



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E DIELÉTRICAS DE
ÓLEOS VEGETAIS PARA USO COMO ISOLANTE EM
TRANSFORMADORES

Claudia Ramos da Silva

Campina Grande

2009

Claudia Ramos da Silva

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E DIELÉTRICAS DE ÓLEOS VEGETAIS
PARA USO COMO ISOLANTE EM TRANSFORMADORES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos

Orientadoras: Prof^ª. Dr^ª. M^a Wilma Nunes Cordeiro Carvalho – UFCG

Prof^ª. Dr^ª Lúbia de Sousa Conrado Oliveira – UFCG

Campina Grande

2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586p Silva, Cláudia Ramos da.
2009 Propriedades físico-químicas e dielétricas de óleos vegetais para uso como isolante em transformadores / Cláudia Ramos da Silva. — Campina Grande, 2009.
86 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr.ª Maria Wilma Nunes Cordeiro Carvalho, Prof. Dr.ª Líbia de Sousa Conrado Oliveira.

1. Óleo Vegetal isolante. 2. Transformadores. 3. NBR 15422. I. Título.

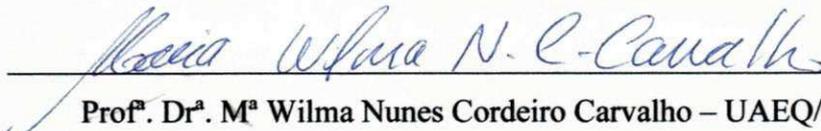
CDU - 62-634.5:621.314.222(043)

Claudia Ramos da Silva

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E DIELETRICAS DE ÓLEOS VEGETAIS PARA
USO COMO ISOLANTE EM TRANSFORMADORES

Dissertação aprovada em: 11 / 02 / 2009

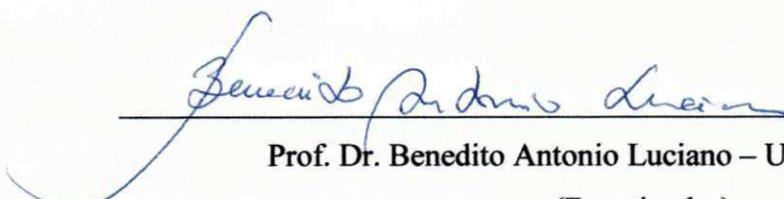
BANCA EXAMINADORA



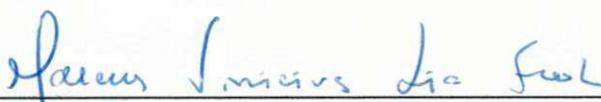
Prof.ª. Dr.ª. M.ª Wilma Nunes Cordeiro Carvalho – UAEQ/CCT/UFCG
(Orientadora)



Prof.ª. Dr.ª Líbia de Sousa Conrado Oliveira – UAEQ/CCT/UFCG
(Orientadora)



Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano – UAEE/CCT/UFCG
(Examinador)



Prof. Dr. Marcus Vinicius Lia Fook – UAEMA/UFCG
(Examinador)

*Dedico este trabalho a minha família e amigos:
leais torcedores.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos concedidas nestes dois anos de trabalho e em toda minha vida;

À família que Deus me deu e que me faz entender o real sentido da palavra *amor*: meus pais (Valdemar e Cecília Dilva) e as minhas irmãs Mônica e Vilma. Meus sobrinhos Ires e Igor pelos momentos de brincadeira compartilhados com tanta alegria.

À Lúcia, uma pessoa muito querida: tia, amiga e conselheira. Á Fábio e Fé (Fernanda) por me fazerem sentir tão bem vinda em sua casa;

A Francisco (Kiko) por estar ao meu lado em momentos tão decisivos; sempre disposto a compartilhar das alegrias, tristezas e inseguranças, transmitindo-me carinho e conforto. À sua família (minha segunda família) pelo apoio, estímulo e torcida por meu sucesso.

Às minhas orientadoras, professoras Wilma e Líbia, por enfrentarem junto a mim o desafio da materialização deste trabalho.

Aos amigos de graduação Ivanildo e Mariângela. Mesmo não tendo o contato de antes, não são esquecidos.

Ao amigo Jailson, por sua amizade e cumplicidade nestes anos de convivência;

A amiga Lionete, pela ajuda no trabalho com óleos e pela amizade conquistada nestes dois anos de convivência diária;

A Chiquinho (Francisco) amigo da UEPB, por sua presteza em ajudar-me na “crise por água destilada”.

A Kleber, pela realização das análises Termogravimétricas;

A Moema, professora do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, que disponibilizou os equipamentos para realização dos ensaios de Rigidez Dielétrica, Teor de Água e Fator de Potência;

A Marcos Tejo, pelos esclarecimentos relacionados à área de transformadores elétricos e pelo óleo mineral;

A Chesf pelo óleo mineral disponibilizado;

À turma do Laboratório de Catálise, Adsorção e Biocombustíveis da UFCG: Jakeline, Jocielys, Rucilana, Ivanilson, Camila, Aroldo, Taline, Krstianne (companheira dos trabalhos com óleos) e Adriano por seu apoio, prontidão e disposição em ajudar.

À UFCG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química pela ajuda de custo concedida para publicação de trabalhos em eventos relacionados à área de interesse.

À secretária da Pós-graduação em Engenharia Química (Maricé), por sua prontidão e profissionalismo.

Aos professores participantes da banca avaliadora, pela presença e contribuições para o enriquecimento deste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

Obrigada!

O *Senhor* guardará a tua entrada e a tua saída, desde agora e para sempre.

(Salmo 121: 8)

Universidade Federal de Campina Grande - Unidade Acadêmica de Engenharia Química
Propriedades físico-químicas e dielétricas de óleos vegetais para uso como isolante em transformadores

Autora: Claudia Ramos da Silva

Orientadoras: Prof^ª. Dr^ª. M^a Wilma Nunes Cordeiro Carvalho – UFCG

Prof^ª. Dr^ª Lúbia de Sousa Conrado Oliveira – UFCG

RESUMO

O óleo vegetal tem se apresentado como promissor candidato a fluido isolante para equipamentos elétricos em substituição ao óleo mineral, tradicionalmente usado, por ser um produto agrícola e de fácil biodegradabilidade. Aproveitando o grande potencial brasileiro na produção de oleaginosas, para este trabalho foram selecionadas cinco variedades de óleos refinados de origem comercial: soja, milho, girassol, babaçu e algodão. Foram realizadas análises de densidade a 20°C, viscosidade a 20, 40 e 100°C, presença de compostos de enxofre, rigidez dielétrica, fator de perdas a 100°C, estabilidade térmica por termogravimetria dinâmica em atmosfera de nitrogênio e estabilidade oxidativa mediante o envelhecimento acelerado sob fluxo de ar a 110°C. Verificou-se que os óleos de soja, milho, girassol e algodão possuem densidade e viscosidade superiores àquelas do óleo mineral, contudo dentro do limite recomendado pela NBR 15422. O óleo de babaçu é pastoso mesmo à temperatura de 25°C, contudo nas temperaturas de 40 e 100°C possui melhor viscosidade que os demais. As cinco espécies vegetais avaliadas apresentaram elevado teor de água e baixa rigidez dielétrica para níveis de isolamento elétrico e, além disso, índice de acidez superior ao limite estabelecido pela norma anteriormente citada. Após a neutralização foi possível estabelecer valores de acidez dentro do recomendado. Os óleos neutralizados, quando comparados aos originais, apresentaram melhorias na rigidez dielétrica e no fator de perdas. Apenas o óleo de milho neutralizado apresentou rigidez dielétrica mínima recomendada para uso como isolante. Os óleos vegetais testados possuem estabilidade térmica adequada para uso em transformadores elétricos por apresentarem temperatura de decomposição acima de 200°C, sendo que os óleos de milho e algodão apresentaram, respectivamente, a melhor e pior estabilidade térmica. Quanto à resistência à oxidação verificou-se a seguinte ordem de estabilidade: algodão < soja < milho < girassol < babaçu.

Palavras-chave: óleo vegetal isolante, transformador, NBR 15422.

Universidade Federal de Campina Grande - Unidade Acadêmica de Engenharia Química
Physico-chemical and dielectric properties of vegetable oils for use as insulation in transformers

Author: Claudia Ramos da Silva

Advisors: Prof^a. Dr^a. M^a Wilma Nunes Cordeiro Carvalho – UFCG

Prof^a. Dr^a Líbia de Sousa Conrado Oliveira – UFCG

ABSTRACT

The vegetable oil has been shown as promising candidate for the insulating fluid for electrical equipment to replace the mineral oil, traditionally used, as an agricultural product and easy biodegradability. Enjoying the great potential in the Brazilian production of oil, for this study were selected five varieties of commercial origin of refined oils: soybean, maize, sunflower, babassu and cotton. Density tests were performed at 20°C, viscosity at 20, 40 and 100°C, the presence of sulfur compounds, breakdown voltage, loss factor at 100° C, thermal stability by thermogravimetry in atmosphere of nitrogen and oxidative stability by the aging under air flow at 110°C. It was found that the oils of soybean, maize, sunflower and cotton density and viscosity are higher than those of mineral oil, however pass in the test NBR 15422. The babassu oil paste is even a temperature of 25°C, however at temperatures of 40 and 100°C has better viscosity than the other. The five species evaluated had high water content and low levels of breakdown voltage for electrical isolation and, moreover, index of acidity than the limit set by the standard above. After neutralization was possible to establish values of acidity within the recommended. The neutralized oil showed improvement in breakdown voltage and loss factor when compared to the originals. Only corn oil neutralized presented recommended minimum breakdown voltage for use as insulation. The vegetable oils tested have adequate thermal stability for use in electrical transformers for presenting the decomposition temperature above 200°C, and the oils of corn and cotton showed, respectively, the best and worst thermal stability. For resistance to oxidation took place the following order of stability: cotton <soybean <maize <sunflower <babassu.

Keywords: vegetable oil insulation, transformer, NBR 15422.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 Estrutura básica de um sistema elétrico	22
Figura 2.2 Transformador de distribuição de poste	23
Figura 2.3 Transformador de potência.....	24
Quadro 2.1 Fluidos isolantes: marcos históricos.....	25
Figura 2.4 Núcleo magnético do transformador envolvido por bobinas de cobre	26
Figura 2.5 Representação estrutural de: (1) glicerol, (2) ácido graxo e (3) triacilglicerídeo..	27
Quadro 2.2 Nomenclatura dos ácidos graxos.....	28
Quadro 2.3 Escala de reatividade para compostos de enxofre (S)	40
Quadro 3.1 Variedades de óleos vegetais selecionadas.....	48
Figura 3.1 Viscosímetro capilar Cannon Fenske.....	49
Figura 3.2 Neutralização do óleo de soja: (a) separação da borra e (b) lavagem.....	52
Figura 3.3 Frascos com óleo para ensaio de enxofre corrosivo	53
Figura 3.4 Célula para ensaio de rigidez dielétrica em óleo	54
Figura 3.5 Diagrama do processo de envelhecimento acelerado dos óleos	56
Figura 4.1 Aspecto visual dos óleos: (a e g) babaçu, (b) soja, (c) milho, (d) girassol, (e) algodão e (f) mineral.....	58
Figura 4.2 Densidades relativas dos óleos comparadas aos limites estabelecidos pela NBR 15422	62
Figura 4.3 Viscosidade dos óleos a 20, 40 e 100°C comparadas aos limites estabelecidos pela NBR 15422.....	62
Figura 4.4 Fitas de cobre após ensaio de enxofre.....	63
Figura 4.5 Rigidez dielétrica dos óleos vegetais antes e após neutralização	66
Figura 4.6 Fator de perdas dos óleos vegetais antes e após neutralização.....	67
Figura 4.7 Curvas TG/DTG para amostras de óleos vegetais em atmosfera de nitrogênio....	68
Figura 4.8 Parâmetros obtidos da Termogravimetria de óleos em atmosfera de nitrogênio ..	69
Figura 4.9 Aspecto visual dos óleos (a) antes e (b) após o envelhecimento acelerado	71
Figura 4.10 Precipitado gerado durante oxidação do óleo mineral a 110°C.....	72
Figura 4.11 Efeito do envelhecimento sob fluxo de ar a 110°C por 72 horas sobre o índice de acidez dos óleos	73

Figura 4.12 Efeito do envelhecimento sob fluxo de ar a 110°C por 72 horas sobre a viscosidade dos óleos.....	74
Figura 4.13 Determinação do tempo de indução por retas tangentes	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 Composição química média de alguns óleos vegetais.....	31
TABELA 2.2 Propriedades típicas dos fluidos vegetais isolantes comerciais BIOTEMP e Envirotemp FR3.....	33
TABELA 2.3 Características referenciais para óleo vegetal isolante	36
TABELA 2.4 Valores das propriedades após teste de oxidação (óleo mineral)	46
TABELA 3.1 Parâmetros de neutralização do óleo	51
TABELA 4.1 Índices de acidez dos óleos antes e após neutralização (N).....	59
TABELA 4.2 Propriedades físico-químicas dos óleos.....	60
TABELA 4.3 Características dielétricas e teor de água dos óleos	64
TABELA 4.4 Propriedades dos óleos não neutralizados após envelhecimento acelerado por 72 horas a 110°C.....	72
TABELA 4.5 Períodos de indução obtidos por medida da condutividade elétrica durante envelhecimento	76

LISTA DE SIGLAS

ABB – *Asea Brown Boveri S.A.*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BHT - *Butylated hydroxytoluene*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais S.A.

Chesf – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco S.A.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia S.A.

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz S.A.

DBCP – Di-terc-butyl-p-cresol

DBDS – Di-benzil Di-sulfeto

DTG – Derivada da Curva Termogravimétrica

GE – *General Electric Company*

HMWH – *High Molecular Weight Hydrocarbons*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICP-AES – Espectrometria de Absorção Atômica de Plasma Indutivamente Acoplado

LCC – Líquido de Castanha de Caju

NBR – Norma Brasileira

OSI – *Oil Stability Index*

PCBs – Bifenilas Policloradas

ppm – Parte por milhão

TBHQ – *Tertiary-butylhydroquinone*

TG – Termogravimetria

UV – Ultravioleta

LISTA DE ABREVIATURAS

Temp. – Temperatura

T_i – Temperatura inicial de cada decomposição

T_p – Temperatura em que cada decomposição é máxima

T_f – Temperatura final de decomposição

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Sistema Elétrico de Potência	21
2.1.1 Transformadores Elétricos.....	22
2.2 Sistemas de Isolamento em Transformadores	24
2.3 Dielétricos.....	26
2.3.1 Óleo Mineral Isolante.....	26
2.4 Características Gerais dos Óleos E Gorduras	27
2.4.1 Óleo de Soja.....	29
2.4.2 Óleo de Milho	29
2.4.3 Óleo de Algodão	29
2.4.4 Óleo de Girassol.....	30
2.4.5 Óleo de Babaçu	30
2.4.6 Óleo Vegetal Isolante	31
2.4.6.1 Guia para Utilização.....	35
2.5 Caracterizações Físico-químicas.....	36
2.5.1 Viscosidade.....	37
2.5.2 Teor de Água	37
2.5.3 Índice de Acidez (IA).....	38
2.5.4 Rigidez Dielétrica.....	39

2.5.5 Enxofre Corrosivo.....	39
2.5.6 Fator de Perdas (tg δ)	42
2.6 Propriedades Térmicas	43
2.6.1 Termogravimetria (TG).....	43
2.6.2 Estabilidade à Oxidação	44
3 MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1 Densidade	48
3.2 Viscosidade Cinemática	49
3.3 Índice de Acidez	50
3.4 Neutralização do Óleo Vegetal.....	50
3.5 Determinação de Enxofre	52
3.6 Teor de Água	53
3.7 Rigidez Dielétrica	53
3.8 Fator de Perdas.....	55
3.9 Análise Térmica.....	55
3.10 Estabilidade à Oxidação	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1 Aspecto Visual.....	58
4.2 Índice de Acidez	59
4.3 Densidade e Viscosidade.....	59
4.4 Determinação de Enxofre.....	63
4.5 Características Dielétricas e Teor de Água dos Óleos	64
4.4 Estabilidade Térmica dos Óleos	67
4.5 Estabilidade à Oxidação	70

5 CONCLUSÕES.....	77
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1. INTRODUÇÃO

Transformadores são equipamentos fundamentais em sistemas elétricos de potência, pois eles estão presentes desde o que podemos chamar de início do sistema, onde a energia é convertida, até o consumo residencial. Nesse trajeto a energia é transmitida sob vários níveis de tensão e, em cada etapa, onde se faz necessário um nível de tensão diferente encontra-se um transformador. Da mesma forma, em indústrias e instalações de grande porte, o emprego de transformadores é muito comum, pois dependendo da potência instalada é mais vantajoso economicamente comprar energia em níveis de tensão mais elevadas; neste caso a própria indústria é responsável por transformar a tensão para níveis a serem usados em seus processos (AMARAL, 2007).

O funcionamento adequado dos transformadores depende de um eficiente sistema de isolamento e refrigeração, os quais são realizados por fluidos contidos em seu interior.

O uso de óleo mineral, derivado do petróleo, como fluido isolante em transformadores data do final do século XIX e, apesar de toda evolução tecnológica, continua sendo o sistema de isolamento mais usado (PAIXÃO, 2006). No ano 2000, Oommen *et al.*, estimaram que de 8 a 10 bilhões de galões deste óleo se encontravam em serviço ao redor do mundo.

Apesar de ser uma tecnologia relativamente recente, o óleo vegetal isolante mostra-se como uma alternativa viável ao óleo mineral isolante para aplicações em transformadores (MARTINS, Marcelo, 2008). Além deste uso, outros possíveis mercados para os fluidos vegetais seriam os de capacitores, disjuntores e trocadores de calor, onde os óleos minerais ou sintéticos são atualmente utilizados.

No Brasil, as alternativas para a obtenção de óleos vegetais são diversas e dependem das espécies cultivadas em cada região. Na região Norte destaca-se a produção de babaçu, dendê e a soja. No Nordeste, o babaçu, o dendê, o algodão, a soja e a mamona, são os que mais se destacam. Do Centro-Oeste são representantes o girassol, o dendê, soja, mamona, algodão e o nabo forrageiro. Já no Sudeste os principais cultivos de oleaginosas são: soja, mamona, algodão e girassol. (GARCIA, Camila, 2006). De acordo com a Associação Brasileira dos Produtores de Milho, em 2008 a região Sul ocupou primeiro lugar na produção nacional deste grão, respondendo por mais de 40% da safra.

Nos últimos anos, tem se evidenciado um crescimento no cultivo de oleaginosas, impulsionado principalmente pelo potencial como matéria-prima na produção de

biocombustíveis. Oportunamente, este trabalho destina-se a estudar os óleos vegetais no que diz respeito às características que os potencializam como isolantes elétricos. Para tanto foram selecionadas cinco variedades de óleos vegetais refinados da classe comestível: soja, milho, algodão, girassol e babaçu. A escolha dos óleos para este estudo foi feita de forma que cada região do país pudesse ser representada.

Este trabalho tem características notadamente inovadoras uma vez que pesquisas na área de isolantes a base de óleos vegetais são recentes no Brasil. Destaca-se, sobretudo por sua importância no desenvolvimento sustentável, pois sabe-se que a disponibilidade do petróleo no mercado mundial é finita e a dependência excessiva em sua oferta ocasiona sérios problemas sócio-econômicos e ambientais. Além disso, o desenvolvimento de fluidos a base de óleos comestíveis tem vantagem sobre o fluido convencional no caso de derramamentos, por serem biodegradáveis. Nesse contexto, é de extrema importância para o setor elétrico a busca por alternativas para substituição do óleo mineral tradicionalmente usado por fluidos biodegradáveis e renováveis.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo investigar propriedades físico-químicas e dielétricas de cinco variedades de óleos vegetais refinados da classe comestível: algodão, babaçu, girassol, milho e soja, visando uso como fluido isolante para equipamentos elétricos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar propriedades físico-químicas dos óleos, sendo estas: densidade, viscosidade, teor de água e presença de compostos corrosivos de enxofre;

- Determinar características dielétricas dos óleos, sendo estas a rigidez dielétrica e fator de perdas;
- Verificar a estabilidade térmica dos óleos mediante uso da termogravimetria;
- Verificar a estabilidade oxidativa dos óleos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema Elétrico de Potência

O objetivo de um sistema elétrico de potência é converter, transmitir e distribuir energia elétrica, atendendo a determinados padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos, com o mínimo impacto ambiental e o máximo de segurança pessoal (LEÃO, 2008).

O sistema atual de energia elétrica brasileiro é majoritariamente composto por grandes usinas de geração que transmitem energia através de sistemas de transmissão de alta tensão, que é, então, distribuída para sistemas de distribuição de média e baixa tensão. Desde sua geração à utilização pelo consumidor (Figura 2.1), a energia elétrica passa por sucessivas transformações de tensões. Logo após a produção, a tensão é elevada numa subestação próxima à usina. A rede de transmissão liga as grandes usinas de geração às áreas de grande consumo. Em geral, apenas poucos consumidores com um alto consumo de energia elétrica são conectados às redes de transmissão. Dependendo do país, o nível de tensão nos sistemas de transmissão se situa entre 220 kV e 765 kV (LEÃO, 2008 e PAIXÃO, 2006)

A rede de subtransmissão recebe energia da rede de transmissão com objetivo de transportar energia elétrica a pequenas cidades ou importantes consumidores industriais. O nível de tensão, na subtransmissão, está entre 35 kV e 160 kV. A estrutura dessas redes é, em geral, em linhas aéreas e por vezes através de cabos subterrâneos próximos a centros urbanos (LEÃO, 2008 & PAIXÃO, 2006).

Os consumidores residenciais, comerciais e industriais de pequeno e médio porte são atendidos pelo sistema de distribuição de energia elétrica. Nos sistemas de distribuição, a faixa média de tensão está situada entre 4kV e 35kV. No caso de consumidores de baixa tensão, os valores mais comuns são 380V, 220V e 110V.

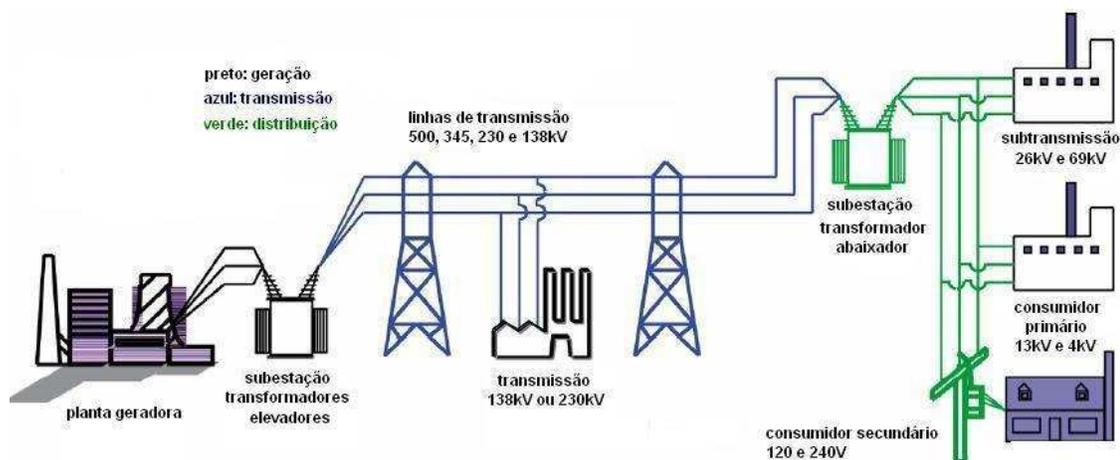


Figura 2.1 Estrutura básica de um sistema elétrico

Fonte: Leão, 2008.

2.1.1 Transformadores Elétricos

Qualquer instalação elétrica, seja de uso doméstico ou industrial, requer a aplicação de transformadores para prover as condições corretas de utilização da energia elétrica. Assim, nas instalações industriais, os transformadores são uma condição necessária para o funcionamento de todo o processo e dos sistemas de distribuição de energia (NOGUEIRA, 2004).

Os transformadores possibilitam a obtenção de energia elétrica em baixa tensão, por questão de segurança, e em alta tensão, para transmissão em longas distâncias, diminuindo as perdas por dissipação de calor e, conseqüentemente, reduzindo os custos. Esses equipamentos são constituídos, em sua maioria, por aço, presente na carcaça e no núcleo; cobre, presente nas bobinas do núcleo; papel do tipo “kraft”, isolante das bobinas de cobre; madeira, que serve de base de sustentação do núcleo (suporte mecânico); borracha (elastômero), utilizada na vedação da tampa e óleo mineral isolante, no qual fica imerso o núcleo. A vida útil dos transformadores está diretamente ligada à qualidade dos seus componentes isolantes, principalmente a do papel de enrolamento e do óleo mineral isolante (LUZ JÚNIOR, GUIMARÃES NETO, MOITA NETO, 2005).

Em geral, transformadores são projetados para durar cerca de 25 anos. Porém, com técnicas de operação e manutenção adequadas podem chegar a uma vida útil de 40 a 50 anos.

A perda financeira causada pela falha de um transformador de potência é contada, frequentemente, em milhões de dólares, devido a interrupção da produção industrial, sem considerar os custos associados com o conserto ou substituição do equipamento (NOGUEIRA, 2004).

Os transformadores podem ser classificados em duas categorias: transformadores de distribuição e transformadores de potência. Os primeiros são aqueles que rebaixam a tensão para o nível de utilização dos usuários, ou seja, são aqueles localizados no final da cadeia do sistema. Devido a sua vasta utilização há uma enorme variedade desse tipo de equipamento, cada qual com suas peculiaridades, dependendo da aplicação e instalação. Para instalação em postes, o transformador de distribuição pode ser do tipo mostrado na Figura 2.2.



Figura 2.2 Transformador de distribuição de poste

Fonte: Tunião Transformadores, 2008.

Os transformadores de potência estão presentes no início do sistema, elevando a tensão de saída dos geradores. Eles estão presentes também na interligação de sistemas e na conexão com linhas de tensões mais reduzidas (AMARAL, 2007).

Na Figura 2.3 é apresentado um típico transformador elétrico usado em subestações.



Figura 2.3 Transformador de potência

Fonte: Arquivo pessoal

2.2 Sistemas de Isolamento em Transformadores

Durante muito tempo, os fluidos usados no isolamento de transformadores eram compostos organoclorados conhecidos por PCBs (PolyChlorinated Biphenyls), ou bifenilas policloradas, comercializados no Brasil como ascarel. Pouco tempo depois, a legislação brasileira proibiu a fabricação de equipamentos que utilizassem essa substância, ainda que, pela mesma lei, seja permitida a utilização dos equipamentos já existentes até o final de sua vida útil. Apesar de suas excelentes propriedades técnicas e do seu grande emprego, os PCBs deixaram de ser fabricados e comercializados em razão da descoberta de evidências sobre sua toxicidade. Além disso, os PCBs não são biodegradáveis e são bioacumulativos nos tecidos vegetais e animais. Por este motivo houve, então, a substituição dos ascaréis por óleo de silicone e mineral (ANTONELLO *et al.*, 2007).

No Quadro 2.1 é apresentado um breve histórico dos principais desenvolvimentos tecnológicos relacionados com sistemas de isolamento líquido para transformadores.

1880s	Patente - conceito de isolamento e refrigeração a óleo
1892	Primeiro protótipo de transformador construído pela G.E. (<i>General Electric Company</i>), isolado a óleo mineral
1899	Fabricação do primeiro óleo exclusivo para transformadores
1930s	Introdução do ascarel, não inflamável
1970s	Promulgadas restrições aos PCBs Introdução dos fluídos alternativos
1978	Fluido isolante R-Temp a base de hidrocarbonetos: alto Ponto de Fulgor e de Combustão Introdução dos Silicones (sintético)
1984	Produção de ésteres sintéticos - Éster sintético (Envirotemp 200): excelente desempenho – Alto custo – Aplicações Especiais
1990s	Início das pesquisas com ester natural
1995	Ester natural – Testes de envelhecimento acelerado
1996	Ester natural – 100 protótipos instalados para teste em campo
2003	Emissão da norma da <i>ASTM D6871</i> – especificação do éster natural como fluido isolante
2006	Emissão da norma brasileira da ABNT NBR 15422 – especificação do éster natural como fluido isolante
2008	Pedido de patente brasileira – primeiro óleo ecológico para transformadores produzido a partir de Líquido de Castanha de Caju (LCC)

Quadro 2.1 Fluidos isolantes: marcos históricos

Fonte: Oliveira, 2005, Martins, 2006, Relatório Anual de Sustentabilidade da Coelce, 2008.

O funcionamento adequado dos transformadores depende de um eficiente sistema de isolamento e refrigeração, os quais são realizados por fluidos com propriedades tais como alta constante dielétrica e elevada estabilidade térmica.

No sistema de isolamento de transformadores, o óleo mineral, em associação ao papel isolante é, o conjunto utilizado em 95% dos equipamentos. Este fato pode parecer estranho, face aos recentes avanços na área de materiais sintéticos, mas está relacionado às excelentes características da dupla papel-óleo face às solicitações elétricas, mecânicas e térmicas no transformador (NUNES JUNIOR, *apud* WYKROTA, 2004).

A função do óleo isolante contido no interior dos transformadores é a de manter o isolamento elétrico entre as diversas partes dos circuitos elétricos e magnéticos e a de transferir o calor, para resfriamento das bobinas e do núcleo.

Na Figura 2.4 é apresentada uma etapa da montagem de um transformador, na qual o conjunto bobinas-núcleo encontra-se exposto.

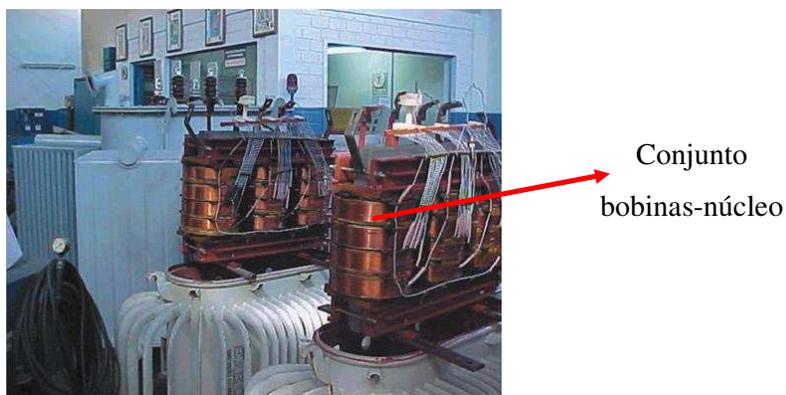


Figura 2.4 Núcleo magnético do transformador envolvido por bobinas de cobre

Fonte: Galeria de fotos da WEG em 06 ago. 2008

2.3 Dielétricos

Dielétricos ou materiais isolantes se caracterizam por oferecerem uma considerável resistência à passagem de corrente elétrica, comparativamente ao valor intrínseco dos materiais condutores. Tal comportamento tem seus fundamentos nas propriedades físicas dessa família de materiais (SCMIDT, 2002).

2.3.1 Óleo Mineral Isolante

O óleo mineral isolante é constituído, basicamente, por uma mistura de hidrocarbonetos e compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio, sendo que estes encontram-se em menor proporção (ppm) (PAIXÃO, 2006).

Durante a operação do transformador, o óleo passa por um processo de envelhecimento resultante da “fadiga” térmica, ação de oxigênio e de materiais presentes na construção do equipamento (cobre e outros). Como consequência, ocorre a deterioração das propriedades isolantes do óleo e seus produtos promovem a degradação da celulose e a formação de substâncias ácidas e de borra (PAIXÃO, 2006).

As reações de oxidação ocorrem por via radicalar e geram, inicialmente, hidroperóxidos e peróxidos que, em seguida, dão origem a álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, ácidos, água e borra substância resinosa resultante da polimerização a partir de ácidos e outros compostos polares. Para desacelerar o processo de oxidação do óleo, acrescentam-se substâncias inibidoras de oxidação (LUZ JÚNIOR, GUIMARÃES NETO, MOITA NETO, 2005).

2.4 Características Gerais dos Óleos e Gorduras

Os óleos e gorduras são substâncias de origem vegetal, animal ou microbiana, insolúveis em água (hidrofóbicas) e solúveis em solventes orgânicos. Essas substâncias são formados, predominantemente, por produtos da condensação entre glicerol e ácidos graxos, formando os chamados triacilglicerídeos (DANTAS, Hérmesson, 2006). Uma representação da estrutura destes compostos encontra-se ilustrada na Figura 2.5

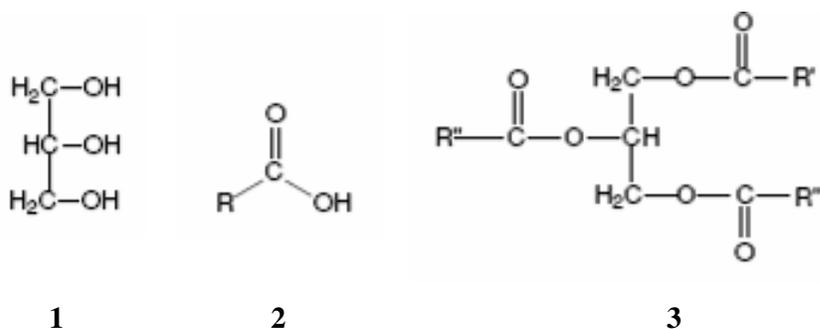


Figura 2.5 Representação estrutural de: (1) glicerol, (2) ácido graxo e (3) triacilglicerídeo

Onde R', R'' e R''' representam as cadeias de ácidos graxos

A diferença entre óleos e gorduras reside exclusivamente na sua aparência física. Os óleos são líquidos, enquanto as gorduras são sólidas à temperatura ambiente. As gorduras de origem vegetal resultam de processos de hidrogenação de óleos vegetais (MORETTO & ALVES, 1986).

Os ácidos graxos, constituintes dos triacilglicerídeos, mais comuns apresentam 12, 14, 16 ou 18 átomos de carbono, embora ácidos com menor ou maior número de átomos de carbono possam ser encontrados em vários óleos e gorduras (GARCIA, Camila, 2006). O número de insaturações pode variar de 1 a 6, sendo que três insaturações são comuns e existe um predomínio de isômeros *cis*, especialmente nos óleos e gorduras naturais. A configuração *cis* da ligação dupla de um ácido graxo insaturado impõe uma curva rígida à cadeia carbônica que causa redução da atração de Van der Waals, entre as moléculas. Como consequência, ácidos graxos insaturados possuem pontos de fusão mais baixos (SOLOMONS, 2002).

A representação genérica dos ácidos graxos é feita usando a fórmula R – COOH (cadeia carbônica – grupo carboxila). Também podem ser individualizados por símbolos numéricos, por exemplo: ácido láurico C12:0, ácido oléico C18:1; onde o número justaposto ao símbolo C indica o número de átomos de carbono e o segundo, a quantidade de duplas ligações. A posição das duplas ligações na cadeia carbônica é indicada entre parênteses. (MORETTO & ALVES, 1986). Alguns exemplos estão ilustrados no Quadro 2.2:

	Símbolo Numérico	Nome Sistemático	Nome Comum
Saturados	C4:0	Butanóico	Butírico
	C8:0	Octanóico	Caprílico
	C10:0	Decanóico	Cáprico
	C12:0	Dodecanóico	Láurico
	C14:0	Tetradecanóico	Mirístico
	C16:0	Hexadecanóico	Palmítico
	C18:0	Octadecanóico	Estearico
Insaturados	C18:1(9)	9-octadecenóico	Oléico
	C18:1(11)	11- octadecenóico	Vacênico
	C18:2 (9,12)	9,12- octadecadienóico	Linoléico
	C18:3 (9,12,15)	9,12,15- octadecatrienóico	Linolênico

Quadro 2.2 Nomenclatura dos ácidos graxos

Fonte: Moretto & Alves, 1986.

2.4.1 Óleo de Soja

A soja (*glycine max* L.) é predominante no mercado mundial, tanto de proteína vegetal, como de óleo comestível. De acordo com pesquisas realizadas pelo IBGE, mencionada por Pereira (2007), a soja é a oleaginosa mais cultivada no Brasil, pois pode ser plantada em qualquer região. O Brasil ocupa a 2ª posição do ranking da produção mundial, perdendo apenas para os Estados Unidos. Em 2007, a cultura dessa semente chegou a ocupar cerca de 20,7 milhões de hectares plantados no país.

Os principais ácidos graxos que compõem o óleo de soja são o linoléico e oléico (MORETTO & FETT, 1998).

2.4.2 Óleo de Milho

O milho é uma planta pertencente à família das gramíneas e é, provavelmente, o grão mais antigo cultivado nas Américas. Foi a principal fonte de alimentos das civilizações desse continente e se tornou um alimento básico. O Brasil ocupa a terceira posição no ranking mundial de produção deste cereal, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e China (PEREIRA, 2007).

O ácido graxo mais abundante no óleo de milho é o linoléico, superior a 50% do total. O ácido linolênico triinsaturado é altamente sujeito à oxidação e está presente em pequena percentagem neste óleo, se comparado com o de soja (PEREIRA, 2007).

2.4.3 Óleo de Algodão

O óleo de algodão é derivado da semente de *Gossypium hirsutum*; um subproduto do beneficiamento e/ou descaroçamento, visando à separação da fibra. A semente de algodão contém de 15 a 24% em média de óleo. A composição média do óleo de milho é: 22% de

ácido oléico, 52% de ácido linoléico e 24% de ácido palmítico, e menos que 1% de ácido linolênico, além de outros ácidos graxos em menor proporção (MORETTO & FETT, 1998).

2.4.4 Óleo de Girassol

Os maiores produtores do grão girassol (*Helianthus annuus*) são Argentina, Rússia, Ucrânia, USA, China, França e Índia. A produção brasileira ainda é pouco expressiva, mas atualmente o produto vem se consolidando e conquistando o seu espaço no mercado, de modo que esta oleaginosa já ocupa o quarto lugar em volume de produção, perdendo apenas para a soja, palma e canola (PEREIRA, 2007).

Das sementes do girassol se extrai um óleo de excelente qualidade e alto teor de ácido linoléico, tocoferóis e maior teor de gorduras polinsaturadas. Na sua composição, possui mais de 50% de ácido graxo linoléico.

2.4.5 Óleo de Babaçu

O óleo de babaçu é obtido das amêndoas contidas nos frutos da palmeira de babaçu (*Orbignya martiana*), uma das mais importantes representantes das palmeiras brasileiras. Atualmente no Brasil, encontram-se vastos babaçuais espalhados ao sul da bacia amazônica. O Nordeste brasileiro possui uma área de cerca de 12 milhões de hectares plantados com babaçu, sendo que a maior parte está concentrada no estado do Maranhão (MORETTO & FETT, 1998; SANTOS, 2008).

De acordo com LIMA *et al.* (2007) o óleo de babaçu tem composição predominantemente láurica (C12:0) podendo possuir mais de 40% do total.

Moretto & Alves (1986) descrevem a composição média dos ácidos graxos presentes em diversas variedades de óleos vegetais, algumas delas foram listadas na Tabela 2.1.

TABELA 2.1
Composição química média de alguns óleos vegetais

Ácidos graxos	Contribuição em cada Óleo (%)				
	Soja	Milho	Girassol	Babaçu	Algodão
C<14	-	-	-	72	1
Mirístico C14:0	11	13	11	9	29
Palmítico C16:0	4	4	6	3	4
Palmitoléico C16:1	-	-	-	-	2
Oléico C18:1	25	29	29	13	24
Linoléico C18:2	51	64	52	3	40
Linolênico C18:3	9	-	-	-	-

Fonte: Moretto & Alves, 1986.

2.4.6 Óleo Vegetal Isolante

Tradicionalmente, os transformadores de potência utilizam isolações sólida de papel celulósico e líquida de óleo mineral, que proporcionam limite de temperatura operacional de 98°C e 115°C, respectivamente. A partir de 1985, a introdução de materiais resistentes a altas temperaturas possibilitou mudanças no conceito dos sistemas convencionais de isolação dos transformadores de potência, imersos em líquido isolante e baseados em celulose-óleo mineral (MARTINS *et al.*, 2007).

Apesar de ser uma tecnologia relativamente recente, o óleo vegetal isolante mostra-se como uma alternativa viável ao óleo mineral isolante para aplicações em equipamentos elétricos. As principais vantagens para o setor elétrico são: a maior segurança ambiental e de saúde, excelente resistência ao fogo e ser um produto renovável (ROCHA FILHO, 2006).

O desenvolvimento de um transformador isolado por fluido vegetal chamou a atenção de investigadores apenas a partir de 1990 (Oommen *et al.*, 2000). Desde então, várias patentes foram publicadas a respeito desse tema. O fluido BIOTEMP foi patenteado nos Estados Unidos, em Setembro de 1999 pela ABB (*Asea Brown Boveri S.A.*). Outra patente foi emitida mais tarde, em setembro 1999, resultados de pesquisas com o óleo de soja, obtidos por

Waverly Light & Power. Em Março de 2000, outra patente foi concedida a *Cooper Industries, Inc*, sob a marca *Envirotemp FR3*.

Os fluidos isolantes de origem vegetal, comercialmente disponíveis no Brasil são: (WILHELM, 2006).

- **Envirotemp FR3:** formulado à base de óleos vegetais e aditivos de classe comestível, não contém materiais à base de petróleo, halogêneos, silicões ou qualquer outro material discutível. Tem rápida biodegradabilidade tanto em ambientes sólidos como aquáticos, sendo comprovado como não-tóxico em testes de toxidez aquática. Comercializado pela *Cooper Power Systems* e produzido pela *Cargill* a base de óleos de soja;
- **BIOTEMP:** isolante a base de óleo de girassol ou cártamo, desenvolvido pela ABB para ser compatível com o meio ambiente. É provido de inibidores de oxidação num nível não tóxico para os seres humanos (MENDES, 2008). É formulado a base de óleos com elevado conteúdo de oléico, mais de 80 %, produzidos principalmente a partir de sementes que foram desenvolvidos por técnicas de manipulação genética (OOMMEN, 2002);
- **BIOVOLT A e BIOVOLT B:** comercializados pela *Mineraltec*; à base do óleo de milho e soja, respectivamente.

Na Tabela 2.2 são listados os valores típicos de algumas propriedades dos fluidos vegetais isolantes comerciais BIOTEMP e Envirotemp FR3.

TABELA 2.2

Propriedades típicas dos fluidos vegetais isolantes comerciais BIOTEMP e Envirottemp FR3

TESTE <i>ASTM</i>	BIOTEMP	Envirottemp FR3
Densidade Relativa a 15°C, D1298	0,91	-
Densidade Relativa a 25°C, D D129	-	0,92
Viscosidade a 40°C, cSt, D445	45	34
Fator de Potência a 100°C, %, <i>ASTM</i> D924	2,0	3,0
Rigidez Dielétrica a 25°C, kV eletrodo VDE (gap 2.0 mm), <i>ASTM</i> D1816	74	56
Rigidez Dielétrica a 25°C, kV eletrodo de disco (gap 2.5 mm), <i>ASTM</i> D877	45	-
Teor de água, ppm, <i>ASTM</i> 1533	150	30
Índice de neutralização, mg KOH/g <i>ASTM</i> D974	0,075	0,04

Fonte: Oommen et al. (2000), Catálogos dos fluidos

Pesquisas em óleos vegetais isolantes são recentes no Brasil, destacando-se a iniciativa privada que vem testando-os em transformadores e em outros equipamentos da rede elétrica.

A Companhia Paranaense de Energia (COPEL), por exemplo, conduz desde 2004, experiências bem-sucedidas, em que o óleo vegetal (a base de soja) foi utilizado como isolante em substituição ao de origem mineral. Segundo a Companhia, até atingirem o ponto considerado ideal para ser colocado nos transformadores, os óleos vegetais comestíveis reforçados com aditivos, não mencionados, passaram por ensaios de oxidação e envelhecimento acelerado em estufas (AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS, 2006).

A CELESC Distribuição (Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.) tem investido em óleo vegetal como isolante de transformadores de alta e baixa tensão e afirma que este alcança o seu ponto de combustão aos 360°C e tem taxa de biodegradação de 97%, enquanto a queima do óleo mineral se dá aos 160°C e sua biodegradabilidade é de apenas 25,2%. Além disso, o óleo vegetal é atóxico, oferece menor risco de acidentes no manuseio e armazenamento, possui melhor tolerância à umidade, tem boa rigidez dielétrica, melhor eficiência na troca térmica pelas excelentes características térmicas, além de ampliar a vida útil do equipamento. Em fevereiro de 2007, a empresa instalou na rede elétrica que atende a região central de

Florianópolis, seu primeiro transformador, de 750kVA, subterrâneo, isolado com óleo vegetal a partir da semente de girassol (MACARIN, LUZ, MATTOZO, 2007).

Por serem provenientes de fontes renováveis, os óleos vegetais são considerados ecologicamente corretos. Assim, a utilização dos mesmos contribui para a qualidade do meio ambiente. Segundo a CPFL Energia (Companhia Paulista de Força e Luz) o óleo vegetal permite ampliar a potência do transformador, que passa a comportar mais kVA por quilo e ajuda a diminuir as falhas técnicas, além de ser decomposto no meio ambiente em apenas 45 dias, enquanto o mineral leva 15 anos para ser totalmente degradado. Ainda, os transformadores apresentam melhora no rendimento porque o líquido leva a celulose, substância mais importante no sistema de isolamento, a se deteriorar mais lentamente. O óleo vegetal é mais higroscópico (absorve mais água) que o mineral à base de petróleo. Os fluidos vegetais apresentam solubilidade de aproximadamente 1000 ppm a 25°C; enquanto o óleo mineral 55-60 ppm. A Companhia desenvolveu novos transformadores e em dois anos e meio, dez deles (isolados com óleo vegetal) foram colocados em locais de falhas constantes; nenhuma falha foi verificada nesse período (FERREIRA JUNIOR, 2006; CLAIBORNE, WALSH & OOMMEN, 1999).

A CEMIG Distribuição S.A. (Companhia Energética de Minas Gerais), motivada pela necessidade de repotenciar transformadores com mais de 22 anos de funcionamento, criou o primeiro equipamento deste tipo no mundo na classe de 145 kV totalmente isolado e refrigerado a óleo isolante vegetal. O equipamento foi devidamente monitorado e mostrou-se capaz de suportar operação em regime nominal e em sobrecarga. O transformador escolhido para protótipo tinha potência inicial de 15 MVA, 138/13,8 kV. Com a repotenciação, a potência nominal subiu para 25MVA. As características proporcionadas pelo emprego das novas tecnologias possibilitaram a operação do equipamento submetido a uma sobrecarga de 37,5MVA durante seis horas e de 42,5MVA por quatro horas consecutivas, sem perda de vida útil. Segundo a empresa, entre as numerosas vantagens obtidas nas condições de operação e manutenção pode-se citar a extensão da vida útil do transformador de 50 para até 400 anos, dado estimado por simulações de envelhecimento acelerado nos laboratórios (CANGUSSU, 2007).

Técnicas de isolamento híbrida (combinação de celulose e materiais isolantes sólidos resistentes a altas temperaturas) em conjunto com refrigeração líquida a óleo vegetal foram estudadas pela CEMIG. Os resultados mostraram que as características singulares do transformador repotenciado com isolamento híbrido e óleo vegetal garantem um enorme

custo/benefício em relação à aquisição de uma nova unidade tradicional. O aumento da vida útil resulta em uma operação prolongada do transformador e elimina os custos de compra de um novo equipamento. Além disso, a possibilidade de sobrecarga, com reserva de potência de até 70%, é extremamente importante e estratégica para suprir demandas em horários de ponta, bem como em situações emergenciais. No decorrer dos estudos de viabilidade econômica que antecederam à revitalização, observou-se que a repotenciação geraria um retorno de investimento consideravelmente maior. O sistema de isolamento e refrigeração líquida foi baseado no óleo isolante vegetal comercial BIOTEMP. O emprego desse óleo foi estendido a todas as partes do transformador: tanque principal, comutador de derivação sob carga e buchas de alta tensão (CANGUSSU, 2007).

2.4.6.1 Guia para Utilização

A norma ABNT NBR 15422 serve como guia para utilização de óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos. Ela 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. Segundo a citada norma, para que um óleo vegetal possa ser usado como isolante elétrico deve conter um conjunto de características específicas dentro dos limites estabelecidos quando ensaiados segundo os métodos indicados por esta. Algumas destas características estão listadas na Tabela 2.3.

TABELA 2.3
Características referenciais para óleo vegetal isolante

Característica	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado
Densidade relativa 20/4°C	-	ABNT NBR 7148	0,96 máximo
Viscosidade	20°C	ABNT NBR 10441	150 máximo
cinemática	40°C		cSt
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	-10 máximo
Rigidez dielétrica	kV	ABNT NBR 6869	30 mínimo
Fator de perdas	90°C	ABNT NBR 12133	3,6 máximo
dielétricas	100°C		%
Enxofre corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo
Teor de água	mg/kg	ABNT NBR 10710	200
Índice de neutralização	mg KOH/g	ABNT NBR 14248	0,06 máximo

Fonte: Adaptado da NBR 15422.

2.5 Caracterizações Físico-químicas

Muitos são os fatores responsáveis pela perda de qualidade de um óleo isolante em serviço. No entanto, todos esses fatores se originam basicamente de dois: dos produtos da degradação da celulose e da própria oxidação do óleo e “stress” térmico, combinado com o “stress” mecânico e o elétrico, provocam a despolimerização da celulose do papel de isolamento, com formação de água e outras substâncias indesejáveis.

A análise das propriedades físico-químicas e dielétricas é importante, pois determina a condição e o estado de envelhecimento do óleo isolante. Quando os valores determinados encontram-se dentro dos limites recomendados (pré-estabelecidos em normas), proporcionam uma indicação de que o óleo isolante está atendendo sua capacidade de isolamento e

refrigeração. Valores fora dos limites pré-estabelecidos indicam necessidade de tratamento. Para a elaboração do diagnóstico a respeito da qualidade do óleo é necessário a verificação de diferentes propriedades através de experimentos.

Os ensaios físico-químicos no óleo isolante têm como premissa a avaliação quantitativa e qualitativa dos produtos de degradação, bem como os processos que aceleram seu envelhecimento (NOGUEIRA, 2004).

As análises físico-químicas permitem realizar medidas preventivas sobre o óleo e o próprio transformador, já que alterações destas características podem indicar tanto o envelhecimento do óleo isolante quanto sua contaminação. O índice de neutralização, teor de água, tensão interfacial, rigidez dielétrica e fator de potência são, dentre outros, ensaios importantes para a verificação do estado de envelhecimento do sistema de isolamento (PAIXÃO, 2006).

2.5.1 Viscosidade

Segundo Moretto & Fett (1998) a viscosidade dos óleos aumenta com o comprimento das cadeias dos ácidos graxos dos triacilglicerídeos e diminui quando aumenta a insaturação. Portanto, é função das dimensões da molécula e de sua orientação, ou seja, aumenta com a hidrogenação.

2.5.2 Teor de Água

A água pode estar presente no óleo devido a falhas de vedação do equipamento e como produto da degradação. Pode ser encontrada tanto emulsificada com o óleo ou no estado livre, tendo sua solubilidade elevada rapidamente com o aumento de temperatura. Principalmente no estado emulsificado, até mesmo em pequenas quantidades, alguns ppm, promove passagem de corrente elétrica através do óleo provocando diminuição da sua rigidez dielétrica, portanto, a redução na capacidade isolante do mesmo e à conseqüente formação de arco voltaico (LUZ JÚNIOR, GUIMARÃES NETO, MOITA NETO, 2005).

Devido à estrutura química, os óleos vegetais têm maior limite saturação do que os óleos minerais. Como o efeito da água depende da umidade relativa do líquido (HEMMER, BADENT & SCHWAB, 2002), uma adequada comparação tem de se referir à umidade relativa.

A equação (1) pode ser usada no cálculo da umidade relativa do óleo (W_{rel}), que corresponde à quantidade de água dissolvida no óleo em relação à capacidade máxima de umidade que o óleo pode suportar. Como esta propriedade é uma função da pressão e, sobretudo da temperatura, a umidade relativa reflete mais do que apenas o teor de água (ZAHN *et al.*, 1999).

$$W_{rel} = \frac{W_{abs}}{W_L(T)} \quad (1)$$

Onde:

W_{abs} é o teor de água absoluto do óleo

$W_L(T)$ é a saturação limite

2.5.3 Índice de Acidez (IA)

Durante a utilização no equipamento, o óleo sofre oxidação e conseqüentemente há formação de ácidos que degradam o papel e corroem as partes metálicas, diminuindo a vida útil do aparelho.

O índice de neutralização é definido como o número de miligrama de KOH (hidróxido de potássio) necessários para neutralizar os ácidos livres presentes em um grama de óleo ou gordura (MORETTO & FETT, 1998).

Nos óleos vegetais a decomposição dos glicerídeos é acelerada por aquecimento e pela luz. A oxidação é quase sempre acompanhada pela formação de ácidos graxos livres; assim a o índice de acidez oferece uma medida indireta do grau de oxidação do óleo (MORETTO & FETT, 1998).

2.5.4 Rigidez Dielétrica

Uma das características mais importantes de um material isolante é a sua resistência à passagem de corrente elétrica, quando ao dielétrico é aplicado uma tensão. A característica de não conduzir corrente, entretanto, tem o seu limite prático, quando um dado valor crítico de tensão é ultrapassado: esse valor de tensão é conhecido como rigidez dielétrica (SCMIDTH, 2002).

A rigidez dielétrica é definida como a tensão na qual ocorre a passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos, sob as condições prescritas pelo teste. De maneira geral, a rigidez dielétrica de um óleo isolante expressa a sua resistência à passagem da corrente elétrica.

O valor da tensão de ruptura é acentuadamente influenciado pela eventual existência de impurezas, que, muitas vezes não podem ser eliminadas. Essas impurezas são, sobretudo, gases, água e pequenas porções de sólidos. Para se ter uma idéia, um óleo mineral com impurezas, apresenta valores de rigidez dielétrica de 30kV/cm ou menor, enquanto que o mesmo óleo limpo e seco atinge até 200kV/cm. Outro fator importante que influi sobre a rigidez do óleo é a temperatura. Cada isolante líquido possui um dado limite de temperatura até o qual pouca influência é notada. No caso do óleo mineral é 80°C. Contendo umidade, o óleo poderá eliminar água por evaporação a 100°C, o que também, evidentemente influi na rigidez dielétrica. A influência negativa da elevação da temperatura sobre propriedades isolantes faz com que aquecimentos que aparecem devido às perdas, reduzam a rigidez dielétrica (SCMIDTH, 2002).

Embora a determinação da rigidez dielétrica não seja um método utilizável para se prever a vida útil do óleo (pelo fato de não ser uma função da composição do óleo), determinações periódicas são importantes para indicar o momento da troca ou a necessidade de regeneração da carga de óleo.

2.5.5 Enxofre Corrosivo

No óleo mineral bruto o enxofre corrosivo pode estar presente na forma elementar ou como compostos termicamente instáveis, podendo causar corrosão a certos metais do

transformador, o cobre, por exemplo. Por outro lado, alguns destes compostos apresentam propriedades benéficas, agindo como inibidores de oxidação.

De acordo com Trindade (2006), o óleo mineral novo pode conter de 0,01 a 0,5% de enxofre, presente na forma de mercaptanos lineares, cíclicas ou aromáticas, sulfetos cíclicos e alifáticos, tiofenos e benzotiofenos dissulfetos, entre outras formas. No Quadro 2.3 encontra-se a ordem de reatividade do enxofre; moléculas menores são mais reativas. Saraiva (2006) expôs que moléculas grandes são potencialmente reativas para o cobre, uma vez que altas temperaturas as convertem em moléculas menores.

Tipo de Composto	Fórmula Química	Reatividade
Enxofre elementar	S	↑
Mercaptanos	R-SH	
Sulfetos	R-S-R	
Dissulfetos	R-S-S-R	
Tiofenos	S em cadeia cíclica	

Quadro 2.3 Escala de reatividade para compostos de enxofre (S)

Fonte: Trindade, 2006.

De maneira simplificada a corrosão por enxofre dos componentes do transformador ocorre seguindo duas etapas: 1) Reação da superfície metálica com compostos de enxofre; 2) Formação de sulfetos de cobre, que têm elevada condutividade e ao dispersar-se sobre o papel isolante reduz sua resistência dielétrica (TRINDADE, 2006).

A corrosividade do óleo é avaliada mediante procedimentos descritos em normas que utilizam como critério de avaliação o aspecto (cor) de uma placa metálica após imersão no óleo sob condições específicas de tempo e temperatura (Figura 2.6):



Figura 2.6 Escala de cores da ASTM D1275

Fonte: Prevost, 2007.

A presença de enxofre corrosivo, embora conhecida desde o início da utilização dos óleos minerais, a partir dos anos 2000 despertou atenção por ter criado problemas consideráveis, como o crescente número de falhas em transformadores e reatores de alta potência. Entre o final de 2004 e o início de 2005, o problema do óleo isolante com enxofre corrosivo foi identificado no Brasil pela primeira vez. Dados levantados por Saraiva (2006) apontaram que no Brasil, ocorreram 19 casos de falhas em transformadores onde a causa mais provável foi o enxofre corrosivo presente no óleo: 18 transformadores de 500 kV e 1 de 230 kV, fato que ocorreu predominante nas regiões Norte e Nordeste devido a elevadas temperaturas ambientais. As falhas ocorreram em equipamentos selados ou imunizados com nitrogênio e temperatura de operação maior que 80°C. A partir desses fatos, tornou-se urgente determinar os mecanismos de falha e desenvolver métodos de diagnóstico e prevenção.

Verificou-se que determinadas marcas de óleo davam origem ao enxofre corrosivo quando submetido a altas temperaturas, associadas à presença do aditivo denominado DBDS (Di-benzil di-sulfeto), o qual é sabidamente danoso para a vida útil de equipamentos elétricos. Não obstante, o óleo isolante teria passado nos testes previstos em normas nacionais e internacionais (NBR 10505 - baseada na norma internacional ASTM D1275), para uso nos referidos equipamentos elétricos. Estes fatos foram expostos em Relatório da Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Eletricidade em meados de 2008. A Superintendência apontou ainda que o volume total de óleo mineral isolante contaminado é de cerca de 20 milhões de litros, distribuídos em 718 equipamentos instalados no Sistema Interligado Nacional, em diversos níveis de tensão, em empresas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Destes, 409 equipamentos com óleo contaminado estão na rede básica, sendo 231 deles no nível de 500 kV. A entidade destacou ainda que atualmente tanto a

metodologia de ensaio de determinação de enxofre corrosivo da ABNT (NBR 10505) quanto a *ASTM D1275* estão sendo revisadas.

A partir da detecção de falhas ocasionadas por corrosão devido ao enxofre, as pesquisas foram intensificadas no desenvolvimento de passivadores que têm a função de prevenir (equipamentos novos) ou interromper (equipamentos em serviço) a deposição de sulfeto de cobre. Após a adição do passivador no óleo, o mesmo tende a migrar para a superfície de cobre dos condutores. Com isso há proteção do cobre em relação à corrosão pelo enxofre (SARAIVA, 2006).

Existem outras técnicas capazes de determinar a presença de enxofre. Os pesquisadores Breitzkreitz e Raimundo Júnior (2002) determinaram enxofre total em óleo diesel utilizando Fluorescência de Raios-X. Ruppel e Hall (2007) relatam que a Fluorescência de UV tem sido usada para a determinação de enxofre, mas a Espectroscopia de Emissão Óptica por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-AES) está rapidamente ganhando terreno como o método analítico por excelência para a determinação de traços de enxofre.

De acordo com NBR 15422 o óleo vegetal isolante deve apresentar comportamento não corrosivo quando testado sob procedimento padrão internacional.

2.5.6 Fator de Perdas ($tg \delta$)

Ao se submeter um fluido isolante a um campo elétrico ele passa por perdas de energia, chamadas dielétricas, devido ao trabalho realizado por um campo externo de certa orientação instantânea, sobre a estrutura do material, com orientação provavelmente diferente. Esse consumo de energia se apresenta na forma de calor (SCHMIDT, 2002).

O ensaio capaz de determinar estas perdas consiste em colocar o líquido dentro de um capacitor, aplicar uma tensão senoidal e identificar a corrente que emerge o aparelho. Um isolante perfeito produz uma corrente defasada de 90° de tensão. Na prática, o isolante perfeito não existe e a defasagem acaba sendo menor, assim tem-se um ângulo de perdas δ (PAIXÃO, 2006).

Além das perdas devidas à circulação de correntes transversais e de consumo de energia no trabalho de polarização, há outros agentes redutores de características isolantes. A umidade, presença de carbono e óxidos entre outros aumentam as perdas dielétricas. Valores

acima do admissível levam a um aquecimento do isolante, podendo atingir sua destruição, uma vez que as propriedades isolantes são praticamente todas afetadas pela elevação de temperatura e cada isolante tem uma temperatura limite acima da qual o material não deve mais ser utilizado (SCHMIDT, 2002).

2.6 Propriedades Térmicas

As propriedades elétricas, mecânicas e físicas do isolante usados em eletricidade dependem acentuadamente da temperatura. Como os dielétricos ficam frequentemente sujeitos, em serviço, a acentuadas variações de temperatura, é imprescindível conhecer os limites térmicos de um material e qual a variação das propriedades em função da temperatura e da sua capacidade de conduzir calor. Justifica-se assim, o interesse em se usar isolamentos capazes de suportar temperaturas cada vez mais elevadas (SCHMIDT, 2002).

A estabilidade térmica de um material é definida como a capacidade de uma substância manter suas propriedades durante o processamento térmico, o mais próximo possível das características iniciais (MONTHÉ & AZEVEDO, 2002).

2.6.1 Termogravimetria (TG)

A análise termogravimétrica baseia-se no estudo da variação de massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação) em função do tempo ou da temperatura (MONTHÉ & AZEVEDO, 2002).

Os principais parâmetros fornecidos pela TG são: temperatura inicial de cada decomposição (T_i), temperatura em que cada decomposição é máxima (T_p) e a temperatura final de decomposição (T_f), além da massa perdida da amostra. A temperatura inicial é aquela na qual a variação de massa acumulada atinge a magnitude que a balança pode detectar. A temperatura final é aquela na qual a variação de massa atinge valor máximo, correspondendo ao término da reação (MONTHÉ & AZEVEDO, 2002).

Já foi enfatizado que a temperatura tem grande influência sobre as propriedades dos isolantes. Uma vez que exposição a altas temperaturas pode alterar suas propriedades, torna-se fundamental o conhecimento o perfil da resistência ou estabilidade térmica dos óleos vegetais. A análise termogravimétrica fornece essa informação.

2.6.2 Estabilidade à Oxidação

A estabilidade térmica e oxidativa é um dos aspectos mais críticos na maioria das aplicações dos óleos isolantes, uma vez que está relacionada com a vida útil do óleo em serviço. A oxidação decorre da exposição do óleo a agentes como calor, oxigênio, metais e umidade. Os produtos provenientes da oxidação possuem um efeito adverso sobre o desempenho do transformador, causando entre outras coisas, aumento da viscosidade e perda da rigidez dielétrica. Uma maneira de se retardar a oxidação é por meio da utilização de aditivos antioxidantes, os quais conferem ao óleo maior estabilidade oxidativa (MELO *et al.*, 2005).

Os níveis de oxidação dependem principalmente das condições de armazenamento, assim como temperatura, presença de luz e da disponibilidade de oxigênio. Sob condições favoráveis, a autooxidação, que constitui-se em um processo químico via radical livre, origina hidroperóxidos em sua fase inicial, estes podem se decompor ou polimerizar, resultando em uma complexa mistura de compostos que possibilitam descrever parcialmente os níveis oxidativos. A oxidação ocorre quando o oxigênio atmosférico ou dissolvido no óleo reage com ácidos graxos insaturados, que são tanto mais reativos quanto maior o número de insaturações em suas cadeias. As reações químicas envolvidas no processo de oxidação de óleos são extremamente complexas. O processo ainda pode ser catalisado por resíduos de metais (ARAÚJO *et al. apud* BRUSCATTO *et al.*, 2007).

A polimerização ocorre quando duas ou mais moléculas de ácidos graxos combinam-se como consequência das alterações do processo de oxidação e altas temperaturas. Os polímeros resultantes promovem aumento na viscosidade do óleo (VERGARA *et al.*, 2006). Óleos que contenham altas proporções de ácidos graxos polinsaturados apresentam problemas de conservação (PACHECO, 2005).

Atualmente, existem vários métodos usados na predição de alterações que ocorrem em óleos sob influência de processos oxidativos. Em geral, para se avaliar a estabilidade oxidativa ou a sua suscetibilidade à oxidação, o óleo é submetido a teste de oxidação acelerada, sob condições padronizadas e um ponto final é escolhido, no qual se observam sinais de deterioração oxidativa. Para se acelerar a oxidação, os testes incluem elevação de temperatura, adição de metais, aumento da pressão e oxigênio, estocagem sob luz e agitação. Em geral, a partir destes ensaios obtém-se o período de indução que é definido como o tempo para se atingir nível de oxidação detectável ou surpreendente mudança na taxa de oxidação. O período de indução também é conhecido como *Oil Stability Index (OSI)*. Este parâmetro é muito utilizado para comparar a resistência à oxidação de diferentes tipos de óleos e para avaliar a eficiência da adição de antioxidantes (ANTONIASSI, 2001).

Alguns dos métodos de avaliação da estabilidade oxidativa monitoram as alterações ocorridas na amostra mediante análises como: índice de peróxidos, análise sensorial, análise de voláteis, entre outras. Os métodos baseados na formação de voláteis, que são medidos por aumento de condutividade elétrica, empregam equipamentos como o Rancimat. Neste aparelho, o fluxo de ar passa através do óleo (mantido sob aquecimento em temperatura que varia de 100 a 140 °C), depois borbulha em água deionizada, arrastando os ácidos carboxílicos voláteis gerados do processo de oxidação, que se solubilizam, aumentando a condutividade elétrica da água. A partir da curva de condutividade elétrica vs tempo constroem-se duas paralelas que se interceptam num ponto que corresponde na escala de tempo ao período de indução. Abaixo deste ponto, praticamente, não existe formação de compostos secundários de oxidação, enquanto que acima do mesmo ocorre rápido aumento da taxa de oxidação (ANTONIASSI, 2001).

Segundo a NBR 15422, os requisitos para estabilidade à oxidação e métodos de ensaios apropriados para o óleo vegetal isolante ainda não foram estabelecidos. Em função disso, a estabilidade à oxidação desse tipo de fluido vem sendo avaliada de acordo com metodologias aplicadas para o óleo mineral isolante. Os testes habituais usados na qualificação da estabilidade oxidativa de fluidos dielétricos são: *ASTM D2440* (semelhante à IEC 74, IEC 474 e IEC 1125) e *ASTM D2112*. Os valores listados na Tabela 2.4 representam os limites das propriedades dos fluidos após o ensaio de oxidação. Estes limites são descritos na norma *ASTM D3487*, que também é específica para fluidos dielétricos oriundos do petróleo (CLAIBORNE, WALSH & OOMMEN, 1999).

TABELA 2.4:
Valores das propriedades após teste de oxidação (óleo mineral)

Teste	% de Borra, máximo		Índice de Acidez em mg KOH/g, máximo	
	* Óleo Não Inibido	**Óleo Inibido	Óleo Não Inibido	Óleo Inibido
ASTM D 2440				
a) Depois de 72 horas	0.15	0.1	0.5	0.3
b) Depois de 164 horas	0.3	0.2	0.6	0.4
ASTM D2112	Período de indução em minutos, mínimo			
	195			

* Sem antioxidante; ** Com antioxidante

Fonte: Claiborne, Walsh & Oommen, 1999.

Claiborne, Walsh & Oommen (1999), concentraram os estudos na variedade de óleo de girassol contendo alto nível de ácido oléico. Segundo esses autores, óleos contendo elevados níveis de oléico (C18:1), apresentam melhor estabilidade oxidativa e um ponto de congelamento relativamente baixo. Óleo de girassol com alto oléico foi obtido como fruto de estudos em reprodução e hibridação de sementes. Ainda de acordo com esses autores, atualmente existe disponível no mercado óleo dessa variedade contendo entre 80 e 90 por cento de oléico.

De acordo com Oommen *et al.* (2000) quando começa oxidação significativa a viscosidade aumenta repentinamente. O tempo para que isso aconteça em minutos não deve ser inferior a 195 minutos (tempo de indução). Estes pesquisadores testaram inibidores de oxidação comumente utilizados para o óleo mineral e óleos comestíveis, como o DBPC (também chamado BHT) e TBHQ. No entanto, estes foram considerados inadequados em proteger o óleo até mesmo em concentrações elevadas como 3%. Para óleo de transformador o nível máximo usado é de cerca de 0,3%, e no óleo comestível, 0,02%. Continuando os estudos Oommen e colaboradores (2000) testaram uma combinação dos antioxidantes, Irganox L57 e Irganox L109 (fabricados pela Ciba Inc.) e atestaram que estes são adequados para a proteção quando se utiliza uma quantidade abaixo de 1%. Percentagens mais elevadas iriam aumentar significativamente a condutividade do óleo. O estudo realizado por Oommen e

colaboradores (2000) faz parte das investigações que resultaram na formulação do fluido isolante vegetal BIOTEMP.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para este trabalho foram selecionadas cinco variedades de óleos vegetais refinados da classe comestível disponíveis no mercado brasileiro. Os óleos de algodão, girassol, milho e soja foram adquiridos no mercado local. O óleo de babaçu foi proveniente do comércio piauiense. No Quadro 3.1 são apresentadas algumas informações adicionais a respeito dos óleos escolhidos. O óleo mineral regenerado foi cedido pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf). Não se obteve informações a respeito das etapas pelas quais o óleo mineral passou durante a regeneração, contudo sabe-se que este processo é uma ação corretiva que se aplica para a retirada de água, compostos ácidos, gases dissolvidos e sedimentos do óleo mineral envelhecido, recompondo as características do óleo e deixando pronto para reutilização nos equipamentos elétricos.

Tipo de Óleo	Marca	Aditivo Antioxidante
Algodão	Caçarola	Não contém
Babaçu	Diamante	Não contém
Girassol	Salada	Ácido cítrico
Milho	Salada	Ácido cítrico
Soja	Soya	Ácido cítrico e TBHQ

Quadro 3.1 Variedades de óleos vegetais selecionadas

As amostras foram preservadas em suas embalagens originais, em local limpo, escuro e isento de poeira e umidade. Quaisquer outros procedimentos relativos ao armazenamento não foram adotados, pois fogem do escopo deste trabalho. Os óleos neutralizados foram caracterizados logo após este procedimento para evitar exposição prolongada ao ambiente.

3.1 Densidade

A determinação da densidade dos óleos a 20°C foi realizada através do método da picnometria. Os experimentos foram realizados em triplicata.

3.2 Viscosidade Cinemática

A viscosidade cinemática dos óleos foi determinada utilizando viscosímetro capilar Cannon-Fenske, com design análogo ao apresentado na Figura 3.1, imerso em banho com temperatura controlada. Esta determinação consistiu em avaliar o tempo que um volume fixo de líquido levou para escoar entre dois pontos fixos do capilar do viscosímetro calibrado, sob ação da gravidade. A viscosidade cinemática nada mais é que o produto desse tempo pela constante de calibração do viscosímetro.

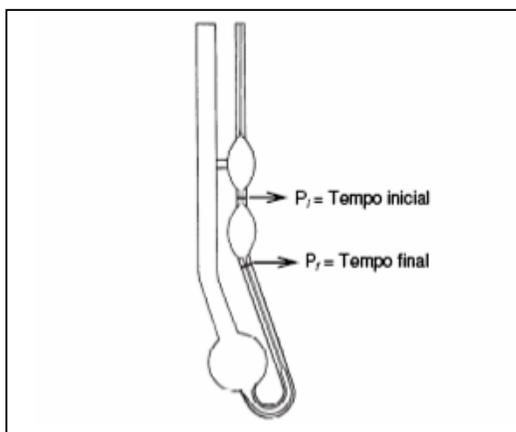


Figura 3.1 Viscosímetro capilar Cannon Fenske

Fonte: Garcia, Camila, 2006.

O ensaio de viscosidade foi realizado nas três temperaturas recomendadas pela NBR 15422 (20, 40 e 100°C). As determinações foram realizadas utilizando viscosímetros específicos para cada temperatura: a 100°C, foi usado o viscosímetro de referência 520 13/150; a 20 e 40°C, o 520 23/300. Após o processo de oxidação também foi efetuada a análise de viscosidade das amostras utilizando o tubo 520 23/300. Para cada amostra foram feitas três leituras de tempo de escoamento. Após isso calculou-se a viscosidade cinemática em cada tempo e determinou-se a média.

3.3 Índice de Acidez

O índice de acidez dos óleos foi determinado adotando a metodologia descrita por Moretto & Fett (1998) que utiliza solução de hidróxido de sódio como titulante.

Pesou-se cerca de 2g de óleo em um erlenmeyer de 125 mL e em seguida adicionou-se 25 mL da solução neutra de éter e álcool etílico na proporção 2:1, respectivamente. Também foram acrescentadas duas gotas da solução alcoólica de fenolftaleína. A solução foi agitada para a dissolução da amostra. Após isso titulou-se com solução de NaOH padronizada, agitando sempre o erlenmeyer até aparecimento da cor rósea por pelo menos 15 segundos. Para todas as amostras realizou-se o ensaio com réplica.

O cálculo do índice de acidez foi realizado de acordo com a seguinte equação (2):

$$\text{Índice de acidez} = \frac{a.f.M.e}{p} \quad (2)$$

Onde:

a → volume em mL da solução de hidróxido de sódio usado na titulação

f → fator de correção da solução de hidróxido de sódio (determinado por padronização da solução)

p → massa em gramas de óleo usada

e → equivalente grama do hidróxido de potássio

M → molaridade da solução titulante

3.4 Neutralização do Óleo Vegetal

Os óleos vegetais objetos deste estudo, apresentaram acidez superior ao limite estabelecido pela NBR 15422. Após esta constatação procedeu-se a neutralização de 1L de cada amostra de óleo vegetal através do tratamento com solução de hidróxido de sódio.

A neutralização dos óleos vegetais foi procedida de acordo com metodologia descrita por Moretto & Fett (1998). De acordo estes autores, as condições da neutralização dependem do percentual de ácidos graxos livres presentes no óleo, sendo assim, fazem recomendações a

respeito dos níveis de concentração de solução alcalina a ser usada durante o processo de neutralização. Tais indicações estão listadas na Tabela 3.1

TABELA 3.1
Parâmetros de neutralização do óleo

% de ácidos graxos livres	Concentração da solução de hidróxido (%)	Temperatura final do óleo (°C)
1-1,5	3-5	90-95
1,5-3	5-10	65-70
3	12-18	50-55

Fonte: Moretto & Fett, 1998.

Antes de realizar a neutralização, foi necessário determinar o percentual de ácidos graxos livres presente em cada variedade de óleo. Esta análise foi realizada de acordo com metodologia descrito por Moretto & Fett (1998). Ao fim do procedimento, verificou-se que os óleos vegetais refinados apresentam percentual de ácidos graxos livres inferior a 1%. Após esta constatação procedeu-se a neutralização seguindo as recomendações descritas na Tabela 3.1.

O óleo foi colocado num becker e aquecido entre 90 e 95°C. Estando o óleo nesta temperatura, adicionou-se a solução quente de 3% de hidróxido de sódio em água, sob agitação. A razão em volume de solução-óleo foi de 1:10. A mistura ficou cerca de 30 minutos sob aquecimento. Passado esse tempo, deixou-se em repouso por cerca de três horas para separação de sabão e borra. Após a retirada da borra em funil de decantação, procedeu-se a lavagem do óleo com água destilada, respeitando um intervalo de aproximadamente 30 minutos entre cada adição de água (Figura 3.2). Para confirmar a remoção de sabão e hidróxidos remanescentes usou-se gotas de fenolftaleína como indicador na fase removida após lavagem. O processo de lavagem foi encerrado quando não mais se visualizou coloração rosa naquela fase. Após neutralização, o óleo foi submetido à secagem em estufa por cerca de 3 horas a 100°C.

Caracterizações físico-químicas e dielétricas foram realizadas, novamente, a fim de verificar se o processo de neutralização modificou as características iniciais dos óleos.

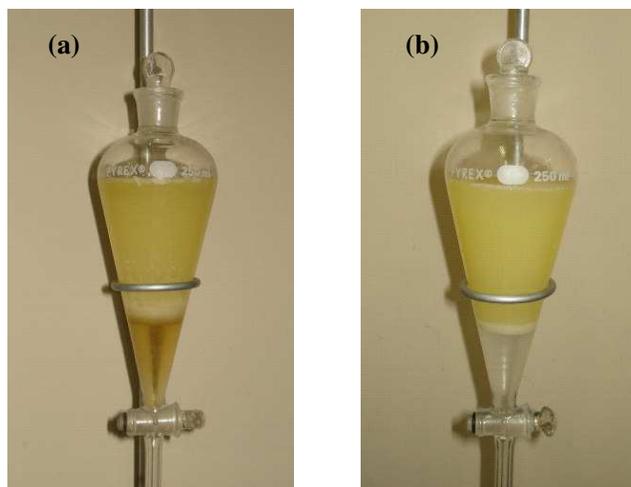


Figura 3.2 Neutralização do óleo de soja: (a) separação da borra e (b) lavagem

Fonte: Arquivo pessoal

3.5 Determinação de Enxofre

O teste de verificação da presença de compostos de enxofre corrosivos foi realizado em triplicata de acordo com o procedimento descrito pela NBR 10505, que especifica um método para determinação qualitativa de composto de enxofre em óleos novo isentos de passivadores.

Para cada ensaio foi colocado 200 mL de óleo em frascos de vidro borossilicato de boca esmerilhada nos quais se depositou uma fita de cobre (25 mm x 6 mm) previamente polida e seca. Em seguida, o nitrogênio foi borbulhado sob o óleo numa vazão de pelo menos 1L/min durante 10 min. Os fracos (Figura 3.3) foram fechados e levados à estufa a 150 °C durante 48 horas. Passado esse tempo, retirou-se os frascos da estufa e removeu-se as fitas de cobre com uma pinça. Cada óleo foi classificado como corrosivo ou não corrosivo quando as três fitas de cobre apresentavam colorações semelhantes, observando a tabela de cores da ASTM D1275.



Figura 3.3 Frascos com óleo para ensaio de enxofre corrosivo

Fonte: Arquivo pessoal

3.6 Teor de Água

O teor de água das amostras foi verificado pelo método de *Karl Fischer*, usando o Titulador *Water Content Measuring Test Equipment Aquameter KFM 3000* da Baur S.A., seguindo critérios recomendados pela NBR 10710. Esta norma recomenda que as análises sejam efetuadas em duplicata e para verificação da repetibilidade deve-se usar o seguinte critério:

“As determinações em duplicata efetuadas por um operador devem ser consideradas suspeitas, com um nível de confiança de 95%, se diferirem por mais de $0,60 \cdot \sqrt{x}$ ppm, onde x é a média das determinações duplicadas” (ABNT NBR 10710).

Neste trabalho para cada amostra de óleo a análise foi repetida por três vezes e ao final fez-se a média das leituras, não deixando de verificar se o critério supra citado era satisfeito.

3.7 Rigidez Dielétrica

Para o teste de rigidez dielétrica a amostra de óleo foi submetido a uma tensão elétrica sob condições prescritas no método de ensaio NBR 6869, exceto pelo fato de que o aumento

da tensão foi 30kV/min (partindo do zero até o valor que produz a ruptura). Segundo esta norma, o aumento da tensão deveria ser 3kV/min, no entanto o equipamento usado, o Fully Automatic Insulating Oil Tester DTA 100 E da Baur S.A., não dispunha desta opção.

Para cada enchimento de célula (Figura 3.4) foram realizados cinco ou dez ensaios consecutivos (dependendo da validade dos resultados), com intervalo de um minuto entre cada ensaio.



Figura 3.4 Célula para ensaio de rigidez dielétrica em óleo

Fonte: Arquivo pessoal

Para validar o ensaio, a norma adverte que se faça uma verificação dos valores obtidos usando um dos critérios de consistência estatística:

“Para que o ensaio seja considerado válido, com um desvio padrão não muito elevado, a diferença entre os valores máximo e mínimo multiplicado por três não deve ser superior ao valor mais próximo do valor mínimo das cinco determinações” (ABNT NBR 6869).

Quando este princípio era satisfeito a rigidez dielétrica da amostra era determinada calculando a média aritmética dos cinco ensaios. Caso contrário, efetuava-se um enchimento adicional e procedia-se mais cinco ensaios. Neste caso, a rigidez dielétrica da amostra era determinada calculando a média aritmética dos dez ensaios obtidos.

3.8 Fator de Perdas

O fator de perdas foi determinado usando o Sistema Automático para a Medida do Fator de Dissipação e Resistividade DTL da Baur S.A.. A norma usada como referência para este ensaio foi a *ASTM D924*, na qual se baseou a ABNT para publicar a NBR 12133.

Após completar a primeira medição a célula foi esvaziada e novamente preenchida com uma segunda alíquota do óleo a ser testado. Para validar o ensaio, a norma NBR 12133 recomenda que seja usado o seguinte critério:

“Se a diferença entre os dois resultados for igual ou menor que $0,0001+10\%$ do mais alto dos dois valores, não é necessário realizar mais ensaios, e o fator de perdas da amostra deve ser considerado como a média dos dois resultados. Caso contrário encher a célula e procede uma terceira medição” (ABNT NBR 12133).

A norma NBR 12133 adverte ainda que se a diferença entre o terceiro e o primeiro ou segundo resultados não se encontrar dentro dos limites acima especificados, deve-se desconsiderar os resultados, limpar a célula e proceder novos testes até que dois resultados de uma mesma amostra se enquadrem dentro dos limites acima previstos.

3.9 Análise Térmica

A decomposição térmica dos seguintes óleos vegetais comerciais foi estudada: babaçu, girassol, milho, soja e algodão. As amostras foram submetidos à Termogravimetria dinâmica em equipamento da *TA Instruments modelo SDT Q600*, a uma razão de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ sob a atmosfera inerte de nitrogênio num fluxo de $100\text{mL}/\text{min}$. O intervalo de temperatura explorado foi de 25 a 600°C . As massas iniciais das amostras de óleo foram: 16,8mg (babaçu); 25,3mg (soja); 24,0mg (milho); 20,1mg (girassol) e 23,8mg (algodão), aproximadamente. Curvas TG bem como suas derivadas termogravimétricas (DTG) foram utilizadas no estudo.

3.10 Estabilidade à Oxidação

Uma vez que um teste de verificação da estabilidade a oxidação para fluidos isolantes elétricos vegetais ainda não foi desenvolvido, o ensaio *ASTM D2440* para óleos minerais foi escolhido. Sendo assim, cada amostra de óleo não neutralizado foi submetida a teste de oxidação acelerada, baseando-se neste teste.

Para evitar interferência da umidade, a corrente de alimentação de ar foi previamente seca ao passar por uma coluna contendo sílica, conforme o diagrama ilustrado na Figura 3.5. Em seguida, o ar (fluxo de 10L/h) foi borbulhado sob 50 mL de amostra de óleo não neutralizado e aquecida a 110°C por um período de 72 horas na presença de um fio de cobre de 30 cm enrolado em formato helicoidal, servindo de catalisador. Transcorridas às 72 horas de reação, uma amostra do óleo foi retirada do sistema e determinou-se o teor de borra e o índice de acidez. Estes são os únicos parâmetros avaliados no ensaio *ASTM D2440*.

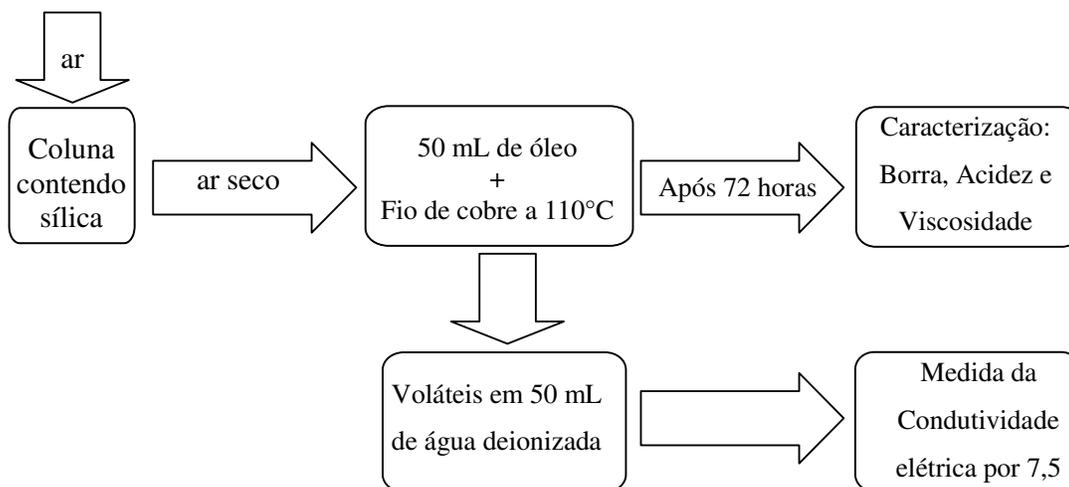


Figura 3.5 Diagrama do processo de envelhecimento acelerado dos óleos

Os efluentes voláteis, arrastando os ácidos carboxílicos voláteis gerados no processo de oxidação, foram coletados em um becker contendo 50 mL de água deionizada e então realizou-se o monitoramento da condutividade da água por cerca de 7,5 horas. Os registros de condutividade em função do tempo foram usados com a finalidade de determinar o período de indução. Este procedimento é descrito no *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*

Lipid Oxidation Stability. Também verificou-se a viscosidade das amostra após o processo de oxidação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aspecto Visual

O primeiro item observado nas amostras de óleos vegetais selecionadas para este estudo foi do aspecto visual. A norma NBR 15422 especifica que o óleo vegetal isolante deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão.

Na Figura 4.1 pode ser observado o aspecto visual das amostras dos óleos vegetais e mineral.

Dos óleos avaliados apenas o de babaçu apresentou caráter questionável no quesito aspecto visual, para a utilização do mesmo como fluido isolante de equipamentos elétricos, quando comparados aos demais, na temperatura ambiente de 25°C. Nessa temperatura, o óleo de babaçu apresenta-se pastoso e opaco, como pode ser visualizado na Figura 4.1(a). Isso se deve a elevada percentagem de triacilglicerídeos saturados presentes na composição deste óleo. Para melhor visualização, uma alíquota do óleo de babaçu foi aquecida a 40°C. Após o aquecimento, pôde-se verificar que este óleo, assim como os demais, apresentou aspecto claro, límpido e isento de materiais em suspensão. A observação do aspecto visual do óleo é um item bastante relevante para a utilização deste com fins de isolamento elétrico. A presença de materiais em suspensão, por exemplo, tem consequência direta nas características térmicas e dielétricas do sistema de isolamento.

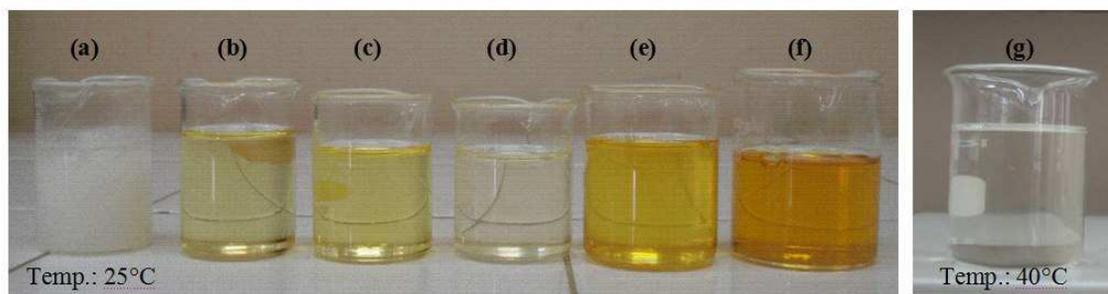


Figura 4.1 Aspecto visual dos óleos: (a e g) babaçu, (b) soja, (c) milho, (d) girassol, (e) algodão e (f) mineral

4.2 Índice de Acidez

Os óleos vegetais comestíveis apresentaram acidez superior ao limite estabelecido pela NBR 15422, que é 0,06 mgKOH/g. Em função disto, foram realizados experimentos de neutralização dos óleos para deixá-los no nível de acidez recomendado. Os índices de acidez dos óleos antes e após a neutralização (caracterizados por N) podem ser examinados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1:
Índices de acidez dos óleos antes e após neutralização (N)

Tipo de Óleo	Índice de acidez (mg KOH/g)
Valor Limite NBR 15422	0,06
Algodão	0,14±0,00
Algodão (N)	0,05±0,00
Babaçu	0,27±0,01
Babaçu (N)	0,04±0,00
Girassol	0,14±0,00
Girassol (N)	0,04±0,00
Milho	0,22±0,00
Milho (N)	0,03±0,00
Soja	0,20±0,01
Soja (N)	0,03±0,00

4.3 Densidade e Viscosidade

Os resultados das análises de densidade e viscosidade dos óleos estão listados na Tabela 4.2. Não foi possível determinar estas propriedades à temperatura de 20°C para o óleo de babaçu em virtude do caráter pastoso das amostras impossibilitar a aplicação das metodologias selecionadas.

TABELA 4.2
Propriedades físico-químicas dos óleos

Tipo de Óleo	*Densidade	Viscosidade (cSt)		
	Relativa	T=20°C	T=40°C	T=100°C
Valor Limite NBR 15442	0,96 máximo	150 máximo	50 máximo	15 máximo
Algodão	0,9228±0,02	73,26±0,48	35,21±0,01	8,63±0,02
Algodão (N)	0,9207±0,00	66,81±0,09	33,98±0,09	8,04±0,00
Babaçu	-	-	29,36±0,01	6,68±0,00
Babaçu (N)	-	-	27,51±0,04	6,50±0,02
Girassol	0,9249±0,03	65,74±0,23	32,60±0,01	8,38±0,00
Girassol (N)	0,9249±0,00	70,16±0,13	32,15±0,09	8,14±0,00
Milho	0,9228±0,00	70,82±0,22	34,90±0,01	8,39±0,05
Milho (N)	0,9221±0,00	74,95±0,13	34,80±0,06	8,35±0,05
Soja	0,9202±0,03	66,67±0,29	32,18±0,01	8,21±0,00
Soja (N)	0,9239±0,00	67,99±0,27	31,60±0,00	8,27±0,02
Mineral	0,8797±0,01	20,9±0,00	9,35±0,01	2,74±0,00

* densidade óleo a 20°C em relação à água pura a 4°C

Mediante análise dos resultados apresentados na Tabela 4.2 verifica-se que as viscosidades dos óleos vegetais são, mais que três vezes, superiores àquelas apresentadas pelo óleo mineral. As densidades também são superiores a do óleo mineral. Estas duas propriedades são muito importantes do ponto de vista da transferência de calor; seja por convecção natural em pequenos transformadores ou por convecção forçada em unidades maiores que dispõem de sistema de bombeamento de óleo. Valores de densidade e viscosidade altos podem inibir a capacidade de dissipação de calor levando o equipamento a sobrecargas de temperatura.

Em função das densidades e viscosidades superiores àquelas apresentadas pelo óleo mineral, o uso de óleos vegetais como isolante para equipamentos elétricos pode requerer mudanças no design e no sistema de bombeamento do fluido. É fato que, quanto maior a densidade do óleo, maior será a massa necessária para o preenchimento do equipamento e, além disso, menor a eficiência no arrefecimento em comparação com óleo mineral.

Amanullah e colaboradores (2005) também caracterizaram algumas variedades de óleos vegetais e fizeram uma análise comparativa de propriedades térmicas, físico-químicas e elétricas com relação a um óleo mineral. Estes pesquisadores constataram que óleos vegetais têm viscosidades semelhantes a do óleo de silicone e muito inferior ao do fluido *HMWH* (*High Molecular Weight Hydrocarbons*). Diante desta constatação eles defenderam que óleos vegetais podem ser facilmente utilizados sem redução da viscosidade. Todavia, destacam que é possível modificar a viscosidade dos óleos vegetais, a níveis desejados, mediante a adição de fluidos adequados (não informados). Neste sentido, Fofana, *et al.*, (2002) estudaram a mistura de óleo vegetal com mineral em diferentes proporções e observaram que propriedades físico-químicas e dielétricas da mistura dos líquidos são semelhantes àquelas apresentadas pelo fluido convencional de transformador, particularmente para misturas abaixo de 20% do óleo vegetal.

A alta viscosidade do óleo vegetal pode ser uma questão crítica para o funcionamento seguro de transformadores, especialmente em regiões de clima frio. Nesse contexto, seria prudente restringir o uso do óleo de babaçu como fluido isolante a locais onde a temperatura ambiente se mantenha acima dos 25°C para evitar pontos frios e conseqüentemente má circulação do fluido no equipamento, visto que este óleo possui limitação em seu grau de circulação mesmo nesta temperatura. Entretanto, uma alternativa é investir na melhoria do ponto de fluidez do óleo através de técnicas adequadas.

Comparando os resultados de densidade e viscosidade presentes na Tabela 4.2 com aqueles apresentados na Tabela 2.2 (seção 2.4.6) verifica-se que os óleos vegetais comestíveis de soja, algodão, babaçu, girassol e milho possuem propriedades semelhantes àquelas dos fluidos vegetais isolantes comerciais Envirotemp FR3 e BIOTEMP. Este resultado era esperado, afinal os fluidos comerciais são formulados a base de óleos vegetais.

Nas Figuras 4.2 e 4.3 os valores médios das análises físico-químicas apresentados na Tabela 4.2 são comparados aos limites estabelecidos pela NBR 15422. Verifica-se que os óleos vegetais apresentaram densidade e viscosidade dentro dos limites estabelecidos.

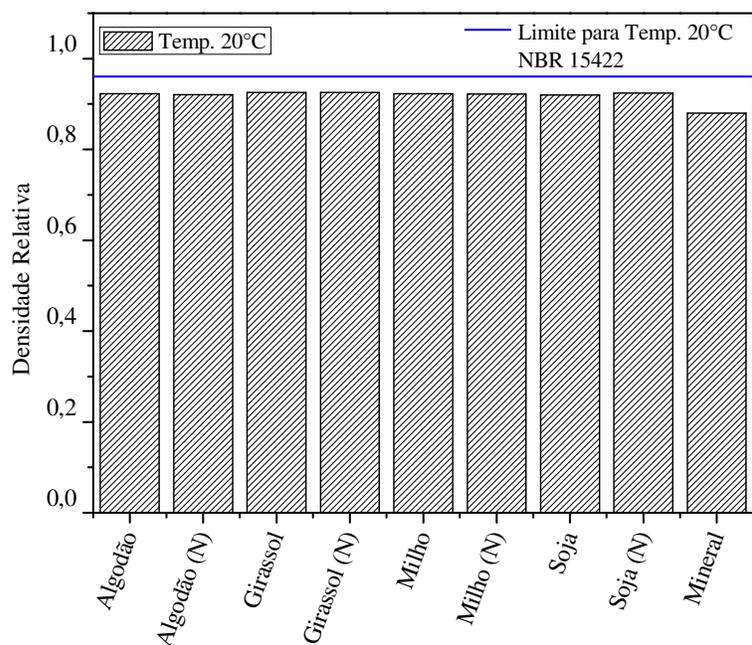


Figura 4.2 Densidades relativas dos óleos comparadas aos limites estabelecidos pela NBR 15422

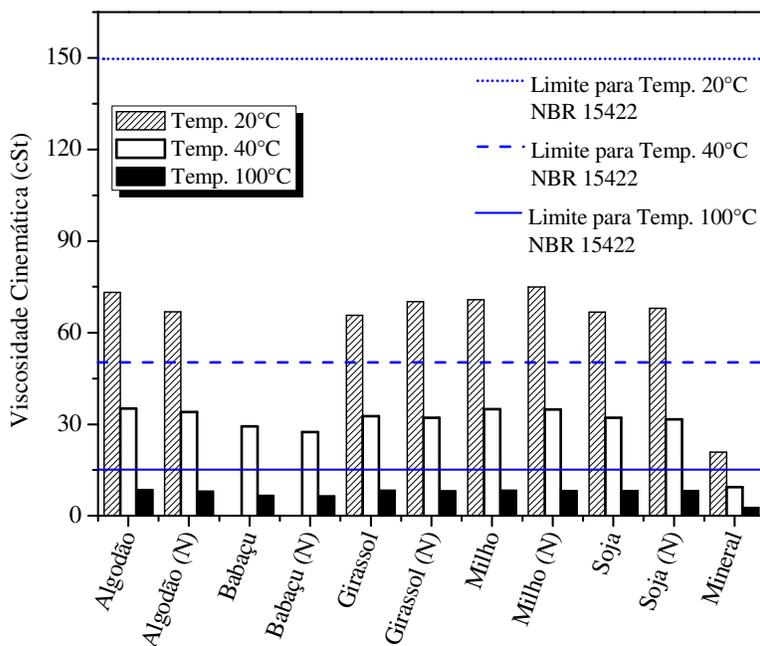


Figura 4.3 Viscosidade dos óleos a 20, 40 e 100°C comparadas aos limites estabelecidos pela NBR 15422

4.4 Determinação de Enxofre

Após o teste que avaliou a presença de enxofre corrosivo, foi verificado que não ocorreu mudança na coloração dos óleos, indicando que não houve oxidação durante o ensaio. A classificação das fitas de cobre foi feita de acordo com a tabela de cores da *ASTM D1275*.

Os óleos vegetais testados foram classificados como não corrosivos. Na Figura 4.4 pode-se verificar que as fitas de cobre apresentaram coloração dourada. Já o óleo mineral regenerado apresentou comportamento corrosivo.

De modo geral, os óleos minerais novos apresentam comportamento não corrosivo quando testado sob as condições deste ensaio. Considerando tal característica, podemos supor que o óleo mineral testado adquiriu comportamento corrosivo após desgaste durante serviço.



Figura 4.4 Fitas de cobre após ensaio de enxofre

Resultados desta análise devem ser avaliados com cautela, pois, como citado no levantamento bibliográfico, diversos transformadores no país apresentaram falhas, supostamente devidas enxofre corrosivo, mesmo tendo passado em testes dessa natureza.

Este ensaio é qualitativo e não deve ser considerado conclusivo para a presença ou não de compostos de enxofre. É interessante aliar este resultado a outras técnicas, como por exemplo, a Fluorescência de Raios-X para uma maior confiabilidade.

4.5 Características Dielétricas e Teor de Água dos Óleos

Na Tabela 4.3 foram listados os resultados de teor de água, umidade relativa, rigidez dielétrica e fator de perdas para os óleos originais e neutralizados. Não foi possível averiguar a umidade dos óleos neutralizados devido a avarias no equipamento.

TABELA 4.3
Características dielétricas e teor de água dos óleos

Óleo	Teor de água (ppm)	*Umidade Relativa (%)	Rigidez Dielétrica (kV)	Fator de Perdas a 100°C (%)
Valor Limite NBR 15442	200	-	30 mínimo	4,0 máximo
Algodão	843±8	84,3±0,8	19,03±4,82	3,10±0,09
Algodão(N)	-	-	19,54±1,67	3,07±0,04
Babaçu	961±3	96,1±0,3	15,00±4,10	4,12±0,09
Babaçu (N)	-	-	27,14±2,30	3,29±0,22
Girassol	856±6	85,6±0,6	17,43±4,38	3,88±0,26
Girassol (N)	-	-	23,42±4,78	3,70±0,05
Milho	864±2	86,4±0,2	16,96±2,06	2,42±0,01
Milho (N)	-	-	49,27±2,83	1,90±0,03
Soja	849±2	84,9±0,2	21,14±2,10	5,23±0,21
Soja (N)	-	-	25,34±2,28	2,63±0,05
Mineral	50±3	90,9±0,3	12,06±1,18	3,13±0,16

* Cálculo de acordo com a equação (1), seção 2.5.2, considerando a saturação limite dos óleos mineral e vegetal como sendo iguais a 55 e 1000 ppm, respectivamente.

As amostras de óleos vegetais apresentaram teor de água absoluto entre 800 e 1000 ppm, por outro lado o óleo mineral apresentou, cerca de 50 ppm. Diversos autores (FOFANA, *et al.*, 2002; AMANULLAH *et al.*; 2005) tem reportado resultados semelhantes.

As cinco espécies de óleos vegetais não neutralizados apresentaram baixa rigidez dielétrica, não satisfazendo ao mínimo aceitável especificado na NBR 15422 para sistemas de isolamento elétrico, que é 30kV. Este fato pode estar relacionado ao elevado teor de água,

para níveis de isolamento elétrica, apresentados pelos óleos. O máximo teor de água recomendado pela norma acima citada é 200 ppm.

Santos, Nogawa & Mendes (2007) estudaram o comportamento de um fluido isolante vegetal comercial formulado à base de óleo de girassol e verificaram que a rigidez dielétrica se mantém acima de 30 kV para concentrações de água abaixo de 500 ppm.

Para melhor correlacionar o teor de água com as propriedades dielétricas dos óleos mineral e vegetais as umidades absolutas foram convertidas a relativas. Os resultados se encontram na Tabela 4.3.

Na Tabela 4.3, verifica-se que óleos vegetais e mineral apresentaram umidades absolutas bem distintas, entretanto, as umidades relativas são semelhantes. Observa-se que o óleo de babaçu apresentou a maior umidade relativa dentre os óleos avaliados e também a menor rigidez dielétrica. Os óleos de algodão e soja apresentaram as menores umidades relativas e, também, as os melhores valores de rigidez dielétrica.

O óleo mineral também apresentou baixa rigidez dielétrica. Como se trata de um óleo usado, essa característica pode estar relacionada tanto à umidade relativa alta, quanto à produtos da deterioração gerados durante serviço.

A presença de umidade é um aspecto que merece atenção, pois acelera a reação com a celulose do papel isolante, conduzindo-o à degradação. Além disso, também ocorrerá diminuição da eficiência impregnação do óleo no papel isolante, levando a uma diminuição do ciclo de vida do sistema de isolamento. Dessa forma, o teor de água apresentado pelos óleos vegetais comestíveis é um parâmetro que precisa ser melhorado para o funcionamento seguro do equipamento que utilize líquido dielétrico à base de óleo vegetal.

Realizou-se a secagem de óleo de girassol utilizando estufa a vácuo (100 mmHg) a 60 e 80°C durante seis horas, entretanto constatou-se que estas condições não foram eficientes para remoção de umidade a um nível exigido para uso do óleo como isolante elétrico. Como resultado obteve-se um óleo com cerca de 700 ppm de água. Também foi feita a secagem em estufa convencional a 100°C durante seis horas, entretanto, essas condições induziram ao primeiro sinal de oxidação do óleo, o cheiro de ranço. Dessa forma é preciso investir em métodos alternativos que diminuam o teor de água sem comprometer outras propriedades do óleo. Neste sentido, Amanullah *et al.* (2005) estudaram a redução do nível de umidade de óleo vegetal utilizando uma peneira molecular (não mencionada) como adsorvente. Após o tratamento o óleo apresentou teor de umidade pouco acima de 50 ppm, atestando a eficácia da peneira molecular na redução do teor de umidade.

O fator de perdas máximo especificado pela NBR 15422 nas condições ensaiadas é 4,0%. Como pode ser visto na Tabela 4.3, os óleos de soja e babaçu comerciais não atenderam este requisito, indicando a presença de umidade e outros produtos de deterioração do óleo.

Os valores médios de rigidez dielétrica e fator de perdas foram usados para construir os gráficos apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6.

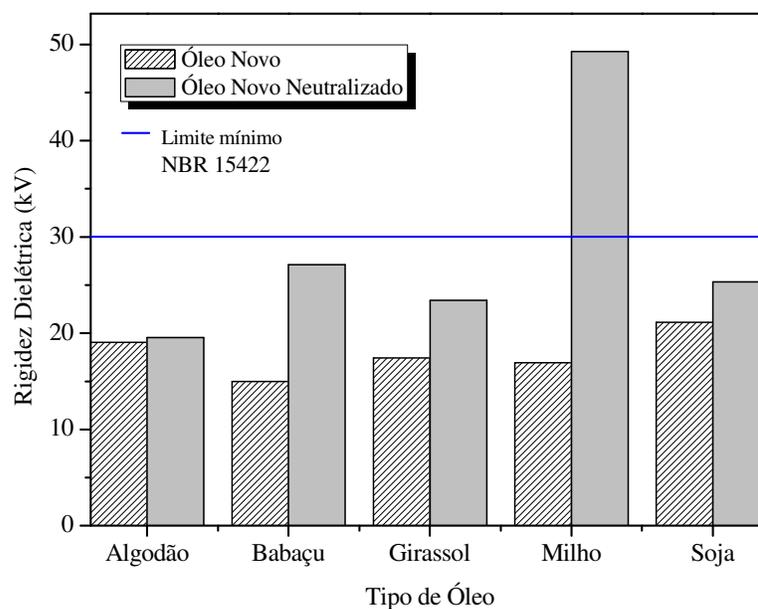


Figura 4.5 Rigidez dielétrica dos óleos vegetais antes e após neutralização

Na Figura 4.5 verifica-se que após a neutralização os óleos apresentaram melhoria na rigidez dielétrica, com destaque para o óleo de milho que apresentou rigidez dielétrica superior a 40kV, demais óleos não apresentaram a rigidez dielétrica mínima recomendada pela NBR 15422.

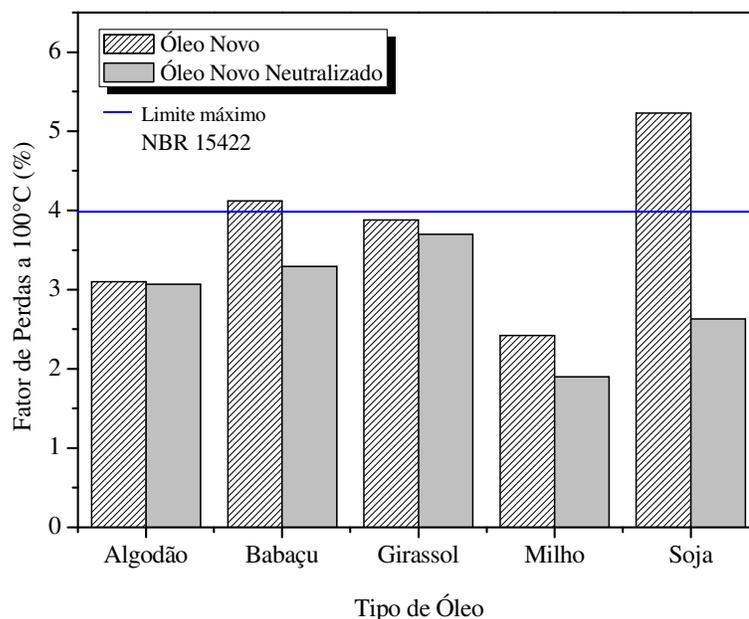


Figura 4.6 Fator de perdas dos óleos vegetais antes e após neutralização

O processo de neutralização também favoreceu a diminuição das perdas dielétricas, o que pode ser constatado na Tabela 4.3 e Figura 4.6. A melhoria nas propriedades dielétricas pode estar relacionada à remoção de partículas condutoras durante a neutralização. Neste sentido, Oommen, *et al.*, (2000) constataram que mesmo o óleo sendo comestível, conduz impurezas acima dos limites aceitáveis para uso em transformador. E então realizaram uma purificação adicional ao passar o óleos por um adsorvente (argila neutra) até atingir condutividade elétrica inferior a 1 pS/m.

4.6 Estabilidade Térmica dos Óleos

A estabilidade térmica dos óleos vegetais refinados foi examinada por Termogravimetria (TG) dinâmica em atmosfera de nitrogênio. A opção por usar nitrogênio como gás de purga justifica-se pelo fato de os transformadores elétricos serem sistemas selados, havendo uma quantidade mínima de oxigênio em contato com o óleo isolante. Para

uma melhor visualização dos estágios de decomposição, foi feita a derivada da curva termogravimétrica (DTG). Curvas TG/DTG dos óleos podem ser visualizadas na Figura 4.7.

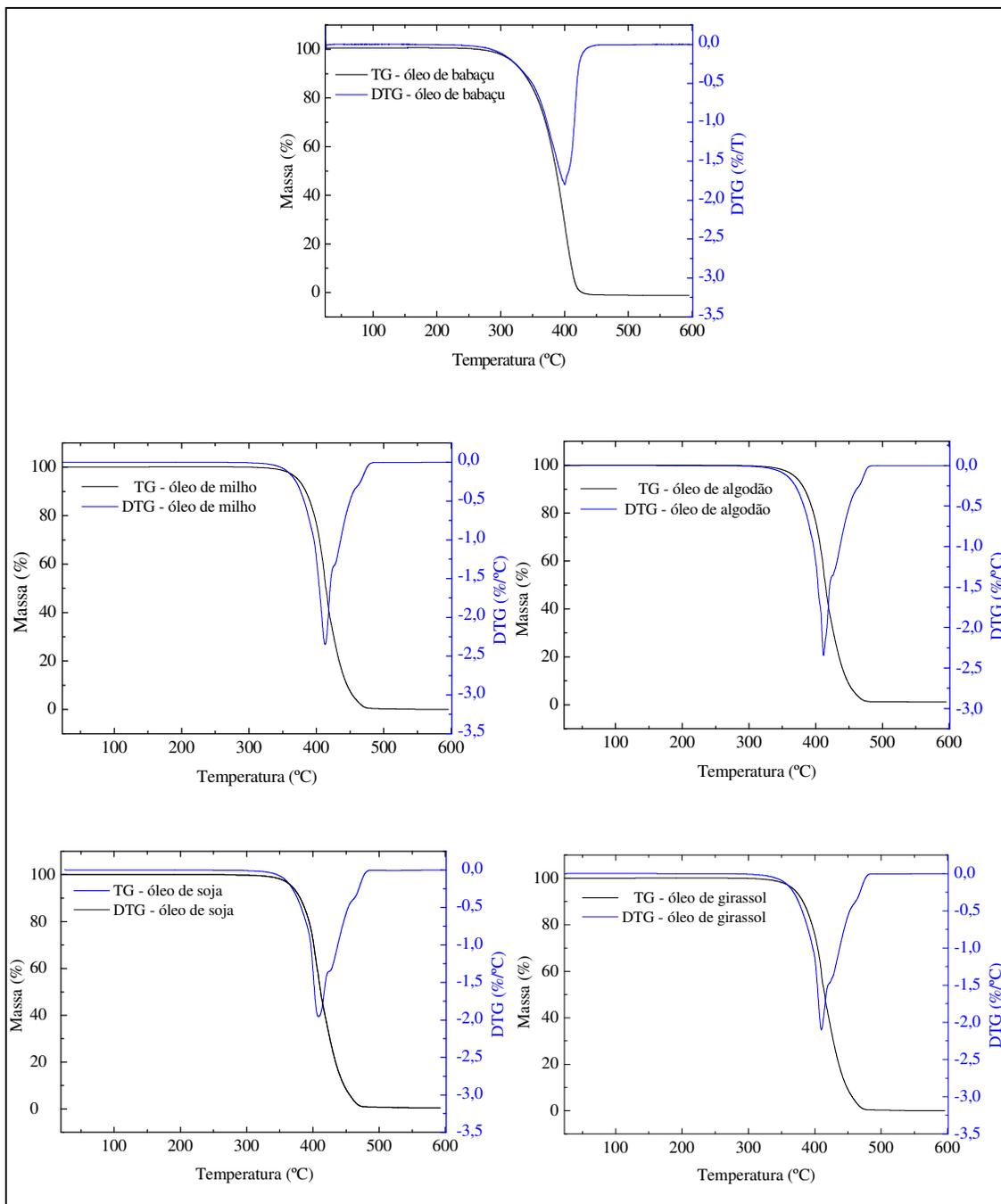


Figura 4.7 Curvas TG/DTG para amostras de óleos vegetais em atmosfera de nitrogênio

A estabilidade térmica dos óleos foi definida através da faixa de temperatura em que a massa permaneceu inalterada durante a Análise Termogravimétrica. Assim, a partir da Figura 4.7 é possível verificar que os óleos avaliados apresentaram início da decomposição acima de 200°C, com destaque para o óleo de milho cujo início se deu próximo aos 300°C.

As curvas DTG das cinco espécies de óleo evidenciaram uma única etapa de perda de massa. A perda total de massa do óleo de babaçu, referente à volatilização e decomposição dos componentes do óleo, ocorreu entre 266 e 446°C. Comportamento semelhante foi observado por Faria *et al.* (2002). De acordo com GARCIA, *et al.* (2004), o óleo de babaçu apresenta um maior teor de triacilglicerídeos contendo ácidos graxos com menor comprimento de cadeia com 16 átomos de carbono e, por isso, sua volatilização se inicia e termina em temperaturas inferiores. Essa justificativa pode ser estendida para o óleo de algodão que de acordo com a Figura 4.7, apresentou perda total de massa entre as temperaturas de 225°C e 480°C.

A partir das curvas TG/DTG ilustradas na Figura 4.7 foi possível determinar as temperaturas inicial, final e de máxima decomposição dos óleos. Estes resultados foram usados para compor a Figura 4.8.

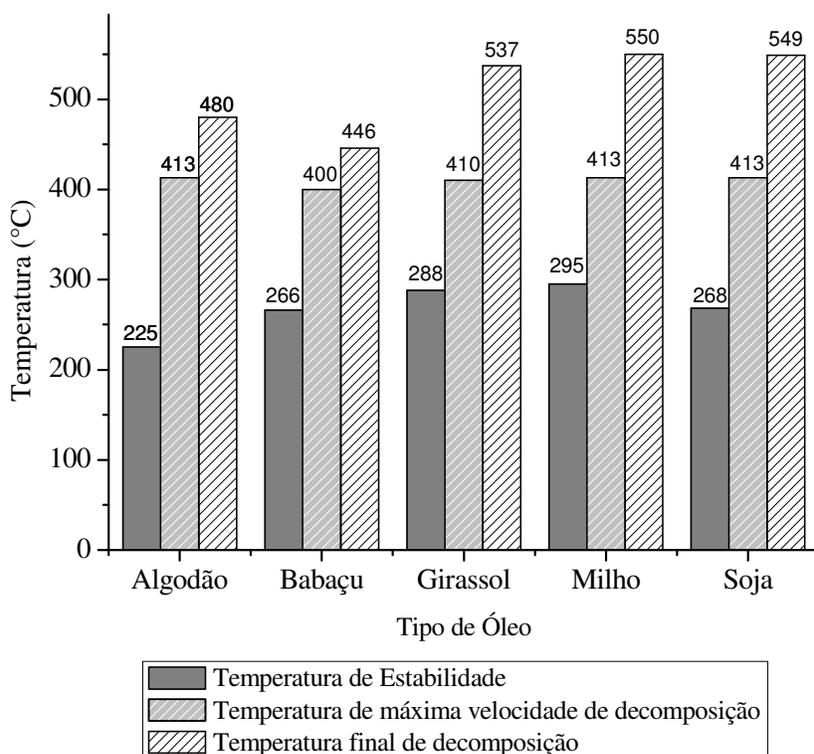


Figura 4.8 Parâmetros obtidos da Termogravimetria de óleos em atmosfera de nitrogênio

Segundo Garcia *et al.* (2004) é possível correlacionar as temperaturas inicial e final de decomposição e/ou volatilização obtidos por TG com o tamanho e o grau de instauração dos triacilglicerídeos presentes nessas amostras. Podendo, assim, sugerir de maneira relativa, o comprimento da cadeia do triacilglicerídeo presente num determinado óleo em comparação a outro. Nesse sentido, estima-se que o óleo de milho, por apresentar maior temperatura de estabilidade térmica, deve apresentar menor teor de triacilglicerídeos de cadeia curta e maior teor de triacilglicerídeos de cadeia longa.

A partir das temperaturas iniciais de decomposição ilustradas na Figura 4.8 é possível elencar a seguinte ordem de estabilidade térmica: milho > girassol > soja > babaçu > algodão.

Diante do exposto podemos pressupor que os óleos vegetais testados apresentam estabilidade térmica adequada para uso em transformadores elétricos. Já que o óleo mineral, tradicionalmente usado tem limite de temperatura operacional de 115°C.

4.7 Estabilidade à Oxidação

Ensaio de envelhecimento acelerado a 110°C foram efetuados com o objetivo de averiguar a estabilidade oxidativa das espécies de óleos selecionadas. É importante observar que os testes realizados não configuram o processo real de oxidação do óleo isolante no transformador, uma vez que no sistema real o oxigênio deve aparecer em proporção mínima proveniente do “respirador” do transformador e como produto da degradação do sistema de isolamento papel-óleo. Contudo, vazamentos e operações periódicas de manutenção podem expor o óleo a contato direto com o ar atmosférico, como consequência o óleo pode degradar.

As caracterizações realizadas após os ensaios de envelhecimento sob condições aceleradas servem como indicativo da tendência à oxidação mais rápida ou mais lenta de cada espécie de óleo.

Na Figura 4.9 é apresentado o aspecto visual das espécies de óleos não neutralizados antes e após envelhecimento em fluxo de ar a 110°C e adição de fio de cobre por 72 horas.

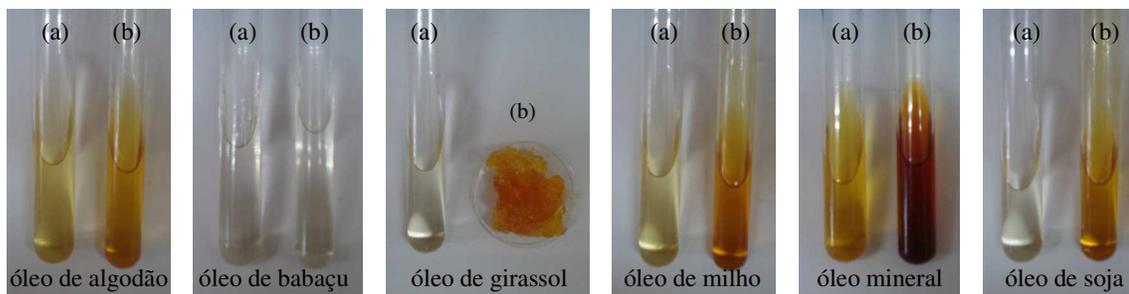


Figura 4.9 Aspecto visual dos óleos (a) antes e (b) após o envelhecimento acelerado

Quatro das cinco espécies de óleo submetidas ao aquecimento contínuo em fluxo de ar sofrem alteração na sua coloração original, escureceram ligeiramente enquanto o óleo mineral alterou sua coloração para marrom-avermelhada, quase preto. Exceção fica por parte do óleo de babaçu que manteve sua coloração inicial. O escurecimento de óleos vegetais durante envelhecimento também foi verificado por diversos autores (HOSIER, VAUGHAN & SWINGLER, 2008; FOFANA *et al.* 2002; FERGUSON, LOBEIRAS & SABAU, 2002). Outro fato que também chamou atenção foi o aspecto apresentado pelo óleo de girassol envelhecido: a oxidação promoveu a polimerização da amostra resultando na formação uma espécie de gel extremamente plástico. Teoricamente, o óleo de girassol possui um alto teor de ácido linoléico, fato que o torna mais susceptível à oxidação em relação aos outros óleos.

Durante a oxidação os óleos vegetais não produziram borra, ao contrário do óleo mineral, que produziu um precipitado marrom escuro, quase preto. Na Figura 4.10 pode-se visualizar o sedimento separado do óleo mineral. Este resultado está de acordo com o reportado por Oommen, Claiborne & Walsh (1998). Nesse aspecto o óleo vegetal apresenta vantagem em relação ao mineral, pois a borra pode se depositar sobre a parte ativa ou nos trocadores de calor do transformador dificultando a transferência de calor para o meio ambiente, conduzindo a sobreaquecimento e, como consequência, à redução de vida útil do equipamento.



Figura 4.10 Precipitado gerado durante oxidação do óleo mineral a 110°C

Os resultados das análises de viscosidade e índice de acidez das amostras envelhecidas por 72 horas em fluxo de ar podem ser visualizados na Tabela 4.4. Não foi possível averiguar estas propriedades para óleo de girassol, pois como mostrado anteriormente, ocorreu a polimerização da amostra, resultando na formação de um gel, fato que impediu o emprego das metodologias selecionadas para as determinações.

TABELA 4.4:

Propriedades dos óleos não neutralizados após envelhecimento acelerado por 72 horas a 110°C

Tipo de Óleo	Índice de acidez (mgKOH/g)	Viscosidade a 100°C (cSt)
Algodão	2,52±0,02	96,43±0,00
Babaçu	17,50±0,06	9,13±0,02
Girassol	–	–
Milho	2,22±0,09	149,36±0,58
Soja	4,46±0,11	184,90±1,19
Mineral	2,03±0,01	2,74±0,00

O processo de oxidação dos óleos produziu uma expressiva quantidade de produtos ácidos, caracterizada pelo elevado índice de acidez (IA). Os valores dos índices de acidez mostrados na Tabela 4.5 excedem os limites especificados pela ASTM D3487, 0,3 mgKOH/g para o óleo inibido e 0,5 mgKOH/g para o óleo não inibido.

Os valores médios dos índices de acidez apresentados por cada espécie antes e após o envelhecimento foram bastante distintos. Uma comparação pode ser feita mediante análise da Figura 4.11.

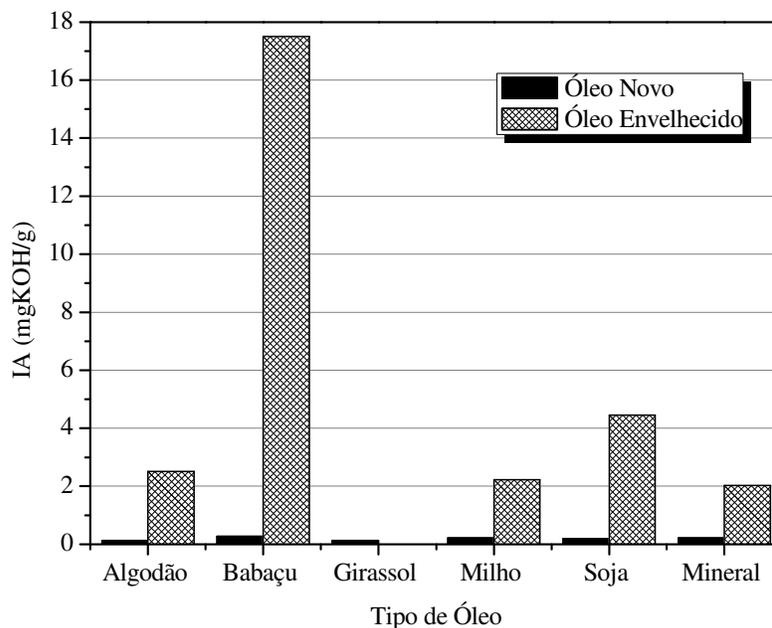


Figura 4.11 Efeito do envelhecimento sob fluxo de ar a 110°C por 72 horas sobre o índice de acidez dos óleos

Analisando os valores médios dos índices de acidez verifica-se que o óleo de babaçu apresentou aumento de 65 vezes, seguido pelos óleos de soja (22 vezes), algodão (18 vezes), milho (10 vezes) e mineral (9 vezes). É fato que os óleos vegetais foram mais afetados que o mineral durante a oxidação, apesar de este último ser um óleo regenerado. Tal comportamento pode ter justificativas nas diferenças de composição química e antioxidantes de cada espécie.

Os valores médios da viscosidade dos óleos novos (não neutralizados) e envelhecidos foram usados para construir o gráfico apresentado na Figura 4.12 e, além disso, para examinar em que proporção ocorreu o aumento de viscosidade após envelhecimento. Fazendo os cálculos verifica-se que a viscosidade do óleo de soja aumenta mais que 22 vezes, seguido pelos óleos de milho (mais que 17 vezes), algodão (mais que 11 vezes) e babaçu (não chega a duplicar). Óleo mineral não apresentou alteração na viscosidade após 72 horas de envelhecimento acelerado.

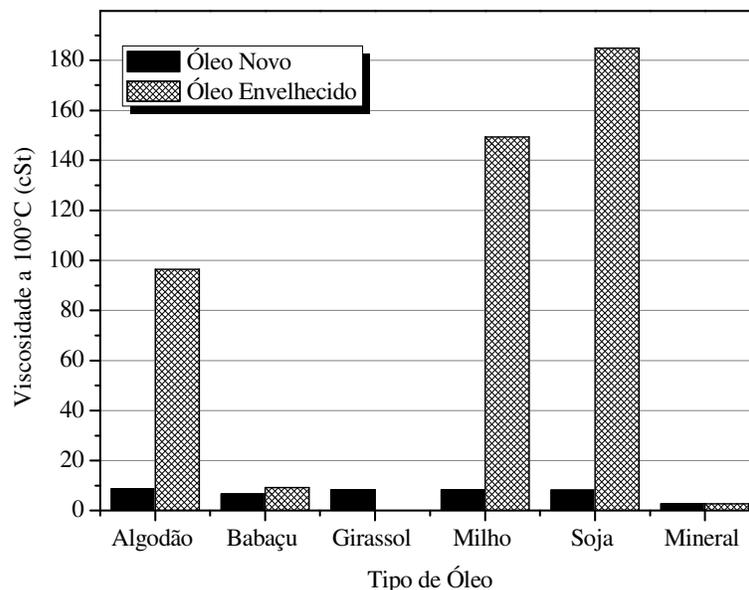


Figura 4.12 Efeito do envelhecimento sob fluxo de ar a 110°C por 72 horas sobre a viscosidade dos óleos

Mendes (2008) menciona que testes de estabilidade à oxidação realizados com o isolante vegetal BIOTEMP demonstraram que este fluido permanece líquido após 72 e 164 horas sob as condições do teste *ASTM D2440*. Embora os valores de índice de acidez em alguns casos excedem as especificações máximas estabelecidas para o óleo mineral. Porém os resultados do teste de vida útil demonstram que isto não prejudica a operação do transformador.

De acordo com Oommen (2002) o fluido Envirottemp FR3 não passa no teste de oxidação *ASTM D2440* por causa de seu menor conteúdo de monoinsaturados em comparação ao BIOTEMP, sob as condições do ensaio ocorre formação de um gel. Comportamento semelhante foi verificado para o óleo de girassol avaliado neste estudo.

Ao relacionar os resultados de acidez com os de viscosidade após o processo de envelhecimento, verifica-se que não há uma correlação direta entre estas duas propriedades. Como exemplo, os resultados das análises do óleo de babaçu envelhecido chamaram bastante atenção: viscosidade semelhante ao óleo novo e coloração idêntica a inicial. Por outro lado, o mesmo óleo apresentou o mais elevado índice de acidez dentre os avaliados. Teoricamente, o óleo de babaçu é composto principalmente por triacilglicerídeos contendo ácidos graxos saturados, fato que o torna mais resistente à oxidação. Pode-se supor que a elevada acidez apresentada após envelhecimento acelerado deve-se a outros tipos de reação, a hidrólise por

exemplo. Neste sentido faz-se necessário dispor de outras análises que complementem estes resultados, particularmente no que diz respeito à avaliação da estabilidade oxidativa de cada espécie.

Para a medida da estabilidade oxidativa foram plotadas as curvas de condutividade elétrica x tempo apresentadas na Figura 4.13.

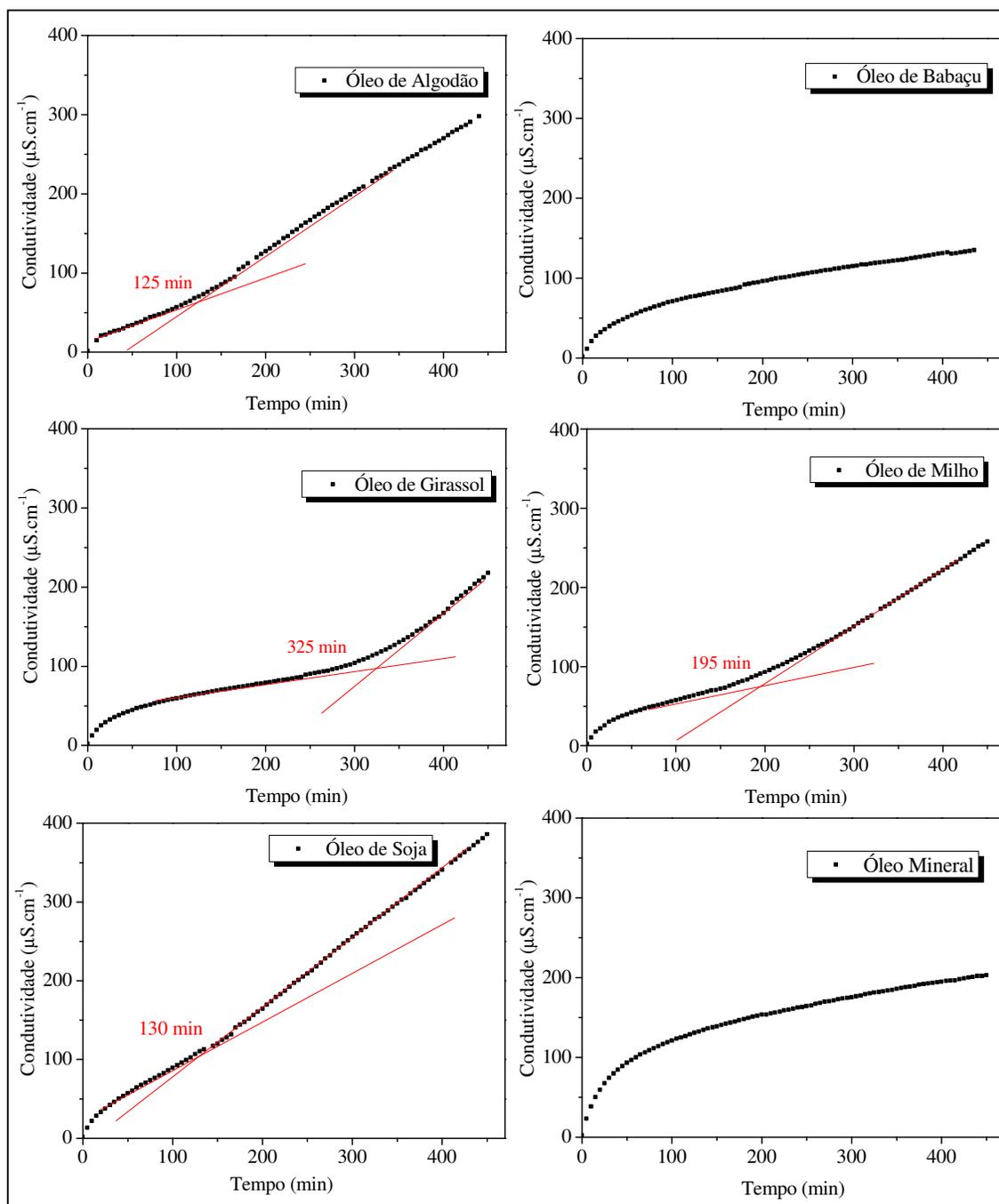


Figura 4.13 Determinação do tempo de indução por retas tangentes

A partir das curvas de condutividade elétrica vs tempo apresentadas na Figura 4.13 determinou-se período de indução (em minutos) de cada espécie. Os resultados foram listados na Tabela 4.5.

TABELA 4.5:

Períodos de indução obtidos pela medida de condutividade elétrica durante envelhecimento

Tipo de Óleo	Período de Indução (min)
Algodão	125
Babaçu	> 400
Girassol	325
Milho	195
Soja	130
Mineral	> 400

De acordo com o período de indução apresentado por cada espécie pode-se elencar a seguinte ordem de resistência a oxidação: algodão < soja < milho < girassol < babaçu. Sendo que os óleos de soja e algodão não apresentaram o período de indução mínimo exigido (195min) para aplicação em transformadores.

Exceto pelo resultado de índice de acidez, o óleo de babaçu apresentou comportamento semelhante ao óleo mineral durante o envelhecimento acelerado: praticamente não houve variação na viscosidade e o período de indução foi superior a 400 mim. Esse aspecto certamente está relacionado ao elevado grau de saturação presente em sua composição, pois a diferença de estabilidade à oxidação entre os diversos tipos de óleos vegetais é decorrente principalmente da quantidade de ácidos graxos polinsaturados, além da quantidade tocoferóis e dos antioxidantes sintéticos.

Diante do exposto, fica claro que os óleos vegetais são mais susceptíveis a oxidação que o óleo mineral. Dessa forma faz-se necessário desenvolver estudos relacionados a adição de antioxidantes. Além disso, é prudente recomendar que unidades preenchidas com óleos vegetais sejam cuidadosamente seladas para evitar contato com umidade e oxigênio do ar atmosférico.

5 CONCLUSÕES

Os óleos vegetais comestíveis de algodão, babaçu, soja, girassol e milho apresentam aspecto claro, límpido e isento de materiais em suspensão.

Os óleos de soja, milho, girassol e algodão possuem densidade a 20°C e viscosidades a 20, 40 e 100°C dentro do limite recomendado pela NBR 15422. O óleo de babaçu é pastoso em temperaturas inferiores a temperatura de 26°C, contudo nas temperaturas de 40 e 100°C possui melhor viscosidade que os demais.

As cinco espécies de óleos vegetais apresentaram comportamento não corrosivo quando testadas sob as condições da NBR 10505.

Os óleos vegetais comerciais apresentam acidez elevada para níveis de isolamento elétrico.

É possível estabelecer valores de índice de acidez dentro do limite estabelecido pela NBR 15422 procedendo a neutralização dos óleos com solução de hidróxido de sódio.

Quanto às propriedades dielétricas, verificou-se que óleos vegetais comerciais apresentam baixa rigidez dielétrica, não satisfazendo o mínimo aceitável especificado na NBR 15422 para sistemas de isolamento elétrico. Apenas os óleos de soja e babaçu não neutralizados apresentaram fator de perdas superior ao limite estabelecido pela norma.

A neutralização dos óleos vegetais promoveu melhoria na rigidez dielétrica e no fator de perdas quando comprados aos originais.

Dentre os óleos vegetais testados apenas o óleo de milho neutralizado apresentou rigidez dielétrica mínima recomendada para uso como isolante elétrico, mesmo com teor de água supostamente superior ao recomendado.

Os óleos vegetais avaliados possuem estabilidade térmica adequada para uso em transformadores elétricos por apresentarem temperatura de decomposição acima de 200°C. A seguinte ordem de estabilidade foi observada: algodão < babaçu < soja < girassol < milho.

Óleos vegetais não produzem borra durante o envelhecimento.

Durante o envelhecimento o óleo de babaçu produz maior quantidade de ácidos graxos livres que os óleos de algodão, soja, milho e girassol.

Quanto à resistência a oxidação, verificou-se a seguinte ordem de estabilidade para os óleos vegetais comestíveis não neutralizados: algodão < soja < milho < girassol < babaçu.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No intuito de dar continuidade a este estudo, a seguir foram listadas algumas sugestões:

- Realizar demais ensaios, não realizados neste estudo, que também são exigidos pela NBR 15422: ponto de fulgor, ponto de fluidez, ponto de combustão, condutividade térmica, entre outros;
- Estudar métodos eficazes que promovam a secagem dos óleos sem comprometer demais propriedades necessárias para uso como líquido dielétrico; o uso de peneiras moleculares, por exemplo;
- Estudar melhoraria na estabilidade oxidativa dos óleos comestíveis mediante a adequada adição de antioxidantes;
- Realizar testes de campo em equipamentos elétricos preenchidos com óleo vegetal e realizar ensaios periódicos para acompanhamento de propriedades físico-químicas, térmicas e elétricas.
- Avaliar o uso de mistura de óleos vegetais;
- Determinar a concentração dos gases dissolvidos em óleos vegetais após ‘estresses’ térmicos e elétricos;
- Realizar ensaios capazes de avaliar o efeito dos fluidos isolantes derivados de óleos vegetais sobre a eventual oxidação dos núcleos de liga amorfa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS. **Mudança de óleo mineral para vegetal rende prêmios ambientais à Copel**, Disponível em: <
<http://www.aenoticias.pr.gov.br/modules/newS.A.rtitle.php?storyid=24692>> Acesso em 31 jul. 2008.

AMANULLAH, MD.; ISLAM, S. M.; CHAMI, S.; IENCO G. **Analyses of Physical Characteristics of Vegetable oils as an Alternative Source to Mineral Oil-based Dielectric Fluid**, In: International Conference on Web Services. 07, 2005. Orlando – Florida. **Anais...IEEE**, p. 397-400. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnum

AMARAL, Nádia Bentz de Souza. **Estudo sobre critérios para a especificação de transformadores elevadores de estações geradoras (generation step-up transformers)**. 2007. 101f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo.

ANTONELLO, I.; HUMERES, E.; SOUZA, I. G. de; DEBACHER, N. A. Determinação de ascarel em óleo isolante de transformadores. **Quim. Nova**, vol. 30, n. 3, p. 709-711, 2007.

ANTONIASSI, Rosemar. Métodos de Avaliação da Estabilidade Oxidativa de Óleos e Gorduras, **B.CEPPA**, v. 19, n.2, p. 353-380, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10441: Produtos de petróleo - Líquidos transparentes e opacos - Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica**: Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10505: Óleo mineral isolante - determinação de enxofre corrosivo**: Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10710: Determinação de água em líquidos isolantes (Método KARL-FISCHER)**: Rio de Janeiro, 2006.

,ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12133: Líquidos isolantes elétricos - Determinação do fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica)**: Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15422: Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos**: São Paulo, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6869: Determinação de rigidez dielétrica de óleos isolantes (Eletrodos de disco)**: Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE MILHO - Milho: supersafra gera excedente de 14 milhões de toneladas. Disponível em: <<http://www.abramilho.org.br/noticias.php?cod=235>> Acesso em 20 jan. 2009.
ber=1490109> Acesso em 18 jan. 2009.

BREITKREITZ, M. C.; RAIMUNDO JÚNIOR, I. M. Determinação de enxofre total em óleo diesel utilizando espectroscopia no infravermelho próximo. In: X Congresso Interno de Iniciação Científica da UNICAMP. 9, 2002, Campinas - SP. **Anais...UNICAMP**, p. E282. Disponível em: < <http://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xcongresso/pdfN/80.pdf>> Acesso em 18 jan. 2009.

BRUSCATTO, M. H.; ZAMBIAZI, R.; OTERO, D.; PAIVA, F.; LIMA, R.; PESTANA, V. R. Estabilidade Oxidativa do Óleo de Arroz. In: IX Encontro de Pós-graduação da Universidade Federal de Pelotas, 11, 2007. Pelotas - RS. **Anais...UFPEL - RS**. Disponível em: http://www.ufpel.tche.br/cic/2007/cd/pdf/CA/CA_01399.pdf> Acesso em 18 jan. 2009.

CANGUSSU, Salete. Transformador de 145 kV revitalizado é inédito no mundo: Técnica permite extensão da vida útil do equipamento de 50 para 400 anos, **P&D**, n. 2, p. 48-49, 2007.

CATÁLOGO DO FLUIDO VEGETAL ISOLANTE BIOTEMP. Disponível em: < [http://library.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/c1256b3c00492da685256c85006d74dc/\\$File/1LUS471050-LTE_BIO.PDF](http://library.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/c1256b3c00492da685256c85006d74dc/$File/1LUS471050-LTE_BIO.PDF) > Acesso em 2 fev. 09.

CATÁLOGO DO FLUIDO VEGETAL ISOLANTE ENVIROTEMP FR3. Disponível em: < <http://www.cooperpower.com/Library/pdf/B90000092P.pdf>> Acesso em 2 fev. 09.

CLAIBORNE, C. C.; WALSH; E. J.; OOMMEN, T. V. **An Agriculturally Based Biodegradable Dielectric Fluid**. In: Transmission and Distribution Conference, 04, 1999, **New Orleans**, LA. **Anais...IEEE**, v.2, p. 876-881. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=756165> Acesso em 18 jan. 2009.

Current Protocols in Food Analytical Chemistry Lipid Oxidation Stability - UNIT D2.3: Assessment of Oxidative Stability for Lipids, John Wiley & Sons, Inc., p. D2.3.1-D2.3.5, 2001.

DANTAS, Manoel Barbosa. **Obtenção, caracterização e estudo termoanalítico de biodiesel de milho (Zea Mays L.)**. 2006. 138f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba.

DANTAS. Hérmesson Jales. **Estudo termoanalítico, cinético e reológico de biodiesel derivado do óleo de algodão (Gossypium hisutum)**. 2006. 122f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba.

FARIA, E. A. de; LELES, M. I. G.; IONASHIRO, M.; ZUPPA, T.de O.; ANTONIOSI FILHO, N. R. Estudo da estabilidade térmica de óleos e gorduras vegetais por TG/DTG e DTA. **Eclética Química**, São Paulo, v. 27, 2002.

FERGUSON, R.; LOBEIRAS, A.; SABAU, J. Suspended Particles in the Liquid Insulation of Aging Power Transformers, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, n. 4, p. 17-23, 2002.

FERREIRA JUNIOR, Wilson. P&D: a CPFL cumpre seu papel, **P&D**, n. 1, p. 23-24, 2006.

FOFANA, I.; WASSERBERG, V.; BORSI, H.; GOCKENBACH, E. Challenge of Mixed Insulating Liquids for Use in High-Voltage Transformers, Part 1: Investigation of Mixed Liquid, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, n. 3, p. 18-31, 2002.

GARCIA, Camila Martins. **Transesterificação de óleos vegetais**. 2006. 136f. Dissertação (Mestrado), Universidade estadual de Campinas - Instituto de Química.

GARCIA, J. U.; SANTOS, H. I. dos; FIALHO, A. P.; GARRO, F. L. T.; ANTONIOSI FILHO, N. R.; LELES, M. I. G. Estudo da estabilidade térmica de óleos de peixes em atmosfera de nitrogênio. **Eclética Química**, v. 29, n.2, 2004.

HEMMER, M.; BADENT, R.; SCHWAB, A. J. **Electrical properties of rape-seed oil**. In: Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 83-86, 2002.

HOSIER, I. L., VAUGHAN, A. S.; SWINGLER, S. G. Studies on the ageing behavior of various synthetic and natural insulation oils. In: 2008 International Conference on Dielectric Liquids, 06-07, 2008, Poitiers-France. **Anais...**University of Southampton. Disponível em: <<http://eprints.ecs.soton.ac.uk/16069/>>

LEÃO, Ruth. GTD – **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 2008. Apostila (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Ceará.

LIMA, J. R. de O.; SILVA, R. B. da; SILVA, C. C. M. da; SANTOS L. S. S. dos; SANTOS Jr, J. R. dos; MOURA E. M.; MOURA, C. V. R. de. Biodiesel de babaçu (*Orbignya sp.*) obtido por via etanólica. **Química Nova**, v. 30, n. 3, p. 600-603, 2007.

LUZ JÚNIOR, G. E. da; GUIMARÃES NETO, J. M.; MOITA NETO, J. M. Ação adsorvente da bauxita sobre óleo isolante novo. **Química Nova**, vol. 28, n. 3, p. 535-538, 2005.

MACARIN, L.; LUZ, R.; MATTOZO. V. **Celesc Distribuição investe em óleo vegetal como isolante de transformadores de alta e baixa tensão**. Disponível em: <http://www.acionista.com.br/home/celesc/260207_oleo_vegetal.htm>. Acesso em 31 jul. 2008.

MARTINS, A. J. A. L.; COSTA, M. A.; ARAÚJO, D. C. P.; SILVINO, J. L.; MARTINS FILHIO, J. L. de O. **Revitalização de transformadores de potência utilizando aramida e óleo vegetal**, p. 40-55, 2007.

MARTINS, Marcelo Neves. **Óleo vegetal isolante e sua influência no envelhecimento de transformadores**. Palestra conferida no Workshop Cepel Óleo Vegetal Isolante, 06 jun. 2008. Disponível em: <<http://www.cepel.br/workshop2/Presentation%20CPS%20-%20Workshop%20OVI%20CEPEL.pdf>> Acesso em 29 set. 2008.

McSHANE, C. P.; MARTINS, M. **Experiência com óleos vegetais isolantes**: a primeira década. Palestra proferida no III Workshop de Química e Meio Ambiente, Belém-PA, 08, 2006.

MELO, A. M. B.; MOTA, F. A. S.; DIAS, F. P.; ALMEIDA, R. F.; LUNA, F. M. T.;

RIBEIRO, M. O. A.; CAVALCANTE JR., C. L.; AZEVEDO, D. S. C. **Estudos de oxidação em compostos parafínicos e avaliação do desempenho de aditivos**. In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Campinas, 07, 2005, Campinas - SP. Anais... **Anais...**Campinas, p. RT15.

MENDES, José Carlos. **BIOTEMP Óleo Vegetal da ABB Aplicação em Transformadores de Potência em Alta Tensão**. Palestra proferida no Workshop Óleo Vegetal, Rio de Janeiro-RJ, 06, 2008.

MONTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. de. **Análise térmica de materiais**. 2002. 1 ed. São Paulo: iEditora, 2002. 300p.

MORETTO, E.; ALVES, R. F. **Óleos e gorduras vegetais**. 1 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1986. 179p.

MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos**. 1 ed. São Paulo: Livraria Varela. 1998. 150p.

NOGUEIRA, César Augusto Azevedo. **Avaliação de sistemas de medição da concentração de hidrogênio dissolvido em óleo isolante**. 2004. 97f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

OLIVEIRA, Afonso. **Dielétricos usados em transformadores de distribuição.** 2005. Trabalho Final de Curso. Faculdade de Engenharia do Porto.

OOMMEN T. V.; CLAIBORNE C. C.; WALSH E. J.; BAKER J. P. A new vegetable oil based transformer fluid: development and verification. In: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 10, 2000. Victoria, Canada. **Anais... IEEE**, p. 308-312.

OOMMEN, T. V. Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, n. 1, p. 6-11, 2002.

OOMMEN, T. V.; CLAIBORNE, C. C.; WALSH E. J.; **Introduction of a new fully biodegradable dielectric fluid.** In: Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference, 05, 1998, Charlotte – NC. **Anais...IEEE**, p. 3/1-3/4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=679223&isnumber=14925>> Acesso em 18 jan. 2009.

PACHECO, Selma Guidorizzi Antonio. **Estabilidade oxidativa de óleo de peixe encapsulado e acondicionado em diferentes tipos de embalagem em condição ambiente.** 2005. 79f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo.

PAIXÃO, Luis Augusto. **Avaliação da qualidade do óleo em transformadores com o emprego da função discriminante quadrática.** 2006. 268f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná.

PEREIRA, Alessandra Félix da Costa. **Determinação simultânea de acidez, índice de refração e viscosidade em óleos vegetais usando espectrometria NIR, calibração multivariada e seleção de variáveis.** 2007. 75f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba.

PREVOST, Thomas A. **Review of test methods to detect corrosive sulfur in insulating oil.** Palestra conferida no Sixth Annual Technical Conference. St. Petersburg-FL 11, 2007. [ransformadoresOleo.pdf](#)> Acesso em 05 ago. 2008.

Relatório Anual de Sustentabilidade da Coelce. Disponível em: <http://www.endesabrazil.com.br/sust/coelce/meio_ambiente_03.html> Acesso em 23 set. 2008.

ROCHA FILHO, Gerardo Narciso. **Estabilidade de óleos vegetais.** Palestra conferida no III Workshop de Química e Meio Ambiente, Belém-PA, 08, 2006.

RUPPEL, T.; HALL, G. Glicerina Livre e Total em Biodiesel B100 por Cromatografia a Gás, **Revista Analytica**, Agosto/Setembro, No. 30, 2007, p. 90-95.

SANTOS, A.; NOGAWA, E. C.; MENDES, J. C. Óleo vegetal – aplicação em transformadores de 145kV, 100% a óleo vegetal. In: XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 10, 2007, Rio de Janeiro - RJ. **Anais...**<http://www.cepel.br/workshop2/ABB-BR-04-SNPTEE2007-OleoVegetalAplicacaoTransformador145kV.pdf>> Acesso em 18 jan. 2009.

SANTOS, Nataly Albuquerque dos. **Propriedades termo-oxidativas e do fluxo de biodiesel de babaçu (*Orbignya phalerata*).** 2008. 154f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba.

SARAIVA, Augusto. **Enxofre corrosivo: experiência da Eletronorte.** Palestra proferida no III Workshop de Química e Meio Ambiente. Belém-PA. 08, 2006.

SCMIDT, Valfredo. **Materiais elétricos isolantes e magnéticos.** V.2, 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher. 2002. 166p.

SOLOMONS, T. W. **Química orgânica 2**, 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

TRINDADE, Eduardo Marques. **Enxofre corrosivo: aspectos químicos e de manutenção de equipamentos.** Palestra proferida no III Workshop de Química e Meio Ambiente. Belém-PA 08, 2006.

TUNIÃO TRANSFORMADORES. Transformadores imersos em óleo mineral ou fluido isolante a base de silicone. Disponível em: < <http://www.stkv.com.br/catalogo/FolhetoUniaoT>

VERGARA, P.; WALLY, A. P.; PESTANA, V. R.; BASTOS, C.; ZAMBIAZI, R. C. Estudo do comportamento de óleo de soja e de arroz reutilizados em frituras sucessivas de batata. **B.CEPPA**, Curitiba, v. 24, n. 1, p. 207-220, 2006.

WEG. Galeria de fotos. Disponível em: http://www.ssmotores.com.br/ss_galeria2.htm. Acesso em 06 ago. 2008.

WILHELM, Helena Maria. **Óleos Vegetais Isolantes**. Palestra proferida no III Workshop de Química e Meio Ambiente, Belém-PA, 08, 2006.

WYKROTA, Rony. **Poli(estireno-divinilbenzeno) funcionalizado na Regeneração de óleo mineral isolante Envelhecido: remoção de produtos de oxidação**. 2004. 118f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná.

ZAHN, Y. Du, M.; LESIEUTRE, B. C.; MAMISHEV, A.V.; LINDGREN, S. R. Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 15, no. 1, p. 11-20, 1999.