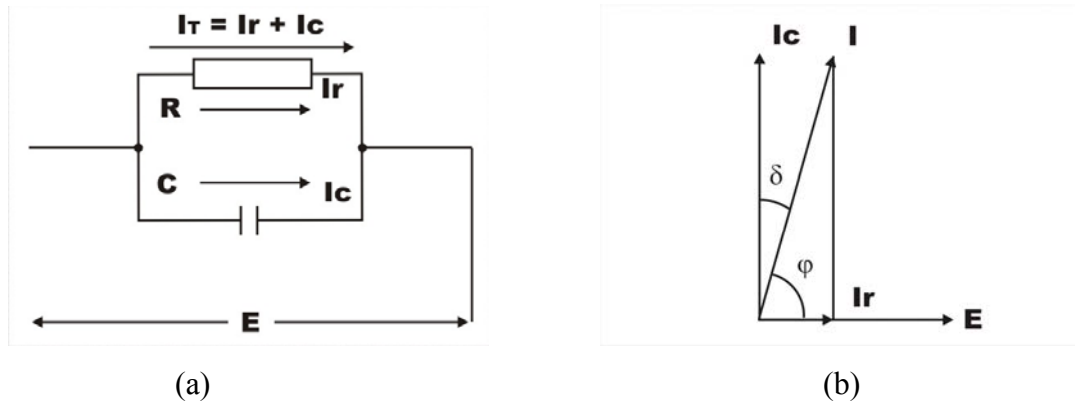


Figura 4.5: (a) Representação gráfica de circuito elétrico equivalente a um dielétrico. (b) Representação vetorial do circuito elétrico equivalente a um dielétrico.

Porém, o circuito elétrico equivalente de um dielétrico sofre influência indireta de diversos componentes que formam o isolamento elétrico dos transformadores (exemplo: papel isolante). Estes componentes são formados por materiais com diferentes características dielétricas, que se sobrepõem em camadas e nas suas interfaces podem-se localizar moléculas polares ionizáveis. [39] Com o umedecimento da massa isolante, essas moléculas se dissociam formando íons, que se orientam e se deslocam conforme a direção do campo elétrico. Este fenômeno é conhecido como absorção dielétrica, conforme é representado na Figura 4.6. Nesta figura, pode-se verificar a formação de caminhos gerados a partir da atração elétrica dos íons com o campo elétrico. [22]

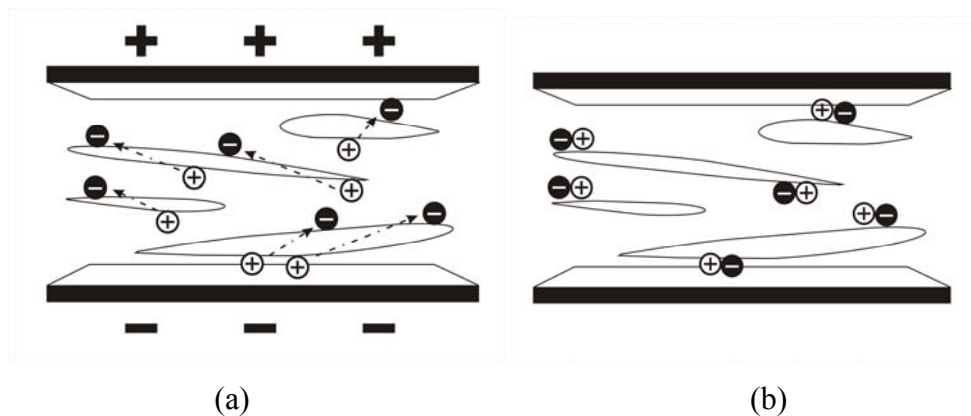


Figura 4.6: (a) Representação esquemática do efeito da água na isolamento, com o efeito de um campo elétrico. (b) Representação esquemática do efeito da água na isolamento, sem o efeito de um campo elétrico. [22]

Então, uma terceira corrente, a de absorção dielétrica, surge quando aplicado uma tensão contínua no circuito elétrico equivalente. Esta corrente é momentânea e aparece após a remoção do curto-circuito, que é aplicado nos terminais do circuito dielétrico. Em outras palavras, ela é uma corrente residual, que aparece após a aplicação do curto-circuito no capacitor, gerando, assim, uma tensão residual. [39] Esta corrente está esquematizada graficamente na Figura 4.7, que mostra uma nova representação gráfica de um dielétrico. É importante informar que esta corrente é momentânea e surge somente quando aplicada uma tensão alternada no circuito isolante. Na representação, a corrente total “I” será adicionada por uma terceira corrente “ $I_{da}$ ”, que resultará numa nova corrente total resultante “ $I_T$ ”.

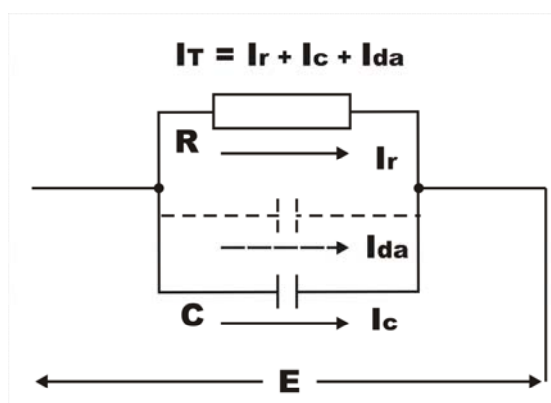


Figura 4.7: Representação gráfica de circuito elétrico equivalente a um dielétrico com a corrente de absorção “ $I_{da}$ ”.

Por fim, tem-se três correntes no sistema elétrico representativo de um dielétrico:

- A corrente de carregamento do capacitor “ $I_c$ ” que decresce rapidamente, e vai para zero, assim que o capacitor estiver carregado.
- A corrente de dispersão, que passa pela superfície e interior da massa do dielétrico “ $I_r$ ”.
- A corrente de absorção “ $I_{da}$ ”, que é atribuída principalmente ao fenômeno de polarização nas interfaces dos dielétricos heterogênicos.

Para a corrente “ $I_r$ ”, se esta for constante, com uma tensão de corrente contínua constante ao longo do tempo, é uma indicação de que a isolamento tem capacidade para resisti-la. Se a corrente aumentar com o tempo de aplicação da tensão, é provável que a isolamento venha a falhar, a não ser que seja suspensa a aplicação da tensão.

Para a “ $I_{da}$ ”, quando o circuito está sujeito a uma baixa capacitância do equipamento, a corrente “ $I_{da}$ ” inicial é alta nos primeiros segundos e depois decresce lentamente até aproximadamente zero. Porém, quando a capacitância é alta ou há contaminação no dielétrico,

a corrente inicial, que é alta, não diminuirá nos primeiros segundos e decrescerá muito lentamente (Figura 4.8). [40]

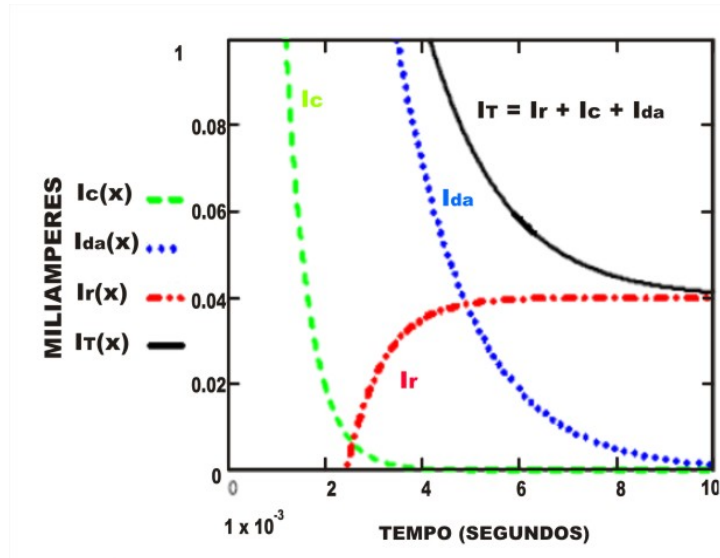


Figura 4.8: Representação gráfica do comportamento das correntes de um circuito elétrico equivalente de um dielétrico. [40]

#### 4.2.2.3 Fator de Dissipação (Fator de Potência)

O fator de dissipação corresponde a medida das perdas elétricas em um líquido isolante, quando este está submetido a um campo elétrico alternado. Estas perdas estão relacionadas com a quantidade de energia dissipada pelo material sob a forma de calor. Sob o ponto de vista químico, o fator de dissipação de potência corresponde à corrente dissipada no óleo que é influenciada, indiretamente, pelos produtos polares e / ou polarizáveis contidos no mesmo óleo.

Em maiores detalhes, tem-se que na representação vetorial de um dielétrico da Figura 4.6 (a), a razão entre a corrente “ $I_r$ ” e a corrente “ $I_c$ ” é chamada de Fator de Perdas Dielétricas ou Fator de Dissipação. Para um ângulo “ $\delta$ ” inferior a  $5^\circ$ , tem-se que os valores do seno e da tangente são aproximadamente iguais; assim, considera-se aceitável, para fins práticos, adotar o Fator de Dissipação ( $\text{tg } \delta$ ) igual ao Fator de Potência ( $\cos \varphi$ ).

Nas Equações 4.1, 4.2 e 4.3, o Fator de Potência é numericamente igual ao seno do ângulo “ $\delta$ ”, mas para um o ângulo “ $\delta$ ” menor que cinco graus, verifica-se que o seno do ângulo “ $\delta$ ” é numericamente equivalente à tangente do ângulo “ $\varphi$ ”, o que implica que a tangente do ângulo “ $\delta$ ” será numericamente igual ao Fator de Potência.



$$\cos \varphi = \text{sen} \delta \quad (4.1)$$

$$\text{Para } \delta < 5^\circ : \text{sen} \delta \cong \tan \varphi \quad (4.2)$$

$$\text{Portanto, neste caso: } \cos \varphi = \tan \delta \quad (4.3)$$

Porém, os materiais isolantes perdem suas características com o tempo de uso, acarretando um aumento no valor da componente “Ir” e, conseqüentemente, aumento do fator de potência. Para ângulos de “δ” maiores que 5°, o fator de dissipação não deve ser considerado igual ao fator de potência, pois a tangente “δ” assume valores relativamente maiores do que o seno “δ”.

Nos casos dos ângulos de “δ” maiores que 5°, os cálculos devem ser realizados por meio da relação entre a potência dissipada no material e o produto da tensão senoidal eficaz “E”, que é a tensão aplicada no dielétrico, e a corrente “I”, em volt-ampère, que é a corrente resultante do circuito do dieletrico. [22]

$$\tan \delta = \frac{X_p}{R} = \frac{G}{\omega.C} = \frac{1}{\omega.C.R} = \cot \varphi \quad (4.4)$$

$$\text{Fator de potência} = \cos \varphi = \frac{G}{\sqrt{(G^2 + (\omega.C)^2)}} \quad (4.5)$$

Nas Equações 4.4 e 4.5, o fator de potência é igual ao co-seno do ângulo “φ”. Nelas, tem-se que a condutância equivalente, em corrente alternada, da resistência é representada pela letra “G”, a reatância paralela do circuito é representada pela letra “Xp” e a frequência do circuito é representada pela letra “ω”.

No geral, as perdas geradas pelo fator de dissipação se dão por meio da dissipação térmica. Esta característica é devido à grande sensibilidade às partículas coloidais condutoras (ex.: carbono) aos contaminantes polares solúveis e aos produtos do envelhecimento oxidativo do óleo. As mudanças dos valores do fator de dissipação são observadas mesmo quando o grau de contaminação é pequeno, o que torna difícil detectar a contaminação por processos de análise química.

Um valor alto para o fator de dissipação do óleo isolante pode também ter influência da resistência do isolamento das bobinas, que normalmente trabalha a temperaturas mais elevadas que a ambiente. A medida do fator de dissipação em diferentes temperaturas, como a ambiente e a 90°C, pode proporcionar informações úteis, por exemplo:

- Um resultado satisfatório a 90°C, mas não satisfatório à temperatura ambiente, pode significar presença de água e de produtos de degradação precipitáveis a frio no óleo, porém em níveis toleráveis;

- Resultados não satisfatórios em ambas as temperaturas significam uma contaminação em maior grau, mostrando que possivelmente o óleo isolante necessita ser submetido a um tratamento de regeneração;

Para o caso do óleo mineral, o valor das perdas intrínsecas aos hidrocarbonetos é extremamente baixo, porém pode ser sensivelmente alterado com a presença de impurezas. Para os óleos vegetais, um baixo fator de perdas dielétricas indica baixo nível de contaminantes solúveis. Estes óleos possuem, normalmente, fatores de perdas dielétricas mais altas do que os óleos minerais isolantes, especialmente em elevadas temperaturas.

#### 4.2.2.4 Rigidez Dielétrica

A rigidez dielétrica de um material é a capacidade máxima deste resistir a uma solitação elétrica (a.c., d.c., impulso de tensão). Para o óleo isolante, a capacidade está em suportar tensões elétricas, nas frequências de trabalho do equipamento, sem apresentar falha. A unidade de medida é em V/m, que é a mesma unidade de campo elétrico ou de gradiente elétrico. O procedimento do ensaio consiste em colocar uma amostra de óleo entre dois eletrodos padrão, como um capacitor, e submetê-la a incrementos constantes de tensão alternada até que ocorra a ruptura do meio isolante e a conseqüente descarga entre os eletrodos.

A rigidez dielétrica é um fenômeno de massa, ou seja, o seu valor dependerá do volume envolvido, e não depende apenas do comportamento médio das moléculas envolvidas na rigidez. Ao contrário, sendo um fenômeno de alto valor (por exemplo: maior que 30 kV), depende dos pontos débeis da estrutura do material, o que leva à conclusão que a rigidez dielétrica depende do volume do material envolvido no ensaio e é um valor estatístico para cada amostragem. Quando se tem um líquido isolante sem umidade e limpo (isento de partículas sólidas), normalmente este tem valores elevados de rigidez dielétrica, ou seja, a presença de água livre e/ou partículas sólidas e suspensão (fibras de celulose e partículas condutoras) associadas ao elevado teor de água dissolvida, reduz acentuadamente a rigidez dielétrica do óleo isolante.

No caso dos óleos minerais (compostos de hidrocarbonetos), por apresentarem polaridade elétrica muito baixa (ou seja, serem apolares), eles possuem uma rigidez dielétrica

“intrínseca” extremamente elevada. Esta resistência ao impacto é sensivelmente diminuída também pela presença de impurezas polares, como a água e/ou outros oxigenados, e por sólidos, como as partículas microscópicas.

No caso dos óleos vegetais, os valores exigidos, por norma, no ensaio de rigidez dielétrica são semelhantes aos exigidos para óleos tipo mineral. Assim, os procedimentos utilizados nos ensaios são parecidos. [36]

### **4.3 Resumo do Capítulo**

Neste capítulo, foram descritos os principais parâmetros para testes nos óleos isolantes para aferição da qualidade de um óleo isolante em um transformador de potência. Entre estes principais parâmetros, destacam-se os de propriedades físicas, químicas e elétricas dos óleos isolantes, que são fundamentais para garantir as condições operacionais necessárias para manter ou aumentar a vida útil dos transformadores.

Também foram descritas as principais normas utilizadas para avaliar o desempenho do óleo isolante em um transformador. Entre estas normas, destacamos a ASTM D3487 para óleos de base mineral e a ASTM D6871 para óleos de base Éster Natural. Neste subitem, foi apresentada uma análise comparativa entre as normas para óleos vegetais e óleos minerais.

Por final, foi realizada uma explicação sucinta sobre a finalidade dos ensaios físicos, químicos e elétricos correlacionados com o desempenho do óleo isolante em um transformador.

## **5. ESTUDO DE CASO: MISTURA DE ÓLEO MINERAL E VEGETAL PARA USO EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

A proposta de estudo de caso da dissertação é apresentar um novo conceito de óleos isolantes para transformadores, a partir de uma mistura de óleo mineral isolante com óleo vegetal natural. Para o alcance de tal objetivo, são realizadas misturas em diferentes proporções de óleos minerais dielétricos e óleos vegetais.

Para propor o estudo de caso, foi necessária a pesquisa por estudos similares em nível nacional e mundial. Nas atuais pesquisas sobre o assunto, constatou-se apenas um artigo com procedimento semelhante. Intitulado de “*Improvement of Power Transformers by using Mixtures of Mineral Oil with Synthetic Esters*”, este artigo foi exposto em setembro de 2005 no *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Neste artigo, os autores analisaram a mistura de óleos minerais isolantes com outros diferentes tipos de óleos isolantes. Diferentemente, no estudo de caso proposto nesta dissertação, as misturas são de óleos minerais isolantes com menores proporções de óleos vegetais comuns. Inicialmente, os procedimentos podem se assemelhar, mas as intenções finais são diversas, diferenciando, assim, os conceitos finais.

Um importante fundamento para o estudo de caso foram às experiências mundiais com o desenvolvimento dos biocombustíveis. Todo o processo de mudança tecnológica demanda um período de transição. Para o caso dos combustíveis utilizados para o setor automobilístico, há atualmente um processo de transição muito bem sucedido e em desenvolvimento. Este processo teve início na década dos anos 70, pelo especialista engenheiro químico cearense Expedito José de Sá Parente, que é professor aposentado da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Atualmente, o Parque de Desenvolvimento Tecnológico do Ceará (Padetec), em conjunto com o Departamento de Engenharia Elétrica da UFC e a concessionária de energia elétrica local, a Coelce, estão trabalhando em um projeto para o desenvolvimento de óleos dielétricos isolantes vegetais, a partir da biomassa local. Este projeto teve início nesta década e deverá gerar a primeira patente mundial local de óleos vegetais isolantes [6].

## 5.1 Metodologia dos Ensaio e Resultados

Para se propor uma nova diretriz na composição dos óleos minerais isolantes misturados com óleos vegetais, foi necessário examinar o tipo de óleo dielétrico mineral ideal para o estudo. A escolha do tipo de óleo vegetal a ser utilizado também foi um ponto considerado muito relevante. Tão importante quanto, tem-se a escolha das proporções das misturas, os procedimentos normativos a serem aplicados, os ensaios a serem realizados e os resultados almejados no trabalho, todos analisados no decorrer do estudo de caso.

### 5.1.1 A escolha do óleo vegetal utilizado no estudo de caso

A escolha de um bom óleo vegetal, que servirá como insumo para o novo óleo dielétrico, foi fundamental na busca dos resultados desejados. A princípio, escolher o tipo de óleo a ser utilizado não é uma tarefa simples. Para isso, deve-se entender o mercado de óleos vegetais e a sua possibilidade de expansão a custos competitivos. Porém, não é suficiente o óleo vegetal ter boas condições de custo, oferta, capilaridade e produção no mercado, precisa também ter características físico-químicas necessárias para que o óleo dielétrico final seja enquadrado nos parâmetros requisitados pelas normas.

Entre os pontos principais considerados na escolha do óleo vegetal, destacam-se três grandes grupos em que o mesmo deve, a princípio, ter capacidade de se enquadrar: o óleo vegetal deve ter um bom desempenho de mercado (boas condições de custo, oferta, capilaridade, produção e possibilidades de expansão), o óleo necessita ter boas características físico-químicas e elétricas em sua forma natural, quando entregue pelo fornecedor, e o óleo deve ser apto a ser misturável com o óleo mineral dielétrico já existente no mercado.

Entre os óleos considerados com bom desempenho de mercado, destaca-se o óleo de soja, que na produção brasileira desponta como um dos produtos de menor custo de produção versus oferta de mercado. Diante dos dados levantados, o óleo de soja, uma “*commodity*” estabelecida a nível mundial, possui condições bem favoráveis para o estudo. Se comparado com outros países produtores de óleo de soja, o óleo de soja brasileiro ainda possui um custo de produção muito competitivo e rentável a nível mundial. (Figura 5.1)

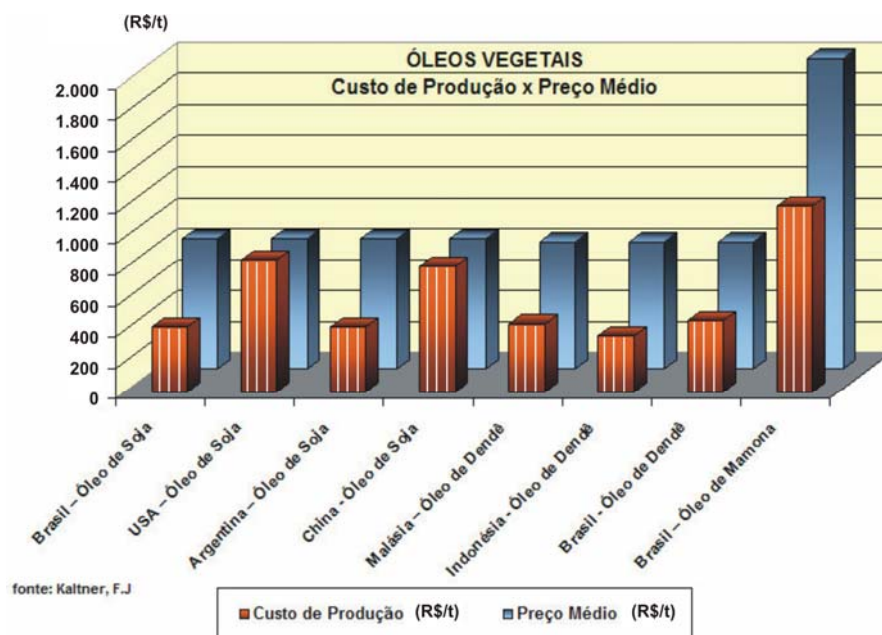


Figura 5.1: Custo de produção da soja no Brasil e em alguns países produtores de soja. [38].

Para verificar se o óleo de soja é um produto que tem boas características físico-químicas e elétricas em sua forma natural, são realizadas quatro etapas de análise:

- Verifica-se que o produto está inserido na composição principal de diversos óleos vegetais dielétricos, que atualmente são comerciais ou estão em desenvolvimento em muitos produtores ou centros de pesquisa a nível mundial.
- Verifica-se o grau percentual de ácidos graxos não saturados na composição do óleo de soja (Tabela 3.1) para verificar teoricamente se o mesmo possui um bom grau de saturação e, conseqüentemente, bons parâmetros físico-químicos.
- Realizam-se diversos ensaios preliminares no óleo de soja *in natura* a fim de se averiguar se o mesmo tem potencial para o estudo de caso. Nos ensaios, que são demonstrados mais adiante, os resultados são bem satisfatórios, atendendo, assim, as pretensões iniciais desejadas pelo estudo de caso.

Verifica-se, ainda, o preço médio do mercado de óleo de soja. O custo de mercado do óleo de soja gira em torno de R\$1,00/litro de óleo (um real por litro de óleo de soja). O preço médio do óleo isolante naftênico, no mercado brasileiro, está em torno de R\$1.200,00/200litros (Hum mil e duzentos reais por duzentos litros de óleo mineral isolante). Com isso, o preço por litro do óleo de soja torna-se 6 (seis) vezes menor que o preço médio por litro do óleo mineral isolante, tipo naftênico, no Brasil.

Outros produtos também poderiam ter sido estudados por esta perspectiva, uma vez que os óleos de base vegetal são utilizados como insumos de óleos dielétricos vegetais. Entre eles,

destacam-se a canola e o girassol, porém não estão bem inseridos na matriz comercial de óleos vegetais brasileiros.

### 5.1.2 A escolha da norma utilizada no estudo de caso

A escolha de que norma será utilizada no estudo de caso é um ponto importante e deve ser tratado com certa sensibilidade. Tratando-se de um produto que não possui uma origem bem definida, mas sim uma mistura de origens, a flexibilidade atual das normas não prevê situações com esta característica.

Para o estudo de caso, foram adotadas as normas para óleos dielétricos minerais, pois, no trabalho, a intenção é propor uma nova rota de transição de óleos minerais para vegetais. Porém, não seria incoerente se fossem aplicadas as normas para óleos vegetais, pois, neste momento, o mercado caminha para essas linhas de produtos e, por este ponto de vista, o ideal seria caminhar no mesmo sentido. Mas para o nosso caso, tem-se um segundo ponto que deve ser sustentado: as misturas dos óleos terão maiores percentuais de óleo mineral do que óleo vegetal. Além do mais, o óleo dielétrico para transformadores utilizado é o mineral. O óleo vegetal é para compor uma proporção do produto, diminuindo, assim, o custo final do óleo misturado.

### 5.1.3 A escolha dos procedimentos e ensaios aplicados no estudo de caso

Diante da escolha das normas, os procedimentos escolhidos seguirão o que as respectivas normas determinam. Na escolha dos tipos de ensaios a serem adotados, foram selecionados os ensaios de maior importância para definição de um bom isolante no estudo de caso. As únicas exceções são os ensaios ambientais, que são importantes, mas não estão inseridos no escopo de ensaios para óleos dielétricos minerais.

Para os ensaios elétricos, foram escolhidos os de Rigidez Dielétrica e o de Fator de Dissipação (Potência).

Para os ensaios físico-químicos, foram escolhidos os de Exame Visual, Cor (Aparência), Teor de Água, Número de Acidez (Índice de Neutralização), Densidade Relativa, Viscosidade a 40°C e 100°C, Ponto de Fulgor e Ponto de Fluidez.

#### 5.1.4 A escolha da melhor proporção de óleo mineral dielétrico e óleo vegetal

Para a escolha das proporções de cada óleo que serão utilizadas, foi preciso delinear algumas proporções de base de óleo vegetais misturadas com óleos dielétricos minerais. Na escolha da melhor proporção, foi preciso realizar os ensaios elétricos e físico-químicos e comparar os resultados entre si. No entanto, algumas premissas foram colocadas antes da mistura dos óleos:

- Para o óleo vegetal, buscou-se um produto o mais isento possível de conservantes para não comprometer os resultados e para ficar o mais próximo do produto *in natura*. A intenção principal foi buscar um produto que não necessite realizar modificações químicas, garantindo assim, menores custos em seu processamento e que não tenha sido produzido para fins de fluidos dielétricos.

- Para o óleo dielétrico mineral, buscou-se um produto usualmente comercializado no mercado com característica naftênica.

Na Tabela 5.1 são mostradas as diferentes proporções utilizadas para a mistura de fluidos dielétricos minerais com óleos vegetais. Verifica-se a realização de três tipos diferentes de misturas, pois as outras duas “misturas”, na verdade, são os óleos 100% mineral e 100% vegetal. As proporções escolhidas, entre óleos minerais e vegetais, são em sua maioria de óleos minerais. A motivação principal para esta opção é o fato de os óleos minerais serem os óleos dielétricos. O intuito do óleo de soja é diminuir o custo final do produto combinado (mistura). É importante ressaltar que os óleos minerais foram misturados com óleos vegetais, que necessariamente não foram produzidos para fins dielétricos.

Tabela 5.1: Diferentes proporções de Misturas de Fluidos Dielétricos Minerais com Óleos Vegetais.

TIPO	Óleo de Soja	Óleo Mineral (Naftênico)
Mistura 1	0,0%	100,0%
Mistura 2	10,0%	90,0%
Mistura 3	30,0%	70,0%
Mistura 4	50,0%	50,0%
Mistura 5	100,0%	0,0%



Uma vez definidas as proporções, foram realizados os ensaios conforme as normas e procedimentos da ASTM D3487 para óleos minerais e os resultados foram sintetizados e mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Comparação dos valores dos ensaios para as diferentes proporções de Misturas de Fluidos Dielétricos Minerais com Vegetais.

<b>ENSAIO / TIPO DE MISTURA</b>	<b>Mistura 1</b>	<b>Mistura 2</b>	<b>Mistura 3</b>	<b>Mistura 4</b>	<b>Mistura 5</b>	
<b>Elétrica</b>						
<b>Rigidez Dielétrica (kV)</b>	38,5	40,20	41,01	43,18	57,08	
<b>Fator de Dissipação (%)</b> 25°C	0,008	0,044	1,1	1,50	2,50	
<b>Química</b>						
<b>Teor de Água (mg / kg)</b>	5,067	4,800	4,339	3,873	5,175	
<b>Número de Acidez (mg KOH / g)</b>	0,01412	0,01694	0,01561	0,01124	0,01398	
<b>Física</b>						
<b>Cor</b>	Incolor	Incolor	Incolor	Incolor / Amarelado	Amarelado	
<b>Exame Visual</b>	Limpo & brilhante	Limpo & brilhante	Limpo & brilhante	Claro & transparente	Claro & transparente	
<b>Densidade Relativa</b>	0,8708	0,8814	0,8879	0,8962	0,9176	
<b>Ponto de Fulgor (°C)</b>	142	150	160	172	222	
<b>Viscosidade (cSt)</b>	<b>100°C</b>	1,0	0,5	0,5	1,0	6,0
	<b>40°C</b>	9,3	10,4	13,5	17,26	31,9
<b>Ponto de Fluidez (°C)</b>	-59	-44	-38	-26	-8	

Todos os ensaios foram realizados em diferentes locais, dependendo dos equipamentos e da especialidade destes ensaios. Na Tabela 5.3, são apontados os locais de realização dos ensaios e mostrados os respectivos co-responsáveis por estes.

Tabela 5.3: Locais e Co-Responsáveis pela realização e aferição dos ensaios.

ENSAIO		Local de Realização do Ensaio	Co-Responsáveis
<b>Elétrica</b>			
<b>Rigidez Dielétrica</b>		Laboratório de Manutenção da COELCE (Companhia Energética do Ceará)	<b>Glauber B. Arrais</b> Químico Industrial
<b>Fator de Dissipação</b>	<b>25°C</b>	Laboratório de Manutenção da COELCE (Companhia Energética do Ceará)	<b>Glauber B. Arrais</b> Químico Industrial
<b>Química</b>			
<b>Teor de Água</b>		Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Processos – LDPP do Parque de Desenvolvimento Tecnológico - PADETEC/UFC	<b>Alexandre Barros</b> Químico
<b>Número de Acidez</b>		Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Processos – LDPP do Parque de Desenvolvimento Tecnológico - PADETEC/UFC	<b>Alexandre Barros</b> Químico
<b>Física</b>			
<b>Cor</b>		Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Processos – LDPP do Parque de Desenvolvimento Tecnológico - PADETEC/UFC	<b>Alexandre Barros</b> Químico
<b>Exame Visual</b>		Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Processos – LDPP do Parque de Desenvolvimento Tecnológico - PADETEC/UFC	<b>Alexandre Barros</b> Químico
<b>Densidade Relativa</b>		Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Processos – LDPP do Parque de Desenvolvimento Tecnológico - PADETEC/UFC	<b>Alexandre Barros</b> Químico
<b>Ponto de Fulgor</b>		Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes - LCC / UFC	<b>Estélio Menezes</b> Químico
<b>Viscosidade</b>	<b>100°C</b>	Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Processos – LDPP e	<b>Alexandre Barros e Estélio Menezes</b> Químicos
	<b>40°C</b>	Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes - LCC	
<b>Ponto de Fluidez</b>		Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes - LCC / UFC	<b>Estélio Menezes</b> Químico

Diante dos resultados, realizaram-se as seguintes observações:

- Para efeito do estudo de caso, a “Mistura 1” e a “Mistura 5” são descartadas devido elas serem 100% óleo mineral e 100% óleo vegetal respectivamente. Assim sendo, realizou-se a comparação das outras análises com as normas para óleos minerais expostas na Tabela 4.1. Na tabela 5.4, os dados foram sintetizados, mostrando um quadro comparativo entre as Misturas e os índices desejáveis pelas normas descritas anteriormente na Tabela 4.1.

- Nos ensaios realizados conforme Tabela 5.2, destacam-se os de Tensão Interfacial, Ponto de Combustão e Fator de Potência a 100°C devido as seguintes justificativas:

- a. Para a Tensão Interfacial: a importância desta foi minimizada devido às características químicas do óleo vegetal influenciarem de forma direta à mistura. Este índice para óleos puramente vegetais é bem inferior ao solicitado por norma para óleo mineral, no entanto, este ensaio é importante para trabalhos futuros sobre a mistura.
- b. Para o Ponto de Combustão: como os valores dos ensaios de Ponto de Fulgor estão com índices bem superiores aos solicitados por norma, os ensaios de Ponto de Combustão serão desnecessários neste momento. Este ensaio pode ser importante, para trabalhos futuros, devido à complementação de dados das normas.
- c. Para o ensaio de Fator de Potência a 100°C: a princípio, ele é desnecessário devido ao ensaio a 40°C apresentar bons índices, no entanto, ele é muito importante para que se tenha um estudo mais preciso.

- Por fim, na comparação, conclui-se que a Mistura 2 será a escolhida para o estudo de caso devido as suas características elétricas se enquadrarem nos valores solicitados pelos ensaios realizados no estudo de caso.

a. Para os casos da rigidez dielétrica e do fator de potência, a Mistura 2 apresentou valores bem semelhantes aos solicitados por norma.

b. Para os casos de teor de água e número de acidez, a Mistura 2 apresentou valores bem melhores do que os solicitado por norma, o que atesta a pouca influência do óleo de soja na Mistura 2.

c. Para os casos de cor, exame visual, viscosidade, ponto de fulgor e ponto de fluidez, os resultados foram satisfatórios, atendendo as normas ABNT e ASTM. A única exceção dos ensaios físicos foi o de densidade relativa pela norma ABNT 5357. Porém, para a norma ASTM D3487, os índices estão dentro dos valores esperados. O não enquadramento neste ensaio para a ABNT 5357 não se torna relevante devido aos valores encontrados serem muito próximos aos valores solicitados por norma. Para o caso das normas para óleos vegetais, o valor do ensaio se enquadrou perfeitamente nos índices solicitados.

Tabela 5.4: Comparação entre as Normas Nacionais e as Misturas 2, 3 e 4 realizadas para o estudo de caso.

ENSAIO / TIPO DE MISTURA	ASTM D3487	ABNT 5357	Mistura 2	Mistura 3	Mistura 4	
<b>Elétrica</b>						
Rigidez Dielétrica (kV)	≥ 35	≥ 30	40,20	41,01	43,18	
Fator de Dissipação (%) 25°C	≤ 0,05	≤ 0,05	0,044	1,1	1,50	
<b>Química</b>						
Teor de Água (mg / kg)	≤ 35	≤ 35	4,800	4,339	3,873	
Número de Acidez (mg KOH / g)	≤ 0,03	≤ 0,03	0,01694	0,01561	0,01124	
<b>Física</b>						
Cor	Incolor	Incolor / Amarelado	Incolor	Incolor	Incolor / Amarelado	
Exame Visual	Limpo & brilhante	-	Limpo & brilhante	Limpo & brilhante	Limpo & transparente	
Densidade Relativa	≤ 0,91	≤ 0,86	0,8814	0,8879	0,8962	
Ponto de Fulgor (°C)	≥ 145	≥ 140	150	160	172	
Viscosidade (cSt)	100°C	≤ 15,0	≤ 3,0	0,5	0,5	1,0
	40°C	≤ 50	≤ 12,0	10,4	13,5	17,2
Ponto de Fluidez (°C)	≤ -40	≤ -12	-44	-38	-26	

## 5.2 Estudo de Caso

Com a Mistura 2, pode-se verificar que o óleo se enquadra perfeitamente nos parâmetros solicitados por norma. É importante compará-lo com os produtos que atualmente estão em estudo ou comercialmente no mercado. Na comparação com os óleos dielétricos minerais, esta é pouca importância, uma vez que a Mistura 2 se comporta de forma semelhante aos óleos minerais e já está atendendo às normas vigentes para estes tipos de óleos. No entanto, para o caso dos óleos dielétricos vegetais ou de outras linhas de composição, como os sintéticos, esta comparação é interessante e pode ser necessária para futuros estudos e aprofundamentos da pesquisa.

### 5.2.1 Análise comparativa entre os principais tipos de óleos isolantes

Na análise comparativa das principais características por tipo de óleos isolantes e a proposta do trabalho, foram considerados cinco tipos diferentes de dielétricos em comparação à Mistura 2. Nesta classificação, dividiram-se os óleos em: Mineral Convencional, de base Naftênica; tipo Silicone; os formados por Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular (HMWH), em específico o da marca R-Temp; o Éster Sintético, em específico o da marca Envirotemp 200; o Éster Natural, em específico o da marca Envirotemp FR3 e a Mistura 2. Os resultados destas análises foram resumidos na Tabela 5.5 e os seus valores foram coletados por ensaios realizados pelos seus respectivos fabricantes ou produtores. A Mistura 2 foi realizada conforme descrito no item 5.1.3. Os métodos de testes foram realizados, em sua maioria, conforme as normas americanas ASTM, padronizando a maneira de análise dos resultados. O intuito desta escolha foi a padronização dos resultados para comparação com outros tipos de óleos isolantes (sintéticos, HMWH...) e óleos vegetais isolantes existentes a nível mundial. Devido a semelhança entre a ASTM e a ABNT, entende-se que não houve necessidade, neste momento, de se realizarem novos ensaios com base na ABNT (Tabela 4.1). Em resumo, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

#### **Para os ensaios elétricos:**

- a. Para o ensaio de Fator de Potência a 25°C, os isolantes de melhores índices foram os tipo Silicone, em seguida o óleo mineral e depois a Mistura 2.
- b. Para o ensaio de Rigidez Dielétrica, os melhores resultados foram os dos óleos tipo HMWH e os tipo Éster Natural, porém, após 50 operações de chaveamento, os HMWH demonstraram uma queda significativa na estabilidade a tensões disruptivas consecutivas. Em outras palavras, para situações de intensa instabilidade elétrica do sistema ou de alto grau de desequilíbrio entre as fases de uma rede elétrica, os transformadores com HMWH podem ter dificuldades para manter a estabilidade elétrica do óleo.

Resumindo, todos os dielétricos apresentados na Tabela 5.5 possuem índices satisfatórios para as normas americanas ASTM para óleos minerais, vigentes na presente data. As únicas exceções foram os óleos tipo Ésteres Naturais, que apresentaram um pequeno índice de Fator de Potência acima do permitido pela norma ASTM para óleos minerais, e os Ésteres Sintéticos, uma vez que não foi possível encontrar dados, pelo catálogo do fabricante, sobre o ensaio de Fator de Potência. No entanto, no primeiro caso isto é compreensível, uma

vez que para as normas específicas para óleos a base de Ésteres Naturais, as ASTM para Éster Naturais, os índices estão bem abaixo dos valores máximos permitidos. Já no caso dos Ésteres Sintéticos, não se pode analisar com mais detalhes o dado isolante.

Uma observação para a Mistura 2, é que a mesma apresentou um comportamento mais semelhante ao dos óleos minerais do que ao dos óleos vegetais, o que é plenamente compreensível.

Tabela 5.5: Comparação dos valores dos ensaios para os diferentes tipos de Fluidos Dielétricos para transformadores.

ENSAIO / TIPO DE ÓLEO	Óleo Mineral	Óleo Silicone	HMWH	Ester Sintético	Ester Natural	Mistura 2	Método Teste	
<b>Elétricos</b>								
Fator de Potência a 25°C (%)	0,01*	0,0001*	0,05*	-	0,055*	0,044	D-924	
Rigidez Dielétrica (kV)	Novo	40	52	43	47	40	D-877	
	Após 50 operações de chaveamento	41	44	43	36	47	-	D-877
<b>Físicos e Químicos</b>								
Viscosidade (cSt)	40°C	9,2	37	121	29	33	10,4	D-445
	100°C	2,3	15,5	12,5	5,6	7,9	0,5	D-88
Ponto de Fulgor (°C)	147	300	276	270	328	150	D-92	
Ponto de Combustão (°C)	165	343	312	306	357	-	D-92	
Calor Específico (cal/gm/ °C) a 25°C	0,39	0,36	0,45	0,45	0,45	-	D-2766	
Ponto de Fluidez (°C)	-50	-55	-21	-50	-21	-44	D-97	
Gravidade Específica (°C) a 25°C	0,87	0,96	0,87	0,97	0,92	0,88	D-1298	
<b>Ambientais</b>								
Demanda Bioquímica de Oxigênio (ppm)	6	0	6	24	250	-	5 dias SM521 0B	
Taxa de DBO/DQO (%)	7	0	17	-	45	-	-	
Mortalidade no Teste de Toxidez a Alevinos de Trutas	N/A	N/A	N/A	N/A	0	-	OECD 203	
* Dados fornecidos pelos Fabricantes								

### **Para os Ensaio Físicos e Químicos:**

- a. No ensaio de Viscosidade, o índice máximo permitido pela Norma ASTM D-445, para óleos minerais, é de 50 cSt a 40°C. Somente os óleos tipo HMWH não se enquadram nos índices mínimos permitidos por tais normas. Para este ensaio, os valores dos diferentes tipos de óleos divergem bastante, de acordo com as suas respectivas normas pertinentes (ASTM), ou seja, as normas divergem em valores de acordo com o óleo em questão. Para a Mistura 2, ela se enquadrou perfeitamente tanto na norma para óleos vegetais como para óleos minerais, apresentando valores de 10,4 cSt a 40°C e 0,5 cSt a 100°C. Estes resultados indicam que a Mistura 2 se comportou melhor do que todos os outros tipos de óleos, com exceção dos óleos minerais. Estes ensaios são de suma importância, pois melhorar os índices de viscosidade pode implicar em comprometimento dos índices de fluidez, já que estes dois ensaios são interligados quimicamente.
- b. Para o ensaio de Ponto de Fluidez, tem-se que o Éster Natural e o HMWH possuem índices acima do permitido. Este fato realmente compromete a utilização destes em transformadores onde há agressividades térmicas de baixas temperaturas.
- c. Para os ensaios de Ponto de Fulgor e de Ponto de Combustão, os óleos isolantes que apresentam os piores índices são os tipo Naftênico. A Mistura 2 se comportou muito semelhante ao óleo mineral. Para os demais óleos isolantes, os valores mostrados para este ensaio foram muito acima do mínimo solicitado por norma, permitindo, assim, uma maior aplicabilidade e, principalmente, uma maior segurança ao usuário final dos isolantes. É importante lembrar que muitos destes óleos foram desenvolvidos para substituir o óleo tipo Ascarel, que possuía como grande vantagem a tolerância às altas temperaturas. Então, estes óleos buscaram atender a uma nova linha de óleos isolantes dielétricos que detinham como principais características serem isolantes de "Alto Ponto de Fulgor" e serem "Líquidos Dielétricos de Baixa Flamabilidade".
- d. Para o caso do ensaio de Gravidade Específica, tem-se que somente os óleos tipo Silicone e o Éster Natural não atenderam às especificações mínimas. Para o segundo caso, tem-se uma situação semelhante a dos ensaios de Fator de Potência, ou seja, devido as suas características divergirem bastante dos óleos minerais, tem-se uma norma específica para este tipo de isolante. A Mistura 2 apresentou valores satisfatórios aos solicitados pela norma.

### **Para os ensaios ambientais:**

Por se tratar de um tema recente, tem-se que somente um tipo de isolante dielétrico atende, por completo, as normas ambientais que, especificamente, não são da ASTM e sim de outros órgãos governamentais americanos, por exemplo, a EPA. Neste caso, somente os óleos tipo Ésteres Naturais atendem às especificações exigidas. Como estes ensaios ainda não são obrigatórios no mercado mundial de óleos isolantes, estes índices ainda passam com pouca relevância pelos consumidores de transformadores. Atualmente, poucos são os casos em que o mercado exige, dos fabricantes de transformadores, isolantes dielétricos 100% ambientalmente corretos. No entanto, a necessidade de se reciclar os óleos vegetais já desponta como um dos fundamentos de preocupação dos fabricantes. Os conceitos de sustentabilidade e da Química Verde são outros pontos de grande apreensão para o mercado.

#### 5.2.2 Análise comparativa entre os principais tipos de óleos isolantes vegetais

Na análise comparativa das principais características por marca de óleos isolantes do tipo Éster Natural e a proposta do trabalho, foram consideradas cinco marcas diferentes de dielétricos mais uma comparação com um óleo mineral convencional, tipo Naftênico, e a Mistura 2. Os resultados destas análises foram resumidos na Tabela 5.6 e os seus valores foram coletados por ensaios realizados pelos seus respectivos fabricantes ou produtores. A Mistura 2 foi realizada conforme descrito no item 5.1.3. Os métodos de testes foram realizados, em sua maioria, conforme as normas americanas ASTM, padronizando, assim, a maneira de análise dos resultados.

Em resumo, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- Para os ensaios elétricos, em específico o de Fator de Potência a 25°C, todos os óleos isolantes vegetais apresentaram valores semelhantes, com exceção do BIOTRANS 1000. Se comparado com as normas para óleos minerais, nenhum dos isolantes vegetais apresentou índices satisfatórios. Para o caso do ensaio de Rigidez Dielétrica, todos os tipos de isolantes se enquadraram nos índices mínimos permitidos por norma, com exceção do *Coconut Oil*. Este óleo foi desenvolvido por uma universidade do *Sri Lanka*, Universidade de Moratuwa, em conjunto com a concessionária local de energia elétrica. O valor médio de rigidez do *Coconut Oil* apresentou índices que atendem às normas ABNT para óleos minerais tipo Parafínicos e não Naftênicos. Dentre todos os óleos, o que apresentou os melhores índices para a rigidez foi o Envirotemp FR3.



- Quanto aos ensaios físicos, encontraram-se valores aceitáveis pelas normas para alguns tipos de ensaios e valores divergentes para outros tipos de ensaios. No ensaio de Viscosidade, todos os óleos vegetais se enquadraram nos índices permitidos por norma, com exceção do *ECO Fluid*. Se utilizada a norma para óleos minerais como referência, nenhum dos óleos se enquadrou no índice permitido por norma, com exceção da Mistura 2. Para o ensaio de Fluidez, todos os óleos vegetais se enquadraram nos índices permitidos, com exceção do *Coconut Oil*, que excedeu com valores bem acima dos permitidos. Se utilizada a norma para óleos minerais como referência, tem-se que todos os óleos a base de Éster Natural possuem índices de Fluidez acima do permitido, o que compromete a utilização destes em transformadores em regiões onde há agressividades térmicas de baixas temperaturas. Para os ensaios de Ponto de Fulgor e de Ponto de Combustão, todos os óleos vegetais se enquadraram nos índices solicitados pela norma, com exceção do *Coconut Oil*. Se utilizado a norma para óleos minerais como referência, os valores de todos os óleos são muito bons, o que potencializa a robustez térmica destes óleos devido as suas características higroscópicas. Para os óleos vegetais, os índices de Ponto de Fulgor e Combustão são bem maiores do que os exigidos por norma e, depois das características ambientais, são uma das principais fontes de publicidade dos fabricantes quanto às qualidades de seus produtos.

- Quanto aos Ensaio Químicos, destaca-se o Teor de Água como um ensaio crítico para os óleos isolantes vegetais. Este ensaio pode ser sensivelmente comprometido devido à higroscopia dos óleos vegetais. Por poder comprometer diretamente a estabilidade elétrica dos óleos isolantes, esta estabilidade pode ser considerada como um dos grandes desafios para esta classe de óleos. Para o caso da Mistura 2, o comportamento perante o ensaio foi muito semelhante a de um óleo mineral, o que a diferencia muito das demais Misturas.

Uma vez resumido, agora se analisa cada tipo de óleo com base no banco de dados exposto na mesma Tabela 5.6. Os óleos das marcas *Biotemp*, *EcoFluid*, *Biotrans 1000* e *Coconut Oil* estão ainda em fase de desenvolvimento ou ainda não entraram em escala comercial. O óleo da marca *Envirotemp FR3*, que já se encontra em escala comercial, apresenta índices bem satisfatórios se analisado de acordo com a norma “*ASTM D6871-03 - Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus*”. Porém, se analisado em vista das normas vigentes dos óleos minerais na presente data, ele se enquadra em todos os índices, com exceção daqueles em que divergem devido às características intrínsecas do tipo de dielétrico, como o ensaio de Teor de Água. No caso da Mistura 2, como esta apresenta características mais próximas dos óleos minerais que dos

óleos vegetais, esta mistura se comportará mais como um óleo tipo mineral que um óleo tipo vegetal.

Tabela 5.6: Tabela comparativa dos principais tipos de óleos isolantes de base vegetal.

ENSAIO / TIPO DE ÓLEO	Óleo Mineral	Biotemp	ECO Fluid	Envirotemp FR3	Coconut Oil	Biotrans 1000	Mistura 2	NORMA
Fornecedor - dados	Valores Típicos	Produtor	Produtor	Produtor	Produtor	Produtor	---	ASTM
<b>Ensaio Elétricos</b>								
Rigidez Dielétrica, kV	≥35	38	45	51	20	42	40,20	ASTM D877
Rigidez Dielétrica, 1 mm gap	≥20	33	61 <sup>a</sup>	36	60 <sup>b</sup>	56	-	ASTM D1816
Fator de Potência, 20-25°C, %	≤0,05	0,0093	0,09	0,0610	-	0,165	0,044	ASTM D924
Fator de Potência, 100°C, %	≤0,30	0,590	0,30	1,850	-	3,63	-	ASTM D924
Constante Dielétrica, 25°C	2,2	3,1	2,86	3,1	3,04	3,04	-	ASTM D924
Tendência de Gases, µL/min	Negativo	-52,7	+22,0	-80,5	-	-55,5	-	ASTM D2300
<b>Ensaio Físicos</b>								
Cor	≤0,5	L0,5	1,0	L0,5 (Verde)	-	0,25	Incolor	ASTM 1500
Aparência	Limpo / Brilhante	Limpo / Brilhante	Limpo	Limpo / Brilhante	-	Limpo / Brilhante	Limpo & Brilhante	ASTM 1524
Viscosidade 40°C	≤11,0	41,4	92 <sup>c</sup>	33,8	29	40,9	10,4	ASTM D445
Ponto de Fluidez, °C	≤(-40)	-12	-12	-21	23	-15 (5)	-44	ASTM D97
Ponto de Fulgor, °C	> 145	328	321	326	225	324 (615)	150	ASTM D92
Ponto de Combustão, °C	180a	358	341	362	-	362 (684)	-	ASTM D92
Densidade Relativa, 60/60	≤0,910	0,919	0,920 <sup>d</sup>	0,923	0,917	0,925	0,88	ASTM D1298
<b>Ensaio Químicos</b>								
Tensão Interfacial, mN/m	> 40	26	26	24	-	40	-	ASTM D971
Teor de Água, ppm	≤30	<80	110	<80	-	143	4	ASTM D1553
Sulfato Corrosivo	Não corrosivo	Não corrosivo	Não corrosivo	Não corrosivo	-	Não corrosivo	Não corrosivo	ASTM 1275
Num. de neutralização, mg KOH/g	≤0,015	0,02	0,05	0,02	-	0,04	0,02	ASTM D974
Índice de Refratância 20°C, D 1807	1,4808	1,4708	1,46	1,4750	-	ND	-	ASTM D1807
Inibidor de Oxidação, D 2668, %	≤0,30	ND	0,15	ND	-	ND	-	ASTM D2668
<sup>a</sup> Performance testada usando um “gap” de 2mm em vez de 1mm; <sup>b</sup> Performance para o método IEC 296; <sup>c</sup> Performance para o método ASTM D88; <sup>d</sup> Correção para 68 °F.								

## 6. CONCLUSÃO

### 6.1 Comentários finais

Esta dissertação apresentou uma revisão histórica dos óleos isolantes para transformadores, abordando as suas principais funções. Nesta revisão, é evidenciada a predominância dos óleos tipo mineral por mais de um século e até o presente momento.

Num segundo momento, o trabalho resumiu os principais tipos de óleos isolantes existentes no mercado mundial. Com o estudo, conclui-se que pouco se fez, ao longo do tempo, para buscar novas alternativas aos mercados de óleos dielétricos para transformadores. Inovações existiram e foram comprovadamente aplicadas; no entanto, pouco se evoluiu ao longo dos anos, a fim de que elas se tornassem extremamente competitivas.

No terceiro momento, foram apresentadas as importâncias dos parâmetros físico-químicos para a definição das características de um bom fluido isolante, como também a importância dos parâmetros elétricos. Para parâmetros elétricos, verifica-se que uma característica fundamental para a escolha de um bom dielétrico é com respeito ao grau de polarização. Quando se tem uma estrutura química formada por moléculas apolares, nota-se que o poder de isolamento da mesma é bem melhor que uma estrutura química polar. Isto é claramente explicável quando foi verificada a afinidade maior das moléculas apolares em adquirirem momentos de dipolo elétrico permanentes, mais alinhados ao campo elétrico aplicado o que, molecularmente, cria um campo elétrico contrário ao aplicado e, assim, aumenta o poder de isolamento do dielétrico.

No estudo de caso, foi apresentada a possibilidade da união das tecnologias de óleos minerais isolantes com óleos vegetais, comuns a nível mundial, e de características não necessariamente feitas para isolante elétrico. Para o desenvolvimento da mistura de óleo isolante aplicado no estudo de caso, as normas utilizadas foram às mesmas para óleos minerais, uma vez que a melhor mistura encontrada possui 90% (noventa por cento) de sua composição formada por óleo mineral e 10% (dez por cento) de óleo de soja. Um fato importante a se ressaltar, é o comportamento da mistura escolhida ser muito parecida com a de um óleo mineral isolante, mas com algumas vantagens de um óleo vegetal. Esta observação é muito relevante, uma vez que o produto, ao ser misturado com uma pequena proporção de óleo de soja, obteve índices semelhantes aos dos óleos minerais. Isto pode permitir o uso da Mistura 2 em transformadores que possuem óleo isolante mineral. Ainda

permite ao usuário da Mistura 2 obter economias no custo inicial do óleo de seu transformador, uma vez que o óleo de soja possui um custo, em média, 6 (seis) vezes menor que o óleo isolante mineral.

Através do entendimento do mercado mundial de óleos isolantes, da história dos óleos isolantes e dos principais parâmetros físico-químicos e elétricos que os envolve, foi possível buscar novas formas de se perceber conceitos e de como se desenvolver e criar soluções para um mercado sólido, que tende a ser modificado ao longo dos próximos anos. Para isso, a dissertação apresentou um estudo de caso de uma mistura de óleo vegetal com óleo mineral, a ser aplicado em transformadores de distribuição. Com isto, além de uma exposição de uma teoria diferente, a dissertação propôs apresentar novos conceitos de óleos isolantes até então pouco explorados e disseminados. Outro ponto importante a se destacar é a possibilidade de se aditivar a atual matriz de óleos minerais isolantes com uma pequena percentagem de óleos vegetais. Os benefícios diretos dessa aditivação estão numa economia bruta de aproximadamente 8% no custo dos óleos isolantes. A percentagem de óleo vegetal, além de ter custos de mercado atrativos, ainda agrega mais, melhorando alguns índices encontrados nos óleos puramente minerais isolantes.

Por fim, a dissertação abre tanto as possibilidades de um maior e melhor aprofundamento na pesquisa proposta, como no desenvolvimento de novas soluções ao mercado de óleos isolantes. A escolha dos melhores óleos a serem aplicados em um transformador depende, diretamente, tanto do entendimento aprofundado das suas estruturas moleculares como de seus comportamentos ao longo de sua operação. O estudo e compreensão do que se está estudando e desenvolvendo atualmente, a nível mundial, também é de fundamental importância para trabalhos futuros.

## **6.2 Sugestões para desenvolvimentos futuros**

Sugere-se como desenvolvimento futuro deste trabalho:

- A complementação dos ensaios elétricos, físico-químicos e ambientais restantes para ter-se uma análise final do estudo de caso proposto neste trabalho;
- O estudo de possíveis aditivos necessários para melhorar os valores encontrados nos ensaios do estudo de caso proposto neste trabalho;

- Análise cromatográfica dos gases emitidos pelo óleo isolante do estudo de caso proposto no trabalho e o entendimento do comportamento dos gases ao longo de situações adversas;
- Estudo de novas soluções, como outras proporções de misturas com diferentes óleos vegetais. Podem-se estudar, futuramente, novas misturas com diferentes tipos de óleos isolantes para transformadores;
- Estudo detalhado do possível custo financeiro para o estudo de caso proposto no trabalho;
- Aprofundamento da teoria apresentada no capítulo 4 sobre o comportamento do sistema elétrico de um isolante quando aplicadas altas tensões;
- A busca por entender, de forma equacional, a conexão das características de uma estrutura molecular apolar com a constante dielétrica de um isolante.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SEMINÁRIOS TEMÁTICOS PROJEÇÕES DO CONSUMO FINAL DE ENERGIA, 2006, Brasília. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2006. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.
- [2] Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting: “International Energy Outlook 2007”. U.S. Department of Energy, Washington, 2007.
- [3] SUNDKVIST, K.; ODELIUS, H. “Putting extra energy into new transformer oils”. *Naphthenics Magazine*, edição 01/2007, p.12-13, 2007.
- [4] LASZLO, C. “Extend transformer lifetime through maintenance and oil changes”. *Naphthenics Magazine*, edição 01/2007, p.4-7, 2007.
- [5] R. ZIRBES. “Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamentos de Papel Impregnado com Óleo Mineral”. 2003. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [6] CARIOCA, J. O. B.; CORREA, G. C.; CARVALHO, P. C. M.; HILUY FILHO, J. J. “A Brazilian Proposal for a Green Transformer Oil”. In: 14 th European Biomass Conference & Exhibition, 2005 Paris. P. 722.
- [7] KALTNER, F. “O Biodiesel no Brasil”. WORKSHOP: A Expansão da Agro-Energia e seus Impactos sobre os Ecossistemas Brasileiros. Rio de Janeiro, 2007. p.140.
- [8] MCSHANE, C. P. “Vegetable-Oil-Based Dielectric Coolants”. *IEEE Industry Applications Magazine*, v.8, n.3, p.34-41, 2002.
- [9] MCSHANE, C. P.; MARTINS, M. N. “Desenvolvimento e Aplicação de Fluido Dielétrico de Base Vegetal para Transformadores de Distribuição e Potência”. In: IV CONFERÊNCIA DOBLE NO BRASIL, 2003, Belo Horizonte.
- [10] The Edison Exploratorium is Open. Disponível em: <[http://www.edisonexploratorium.org/bio/stanley\\_william.htm](http://www.edisonexploratorium.org/bio/stanley_william.htm)> Acesso em: 03 ago. 2007.
- [11] LEWAND, L. R. “Natural ester dielectric liquids”. *Chemist’s Perspective*, Watertown, 2004.
- [12] IEEE History Center, Biographies. Disponível em: <[http://www.ieee.org/web/aboutus/history\\_center/biography/stanley.html](http://www.ieee.org/web/aboutus/history_center/biography/stanley.html)> Acesso em: 03 ago. 2007.

- [13] Cooper Power Systems, Bulletin TFTP9, “Natural and Synthetic Ester Dielectric Fluids and Novel Insulation Systems for Their Use”. USA, 1998.
- [14] Ambicare Industrial – Tratamento de Resíduos S.A., Documento Técnico “PCB O QUE SÃO?”, Setúbal, Portugal, 2004.
- [15] Siemens S.A. Disponível em: <[http://www.siemens.com.ar/sie-energia/transm\\_energia/transfo\\_resi\\_na\\_colada.htm](http://www.siemens.com.ar/sie-energia/transm_energia/transfo_resi_na_colada.htm)> Acesso em: 03 ago. 2007.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/>>
- [17] GEROMEL, L. H. “Aplicação de Sistemas Inteligentes em Projetos de Transformadores de Potência”. 2003. p.21-42. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- [18] Biblioteca Digital. Disponível em: <<http://omega.ilce.edu.mx:3000/index2.html>>
- [19] PAIXÃO, A. L. “Avaliação de óleo isolante em transformadores com o emprego da Análise Discriminante Quadrática”. 2006. p.5-12. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- [20] Nynas Naphtenics. “Transformer Oil Handbook”. Suécia: Linderoths em Vingåker, 2004. 1.ed., 223 p.
- [21] MORAIS, R. M. , “Estudo do envelhecimento térmico do papel isolante elétrico”. 1990. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [22] MILASH, M. “Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante”. São Paulo: Edgard Blücher, EFEI, 1984. 5.ed.
- [23] SILVA, V. L. ; MORAIS, R. M. “Evolução de produtos de degradação do papel em óleo mineral isolante durante o envelhecimento térmico”. In: SEMINÁRIO DE MATERIAIS NO SETOR ELÉTRICO, 4., 1994, Curitiba. *Anais*. Curitiba: COPEL/LAC, 1994. p.117-126.
- [24] KARSAI, K.; KERENYI, D.; KISS, L. “Large power transformer”. New York: Elsevier Company, 1987.
- [25] MYERS, S. D.; KELLY, J.; PARRISH, R. H. “A Guide to Transformer Maintenance”. Akron: TMI, 1981. cap.4

- [26] GRANATO, R. C.; LEVY, N. M.; TULIO, L. “Manutenção de transformadores baseada em ensaios físico-químicos e cromatográficos no sistema isolante”. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Curitiba, 2001.
- [27] SILVA, I. N. da; SOUSA, A. N. de; ULSON, J. A. C.; FLAUZINO, R. A. “Técnicas de Sistemas Inteligentes Aplicadas na Identificação do Envelhecimento de Transformadores”. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 2001, Campinas.
- [28] LIPSTEIN, R. A.; SHAKNOVICH, M. I. “Transformer oil”. 2.ed. Jerusalém: Scientific Translations, 1970. p. 275.
- [29] LUNA, A. M.; BRAGA, J. D. “A Experiência da Chesf no Manuseio e Armazenamento do Óleo Ascarel e algumas considerações sobre o seu descarte”. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 1997, Belém.
- [30] Headwater Environmental Services Corporation, Basel Convention: “PCB, PCT AND PBB TECHNICAL GUIDELINES”. Environment Canada Toxics Pollution Prevention Directorate, 2<sup>nd</sup> Draft, Jerseyville, Canada, September 2002.
- [31] Cooper Power Systems, Bulletin 92006, Product Information, August 2003.
- [32] Cooper Power Systems, Bulletin 94034, Product Information, January 2002.
- [33] OOMMEN, T. V.; CLAIBORNE, C. C.; WALSH, E. J.; BAKER, J. P. “A new Vegetable Oil Based Transformer Fluid: Development and Verification”. In: 2000 CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2000, USA.
- [34] Cooper Power Systems, Bulletin 00092, Product Information, June 2001.
- [35] OOMMEN, T. V. “Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers”. *IEEE - Industry Application Magazine*, v.18, n.1, 2002.
- [36] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 3º PROJETO 03:010.02-027, “Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos”. Rio de Janeiro, Junho 2006.
- [37] Cooper Power Systems, Bulletin B100-98077. “Envirotran® Transformers - The Next Step in Advancing Safety, Value and Performance”. USA, Março, 2007.
- [38] Shanghai Changji Geological Instrument Co. Disponível em: <[http://www.shangyi.net/index\\_prod\\_1\\_eng.html](http://www.shangyi.net/index_prod_1_eng.html)>



- [39] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. “Fundamentos de Física”. 4.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1993. v.3.
- [40] DIOGO, A. C. T. “Avaliação da Vida Útil Residual de Transformadores de Potência Através da Cromatografia Líquida de Alto Desempenho”. III CLAGTEE, 1997. p.486-489.
- [41] HANIF, M. “Principles & Applications of Insulation Testing with DC”. ABB Electrical Industries Company Ltd, IEP-SAC Journal 2004-2005, Riyadh, Saudi Arabia, p. 57-63.
- [42] KATE, K.;SARAH, L. “The Commercial Use of Biodiversity”. London, 2002.
- [43] FERNANDES, L. R. R. M. V. “A Gestão do Conhecimento Aplicada à Biodiversidade com foco em Plantas Medicinais Brasileiras”. 2002. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [44] RODRIGUES, J. R.; FREITAS, E. J.;GAZZONI, D. L. “Biocombustíveis: Uma oportunidade para o agronegócio brasileiro”.
- [45] JASINSKI, R. “Envelhecimento de Transformadores de Potência”. CEMEE/Convênio Universidade Federal do Paraná – COPEL, Curitiba , 1996.
- [46] Dupont™ Nomex®, Electrical applications. Disponível em: <<http://www.dupont.com/nomex/electapps/index.html>> Acesso em: 30 ago. 2004.
- [47] LUCAS, J. R. “Historical Development of the Transformer”. The Institution of Electrical Engineers, Chairman IEE Sri Lanka Centre 2000/0, Colombo, Sri Lanka, 2000.
- [48] COLTMAN, J. W. “The Transformer”. *IEEE - Industry Application Magazine*, v.18, n.1, 2002.
- [49] ABDULLAHI, U. U.; BASHI, S. M.; MOHIBULLAH, R. Y.; NURDIN, H. A. “The Potentials of Palm Oil as a Dielectric Fluid”. In: NATIONAL POWER& ENERGY CONFERENCE (PECon), 2004, Kuala Lumpur, Malasia.
- [50] Environmental Protection Agency, “PCB Regulations”, parte 761, 40 CFR, Federal Register - USA, 1979.
- [51] Underwriters Laboratories, “R-temp fluid UL classification marking,” Gas & Oil Equipment Directory, USA, 1984.

- [52] JUNQUEIRA, L. H. P.; VILELA, J. A. “Determinação de incertezas em ensaios Físico-Químicos de Óleo Isolante”. Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Setembro 01-05, Recife, 2003.
- [53] LEVY, N. M.; NAKAMORI, A.; PEREIRA, N. ”Determinação de Envelhecimento Relativo de Transformadores de Potência, através da Correlação dos Teores de Produtos de Degradação da Isolação Sólida e Líquida”. In: SEMINÁRIO DE MATERIAIS NO SETOR ELÉTRICO, 4., 1994, Curitiba. p.349-354.
- [54] NBR 5356. “Transformadores de Potência”.1993.
- [55] NBR 5440. “Transformadores de distribuição”.1990.
- [56] NBR 10576. “Guia para acompanhamento de óleo mineral isolante”. 1988.
- [57] MCSHANE, C. P. “The Health, Environmental, Safety, Performance and Economic Analysis of R-Temp Fluid”. EPRI substitute workshop, 1986.
- [58] ROUSE, T. O. “Mineral insulating oil in transformers”. *IEEE - Industry Application Magazine*, v.14, n.3, 1998.
- [59] ELDRIDGE, K.; XU, J.; YIN, W.; JEFFERY, A.M.; RONZELLO, J. A.; BOGGS, S. A. “Degradation of a Silicone-Based Coating in a Substation Application”. Electrical Insulation Research Center, USA.
- [60] CLAIBORNE, C. C.; PEARCE, H. A. “Transformer Fluids”. *IEEE - Industry Applications Magazine*, v.5, n.4, 1989.
- [61] ABEYSUNDARA, D. C.; WEERAKOON, C.; LUCAS, J. R.; GUNATUNGA, K. A.; OBADAGE, K. C. “Coconut Oil as an Alternative to Transformer Oil”. 8th Annual Conference of the IEE - Paper 2001/02, Colombo, Sri Lanka, 2001.
- [62] SAHA, T. K.; PURKAIT, P. “Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil-paper Insulation of Aged Transformers”. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v.11, n.1, 2004.
- [63] C. PERRIER; A. BEROUAL; J. L. BESSEDE. “Improvement of Power Transformers by using Mixtures of Mineral Oil with Synthetic Esters”. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v.13, n.3, 2006.
- [64] T. Y. ZHENG; T. K. SAHA. “Analysis and Modeling of Dielectric Responses of Power Transformer Insulation”. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002.

- [65] L. R. LEWAND. “Laboratory Testing of Natural Ester Dielectric Liquids”. *Chemist’s Perspective*, 2005.
- [66] D. R. MORAIS. “Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores baseada na Análise de Gases Dissolvidos no Óleo Isolante”. 2004. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

## **Equipamentos de medidas das propriedades dos óleos isolantes**

### **Exame Visual do Óleo Isolante.**

O ensaio de cor realizado no óleo isolante tem por principal função a indicação de contaminação e/ou oxidação do mesmo. Quando há uma rápida alteração na cor (cores mais intensas e escuras) tem-se um indicativo de piora na qualidade do óleo. Cores claras e brilhantes são sempre desejáveis para os óleos isolantes.



Foto 1: Ilustração da Mistura 2, composta por 90% de óleo mineral e 10% de óleo vegetal.

### **Medidor de Viscosidade**

O medidor *Factor Finder* faz uma medição da viscosidade do óleo dielétrico. Este parâmetro é importante, pois a quantidade de calor que o óleo é capaz de transferir por hora, do transformador para o meio ambiente, depende da viscosidade. A viscosidade dos óleos isolantes é medida em cSt e deve ser feita sempre em duas diferentes temperaturas. Geralmente elas são feitas na temperatura ambiente e a 100°C ou 90°C.



Foto 2: Viscosímetro, da Factor Finder.

### **Medidor de Rigidez Dielétrica**

O ETS faz a leitura direta da Rigidez Dielétrica. O óleo é submetido a uma diferença de potencial crescente até o surgimento do arco elétrico no dielétrico, indicando a ruptura do mesmo. Verifica-se que a constante dielétrica é um parâmetro que define o campo elétrico, que por sua vez, está relacionada à Rigidez Dielétrica do óleo.



Foto 3: Equipamentos medidores de Rigidez Dielétrica, da “Eletric Test Seta – ETS”

### Medidor de Fator de Potência de Isolamento

O medidor MP 2500D faz leitura indireta do Fator de Dissipação e da Capacitância do equipamento sob teste. Através de medições no equipamento, pode-se determinar **perdas ativas em mVA** e **perdas ativas em mW**. A razão entre estes dois parâmetros fornece o Fator de Potência ( $\text{tg } \delta$ ). É importante ressaltar que a constante dielétrica (específica de cada óleo) é um parâmetro que define a capacitância, que por sua vez está relacionada ao fator de potência.



Foto 4: Equipamentos medidores de Fator de Potência, da Nansen.

### Medidor de Umidade

O medidor *Karl Fischer* faz medição indireta do teor de água existente no óleo isolante. O ensaio consiste na determinação, através de reações químicas, da quantidade de água presente na amostra de óleo sob análise. Para o caso de óleos isolantes, o teor de água desejável deve ser muito baixo.



Foto 5: Equipamento de Medição de Umidade, modelo Karl Fischer

