

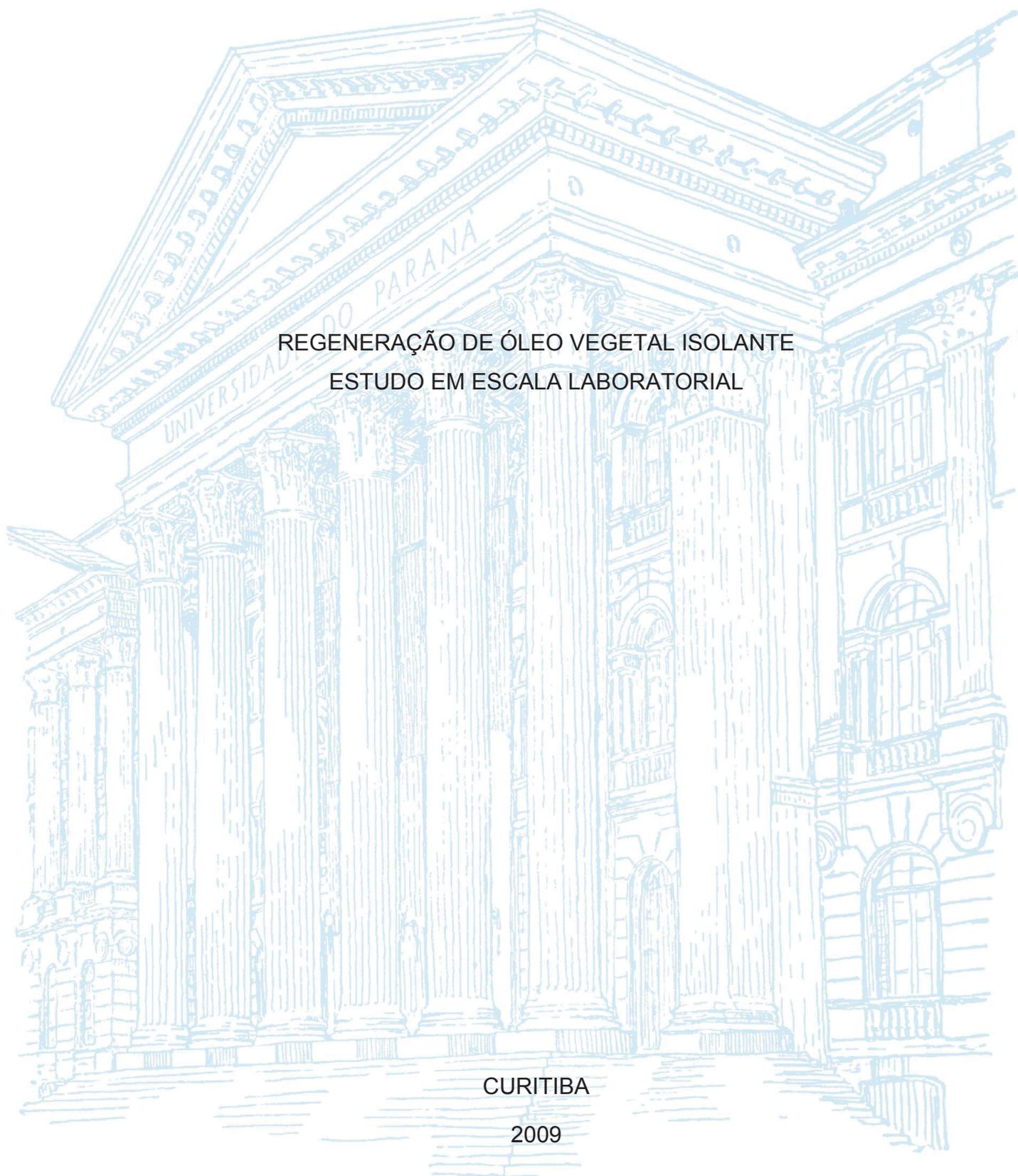
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME BARRACHINA STOCCO

REGENERAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL ISOLANTE
ESTUDO EM ESCALA LABORATORIAL

CURITIBA

2009



GUILHERME BARRACHINA STOCCO

REGENERAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL ISOLANTE
ESTUDO EM ESCALA LABORATORIAL

Dissertação apresentada ao curso de Pós- Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Helena Maria Wilhelm

CURITIBA

2009

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

S864r

Stocco, Guilherme Barrachina

Regeneração de óleo vegetal isolante estudo em escala laboratorial [recurso eletrônico]/ Guilherme Barrachina Stocco - Curitiba, 2009.

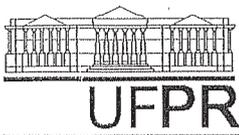
Dissertação (Mestrado) apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Helena Maria Wilhelm

1. Transformadores elétricos. 2. Óleo vegetal. 3. Energia elétrica – concessionária. I. Wilhelm, Helena Maria. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 621.3

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



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

RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos vinte e nove dias do mês de outubro de 2009, no Auditório do CEHPAR - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Dante Homero Mosca Jr, coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a centésima septuagésima terceira defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Helena M. Wilhelm (UFPR), Marilda Munaro (UFPR), Pedro Augusto Arroyo (UEM). Às 14:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **GUILHERME BARRACHINA STOCCO** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**REGENERAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL ISOLANTE – ESTUDO EM ESCALA LABORATORIAL**”. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de argüição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a argüição, a banca decidiu pela aprovação do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 62 e 63 da resolução 62/03 de 22.07.2003).

Curitiba, 29 de outubro de 2009.

Prof^ª.Dr^ª. Helena M. Wilhelm
Orientador

Prof. Dr. Pedro Augusto Arroyo
Examinador

Prof^ª. Dr^ª. Marilda Munaro
Examinador

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

A. Einstein
1879-1955

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Luiz Carlos Stocco e Maria Yolanda Barrachina Stocco, que com muito esforço, amor, carinho e dedicação, me ajudaram a ser o que sou.

À minha esposa e companheira, Mônica Buffara Cecato Stocco, que caminhou ao meu lado durante esta trajetória e me apoiou durante as dificuldades.

Ao meu filho, Arthur Cecato Stocco, que foi o maior presente que pude receber me trazendo alegria e tranquilidade com seus sorrisos, mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu irmão, Daniel Barrachina Stocco, que aonde quer que esteja sempre esteve olhando por mim e me dando forças para não desistir.

Ao meu irmão, Fernando Barrachina Stocco, que sempre me apoia e me deixa muito orgulhoso de ser seu irmão.

Aos meus colegas de trabalho Adriano Fontana Kerecz, Cherryl Ladd Moreira dos Santos, Diego Tulio Leitão, Leandro Gonçalves Feitosa, Luciane Tulio e Suely Monteiro de Oliveira, que me ajudaram a desenvolver todos os ensaios e processos durante este trabalho e que estão comigo todos os dias me apoiando e incentivando a crescer como profissional.

Aos demais colegas de trabalho, que estão sempre dispostos a discutir e questionar os trabalhos desenvolvidos.

Ao meu mentor, Romeu Caetano Granato, por ter me dado a oportunidade de trabalhar ao seu lado e ensinar muito do que sei hoje.

À minha orientadora, Helena Maria Wilhelm, por me incentivar a realizar o curso de mestrado e se desdobrar para me ajudar a cumprir o prazo.

Ao LACTEC, por me dar a oportunidade de realizar o curso de mestrado.

Ao PIPE, por oferecer um curso abrangente e inovador na área.

À COPEL Distribuição S.A., pelo apoio financeiro ao projeto que deu origem a este trabalho.

E a Deus por me dar luz e sapiência durante toda a minha vida.

RESUMO

A substituição do óleo mineral isolante (OMI) por fluidos isolantes de origem vegetal é uma prática que está sendo cada dia mais utilizada pelas concessionárias de energia elétrica. Estas concessionárias optam por este tipo de isolante devido ao grande número de características vistas como “ecologicamente corretas”, entre elas a biodegradabilidade destes óleos, o alto ponto de fulgor que o caracteriza como fluido de segurança, e o fato de ser proveniente de uma matéria-prima renovável em contrapartida ao óleo mineral proveniente do petróleo. No entanto, a utilização dos fluidos vegetais isolantes no Brasil é bastante recente e limitada em função da insuficiência de resultados técnicos quanto ao seu desempenho.

Os óleos vegetais isolantes (OVIs) irão necessitar, em algum momento durante seu uso no transformador, de intervenções como recuperação (ou secagem) ou regeneração, métodos tradicionalmente utilizados em larga escala no tratamento de OMI em uso. Não existe nenhum estudo científico e/ou tecnológico publicado que trata do processo de regeneração de OVIs em uso, sendo o presente estudo, portanto, inovador e pioneiro.

Neste trabalho foi avaliada a viabilidade técnica de regeneração do OVI envelhecido.

A pesquisa consistiu em envelhecer inicialmente, em escala laboratorial, um OVI comercial, por 2 métodos de envelhecimento distintos, denominados 1 e 2. O óleo envelhecido pelo método 1 apresentou, ao final do envelhecimento, uma elevada viscosidade, da ordem de 48,0 cSt, enquanto que o óleo envelhecido pelo método 2 apresentou um elevado índice de neutralização (1,16 mg KOH/g óleo). Amostras destes óleos foram regeneradas pela aplicação de dois métodos tradicionalmente utilizados para o OMI, a saber, regeneração por contato e regeneração por percolação. Além destas, foi testada pelo método da percolação uma amostra de óleo vegetal, de fabricante desconhecido, que estava em serviço em uma chave religadora de 13,8 kV da COPEL Distribuição S.A., e que apresentava um fator de perdas dielétricas elevado, da ordem de 76% a 100 °C.

Os resultados obtidos apontaram o método de regeneração por contato como sendo tecnicamente inviável no tratamento da amostra de OVI com viscosidade elevada, obtida pelo método 1 de envelhecimento, mas tecnicamente viável no

tratamento da amostra que apresentava um índice de neutralização elevado, obtida pelo método 2 de envelhecimento. A regeneração por percolação se mostrou tecnicamente viável no tratamento da amostra de OVI proveniente da chave religadora, que apresentava um elevado fator de perdas dielétricas.

Os resultados obtidos neste estudo mostraram que os processos tradicionalmente utilizados na regeneração do OMI podem ser aplicados ao OVI, desde que se tenha conhecimento e controle da condição físico-química do OVI em uso.

Palavras-chaves: Óleo vegetal isolante. OVI. Regeneração. Percolação. Agente adsorvente. Concessionárias de energia elétrica. Equipamentos elétricos.

ABSTRACT

The replacement of mineral insulating oil for insulating fluids from vegetable sources is occurring frequently in Brazilian Electric Utilities. These companies choose this type of insulating fluid original from renewable sources because it is considered “ecologically correct”, due to its biodegradability, the high fire point properties, it is characterizing it as a safety fluid, and a while mineral oil is derivated from petroleum. However, the use of vegetable insulating fluid in Brazil is recent and its performance is still under investigation.

Vegetable insulating oils, will need, at any time during its lifetime in electrical equipments interventions like: reconditioning, recuperation or regeneration, which are traditional methods used in recovery of mineral insulating oils. Nevertheless, there are no studies concerning vegetable insulating oils regeneration, which makes this investigation original and singular.

In this work, regeneration of aged commercial vegetable insulating oil was evaluated. The oil was aged in laboratory by means of two aging methods, named as 1 and 2. The oil aged by method 1 presented at the end of conditioning, high viscosity, around 48.0 cSt while the oil aged by method 2 presented high neutralization number of 1.16 mg KOH/g oil. These aged samples were then regenerated through methodologies applied traditionally to the mineral oil, i.e., the regeneration was carried out using contact and percolation processes. Beyond these, was tested by percolation method a vegetable insulating oil sample, of unknown manufacturer, from a Recloser 13.8 kV belonging to COPEL Distribuição S.A., and this sample showed a high loss factor around 76.0% at 100 °C.

Results obtained showed that regeneration by contact is technically unviable to recover vegetable oil with high viscosity (aging method 1), but technically viable in the treatment of samples with high neutralization number (aging method 2). The percolation showed to be feasible in the treatment of oil from Recloser. It was also demonstrated that processes traditionally used for mineral oil regeneration can be applied to vegetable oil if physical chemical characteristics are previously known.

Keywords: Vegetable insulating oil. VIO. Regeneration. Percolation. Adsorbent agent. Electricity concessionaires. Electrical equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos parafínicos ou alcanos constituintes do OMI.....	22
Figura 2. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos naftênicos ou cicloalcanos constituintes do OMI.....	22
Figura 3. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos aromático constituintes do OMI.	23
Figura 4. Sistema de regeneração de OMI.	30
Figura 5. Sistema de regeneração “on-line” de OMI em transformador energizado..	30
Figura 6. Gráfico que sintetiza a produção de óleos e gorduras no Brasil durante o ano de 2007.	32
Figura 7. Gráfico que sintetiza a Produção Mundial em 2007 de Óleos Vegetais em toneladas.....	33
Figura 8. Gráfico que sintetiza a área plantada, em hectares, de produtos vegetais que produzem, como subprodutos ou não, óleos vegetais.	33
Figura 9. Representação esquemática de um triacilglicerol, componente majoritário do OVI.	34
Figura 10: Etapas do processo de oxidação de óleos insaturados.	40
Figura 11. Formação de ácido graxo proveniente da reação de hidrólise do OVI.....	40
Figura 12: Sistema protótipo percolador.	47
Figura 13. Viscosidade cinemática a 40°C do OVI envelhecido pelo método 1, sendo que a linha pontilhada representa o valor limite para OVI em uso sugerido no guia da IEEE.	52
Figura 14. Índice de neutralização do OVI envelhecido pelo método 1, sendo que a linha pontilhada representa o valor limite para OVI em uso sugerido no guia da IEEE.	53
Figura 15. Viscosidade cinemática a 40°C do OVI envelhecido pelo método 2, sendo que a linha pontilhada representa o valor limite para OVI em uso sugerido no guia IEEE.	54
Figura 16. Índice de neutralização do OVI envelhecido pelo método 2, sendo que a linha pontilhada representa o valor limite para OVI em uso sugerido no guia da IEEE.	55

Figura 17. (A) Viscosidade cinemática a 40°C e (B) Fator de potência a 100°C da amostra coletada no religador, regenerada por percolação, sendo que a linha pontilhada representa o valor de aceitação para OVI novo sugerido na norma ABNT NBR 15422.....60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Reação em cadeia da degradação do OMI.	27
Tabela 2. Produtos de oxidação em função do hidroperóxido de origem.	28
Tabela 3. Produção anual brasileira de óleo (mil ton).	31
Tabela 4. Composição química de alguns dos principais óleos vegetais.	35
Tabela 5. Diretrizes para os valores das principais propriedades de fluidos de ésteres naturais envelhecidos em serviço de acordo com a IEEE.	41
Tabela 6. Características do OVI Comercial novo.	43
Tabela 7. Ensaio físico-químico realizados na Amostra de OVI do Religador.	44
Tabela 8. Equipamentos utilizados na realização deste estudo.	49
Tabela 9. Caracterização físico-química do OVI Comercial novo.	50
Tabela 10. Caracterização físico-química da Amostra de OVI do Religador.	51
Tabela 11. Regeneração por contato do OVI Comercial novo em função do tipo de adsorvente.	56
Tabela 12. Regeneração por contato do OVI Comercial, envelhecido pelo método 1, em função do tipo de adsorvente.	57
Tabela 13. Regeneração por contato do OVI Comercial, envelhecido pelo método 2, em função do tipo de adsorvente.	58
Tabela 14. Regeneração por percolação da amostra de OVI do religador usando o adsorvente 1.	59
Tabela 15. Efeito da adição de aditivos antioxidantes no período de indução da amostra de OVI do religador regenerada por percolação.	61

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E UNIDADES

ABB – Asea Brown Boveri

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BEN – Balanço Energético Nacional

CE – Comissão de Estudos

CIGRÉ – Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

COBEI – Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicação

cSt – Centi Stokes

DBPC – Di-terc-butil-p-cresol

FT – Força Tarefa

GE – General Electric Company

GT – Grupo de Trabalho

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

KOH – Hidróxido de Potássio

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

NBR – Norma Brasileira

OMI – Óleo Mineral Isolante

OVI – Óleo Vegetal Isolante

OVI's – Óleos Vegetais Isolantes

ppm – Parte por Milhão

PCB - Bifenilapoliclorada

PRODETEC – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia

R – Radical

R/P – Reserva/Produção

S - Siemens

SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

WORKSPOT – International Workshop on Power Transformer

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.1. Objetivo Principal	16
1.2. Objetivos Específicos	16
1.3. Trabalhos Resultantes da Pesquisa Realizada	17
1.4. Importância da Pesquisa	17
2. INTRODUÇÃO	19
2.1 Revisão Bibliográfica	21
2.1.1 Transformadores elétricos	21
2.1.2 Sistema Isolante do Transformador	21
2.1.3 Óleo Mineral Isolante (OMI)	22
2.1.4 Manutenção de Transformadores	24
2.1.5 Mecanismos de Envelhecimento do Sistema Isolante de Transformadores	26
2.1.6 Regeneração do OMI	29
2.1.7 Óleo Vegetal.....	31
2.1.8 Óleo Vegetal Isolante (OVI).....	35
2.1.9 Degradação do Óleo Vegetal Isolante.....	38
3. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	42
3.1. Materiais.....	42
3.2. Métodos.....	42
3.2.1. Caracterização dos Agentes Adsorventes e dos OVIs	42
3.2.2. Envelhecimento Acelerado do OVI Comercial.....	44
3.2.2.1 Envelhecimento do OVI pelo método 1	44
3.2.2.2 Envelhecimento do OVI pelo método 2	45
3.2.3. Regeneração dos OVIs envelhecidos	45
3.2.3.1. Regeneração por Contato do OVI Comercial	46
3.2.3.2 Regeneração por percolação da amostra do OVI do Religador	46
3.2.3.3 Ensaio físico-químicos realizados no OVI para avaliar o processo de regeneração testado	47
3.2.4. Adição de aditivos antioxidantes aos OVIs regenerados.....	48
3.3. Equipamentos Utilizados na Realização dos Ensaio	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1. Caracterização dos Fluidos Isolantes.....	50

4.2 Envelhecimento Acelerado do OVI Comercial.....	52
4.3. Testes de Regeneração do OVI	56
4.3.1 Regeneração por contato do OVI Comercial novo	56
4.3.2 Regeneração por contato do OVI Comercial envelhecido pelo método 1	56
4.3.3 Regeneração por contato do OVI Comercial envelhecido pelo método 2	57
4.3.4 Regeneração por percolação da amostra de OVI coletada do Religador.....	58
4.3.5 Aditivção da amostra de OVI coletada do religador após a regeneração por percolação.....	61
5. CONCLUSÕES	63
5.1. Sugestões Para Continuidade dos Estudos	63
REFERÊNCIAS	64

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos.

Neste primeiro capítulo têm-se uma explanação geral de como está dividido e como foi realizado este trabalho.

No segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica necessária para a compreensão do tema abordado, ou seja, transformadores, óleos isolantes, principalmente o OVI e os tipos de regeneração existentes para estes óleos.

No terceiro capítulo estão apresentadas as características dos materiais, os principais equipamentos utilizados e a metodologia empregada para a aditivação e regeneração dos fluidos isolantes (OVIs) estudados em escala laboratorial.

No quarto capítulo, estão apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo.

Finalmente, no quinto capítulo, estão as conclusões com base no estudo realizado e as sugestões de futuros trabalhos, abordando a mesma linha de pesquisa.

1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Avaliar a viabilidade técnica de regeneração de OVI envelhecido.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Testar diferentes agentes adsorventes no processo de regeneração de OVI envelhecido;
- Avaliar, em escala laboratorial, a eficiência de dois processos de regeneração, por contato e por percolação, em amostras de OVI envelhecidas;
- Avaliar, em escala laboratorial, o efeito da incorporação de aditivos antioxidantes ao OVI regenerado, visando à extensão da sua vida útil.

1.3. TRABALHOS RESULTANTES DA PESQUISA REALIZADA

O projeto de pesquisa que fundamentou a elaboração desta dissertação gerou os trabalhos a seguir relacionados:

- STOCCO, G., B., TULIO, L., FEITOSA G. L., SANTOS, C., L., M., KEREZCZ, A. F., JUNIOR, S. B. G., JASINSKI, R., WILHELM, H. M., “Regeneração de Óleo Vegetal Isolante (OVI) – Estudo em Escala Laboratorial”. **V WORKSPOT - International Workshop on Power Transformers**, Belém - PA, abril, 2008.
- STOCCO, G., B., TULIO, L., FEITOSA G. L., SANTOS, C., L., M., KEREZCZ, A. F., JUNIOR, S. B. G., JASINSKI, R., WILHELM, H. M., “Regeneração de Óleo Vegetal Isolante (OVI) – Estudo em Escala Laboratorial”. A ser submetido em setembro de 2009 para o **VI WORKSPOT – INTERNATIONAL WORKSHOP ON POWER TRANSFORMERS, FOZ DO IGUAÇÚ, PR** – a ser realizado em 25 a 28 de abril de 2010.

Este trabalho foi financiado pela COPEL Distribuição S.A., dentro do projeto de pesquisa “Regeneração de Óleo Vegetal Isolante (OVI) – Estudo em Escala Laboratorial”, tendo gerado o seguinte relatório técnico:

- STOCCO, G., B., TULIO, L., FEITOSA G. L., SANTOS, C., L., M., KEREZCZ, A. F., WILHELM, H. M., **Relatório Técnico Final “Regeneração de Óleo Vegetal Isolante (OVI) – Estudo em Escala Laboratorial – LACTEC/DPTM 31614/2009 – 34 p., 2009.**

1.4. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Pelo processo de regeneração os óleos minerais isolantes em uso têm suas características de desempenho novamente recompostas e podem ser reutilizados por mais um período de, no mínimo, 15 (quinze) anos. Este procedimento trás imensos

benefícios não só para a concessionária de energia como também para a comunidade em geral, pois, com esta prática, a incineração do óleo usado é evitada, contribuindo para a minimização dos impactos ambientais pela não geração de efluentes gasosos produzidos na combustão de derivados de petróleo. Outro benefício de grande relevância é a diminuição do consumo de óleos novos, ou seja, deixa-se de consumir um recurso não renovável, obtido a partir do petróleo, cuja escassez já é prevista. Para o usuário final, o benefício financeiro deste processo é significativo, pois o custo dos óleos regenerados é cerca de 30% (trinta por cento) inferior, comparativamente ao produto novo, e a qualidade dos mesmos é mantida, comparativamente aos óleos novos.

Apesar da utilização do OVI em substituição ao OMI ser uma prática incipiente no país, as concessionárias de energia, além de estarem preocupadas com a vida útil deste fluido em campo, preocupam-se com a extensão da vida útil deste fluido. Segundo os fabricantes, o OVI pode ser regenerado utilizando-se o mesmo processo aplicado para o OMI. Porém, até o momento não existe nenhum estudo técnico-científico publicado nacional e internacionalmente que comprove não só a viabilidade técnica como, também, a econômica desse processo.

Hoje um processo de regeneração para o OMI tem um custo médio de R\$ 1,30 (um real e trinta centavos) por litro de OMI regenerado. Este processo inclui a regeneração e a aditivação do OMI, além de uma perda de 5% do óleo no processo. O OVI novo tem custo médio de R\$ 8,50 (oito reais e cinquenta centavos). Se os métodos de regeneração utilizados para o OMI se mostrarem eficazes para o OVI, pode-se estimar uma economia em torno de 85%, adotando-se a regeneração, em comparação com a aquisição de OVI novo.

Este estudo teve por objetivo avaliar a aplicação do processo de regeneração para amostras de OVI envelhecidas. Trata-se de um estudo inédito e de amplo interesse de todas as concessionárias de energia brasileiras dispostas a utilizar este novo fluido, renovável, ambientalmente correto e biodegradável. Atualmente, a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), por exemplo, possui 21 transformadores subterrâneos, 02 religadores e 19 transformadores de distribuição isolados a OVI. Portanto, a necessidade de avaliar tecnicamente a regeneração destes óleos é fundamental para as equipes de manutenção e para minimização de custo, pela aquisição de novas cargas destes fluidos, quando estes estiverem com sua qualidade comprometida.

2. INTRODUÇÃO

No princípio do desenvolvimento dos transformadores os óleos vegetais eram usados como fluidos isolantes. Porém, a necessidade de melhorias quanto à isolação e o rendimento dos transformadores, aliado à baixa estabilidade à oxidação dos óleos vegetais, fomentou as pesquisas nestes segmentos. A companhia General Eletric já havia inovado o segmento com um produto dielétrico mineral e a indústria focava suas atenções na determinação tanto das propriedades dielétricas como no desenvolvimento de um fluido mais apropriado para transformadores. As vantagens encontradas para o produto dielétrico mineral eram inúmeras. Em virtude das boas características físico-químicas, como a rigidez dielétrica, teor de água e fator de potência, foram consideradas ideais devido às poucas adaptações necessárias e à boa estabilidade à oxidação encontrada. Logo após a disseminação dos estudos sobre óleos minerais, em 1899, surgiu a primeira refinaria, que tinha por finalidade o preparo de óleos minerais isolantes específicos para transformadores (McSHANE, 2002; LEWAND, 2004).

O OMI vem sendo utilizado como meio isolante e refrigerante em transformadores por mais de um século e é, sem dúvida, o dielétrico líquido de maior utilização para esta aplicação. Muitos bilhões de litros de óleo estão em uso em equipamentos elétricos pelo mundo. A popularidade do OMI é devida, principalmente, a sua disponibilidade e baixo custo. Adicionalmente, ele é um excelente meio de isolamento e de resfriamento (CLAIBORNE e CHERRY, 2006).

Esta tendência se deve à eficácia do sistema isolante óleo/papel Kraft e ao custo reduzido em relação a outros meios dielétricos, bem como à possibilidade de sua regeneração química.

Durante o funcionamento dos transformadores de potência vários processos de desgaste e de envelhecimento ocorrem no sistema de isolamento. Os efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como, pontos quentes, sobreaquecimentos, sobretensões e vibração são responsáveis por alterações do sistema isolante. Estas devem ser monitorados para garantir a eficiência do equipamento, permitindo intervenções de manutenção preventiva e preditiva, a fim de evitar paradas de máquina e, conseqüentemente, aumento de custos.

Devido aos investimentos feitos no Brasil durante o processo de

desenvolvimento ocorrido nas décadas de sessenta e setenta, há um grande número de transformadores de potência com idade acumulada de trinta ou mais anos de operação. Estes transformadores de potência são elementos de ligação muito importantes dentro de um sistema de energia elétrica (NUNES JR., ET AL. 2000). A saída de operação de um transformador de potência pode provocar a paralisação de parte de uma usina geradora, de uma subestação de energia elétrica ou de um dos sistemas elétricos que abastece hospitais, escolas, indústrias etc. (SEIROTA e RUNGIS, 1995).

A aplicação de ésteres naturais em transformadores alcançou um equilíbrio, entre o transformador desejável e as propriedades ambientais externas, não encontradas no OMI, por exemplo. Uma fonte de ésteres naturais atrativa é os óleos de sementes comestíveis, uma commodity agrícola largamente disponível, derivada de fontes renováveis, ao contrário dos óleos minerais (MCSHANE, ET al., 2006).

Por se tratar de um fluido natural, o OVI é sensível a fatores como umidade, oxigênio e temperatura, os quais promovem sua degradação (TULIO, 2008). Este comportamento também é observado para o OMI, que sofre degradação termo oxidativa durante seu uso, tendo sua vida útil exaurida em torno de 30 (trinta) anos e é recomendada a sua substituição, por óleo novo ou por óleo regenerado, quando a tensão interfacial for inferior a 20 dina/cm.

A regeneração do OMI já é uma prática consolidada que veio para trazer imensos benefícios não só para a concessionária de energia como também para a comunidade em geral, pois, com esta prática, a incineração do óleo usado é evitada, contribuindo para a minimização dos impactos ambientais pela geração de efluentes gasosos produzidos na combustão de derivados de petróleo.

A utilização do OVI como substituto ao OMI irá gerar, no futuro, uma demanda de serviços de recuperação (ou secagem) e de regeneração deste fluido. No entanto, devido ao pouco tempo de uso ainda não são encontrados muitos estudos sobre envelhecimento e tão pouco sobre processos de recuperação aplicados aos OVIs.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Transformadores elétricos

Transformadores de potência são equipamentos importantes e de alto custo no contexto dos sistemas elétricos. São máquinas estáticas que transferem energia elétrica de um circuito a outro, mantendo a mesma frequência e, normalmente, variando valores de corrente e de tensão. De maneira geral, a função de um transformador é a de reduzir as perdas em transmissão por redução da corrente requerida para transmitir uma determinada potência elétrica (NYNÄS, 2004). Esta transferência de energia é acompanhada de perdas que dependem, normalmente, da construção do transformador, do seu regime de funcionamento e da sua manutenção.

A principal parte do transformador de potência é o seu sistema de isolamento, que é constituído, basicamente, por um líquido isolante e uma isolação sólida, o papel Kraft. O papel isolante é praticamente o elemento responsável por definir a vida útil do transformador, pois o mesmo não é regenerativo, diferente do óleo em uso, que pode ser tratado ou regenerado até o ponto de poder ser novamente utilizado.

Também fazem parte do núcleo do transformador resinas e fibras, que são empregadas com a finalidade de fixar os componentes isolantes e magnéticos. Materiais elastoméricos e tintas compatíveis com o OMI são utilizados com a finalidade de promover a vedação e a proteção do equipamento (MYERS, 1981; KARSAI, 1987).

2.1.2 Sistema Isolante do Transformador

No início, os transformadores não possuíam líquidos isolantes dielétricos para os seus componentes, ou seja, eles eram isolados somente pela rigidez dielétrica do ar ambiente. Somente no início da década de 1890, as primeiras experiências com o uso de óleos dielétricos líquidos, como os óleos vegetais, para isolação das partes internas do transformador passaram a ser realizadas pela indústria de transformadores de distribuição. A ideia de que os transformadores, usando óleo mineral como refrigerante dielétrico, pudessem ser menores e mais eficientes foi patenteada em 1882 pelo professor Elihu Thomson, mas levou mais de uma década

até que sua ideia fosse colocada em prática. Somente a partir de 1892, nos Estados Unidos, é que o uso de óleos dielétricos isolantes em transformadores passou a ser reconhecido (McSHANE, 2002; LEWAND, 2004).

2.1.3 Óleo Mineral Isolante (OMI)

O OMI utilizado em equipamentos elétricos é obtido pela destilação do petróleo e corresponde à fração obtida entre 300 e 400 °C. Este destilado pode ser de origem parafínica ou naftênica (LIPSTEIN e SHAKNOVISH, 1970; CLARK, 1962). Trata-se de uma mistura de compostos na qual a maioria das moléculas é constituída por carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) e, em pequenas quantidades, por compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio em sua estrutura (WILSON, 1980).

Os hidrocarbonetos podem ser divididos em três grupos, parafinas ou alcanos, naftenos ou cicloalcanos e aromáticos, sendo cada um destes grupos definidos conforme segue:

- Parafinas ou alcanos: hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta linear ou ramificada (Figura 1).

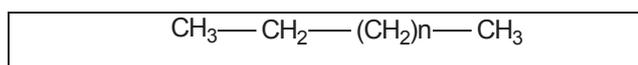


Figura 1. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos parafínicos ou alcanos constituintes do OMI.

- Naftenos ou cicloalcanos: hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo um ou mais anéis, sendo que estes podem possuir uma ou mais cadeias laterais lineares ou ramificadas (Figura 2).

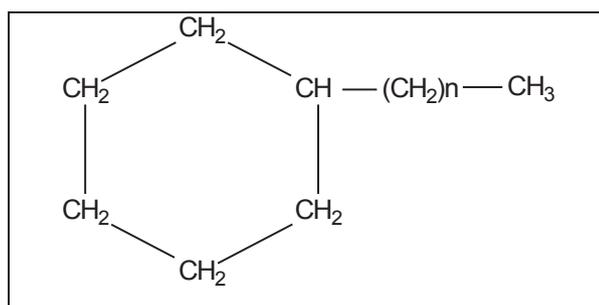


Figura 2. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos naftênicos ou cicloalcanos

constituintes do OMI.

- Aromáticos: hidrocarbonetos aromáticos contendo um ou mais anéis benzênicos que podem ser combinados com anéis alicíclicos, podendo ou não apresentar cadeias laterais (Figura 3).

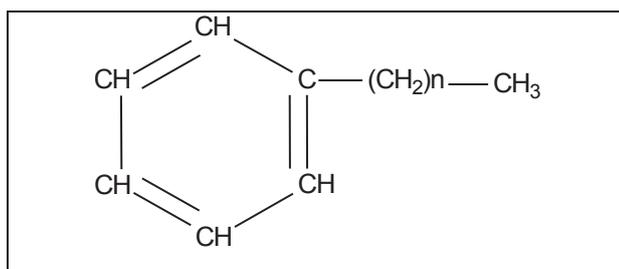


Figura 3. Ilustração esquemática dos hidrocarbonetos aromático constituintes do OMI.

A classificação do OMI em parafínico ou naftênico é, normalmente, realizada segundo a norma ASTM D 2140 (1991), por meio de medidas de viscosidade, densidade, índice de refração e pela correlação entre estes resultados em um diagrama ternário (ASTM D 2140, 1991). Alternativamente, a classificação do OMI em parafínico ou naftênico pode ser realizada com a utilização da técnica de espectroscopia na região do infravermelho, pela determinação do seu conteúdo parafínico (C_P). Óleos com C_P inferiores a 50% são considerados naftênicos enquanto que aqueles com C_P iguais ou superiores a 56% são classificados como parafínicos. Os óleos com valores de C_P entre 50 e 56% são classificados, em geral, como óleos intermediários (NYNÄS, 2004).

Quanto à longevidade das atuais reservas provadas de petróleo, o principal indicador é a razão R/P (reserva/produção), situado em torno de 19 anos em 2005 segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008).

Este número indica que, mantida a atual relação entre reservas provadas e o ritmo de produção atual, as reservas atualmente disponíveis sustentam a produção atual de petróleo por um período de aproximadamente 19 anos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008), sem considerar as novas reservas de petróleo encontradas nos últimos 5 anos.

Ressalta-se que a razão R/P é dependente do ritmo de novas descobertas, da evolução dos métodos de recuperação do reservatório, da alteração dos preços da

energia, como, também, do ritmo da demanda por derivados de petróleo. Este último depende, essencialmente, das condições de crescimento econômico e do perfil deste crescimento, isto é, sob que tecnologias e padrões de consumo se sustentam este crescimento. No que tange ao ritmo de descobertas, desde 1980, as reservas provadas nacionais têm crescido a um ritmo de 9,2% ao ano (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008).

2.1.4 Manutenção de Transformadores

Durante o funcionamento dos transformadores de potência vários processos de desgaste e de envelhecimento ocorrem no sistema de isolamento. Os efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como, pontos quentes, sobreaquecimentos, sobretensões e vibração são responsáveis por alterações do sistema isolante e devem ser monitorados para garantir a eficiência do equipamento. Isto permite intervenções de manutenção preventiva e preditiva, a fim de evitar paradas de máquina e, conseqüentemente, aumento de custos.

As falhas que normalmente provocam a retirada de um transformador de potência de serviço podem ocorrer por solicitações excessivas em serviço ou mesmo em condições normais de operação, por deficiência de manutenção, envelhecimento do equipamento ou de uma de suas partes constituintes (BIELLA e SILVA, 1986). Estas falhas podem causar danos diretos devido a incêndios, poluição ambiental ou explosão na área da subestação, ou em áreas adjacentes, e substituição do transformador de potência. Os danos indiretos são mais difíceis de serem avaliados, pois acarretam às indústrias ou prestadoras de serviços perda de eficiência e de produto, entre outras (NUNES JR. *ET al.*, 2003).

Em todos os processos operativos verifica-se que os equipamentos envolvidos, em um determinado momento, irão necessitar de manutenção.

Ainda hoje, a manutenção é encarada como um mal necessário, considerando-se que máquinas e equipamentos falham. O problema consiste no fato de que, se os equipamentos estiverem inoperantes, haverá perda de produção com conseqüentes prejuízos.

Principalmente nos países da América do Sul e do terceiro mundo, a escassez de recursos impossibilita a renovação e atualização dos sistemas operativos, a aquisição de novos equipamentos e a modernização de indústrias. Portanto, faz-se

necessária a realização de manutenção preventiva e preditiva para que os sistemas e equipamentos sejam mantidos nas mais perfeitas condições operacionais, para operar e para que a vida útil dos mesmos seja mantida ou ampliada (GRANATO *ET al.*, 2001).

A manutenção preventiva é uma técnica baseada na intervenção em equipamentos que consiste em corrigir previamente situações ou componentes cuja deterioração ou desgaste são conhecidos. Tem como objetivo principal reduzir a ocorrência de falhas, evitando as interrupções de funcionamento e diminuindo os custos da manutenção tradicional corretiva (GRANATO *ET al.*, 2001).

De uma forma prática, isto se traduz na substituição de partes dos equipamentos mais sujeitas ao desgaste, antes que venham a falhar, com o objetivo de garantir ou estender a vida útil de todo o sistema e evitar a ocorrência de falhas. Nos transformadores, o componente mais sujeito ao desgaste e à deterioração é o sistema papel/óleo isolante. Assim, sua vida útil está diretamente relacionada à vida do isolamento sólido aplicado sobre as espiras. Uma vez perdido este isolamento, a tarefa básica do transformador não será mais executada e o reparo necessário consistirá no re-isolamento total das bobinas. Portanto, a manutenção preventiva destes equipamentos não consiste na substituição periódica do papel isolante, devido ao alto custo desta operação (FERNANDES, 1988).

Nos transformadores, a manutenção preventiva consiste em minimizar os fatores que aceleram o envelhecimento do papel isolante, como calor, água e compostos ácidos. Visa, também, aperfeiçoar as condições de operação dos transformadores de forma a reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas. Ou seja, manter o meio isolante livre de impurezas que possam prejudicar o desempenho do transformador (GRANATO *ET al.*, 2001).

Pode-se dizer que a principal ação de manutenção preventiva para transformadores consiste em proteger o papel isolante destes fatores agressivos. O desgaste químico deste material isolante é, normalmente, monitorado por ensaios físico-químicos em laboratórios especializados, sendo este acompanhamento realizado por praticamente todas as concessionárias do setor elétrico. O resultado obtido nestes ensaios permite uma tomada de decisão quanto ao processo a ser utilizado para a remoção destes contaminantes. Estes processos normalmente são: secagem, filtração, regeneração ou troca do líquido isolante.

Nos transformadores elétricos isolados a óleo a inspeção direta de seus componentes não é possível sem a retirada de operação dos equipamentos. Já que

isto é exatamente o que se procura evitar pela manutenção, é necessário um procedimento indireto.

Durante a operação dos transformadores, o líquido isolante estará circulando em seu interior, em contato com todos os demais componentes do equipamento. Assim, quando ocorre uma falha em qualquer uma de suas partes, isto será indicado no líquido isolante.

A manutenção preditiva nos transformadores, portanto, baseia-se no acompanhamento periódico e sistemático deste líquido isolante. Qualquer variação que não seja consequência do envelhecimento normal do produto será uma indicação da existência de falha incipiente no transformador. (DUVAL, 1989).

São bastante conhecidos a eficiência técnica e o retorno financeiro deste monitoramento, garantindo eficácia na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

O setor elétrico nacional dispõe de metodologia de monitoramento programado do OMI, baseada na realização de ensaios normatizados, visando avaliar parâmetros indicadores da boa funcionalidade e da eficiência do sistema isolante óleo/papel, servindo também como indicadores do estado geral do equipamento no qual o fluido se encontra (MORAIS, 1990). Estes parâmetros subsidiam informações para a tomada de decisão visando à manutenção preventiva e preditiva.

2.1.5 Mecanismos de Envelhecimento do Sistema Isolante de Transformadores

O OMI em serviço, usado em equipamentos elétricos como transformadores, está sendo continuamente deteriorado, sofrendo um processo de envelhecimento, devido às reações de oxidação. Estas reações que podem ser aceleradas pela presença de compostos metálicos (materiais presentes na construção, como cobre e outros, sendo que estes agem como catalisadores), oxigênio, alto teor de água e calor excessivo que conduzem à formação de produtos de oxidação (LIPSHEIN, 1970; MARTINS DE SOUZA, 2003; WYKROTA, 2004).

Como consequência, há deterioração das propriedades isolantes do óleo e os seus produtos promovem a aceleração do processo de degradação da celulose, podendo ocorrer mudanças de cor no óleo, formação de compostos ácidos e em um estágio mais avançado da oxidação, precipitação de borra. Tais alterações podem levar ao comprometimento do equipamento (LIPSHEIN, 1970; BATISTA, 2005;

MARTINS DE SOUZA, 2003).

A presença de oxigênio atua como poderoso agente acelerador da degradação do óleo e/ou do papel. A atuação de um sistema de preservação do equipamento é importante para isolar a umidade e o oxigênio provenientes do ar atmosférico do sistema papel-óleo (NUNES JR., 2003).

A temperatura de funcionamento do transformador está ligada diretamente à sua aplicação de carga, portanto, é inerente ao equipamento (WYKROTA, 2004).

Normalmente, o óleo deteriorado é aquele que apresenta produtos resultantes de sua oxidação, enquanto que o óleo contaminado é aquele que apresenta água e outras substâncias estranhas que não fazem parte de sua composição.

O processo de degradação do OMI pode ser apresentado em três fases distintas. A fase inicial caracteriza-se pela formação de peróxidos quimicamente instáveis, os quais liberam oxigênio e formam os compostos oxi-celulósicos com o papel isolante. A fase intermediária caracteriza-se pela formação de gases e na fase final, a formação de borra, que geralmente consiste em uma substância resinosa resultante da polimerização a partir de ácidos e outros compostos (SILVA, 2001).

O processo que rege a oxidação dos hidrocarbonetos é o mecanismo de peroxidação, mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Reação em cadeia da degradação do OMI.

Descrição da Reação	Reação
Formação de radical livre	$R-H \xrightarrow{O_2} R^*$
Formação de radical peróxido	$R^* + O_2 \longrightarrow R-O-O^*$
Formação de hidroperóxido	$R-O-O^* + R'-H \longrightarrow R-O-O-H + R'^*$
Transformação de hidroperóxido em radical peróxido	$ROOH + 1/2O_2 \longrightarrow ROO^* + ^*OH$

Fonte: WYKROTA, 2004.

As quatro etapas mostradas na Tabela 1 constituem uma reação em cadeia. Estas possuem a característica de que sua velocidade é uma função exponencial do tempo, para uma dada temperatura. Após a formação dos hidroperóxidos, muitos

produtos de oxidação são formados. Estes diferem de acordo com a espécie do hidroperóxido que lhe deu origem, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Produtos de oxidação em função do hidroperóxido de origem.

Descrição da Reação	Reação
Formação de álcool e cetona a partir de hidroperóxido terciário	$ \begin{array}{c} \text{R} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{OOH} \\ \\ \text{R} \end{array} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{c} \text{R} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{COOH} + \text{O}^* \\ \\ \text{R} \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{R} \\ \\ \text{R} \end{array} + \text{R}-\text{OH} $
Formação de cetona e ácido carboxílico a partir de hidroperóxido secundário	$ \begin{array}{c} \text{R} \\ \diagdown \\ \text{CH}-\text{OOH} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{R} \\ \\ \text{R} \end{array} + \text{H}_2\text{O} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{OH} \end{array} + \text{RH} $
Formação de aldeído e ácido carboxílico a partir de hidroperóxido primário	$ \text{R}-\text{CH}_2-\text{OOH} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} + \text{H}_2\text{O} \begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{OH} \end{array} + \text{H}_2 $

Fonte: WYKROTA, 2004.

Estes álcoois, aldeídos e cetonas, produtos intermediários da oxidação, na presença de oxigênio permitem a formação de ácidos carboxílicos (LIPSTEIN, 1970).

O aumento da acidez do óleo, decorrente de sua deterioração, favorece a reação deste com os metais e principalmente os produtos orgânicos tais como o papel isolante usado na fabricação do transformador, contribuindo para a formação de radicais livres. A água formada contribui para manter a sequência do processo de deterioração do óleo isolante (MYERS, 1982; BIELLA e SILVA, 1986; WYKROTA, 2004).

2.1.6 Regeneração do OMI

Dependendo da condição do OMI em uso, este pode ser substituído por fluido novo, tratado com termo-vácuo ou regenerado.

A substituição do OMI é uma ação corretiva que se aplica quando o OMI apresenta elevado grau de degradação ou contaminado por compostos polares. Neste caso, o OMI envelhecido ou contaminado pode ser substituído por OMI novo ou regenerado, desde que este último apresente as características físico-químicas de OMI novo.

O tratamento termo-vácuo é uma ação corretiva aplicada quando o OMI apresenta elevado teor de água e/ou partículas que causam diminuição de sua rigidez dielétrica. Com este tratamento, há elevação na rigidez dielétrica, uma vez que os contaminantes (água e partículas) são reduzidos a valores adequados, e também, redução no teor de gases dissolvidos (BATISTA, 2005).

A regeneração do OMI é uma ação corretiva que se aplica quando o OMI apresenta baixa tensão interfacial e/ou elevado índice de neutralização. Um OMI regenerado apresenta, normalmente, tensão interfacial e índice de neutralização próximos ou iguais ao de OMIs novos. Ou seja, após a regeneração o OMI recompõe as características de OMI novo. Neste processo, o OMI é percolado por um agente adsorvente (bauxita, atapulgita ou terra Füller), no qual ficam retidos a maioria dos compostos polares, gerando, ao final, um OMI com características físico-químicas próximas às de um OMI novo, porém, com um decréscimo na sua estabilidade à oxidação. Para aumentar a estabilidade à oxidação é adicionado o antioxidante sintético di-terc-butil-*p*-cresol (DBPC), normalmente na concentração de 0,3% (m/m). Após esta etapa o OMI é submetido ao acondicionamento por termo-vácuo, para retirada de umidade e gases dissolvidos (GRANATO *ET al.*, 2001).

Além da regeneração do OMI, também, pode ser realizado o tratamento do núcleo do transformador, que contém basicamente cobre e papel. A secagem do núcleo (*Hot Oil Spray*) é uma ação corretiva que se aplica quando o papel do isolamento sólido do transformador está contaminado com elevado teor de água. Este tratamento é indicado para os casos nos quais o equipamento elétrico não pode ser deslocado para manutenção em fábrica (BATISTA, 2005).

Atualmente, existem no mercado nacional vários sistemas utilizados para a regeneração do OMI, alguns desenvolvidos pelas próprias concessionárias de energia

elétrica (Figuras 4 e 5) e outros que são comercializados por empresas especializadas, sendo necessária apenas a substituição do agente adsorvente.



Figura 4. Sistema de regeneração de OMI.

Fonte: JUNIOR *ET al.*, (2006).



Figura 5. Sistema de regeneração “on-line” de OMI em transformador energizado.

Fonte: JUNIOR *ET al.*, (2006).

Após o processo de regeneração, o agente adsorvente impregnado com produtos de oxidação, OMI e umidade, gera um resíduo que deverá ser destinado de forma correta, em aterros industriais. Mas, existem também, equipamentos capazes de recuperar este agente adsorvente aumentando a sua vida útil. O Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) desenvolveu em 2004, para a Manaus Energia, um processo de recuperação do agente adsorvente (STOCCO *ET al.*, 2004).

Atualmente o LACTEC está desenvolvendo um segundo processo, para a ENERGISA, no qual as etapas de regeneração, de secagem do OMI e de recuperação do agente adsorvente são realizadas em um único equipamento, este processo gera uma pequena quantidade de resíduos que são basicamente os compostos de oxidação que ficaram retidos no agente adsorvente. (STOCCO *ET al.*, 2009).

2.1.7 Óleo Vegetal

O Brasil ocupa uma posição privilegiada tanto em termos de biodiversidade quanto em capacidade de gerar recursos renováveis em grande escala. É detentor de uma grande extensão territorial e é o país de maior biodiversidade mundial, rico em oleaginosas, sendo a soja a primeira colocada na produção de oleaginosas no Brasil, como pode ser visto na Tabela 3 (TULIO, 2008).

Tabela 3. Produção anual brasileira de óleo (mil ton).

Espécie	2002	2003	2004	2005	2006	% em 2006
Soja	4.937,0	5.387,0	5.571,0	5.549,0	5.709,0	88,90
Algodão	195,7	217,0	268,4	251,2	270,8	4,22
Dendê	118,0	129,0	140,0	147,0	152,0	2,37
Girassol	55,7	62,1	74,6	76,2	78,6	1,22
Milho	45,9	55,0	63,6	65,6	68,0	1,06
Mamona	40,1	39,7	60,8	68,1	69,8	1,09
Canola	16,9	20,4	22,8	24,0	26,2	0,41
Amendoim	28,1	21,8	21,8	22,3	23,8	0,37
Palmiste	13,3	14,5	15,8	17,0	19,2	0,30
Linhaça	1,7	2,0	2,1	2,2	2,2	0,03
Coco	1,9	1,9	1,9	2,0	2,1	0,03
Total	5.454,3	5.950,4	6.242,8	6.224,6	6.421,7	100,00

Fonte: Gazzoni, (2007) *apud*: Yamaoka, (2007).

O Brasil, sob o ponto de vista de mercado de óleos vegetais, pode ser caracterizado como um país com a “monocultura de soja” (Figura 6). No caso do

dendezeiro, onde se têm as maiores áreas disponíveis para plantio, a produção é irrelevante. Por não ser suficiente para atender o mercado interno, a importação em 2006 foi de 40% em relação à produção nacional. O Brasil importa sistematicamente óleo de palma, palmiste, girassol e canola e precisa estimular a ampliação destas culturas (KALTNER, 2007).

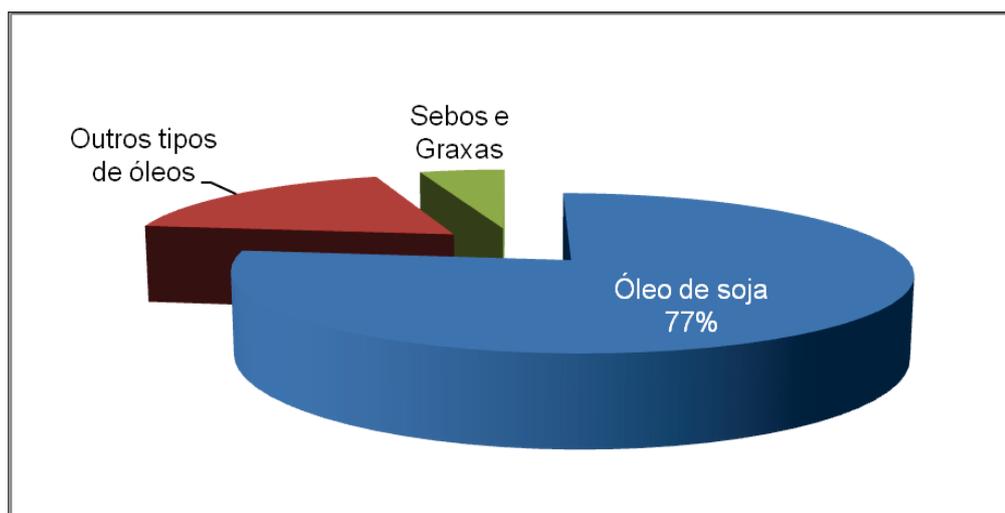


Figura 6. Gráfico que sintetiza a produção de óleos e gorduras no Brasil durante o ano de 2007.

Fonte: COELHO Jr., (2007.)

A produção mundial de óleos vegetais e gorduras em 2007 foi de 147 milhões de toneladas. Deste total, 113,6 milhões de toneladas são óleos vegetais. O mercado cresce continuamente a taxas de, aproximadamente, 5% ao ano e, no ano de 2007, o aumento da produção foi de 6,5 milhões de toneladas, como mostrado na Figura 7 (KALTNER, 2007).

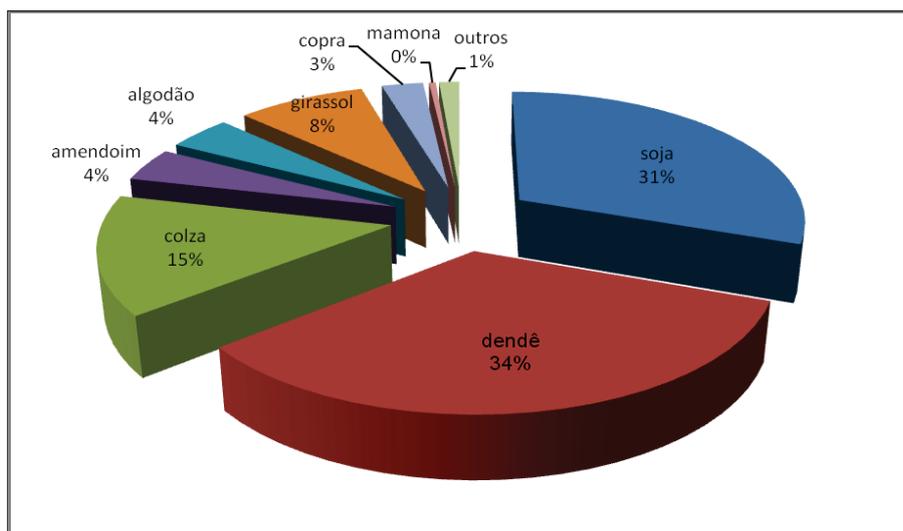


Figura 7. Gráfico que sintetiza a Produção Mundial em 2007 de Óleos Vegetais em toneladas.

Fonte: COELHO Jr., (2007)

No mundo, somente três plantas oleaginosas são produzidas em larga escala e têm importância no mercado internacional de óleos vegetais: a palma africana ou dendezeiro, a soja e a colza. Estas três representam, aproximadamente, 80% da produção total de óleos vegetais, que em 2007 foi de 113,6 milhões de toneladas. É importante registrar que a produção de óleo de palma/palmiste representou 34% da produção total, mas ocupou somente 4% das áreas agrícolas dedicadas à produção de óleos vegetais (KALTNER, 2007), conforme mostrado na Figura 8

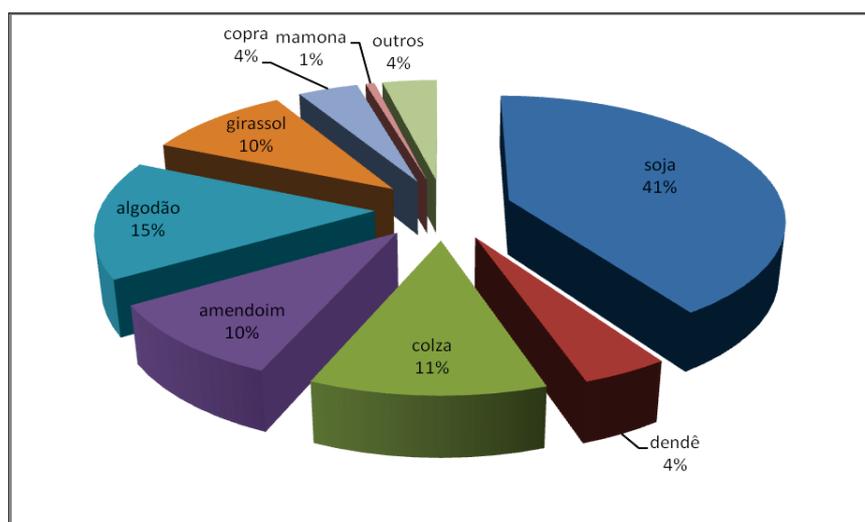


Figura 8. Gráfico que sintetiza a área plantada, em hectares, de produtos vegetais que produzem, como subprodutos ou não, óleos vegetais.

Fonte: COELHO Jr., 2007

Os óleos vegetais são obtidos a partir dos grãos, por processos de descortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente. Ao final deste processo, tem-se o óleo bruto. Este óleo passa, então, pelos processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização, obtendo-se o óleo refinado (MORETTO e FETT, 1998).

Os óleos vegetais são substâncias insolúveis em água, formadas predominantemente por triacilgliceróis. O triacilglicerol é um éster (Figura 9), oriundo da reação de condensação entre as três hidroxilas do glicerol com ácidos graxos (MORETTO e FETT, 1998). Trata-se de uma molécula com uma fração polar (éster) e outra apolar (cadeia hidrocarbônica ou unidades acila). Ou seja, a composição química do OVI é diferente da composição química do OMI (TULIO, 2008).

Na sua composição, o éster natural é formado do óleo de sementes/grãos ou da fruta mais os aditivos para melhorar e adequar o produto final. Também podem ser constituídos por uma mistura de tri, di e monoacilgliceróis, ácidos graxos livres, glicolípídios, fosfolípídios, esteróis e outras substâncias. A maior parte destes constituintes é oxidável em diferentes graus, sendo que os ácidos graxos insaturados são as estruturas mais susceptíveis ao processo oxidativo. Estes são susceptíveis a diversos tipos de transformações químicas que se processam ao longo da fase de extração, durante o transporte ou na estocagem (TULIO, 2008).

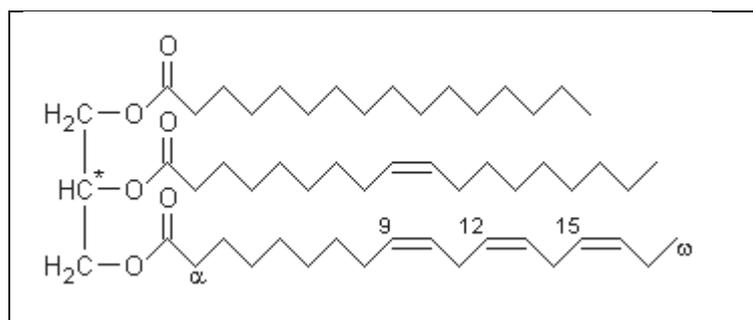


Figura 9. Representação esquemática de um triacilglicerol, componente majoritário do OVI.

As unidades acila presentes no triacilglicerol podem conter de 4 a 30 átomos de carbono, dependendo do ácido graxo que lhe deu origem. Estas unidades acila podem ser saturadas ou insaturadas. O número de insaturações pode variar entre 1 e 6. Normalmente, são encontrados ácidos graxos saturados, que contém de 8 a 22 átomos de carbono; com uma insaturação, que contém de 10 a 22 átomos de carbono

e com duas e três insaturações, cuja maioria contém 18 átomos de carbono, conhecidos como ácidos linoleico e linolênico, respectivamente (TULIO, 2008).

Com relação ao percentual de cada unidade acila, existe uma composição típica para cada tipo de óleo (Tabela 4). O óleo de soja é caracterizado pela presença das unidades provenientes dos ácidos linoleico (64,0%), oleico (20,0%), palmítico (11,0%), linolênico (3,0%) e esteárico (2,0%). A presença do elevado teor de compostos insaturados, com destaque à presença de cerca de 3 % da unidade derivada do ácido linolênico, torna este óleo bastante susceptível à oxidação. Enquanto o óleo de girassol é caracterizado pela presença das unidades provenientes dos ácidos linoleico (65,2%), oleico (23,2%), palmítico (6,4%), linolênico (0,2%) e esteárico (3,6%) (TULIO, 2008).

Tabela 4. Composição química de alguns dos principais óleos vegetais.

Fonte	Ácido graxo que deu origem as unidades acila do triacilglicerol (%)						
	Láurico	Mirístico	Palmítico	Esteárico	Oléico	Linoléico	Linolênico
Coco	45,0	20,0	5,0	3,0	6,0	-	-
Oliva	-	-	14,6	-	75,4	10,0	-
Amendoim	-	-	8,5	6,0	51,6	26,0	-
Algodão	-	-	23,4	-	31,6	45,0	-
Milho	-	-	6,0	2,0	44,0	48,0	-
Linho	-	3,0	6,0	-	-	74,0	17,0
Soja	-	-	11,0	2,0	20,0	64,0	3,0
Girassol	-	-	6,4	3,6	23,2	65,2	0,2

Fonte: Adaptado de Alsberg e Taylor () por TULIO (2008).

2.1.8 Óleo Vegetal Isolante (OVI)

Experimentos utilizando óleos vegetais como dielétrico foram conduzidos na mesma época de realização dos primeiros testes com OMI. Porém, os óleos vegetais demonstraram ser menos atrativos que o mineral devido à sua estabilidade à oxidação, ponto de fluidez, permissividade e viscosidade distintas (MCSHANE, 2002).

Com o aumento da demanda por opções viáveis ao OMI, as pesquisas se intensificaram e foram avaliadas diversas misturas de óleos de classe comestível.

A utilização de óleos vegetais como fluidos isolantes (OVIs) iniciou com a substituição do OMI (*retrofilling* ou reenchimento) em transformadores em operação. O primeiro teste, sob este enfoque, foi realizado em dois transformadores de 225kVA, tipo *pad-mounted*, alimentando fornos, instalados no início de 1970, sujeitos a um carregamento contínuo com 80% da corrente nominal (MCSHANE, et. al., 2003).

Em 1993, a indústria de óleos sintéticos, Cooper Power Systems, avaliou duas dúzias de misturas e óleos de classe comestível. Alguns desses óleos continham uma alta porcentagem de ácidos graxos não saturados, que resultam baixa viscosidade e melhores propriedades a baixas temperaturas. Outros óleos tinham uma grande porcentagem de tipos saturados, que são melhores quanto à estabilidade à oxidação. Era preciso equilibrar com cuidado a proporção entre os dois tipos de óleos. Assim, após ser encontrada a melhor forma de equilibrá-los, iniciou-se o passo seguinte: melhoria da oxidação e ponto de fluidez (COOPER, 2004).

Em 1994, esta mesma indústria, *Cooper Power Systems*, iniciou a seleção de aditivos para melhoria de desempenho e estabilidade à oxidação e diversos materiais de classe comestível foram incluídos nos estudos de aditivos. Após a conclusão de testes de envelhecimento acelerado em pequena escala, foram determinadas a combinação e a quantidade de aditivos. Assim, no final, era possível usar materiais de classe comestível exclusivamente para os aditivos e ésteres básicos selecionados (McSHANE e MARTINS, 2006).

Impulsionados, principalmente, pela questão ambiental que tem sido motivo de preocupação da comunidade mundial de forma crescente, foram desenvolvidos, por volta de 1999, óleos vegetais apropriados para uso em equipamentos elétricos (LEWAND, 2004).

O primeiro produto comercial lançado no mercado foi o Biotemp®, cuja patente foi requerida nos Estados Unidos da América (EUA), em setembro de 1999, pela empresa ABB, sendo o produto desenvolvido em seu laboratório de transformadores. O fluido base usado foi o óleo de girassol obtido a partir de sementes geneticamente selecionadas, contendo um teor de ácido oléico superior a 80% (OOMMEN, 2002).

Também, foram concedidas outras patentes referentes ao desenvolvimento de fluidos isolantes obtidos a partir óleos vegetais. Em final de setembro de 1999, por exemplo, foi concedida uma patente para a empresa Waverly Light & Power e, em março de 2000, para a Cooper Industries, sendo o óleo comercializado pelo nome fantasia de ENVIROTEMP®FR3™ (LEWAND, 2004).

Em outubro de 2001 a empresa Alliant Energy fez o reenchimento do primeiro transformador de potência (fabricante: Pennsylvania; dados de placa do equipamento: trifásico, 50MVA, 69kV, NBI 350kV, 7.000 galões de óleo, fabricado em 1957) com óleo vegetal isolante (MCSHANE, ET. AL., 2003).

Em 2007, foram lançados, no mercado nacional, os óleos BIOVOLT®, produzidos e comercializados a partir de uma tecnologia 100% nacional, pela empresa MINERALTEC Tecnologia em Óleos Minerais (WILHELM, 2008).

Até maio de 2007, encontravam-se em operação, na América do Sul, cerca de 410 transformadores isolados com OVI, nas tensões primárias de 440 a 230.000 V e de potência nominal entre 10 a 40.000 kVA (UHREN, 2007).

No Brasil, duas concessionárias de energia elétrica estão realizando testes utilizando o OVI em equipamentos elétricos de potência. A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) colocou em operação o primeiro transformador do mundo que funciona totalmente a OVI. A combinação do OVI com a avançada tecnologia de materiais isolantes possibilitou que esse transformador, que inicialmente foi projetado para 25 MVA em 138 kV, segundo informação da CEMIG, seja sobrecarregado até 43 MVA, durante quatro horas consecutivas, sem perda de sua vida útil. Este equipamento está em operação desde agosto de 2006, na subestação de Contagem, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (UHREN, 2007).

As Centrais Elétricas do Norte (ELETRONORTE) e a filial brasileira da estatal francesa Areva desenvolveram em conjunto o primeiro reator de 242 kV no mundo a base de OVI. Obtendo êxito, a ELETRONORTE tem interesse em colocar mais equipamentos desse porte nas linhas que atendem a região Amazônica (ELETRONORTE, 2008).

Em dezembro de 2006, a CELESC, Centrais Elétricas de Santa Catarina, instalou em Porto Belo (SC), o primeiro transformador móvel a utilizar óleo vegetal isolante no Brasil, com potência instalada de 30 MVA e tensão de 138 kV (CELESC, 2008).

A Companhia Paranaense de Energia (COPEL) também colocou em operação esta nova tecnologia no projeto da rede subterrânea de Foz do Iguaçu. O projeto da rede subterrânea de distribuição de eletricidade na Avenida Brasil, em Foz do Iguaçu (PR), incorpora algumas inovações técnicas que estão sendo introduzidas pela COPEL de forma pioneira no sistema elétrico brasileiro. Inaugurada em junho de 2006, uma delas é a adoção de transformadores que usam óleo vegetal como isolante

elétrico em lugar do óleo mineral (COPEL, 2006). A rede subterrânea da Avenida Brasil tem 18 transformadores desse tipo, com potência individual de 500 kVA e operando confinados em câmaras especiais na tensão de 13,8 kV e com saídas de 220/127 V. A rede elétrica subterrânea atende cerca de 650 consumidores, como grandes edifícios e galerias, hotéis, bancos e lojas (COPEL, 2006).

Em junho de 2009, 22 equipamentos com isolamento a óleo vegetal foram adquiridos pela Copel e instalados nas redes de distribuição, situadas justamente no entorno das nascentes do rio Cascavel. Cada um dos transformadores – que operam na tensão de 13,8 kV e com potência de 112,5 kVA – comporta em torno de 100 litros do fluido isolante ecológico, BIOVOLT A e BIOVOLT B (COPEL, 2009).

Conforme a norma ABNT NBR 15422 “Óleo Vegetal Isolante para Equipamentos Elétricos”, de junho de 2006, o OVI difere do OMI convencional e de outros fluidos resistentes ao fogo por ser um produto agrícola derivado de óleos vegetais, ou sintetizado a partir de precursores orgânicos. Esta mesma norma define ainda que, para que um óleo seja considerado “Óleo Vegetal Isolante”, ele deve conter ligações ésteres, tipicamente de triglicerídeos. Além disso, sua formulação deve ser normalmente composta por uma base derivada de óleo de sementes/grãos e aditivos para melhoria de desempenho e classificada como resistente ao fogo (ou de alto ponto de combustão); o mesmo não deve ser tóxico, bioacumulativo; e ser facilmente biodegradável.

2.1.9 Degradação do Óleo Vegetal Isolante

Wilhelm e Tulio (2009a) avaliaram a degradação de OVIs, a partir de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório. Para tanto foram realizados dois tipos de envelhecimento: o primeiro foi realizado em sistema fechado, em frascos lacrados, a 120 °C, nos quais os OVIs foram envelhecidos na presença de papel Kraft isolante e o segundo foi realizado em sistema aberto, com borbulhamento de oxigênio, em três temperaturas distintas, a saber, 70, 95 e 110°C, no qual o OVI foi envelhecido na presença de papel Kraft isolante. Os resultados obtidos mostraram que parâmetros como oxigênio, temperatura e umidade afetam a degradação dos óleos vegetais isolantes. Dependendo das condições operacionais do equipamento, da qualidade do óleo e do teor de umidade do papel Kraft isolante, a degradação dos óleos vegetais isolantes pode ocorrer via oxidação ou hidrólise, passível de monitoramento por

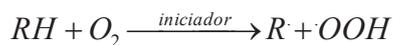
ensaios físico-químicos específicos. Estes parâmetros são mencionados na literatura como os principais agentes de degradação do óleo vegetal comestível. As características de qualidade destes óleos sempre estão correlacionadas com o fenômeno da rancidez que é, sem dúvida nenhuma, o fenômeno deteriorativo mais importante deste tipo de produto (WILHELM e TULIO, 2009a).

Existem dois tipos de degradação descritos para o óleo vegetal comestível: a hidrolítica e a oxidativa (MORETTO e FETT, 1998). Assim, segundo Wilhelm e Tulio (2009a), a degradação do OVI segue o mesmo mecanismo de degradação reportado para o óleo vegetal comestível.

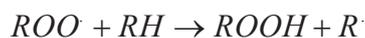
Na presença de oxigênio, sugere-se para o OVI a ocorrência preferencial da rancidez oxidativa que está diretamente relacionada com a presença de ácidos graxos insaturados, ou seja, unidades acila contendo insaturações. Trata-se da reação do oxigênio atmosférico com as duplas ligações desses ésteres, cuja reatividade aumenta com o aumento do número de insaturações na cadeia. A reação de oxidação produz peróxidos e hidroperóxidos (produtos primários). Estes compostos por uma série de reações paralelas produzem os compostos voláteis como aldeídos e cetonas (produtos secundários) (TULIO, 2008).

Na proposta de mecanismo via radicais livres (Figura 10), o processo se inicia num átomo de carbono em posição alfa do grupo acila insaturado, com formação de um radical livre, por perda de um átomo de hidrogênio (fase de indução). O radical livre reage com o oxigênio, formando o radical peróxido. Esses peróxidos podem participar das reações de decomposição e formação de novos radicais livres (fase de propagação). Quando os radicais livres reagem entre si, inicia-se a terceira fase da reação (fase terminal). Os peróxidos e hidroperóxidos podem romper formando, então, os compostos secundários (aldeídos e cetonas). A reação dos radicais livres necessita de um iniciador que pode ser energia luminosa ou metais como ferro ou cobre, por exemplo, (TULIO, 2008).

(1) Iniciação



(2) Propagação



(3) Terminação

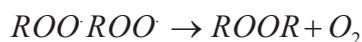
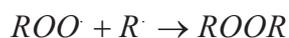
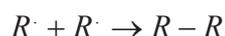


Figura 10: Etapas do processo de oxidação de óleos insaturados.

Fonte: TULIO, (2008).

Os peróxidos e hidroperóxidos produzidos pela reação de oxidação podem polimerizar com outros radicais produzindo moléculas de elevada massa molar, sedimentos insolúveis, gomas e, em alguns casos, a cadeia do ácido graxo oxidado pode quebrar, produzindo ácidos de cadeias menores e aldeídos (PRANKL e SCHINDLBAUER, 1998).

Na presença de umidade, Wilhelm e Tulio (2009a) sugerem que a degradação do OVI se dá preferencialmente pela hidrólise dos triacilgliceróis com produção de ácidos graxos livres (Figura 11).

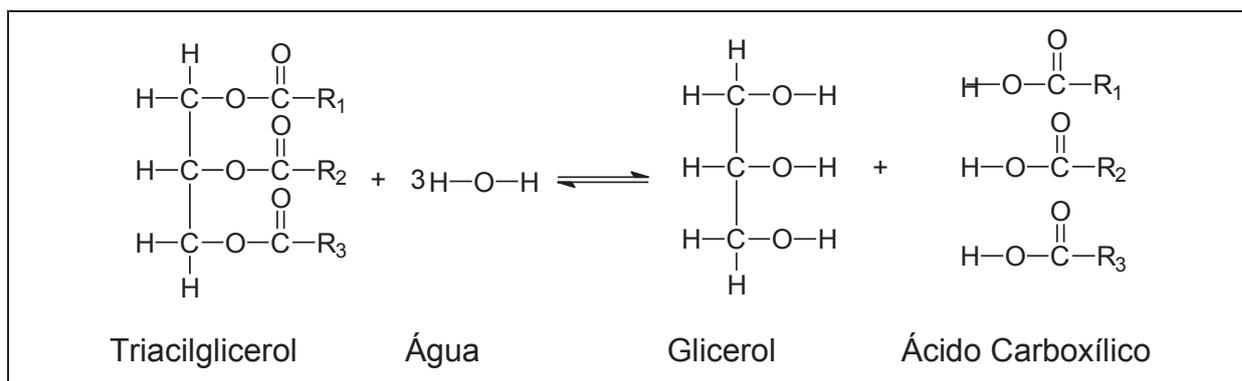


Figura 11. Formação de ácido graxo proveniente da reação de hidrólise do OVI.

Fonte: WILHELM e TULIO, (2009a).

Com os resultados obtidos, Wilhelm e Tulio (2009a) concluíram que a viscosidade, o índice de neutralização e o fator de perdas dielétricas a 90°C são

parâmetros importantes no monitoramento do envelhecimento de OVI e que devem ser inseridos nos ensaios de manutenção preventiva de equipamentos isolados com estes fluídos (WILHELM e TULIO, 2009a).

Em 14 de julho de 2008 a IEEE publicou o documento “Guia IEEE para aceitação e manutenção de fluidos de ésteres naturais em transformadores” (IEEE, 2008). Este documento contempla desde a citação e descrição dos ensaios realizados no OVI e de seu significado, até as práticas de enchimento, manuseio e de manutenção do fluido isolante durante seu uso. Valores de referência para óleos vegetais isolantes novos, após o enchimento e em uso também são apresentados nesses documentos. Os valores de referência para estes óleos estão indicados na Tabela 6, conforme a classe de tensão do equipamento. Para a regeneração dos OVI em uso, o referido guia simplesmente sugere que seja consultado o fabricante do óleo.

Em 2007 a Comissão de Estudos de Líquidos Isolantes Sintéticos e Naturais (CE-03:010.02) do Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03) iniciou a elaboração de um documento contendo as diretrizes para supervisão e manutenção de OVI em uso, em equipamentos elétricos (projeto 03:010.02-028). A elaboração do projeto foi iniciada tendo como base, na época, a 11ª versão do draft do guia da IEEE. Até o momento, este documento continua em discussão na comissão de estudo CE-03:010.02 (WILHELM e TULIO, 2009b).

Tabela 5. Diretrizes para os valores das principais propriedades de fluidos de ésteres naturais envelhecidos em serviço de acordo com a IEEE.

Teste e Método ASTM	Valor IEEE para Classe de Tensão		
	≤69 kV	>69kV e <230kV	≥ 230kV
Fator de dissipação (fator de potência), D924, a 25°C, %	≥3	≥3	≥3
Teor de água, D1533, mg/kg	≥400	≥200	≥150
Aumento da viscosidade a partir do valor no momento da energização inicial, D445, a 40°C, %	≥10	≥10	≥10
Índice de neutralização, D974, mg KOH/g	≥0,30	≥0,30	≥0,30
Ponto de fulgor, D92, °C	≤275	≤275	≤275
Cor, ASTM D1500	≥1,5	≥1,5	≥1,5

Fonte: C57.147 IEEE, (2008).

3. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1. MATERIAIS

Neste trabalho foi utilizado um OVI disponível no mercado nacional. Este OVI foi identificado neste estudo como OVI Comercial.

Para o desenvolvimento da pesquisa, uma concessionária de energia elétrica forneceu aproximadamente 50 L de OVI, de fabricante não identificado, que foi retirado, segundo informações da concessionária, de uma chave religadora de 13,8 kV em funcionamento por 8 meses. Este OVI foi identificado neste estudo como Amostra de OVI do Religador.

Neste trabalho foram utilizados 5 diferentes agentes adsorventes nos testes de regeneração, identificados por 1, 2, 3, 4 e 5. O agente adsorvente 1, de granulometria 30/60 mesh, foi gentilmente cedido pela MINERALTEC Tecnologia em Óleos Minerais. Os agentes adsorventes 2 e 3, de granulometria de 8/16 mesh e 30/60 mesh, respectivamente, foram gentilmente cedidos pela Copel Distribuição S.A. Os agentes adsorventes 4 e 5, de granulometria 200 mesh, foram adquiridos junto à empresa Grace Davidson. Os agentes adsorventes 1, 2 e 3 são basicamente alumossilicatos, largamente utilizados na indústria petroquímica, na clarificação de parafinas e querosene de aviação. Outra aplicação importante tem sido na regeneração de OMI utilizado em transformadores. Os agentes adsorventes 4 e 5 são utilizados na indústria de óleos vegetais, como clarificante e como adsorvente de compostos ácidos presentes no óleo bruto.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Caracterização dos Agentes Adsorventes e dos OVIs

Os agentes adsorventes foram avaliados em relação à umidade, por meio de um analisador de umidade por infravermelho, marca Gehaka, modelo IV2002.

O OVI Comercial foi caracterizado em laboratório, por análises físico-químicas, de acordo com a norma ABNT NBR 15422 (Tabela 6).

Tabela 6. Características do OVI Comercial novo.

Características	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado
Aspecto visual	-	visual	O óleo deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máx.
Densidade relativa a 20/4°C	-	ABNT NBR 7148	0,96 máx.
Viscosidade cinemática 20°C 40°C 100°C	cSt	ABNT NBR 10441	150 máx. 50 máx. 15 máx.
Ponto de fulgor	°C	ABNT NBR 11341	275 mín.
Ponto de combustão	°C	ABNT NBR 11341	300 mín.
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 10 máx.
Rigidez dielétrica Eletrodo de disco Eletrodo de calota	kV	ABNT NBR 6869 ABNT NBR IEC 60156	30 mín. 42 mín.
Rigidez dielétrica a impulso	kV	ASTM D 3300	130 mín.
Fator de perdas dielétricas 25°C 90°C 100°C	%	ABNT NBR 12133	0,20 máx. 3,6 máx. 4,0 máx.
Enxofre corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo
Índice de neutralização	mg KOH/g de óleo	ABNT NBR 14248	0,06 máx.
Teor de água	mg/kg	ABNT NBR 10710 - Método B	200
Bifenila policlorada (teor de PCB)	mg/kg	ABNT NBR 13882 - Método B	Não detectável

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15422, (2006).

A amostra de OVI do Religador foi caracterizada de acordo com os ensaios e normas contidas na Tabela 7.

Tabela 7. Ensaio físico-químicos realizados na Amostra de OVI do Religador.

Ensaio	Método
Índice de Neutralização	ABNT NBR 14248
Teor de Água	ABNT NBR 10710
Cor	ABNT NBR 14483
Densidade a 20 °C	ABNT NBR 14065
Fator de Potência a 20 °C	ABNT NBR 12133
Fator de Potência a 100 °C	ABNT NBR 12133
Índice de Refração a 20 °C	ASTM D 1218-92
Ponto de Fulgor	ABNT NBR 11341
Ponto de Combustão	ABNT NBR 11341
Rigidez Dielétrica	ABNT NBR 6869
Viscosidade Cinemática a 20 °C	ABNT NBR 10441
Viscosidade Cinemática a 40 °C	ABNT NBR 10441
Enxofre Corrosivo	ABNT NBR 10505
Estabilidade a Oxidação a 130 °C	EN 14112

3.2.2. Envelhecimento Acelerado do OVI Comercial

Para o desenvolvimento deste estudo não foram encontrados OVIs em uso que apresentassem condições de regeneração, pois os equipamentos que estão operando com este tipo de fluido têm, no máximo, 5 anos de uso.

Diante deste fato, foi necessária a simulação em laboratório de envelhecimentos acelerados no OVI para que o mesmo obtivesse características que indicassem a necessidade de regeneração deste fluido.

Foram realizados dois tipos de envelhecimentos acelerados do OVI por 2 métodos distintos, denominados de método 1 e método 2, para promover preferencialmente a degradação hidrolítica e oxidativa, respectivamente.

3.2.2.1 Envelhecimento do OVI pelo método 1

Para o envelhecimento do OVI pelo método 1 foi utilizado um banho termostático, aberto, com capacidade para 80 L. O equipamento operou a

temperatura de 95°C. Este banho foi preenchido com OVI Comercial. Amostras de 100 mL do OVI foram retiradas com 17, 35, 48 e 64 dias de operação do banho, para monitorar a degradação do óleo por meio dos ensaios de índice de neutralização e viscosidade cinemática a 40°C.

Os ensaios de índice de neutralização e de viscosidade cinemática a 40°C foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR 14248 e ABNT NBR 10441, respectivamente.

3.2.2.2 Envelhecimento do OVI pelo método 2

Para o envelhecimento do OVI pelo método 2 foram utilizados 6 recipientes abertos com capacidade para 6 L cada.

Cada recipiente foi preenchido com o óleo OVI Comercial e introduzido neste papel Kraft com teor de umidade de $\approx 5\%$, com intuito de favorecer a degradação do óleo pelo mecanismo da hidrólise dos triacilgliceróis (TULIO, 2008). Com isto, esperava-se um aumento mais significativo no índice de neutralização em relação à viscosidade cinemática.

Estes recipientes foram colocados em estufa a 120°C, sendo utilizados como parâmetros de acompanhamento do grau de degradação, os ensaios de índice de neutralização (ABNT NBR 14248) e viscosidade cinemática a 40°C (ABNT NBR 10441).

3.2.3. Regeneração dos OVIs envelhecidos

O processo de regeneração de óleos pode ser realizado de duas maneiras, a primeira e a mais difundida é realizada por meio da percolação do óleo por um leito do agente adsorvente seco, denominada neste trabalho de “regeneração por percolação” (processo contínuo), e a segunda por meio da adição do agente adsorvente ao óleo, denominada neste trabalho de “regeneração por contato” (processo por batelada).

Primeiramente, foram realizados testes de “regeneração por contato” para o óleo OVI Comercial novo, com o intuito de verificar a influência dos agentes adsorventes nas características físico-químicas do óleo.

Na sequência foram realizados testes de “regeneração por contato” para óleo

OVI Comercial previamente envelhecido pelos métodos 1 e 2. Também foram realizados, testes de “regeneração por percolação” para a amostra de óleo coletada do religador, denominada neste trabalho de Amostra de OVI do Religador.

3.2.3.1. Regeneração por Contato do OVI Comercial

Foram realizados 5 testes de “regeneração por contato”, em cada amostra de óleo (OVI Comercial novo, OVI Comercial envelhecido pelos métodos 1 e 2), variando o agente adsorvente (adsorventes 1 a 5), para determinar qual seria o agente adsorvente, que não alterasse as propriedades físico-químicas do OVI.

Em erlenmeyer de 2 L fechado, foram acondicionados 100 g do agente adsorvente e 1000 mL do óleo a regenerar. Este erlenmeyer foi colocado sob agitação constante magnética por 4 horas. Na sequência, esta mistura heterogênea foi filtrada a vácuo em papel 3 µm, para separar o agente adsorvente do óleo tratado.

Após os processos de “regeneração por contato” foram realizados no óleo os ensaios físico-químicos de índice de neutralização (ABNT NBR 14248), fator de potência a 100°C (ABNT NBR 12133) e viscosidade cinemática a 40°C (ABNT NBR 10441).

3.2.3.2 Regeneração por percolação da amostra do OVI do Religador

Os testes de percolação pelo leito de agente adsorvente foram realizados em um sistema protótipo percolador, construído em aço inoxidável, com capacidade aproximada para 2 kg de agente adsorvente, este protótipo foi alimentado com uma bomba a vácuo, com fluxo ascendente e a temperatura ambiente. (Figura 12).

No topo da coluna percoladora foi conectada uma mangueira até um kitassato de 2 L e neste kitassato foi aplicado vácuo (Figura 12).

Foi utilizado o adsorvente 1 nestes testes. Foram realizadas 3 passagens do óleo pelo adsorvente, denominadas de Ciclo 1, Ciclo 2 e Ciclo 3.

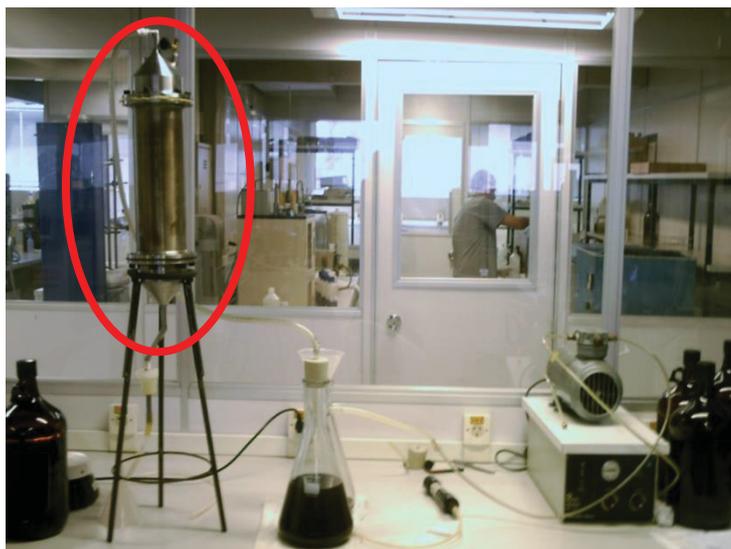


Figura 12: Sistema protótipo percolador.

Fonte: O Autor, 2009.

3.2.3.3 Ensaios físico-químicos realizados no OVI para avaliar o processo de regeneração testado

Para avaliar a eficiência do processo de regeneração, seja por contato ou percolação, foram realizados os seguintes ensaios físico-químicos no OVI em tratamento: viscosidade cinemática a 40°C (ABNT NBR 10441), índice de neutralização (ABNT NBR 14248) e fator de perdas dielétricas a 90°C (ABNT NBR 12133).

A viscosidade cinemática expressa em cSt, mede a resistência ao escoamento de um óleo. A viscosidade do fluido isolante deve ser tal, que permita a convecção do óleo dentro do equipamento elétrico, a fim de facilitar a troca do calor gerado pelas perdas do equipamento com o meio ambiente (TULIO, 2008).

As perdas dielétricas, expressas em %, são as medidas das perdas em um líquido isolante quando este é submetido a um campo elétrico alternado. Sob o ponto de vista elétrico, as perdas dielétricas correspondem à medida do $\cos \varphi$ ou $\operatorname{tg} \delta$, ou seja, quanto maior estes valores, maiores serão as perdas. Sob o ponto de vista químico, é a medida da corrente dissipada pelo óleo, que está relacionada indiretamente com os produtos polares, polarizáveis e partículas (metálicas ou não). A medida das perdas dielétricas em um material isolante está relacionada com a quantidade de energia dissipada pelo material sob a forma de calor (TULIO, 2008).

O índice de neutralização, expresso em mg KOH/g de óleo, é a medida da quantidade necessária de base (KOH) para neutralizar os constituintes ácidos presentes em 1 g de óleo. No óleo novo, tanto no mineral como no vegetal, podem ser encontrados alguns compostos de caráter ácido, provenientes do petróleo básico ou do óleo vegetal bruto. Portanto, este ensaio é um indicativo da qualidade do refino, já que os compostos indesejáveis presentes no óleo devem ser retirados neste processo. Pode indicar, ainda, contaminação proveniente de manuseio, transporte e armazenamento indevido do óleo (TULIO, 2008).

3.2.4. Adição de aditivos antioxidantes aos OVIs regenerados

Após a regeneração por percolação da Amostra do OVI do Religador, foram utilizadas amostras deste óleo regenerado e adicionados aditivos antioxidantes, denominados neste trabalho de 2, 6-di-terc-butil-p-cresol (DBPC), terc-butil-hidroquinona (TBHQ) e uma mistura de DBPC e TBHQ.

Por não se polimerizar e não interferir nas características dielétricas do OMI, o DBPC é usado como inibidor de oxidação em óleos minerais. O DBPC é um fenol tri-substituído com bloqueamento estérico. Não reage em condições ambientes com ácidos, aldeídos, glicóis ou ésteres e tem alto grau de estabilidade quando exposto a luz, calor e ar, e a ação de radicais livres, sendo, portanto, antioxidante eficaz (OLIVEIRA *ET al.*, 2005).

O TBHQ é um pó cristalino branco e brilhoso, moderadamente solúvel em óleos e gorduras e não se complexa com íons de cobre e ferro, como o galato. É considerado, em geral, mais eficaz em óleos vegetais que butil-hidroxianisol (BHA) ou butil-hidroxitolueno (BHT); em relação à gordura animal, é tão efetivo quanto o BHA e mais efetivo que o BHT ou o propil galato (PG). O TBHQ é considerado também o melhor antioxidante para óleos de fritura, pois resiste ao calor e proporciona uma excelente estabilidade para os produtos acabados. Ácido cítrico e TBHQ apresentam excelente sinergia em óleos vegetais. (RAMALHO e JORGE, 2006).

As amostras de OVI regeneradas e aditivadas foram analisadas pelo método do Rancimat (BS EN 14112/2001) para avaliar sua estabilidade à oxidação. O período de permanência de óleos e gorduras vegetais em prateleira é determinado a partir da estabilidade à oxidação, determinada pelo método condutivimétrico (WILHELM e STOCCO, 2007). Na força tarefa de “Óleos vegetais isolantes” (FT – 02) do grupo de

trabalho de líquidos isolantes GT D1.01 do CIGRÉ foi apresentado um relatório técnico em que foi utilizado o método condutivimétrico para avaliar a estabilidade a oxidação de óleos vegetais isolantes (WILHELM e STOCCO, 2007). Neste trabalho, os autores concluíram que este método condutivimétrico pode ser utilizado como ferramenta analítica para análise comparativa da estabilidade à oxidação de óleos vegetais isolantes.

Os ensaios de estabilidade à oxidação foram realizados em um aparelho Rancimat, modelo 873, a temperatura de 130°C, e vazão de oxigênio de 10 L/h.

3.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Na Tabela 8 estão relacionados os equipamentos utilizados para a caracterização dos óleos novos e óleos regenerados, para a realização dos ensaios de envelhecimento acelerado e para a caracterização dos agentes adsorventes.

Tabela 8. Equipamentos utilizados na realização deste estudo.

Ensaio	Equipamento
Umidade	Gehaka, IV 2002
Teor de água	Baur, KFM 1000
Cor	Fisher
Densidade	Anton Paar, DMA 48
Fator de perdas dielétricas	Tettex AG Instruments
Ponto de fulgor e de combustão	Solotest, Cleveland
Rigidez dielétrica	Baur, DTA
Viscosidade cinemática	Banho Precilabo Haake DL30 e coluna Schott Geräte tipo Cannon Fenske
Enxofre corrosivo	Estufa Marconi, MA 035
Ponto de fluidez	Marconi, modelo MAE 184
Estabilidade à oxidação do OVI	873 Biodiesel Rancimat, marca Metrohm
Envelhecimento acelerado	Estufa Marconi com circulação, modelo 320-SE Banho termostático Marconi, modelo MA 470

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS ISOLANTES

Foi realizada a caracterização físico-química do óleo vegetal isolante (OVI) Comercial novo, cujos resultados estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9. Caracterização físico-química do OVI Comercial novo.

Ensaio	Método (ABNT)	OVI novo
Análise visual	VISUAL	Claro e límpido
Índice de neutralização (mg KOH/g óleo)	NBR 14248	0,03
Teor de água (ppm m/m)	NBR 10710/B	35
Cor	NBR 14483	L 0,5
Densidade a 20°C (g/mL)	NBR 14065	0,9200
Fator de potência a 20°C (%)	NBR 12133	0,05
Fator de potência a 100°C (%)	NBR 12133	2,8
Ponto de fulgor (°C)	NBR 11341	319
Ponto de combustão (°C)	NBR 11341	347
Rigidez dielétrica (kV)	NBR 6869	55
Viscosidade Cinemática a 40°C (cSt)	NBR 10441	34,2
Viscosidade Cinemática a 100°C (cSt)	NBR 10441	8,2
Enxofre corrosivo	NBR 10505	Não corrosivo
Estabilidade à oxidação a 130°C (h)	EN 14112	3,3

Os resultados obtidos mostram que a amostra de OVI Comercial novo atende as especificações previstas na norma ABNT NBR 15422 para OVIs novos.

Foi realizada, também, a caracterização físico-química da amostra de OVI coletada do religador, que se encontrava, segundo a concessionária de energia elétrica em uma chave religadora de 13,8 kV, sendo os resultados dispostos na Tabela 10.

Tabela 10. Caracterização físico-química da Amostra de OVI do Religador.

Ensaio	Método (ABNT)	Amostra de OVI do Religador
Aspecto	Visual	Escuro e turvo
Índice de neutralização (mg KOH/g óleo)	NBR 14248	0,22
Teor de água (ppm m/m)	NBR 10710/B	670
Cor	NBR 14483	1,5
Densidade a 20°C (g/mL)	NBR 14065	0,9178
Fator de potência a 25°C (%)	NBR 12133	6,8
Fator de potência a 100°C (%)	NBR 12133	76,0
Ponto de fulgor (°C)	NBR 11341	267
Ponto de combustão (°C)	NBR 11341	347
Rigidez dielétrica (kV)	NBR 6869	36
Viscosidade Cinemática a 40°C (cSt)	NBR 10441	34,5
Viscosidade Cinemática a 100°C (cSt)	NBR 10441	8,4
Enxofre corrosivo	NBR 10505	Não corrosivo
Estabilidade à oxidação a 130°C (h)	EN 14112	1,5

A Amostra de OVI do Religador apresentou valor de índice de neutralização igual a 0,22 mg KOH/g de óleo, ou seja, próximo ao valor limite estipulado no guia da IEEE (Tabela 6) que prevê, para OVIs em uso, valores iguais a 0,30 mg KOH/g de óleo para equipamentos com tensão menor ou igual a 69 kV. O teor de água foi igual a 670 ppm m/m, valor este superior ao valor de 400 mg/kg (400 ppm m/m) sugerido no guia da IEEE o que indica necessidade de secagem deste óleo. Os agentes adsorventes usados neste estudo no processo de regeneração, além de capturarem em seus sítios ativos produtos de oxidação provenientes do óleo, também tem a propriedade de reter a água dissolvida no OVI.

A amostra de OVI do religador apresentou fator de potência a 25°C igual a 6,8%. O guia da IEEE (Tabela 6) sugere que seja realizada intervenção no equipamento elétrico se o OVI em uso apresentar valor igual ou superior a 3,0%. A amostra de OVI do religador apresentou um fator a 25°C aproximadamente 2 vezes superior ao valor limite sugerido no guia da IEEE, evidenciando a necessidade de regeneração desta amostra de OVI.

Segundo o guia da IEEE (Tabela 6) o valor limítrofe do ensaio de cor ASTM é igual ou superior a 1,5 para que se faça necessária a regeneração. A amostra de OVI do religador apresentou cor ASTM igual a 1,5, sendo este mais um indicativo da necessidade de regeneração ou substituição deste óleo.

Portanto, o conjunto dos resultados obtidos nos ensaios realizados na amostra de OVI coletada do religador, (Tabela 10), mostram a necessidade de regeneração ou substituição deste óleo, tendo como base os valores de referência sugeridos no guia da IEEE, apresentado na (Tabela 6) (IEEE, 2008).

Com relação à estabilidade a oxidação, a amostra de OVI coletada do religador apresentou um período de indução de 1,5 h (Tabela 10). Como a concessionária de energia não forneceu o nome do fabricante deste óleo e como a mesma não possuía em estoque amostras deste óleo, não foi possível inferir sobre o consumo do aditivo antioxidante durante o uso desse óleo no religador.

4.2 ENVELHECIMENTO ACELERADO DO OVI COMERCIAL

Na Figura 13 estão ilustrados os resultados obtidos para a o ensaio de viscosidade cinemática a 40°C das amostras de OVI coletadas durante o envelhecimento acelerado pelo método 1, conforme item 3.2.2.1. A linha pontilhada representa o valor limite sugerido no guia da IEEE para o OVI em uso (IEEE, 2008).

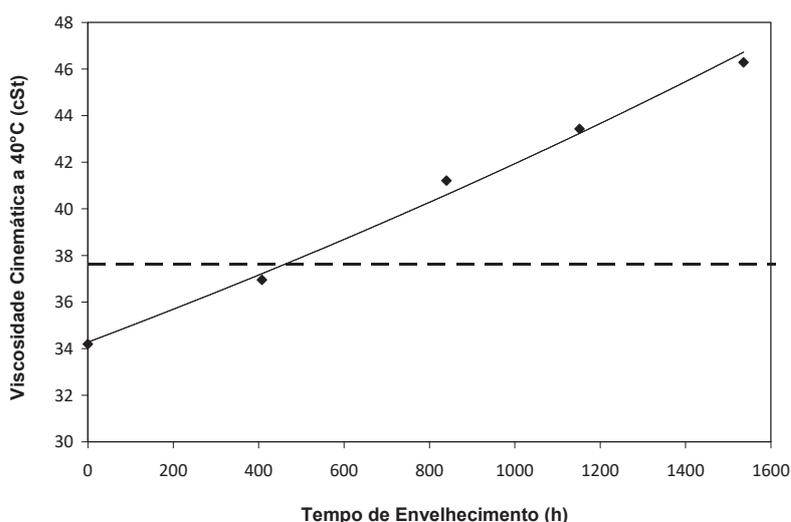


Figura 13. Viscosidade cinemática a 40°C do OVI envelhecido pelo método 1, sendo que a linha pontilhada representa o valor limite para OVI em uso sugerido no guia da IEEE.

A partir de aproximadamente 400 horas de envelhecimento (Figura 13), o OVI Comercial apresentou valores de viscosidade cinemática superiores ao valor de referência sugerido no guia da IEEE (aumento de 10% em relação ao valor original), atingindo ao final do processo uma viscosidade 35% superior ao valor original.

A Figura 14 mostra os resultados obtidos para o ensaio de índice de neutralização das amostras de OVI coletadas durante o envelhecimento acelerado pelo método 1, conforme item 3.2.2.1. Novamente, a linha pontilhada representa o valor limite sugerido no guia da IEEE para OVI em uso (IEEE, 2008). O OVI comercial envelhecido levou cerca de 1500 horas de envelhecimento para atingir o valor de referência para OVI em uso sugerido no guia da IEEE.

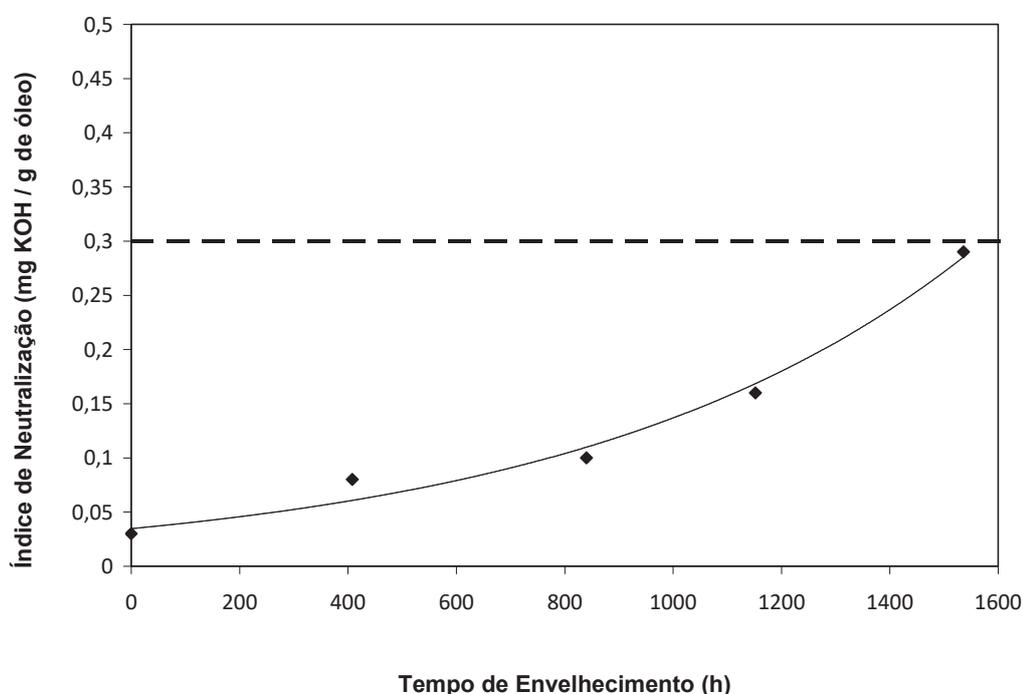


Figura 14. Índice de neutralização do OVI envelhecido pelo método 1, sendo que a linha pontilhada representa o valor limite para OVI em uso sugerido no guia da IEEE.

Os resultados obtidos (Figuras 13 e 14) mostram um aumento tanto no índice de neutralização quanto na viscosidade cinemática ao longo do tempo de envelhecimento. Este aumento significativo na viscosidade indica que o mecanismo predominante de degradação do óleo nas condições de envelhecimento utilizadas no método 1 foi o oxidativo. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Wilhelm e Tulio, 2009a.

Na Figura 15 estão ilustrados os resultados obtidos para a o ensaio de viscosidade cinemática a 40°C das amostras de OVI coletadas durante o envelhecimento acelerado pelo método 2, conforme item 3.2.2.2. Pode-se verificar que o OVI Comercial levou cerca de 800 horas de envelhecimento para atingir o valor de referência para OVI em uso sugerido no guia da IEEE (IEEE, 2008). Após este intervalo de tempo, não foi observada uma alteração significativa na viscosidade até 1400 horas.

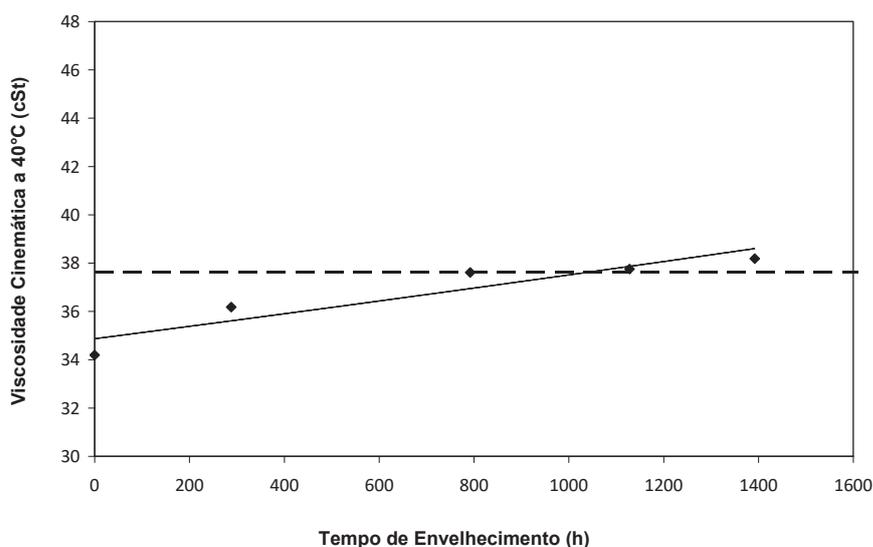


Figura 15. Viscosidade cinemática a 40°C do OVI envelhecido pelo método 2, sendo que a linha pontilhada representa o valor limite para OVI em uso sugerido no guia IEEE.

A Figura 16 mostra os resultados obtidos para o ensaio de índice de neutralização das amostras de OVI coletadas durante o envelhecimento acelerado pelo método 2, conforme item 3.2.2.2. Em intervalos de tempo superiores há 800 horas o OVI Comercial atingiu o valor de referência para OVI em uso sugerido no guia da IEEE (IEEE, 2008), desta forma ao final do envelhecimento foi obtido um índice de neutralização aproximadamente 4 vezes superior ao limite sugerido no guia da IEEE (0,3 mg KOH/g).

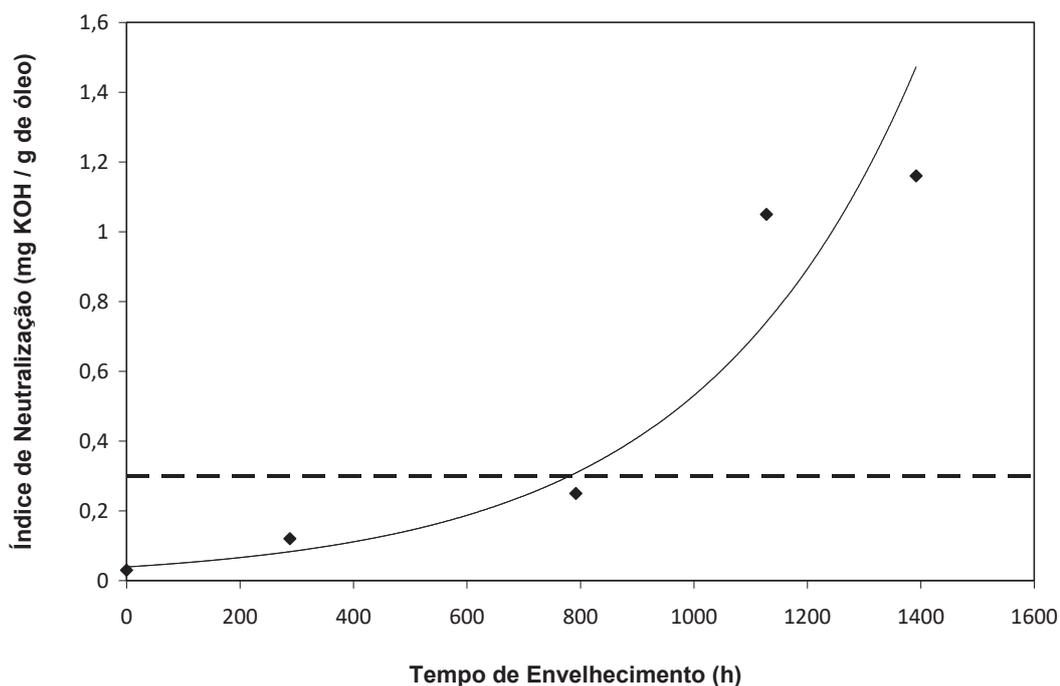


Figura 16. Índice de neutralização do OVI envelhecido pelo método 2, sendo que a linha pontilhada representa o valor limite para OVI em uso sugerido no guia da IEEE.

Pode-se observar uma relação aproximadamente linear da viscosidade cinemática a 40°C em contrapartida a um aumento abrupto no índice de neutralização nas amostras de OVI Comercial envelhecido pelo método 2 (Figuras 15 e 16 respectivamente). Um aumento significativo no índice de neutralização em comparação ao aumento observado na viscosidade cinemática indica a formação de compostos ácidos, evidenciando a ocorrência preferencial do processo de hidrólise do óleo em relação ao da oxidação (WILHELM e TULLIO, 2009a). Assim, a degradação do óleo pelo método 2 se deu preferencialmente pela hidrólise do triacilglicerol.

Na seqüência foi avaliada a regeneração do OVI Comercial novo e das amostras envelhecidas pelos métodos 1 e 2 que apresentavam viscosidade cinemática a 40°C e índice de neutralização elevados, respectivamente.

4.3. TESTES DE REGENERAÇÃO DO OVI

4.3.1 Regeneração por contato do OVI Comercial novo

Para os testes, realizados em escala laboratorial, foram utilizadas alíquotas do OVI Comercial novo, variando-se o tipo de agente adsorvente.

Os resultados obtidos para os diferentes parâmetros físico-químicos avaliados para o OVI regenerado estão apresentados na Tabela 11.

Os resultados obtidos indicam que nenhum dos agentes adsorventes testados piorou a condição físico-química do OVI regenerado em comparação ao OVI novo, não regenerado. Os adsorventes 4 e 5 proporcionaram uma diminuição no fator de potência do óleo.

Tabela 11. Regeneração por contato do OVI Comercial novo em função do tipo de adsorvente.

Ensaio	OVI Comercial novo, antes da regeneração	OVI Comercial novo após regeneração por contato com os adsorventes:				
		1	2	3	4	5
Índice de Neutralização (mg KOH/g)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,02
Fator de Potência a 100°C (%)	2,8	2,6	3,2	2,9	0,69	0,17
Viscosidade Cinemática a 40°C (cSt)	34,2	34,1	34,3	35,0	35,6	35,2

4.3.2 Regeneração por contato do OVI Comercial envelhecido pelo método 1

Para os testes, realizados em escala laboratorial, foram utilizadas alíquotas do OVI Comercial envelhecido pelo método 1, variando-se o agente adsorvente.

Os resultados obtidos para os diferentes parâmetros físico-químicos avaliados

para o OVI regenerado estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Regeneração por contato do OVI Comercial, envelhecido pelo método 1, em função do tipo de adsorvente.

Ensaio	OVI envelhecido, antes da regeneração	OVI envelhecido após regeneração por contato com os adsorventes:				
		1	2	3	4	5
Índice de Neutralização (mg KOH/g)	0,29	0,18	0,27	0,26	0,32	0,04
Fator de Potência a 100°C (%)	3,8	2,8	3,3	2,8	2,0	3,0
Viscosidade Cinemática a 40°C (cSt)	46,3	47,1	47,8	48,3	46,6	48,2

Conforme os resultados descritos na Tabela 12, todos os agentes adsorventes testados no tratamento do OVI envelhecido pelo método 1 proporcionaram uma redução no fator de potência a 100°C em comparação ao OVI antes da regeneração. O adsorvente 5 apresentou o melhor desempenho em comparação aos demais, pois, diminuiu consideravelmente o índice de neutralização do óleo. No entanto, nenhum dos agentes adsorventes promoveu uma diminuição na viscosidade da amostra de óleo testada.

Estes resultados evidenciam que a regeneração por contato do OVI com viscosidades cinemáticas altas é tecnicamente inviável, ou seja, a regeneração do OVI envelhecido pelo método 1 não proporcionou a este óleo valores de viscosidade cinemática próximos ao do OVI novo. Quanto ao índice de neutralização, o adsorvente 5 mostrou-se eficiente na adequação deste parâmetro ao valor limite estipulado na norma ABNT NBR 15422, que é de 0,06 mg KOH/g.

4.3.3 Regeneração por contato do OVI Comercial envelhecido pelo método 2

Para os testes, realizados em escala laboratorial, foram utilizadas alíquotas do OVI Comercial envelhecido pelo método 2, variado o agente adsorvente.

Os resultados obtidos para os diferentes parâmetros físico-químicos avaliados para o OVI regenerado estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Regeneração por contato do OVI Comercial, envelhecido pelo método 2, em função do tipo de adsorvente.

Ensaio	OVI envelhecido, antes da regeneração	OVI envelhecido após regeneração por contato com os adsorventes:				
		1	2	3	4	5
Índice de Neutralização (mg KOH/g)	1,16	0,42	1,03	1,00	1,03	0,13
Fator de Potência a 100°C (%)	3,2	2,2	2,1	2,5	1,8	3,6
Viscosidade Cinemática a 40°C (cSt)	38,2	36,8	37,2	37,0	37,1	37,2

Os adsorventes 1 e 5 mostraram-se mais eficientes na redução do índice de neutralização da amostra de OVI testada. Embora o adsorvente 5 tenha apresentado uma redução significativa no índice de neutralização do OVI, o uso deste material não é indicado para a sua utilização em um sistema protótipo percolador por poder ocasionar o entupimento dos filtros e um possível aumento na pressão interna da coluna percoladora, em decorrência de sua granulometria extremamente alta.

As análises indicaram que o adsorvente 1 apresentou o melhor desempenho para a regeneração por contato.

4.3.4 Regeneração por percolação da amostra de OVI coletada do Religador

Após os testes realizados na regeneração por contato foi definido que o agente adsorvente que seria utilizado durante os testes de regeneração por percolação seria o adsorvente 1.

Foram realizadas 3 passagens do óleo pelo adsorvente fresco, denominadas de ciclo 1, ciclo 2 e ciclo 3. Após o ciclo 1 foi realizada a substituição da carga do agente adsorvente, pois os resultados apresentados não foram satisfatórios,

principalmente, quanto à rigidez dielétrica, indicando uma saturação do agente adsorvente (Tabela 14).

Após a substituição da carga do agente adsorvente os resultados obtidos para os ciclos 2 e 3 foram satisfatórios, pois houve uma melhora significativa na condição físico-química do OVI testado. O índice de neutralização ficou bem abaixo do valor limite estipulado para OVI novo (ABNT NBR 15422). Mesmo com a aplicação de 3 ciclos de regeneração, o fator de potência ficou um pouco acima e o teor de umidade próximo dos valores limites estipulados para OVI novo na norma ABNT NBR 15422. No entanto, os gráficos da Figura 17 mostram que a aplicação de ciclos subsequentes deve aproximar cada vez mais esses valores dos valores limites para OVI novo, até saturar o adsorvente.

Tabela 14. Regeneração por percolação da amostra de OVI do religador usando o adsorvente 1.

Ensaio	OVI envelhecido, antes da regeneração	Regeneração por percolação do OVI envelhecido:		
		Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
Índice de Neutralização (mg KOH/g)	0,22	0,15	0,04	0,03
Teor de Água (ppm m/m)	670	520	397	219
Fator de Potência a 100°C (%)	76,0	51,2	27,6	8,6
Rigidez Dielétrica (kV)	36	35	50	53
Viscosidade Cinemática a 40°C (cSt)	34,5	35,7	34,6	34,0

De uma forma geral, os resultados obtidos indicaram que, com a aplicação de ciclos subsequentes de regeneração, é possível obter um fluido isolante com propriedades similares a de um de um OVI novo (ABNT NBR 15422). Porém, convém ressaltar que, quanto maior o número de ciclos necessários para recompor as

propriedades do OVI envelhecido, maior será o custo do processo.

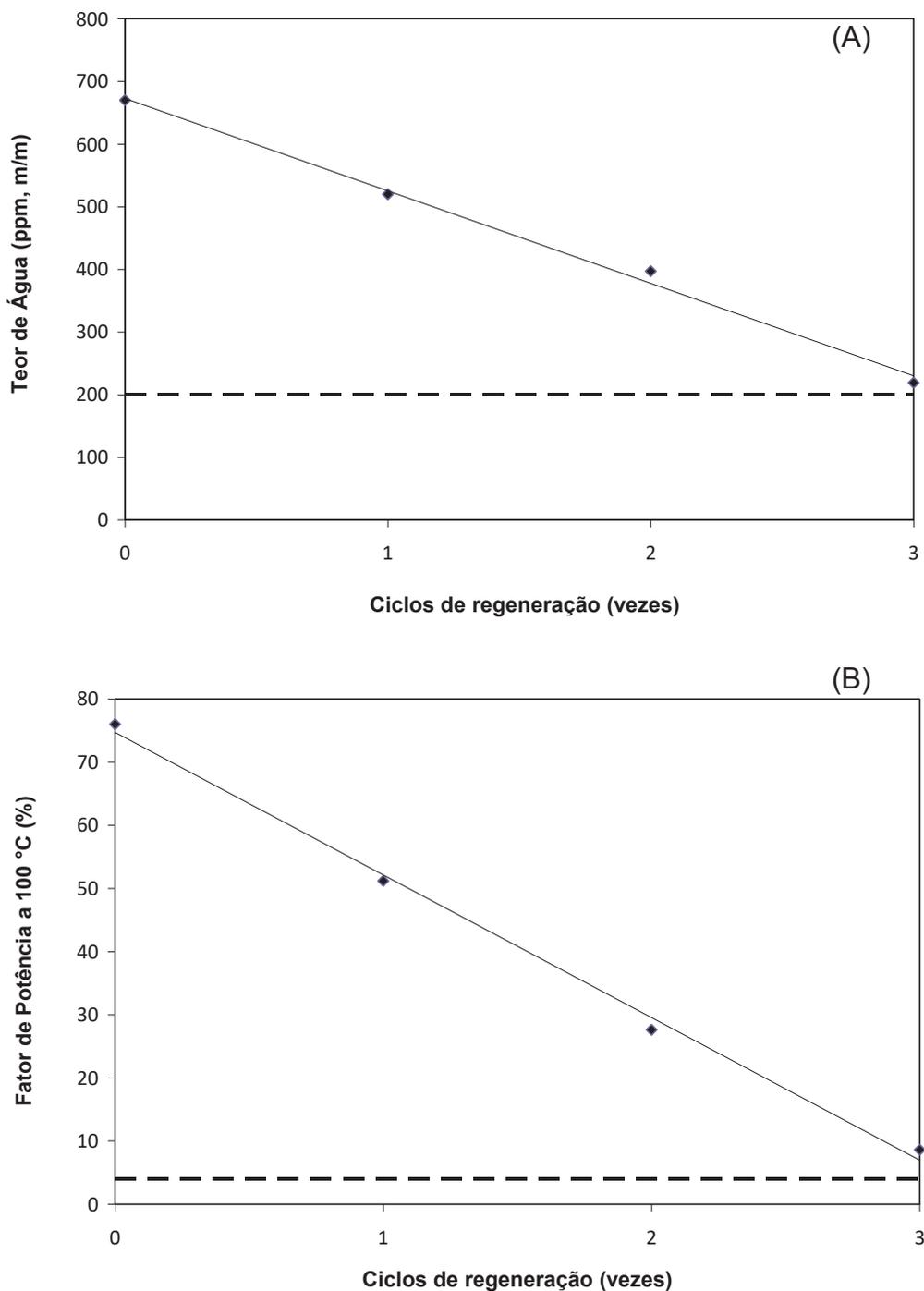


Figura 17. (A) Viscosidade cinemática a 40°C e (B) Fator de potência a 100°C da amostra coletada no religador, regenerada por percolação, sendo que a linha pontilhada representa o valor de aceitação para OVI novo sugerido na norma ABNT NBR 15422.

4.3.5 Aditivação da amostra de OVI coletada do religador após a regeneração por percolação

A fim de estender a vida útil dos óleos, inibidores de oxidação ou comumente chamados de aditivos antioxidantes, podem ser adicionados aos mesmos. Este produto reage preferencialmente com os produtos de oxidação oriundos da degradação dos óleos, formando produtos mais estáveis e interrompendo a reação em cadeia.

Após a regeneração da amostra de OVI do religador foi realizada a aditivação deste OVI regenerado a partir da adição de 3 diferentes aditivos antioxidantes, disponíveis no mercado nacional.

Como ainda não existe normatização para a aditivação do óleo vegetal isolante, a concentração utilizada baseou-se na resolução nº 36 de 05/12/2008 da ANP, que estabelece 3000 ppm (0,30% m/m) como a concentração máxima para o aditivo inibidor ao OMI.

O ensaio de estabilidade à oxidação não faz parte do conjunto de ensaios especificados para OVI novo, descritos na norma ABNT NBR 15422. Entretanto, em função de sua aplicação na determinação da estabilidade à oxidação de óleos vegetais isolantes (WILHELM e STOCCO, 2006), sua praticidade, decidiu-se por utilizar este ensaio para avaliar o efeito da adição dos aditivos antioxidantes na estabilidade das amostras de OVI regeneradas.

Os resultados obtidos para a estabilidade à oxidação dos óleos aditivados estão mostrados na Tabela 15.

Tabela 15. Efeito da adição de aditivos antioxidantes no período de indução da amostra de OVI do religador regenerada por percolação

OVI	Antioxidante	Período de indução a 130°C (h)
Amostra de OVI do religador antes da regeneração	Sem antioxidante	1,5
Amostra de OVI do religador regenerada por percolação	Sem antioxidante	0,2
	1	1,3
	2	4,7
	3	1,0

Os resultados obtidos (Tabela 15) mostram que o OVI coletado do religador apresentava um período de indução de 1,5 h antes da regeneração. Após a regeneração o período de indução diminuiu para 0,2 h, indicando que parte do aditivo antioxidante ficou retido no agente adsorvente. Este resultado mostra que o OVI deve ser aditivado após o tratamento de regeneração, semelhante ao procedimento tradicionalmente adotado na regeneração do OMI. Todos os aditivos antioxidantes adicionados ao óleo regenerado promoveram uma melhora na estabilidade a oxidação em comparação ao óleo regenerado sem adição de aditivos antioxidantes. O aditivo 2 apresentou o melhor desempenho em relação aos demais. A partir dos resultados obtidos sugere-se o uso do ensaio de estabilidade a oxidação para avaliar a necessidade de adição de aditivos antioxidantes ao OVI regenerado, conforme esperado.

Hoje no Brasil, o custo do aditivo antioxidante 2, testado neste trabalho, é de aproximadamente R\$ 14,00 por quilograma e do agente adsorvente é de aproximadamente R\$ 7,00 por quilograma. Desconsiderando impostos e serviços, o custo aproximado para regeneração por contato, em laboratório, das amostras envelhecidas pelo método 2, foi da ordem de R\$ 0,60 por litro. Para que fossem alcançados valores similares ao de um OVI novo este custo seria elevado para aproximadamente R\$ 0,75 por litro no caso da regeneração por percolação da amostra coletada do religador, considerando: três ciclos de regeneração, a substituição da carga de agente adsorvente após o primeiro ciclo e a adição de 3000 ppm de aditivo antioxidante (tendo como base o resultado da Tabela 16).

Para realizar o processo de regeneração do OMI, atualmente, as empresas cobram, aproximadamente, R\$ 1,25 por litro de óleo regenerado. Partindo do princípio que o processo para tratar o OVI é o mesmo que o empregado para o OMI, pode-se estimar que o custo da regeneração do OVI em planta fixa seja o mesmo praticado para o OMI.

5. CONCLUSÕES

Baseado nos ensaios realizados e nos resultados obtidos durante este estudo pode-se concluir que:

- A degradação do OVI é regida pelos mecanismos de oxidação e hidrólise.
 - Degradação oxidativa: observada no método 1 de envelhecimento, evidenciada pelo aumento da viscosidade
 - Degradação hidrolítica: observada no método 2 de envelhecimento, evidenciada pelo aumento do índice de neutralização.
- A regeneração por contato não foi eficiente no tratamento da amostra de OVI, pois apresentava um aumento de 35% na viscosidade cinemática a 40°C em relação ao valor original, valor este acima do sugerido pelo guia IEEE para OVI em uso (aumento de 10% do valor original)
- A regeneração por contato foi eficiente no tratamento da amostra de OVI com índice de neutralização aproximadamente 4 vezes superior em relação ao valor sugerido pelo guia IEEE para OVI em uso (0,30 mg KOH/g)
- A regeneração por percolação foi eficiente no tratamento da amostra de OVI do religador que apresentava fator de perdas dielétricas a 25°C aproximadamente 2 vezes maior em relação ao valor sugerido pelo guia IEEE para OVI em uso (3,0%)
- O parâmetro físico-químico que deve ser monitorado para avaliar a viabilidade técnica da regeneração do OVI em uso é a viscosidade
- O OVI regenerado deve necessariamente ser aditivado com aditivo(s) antioxidante(s).

5.1. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DOS ESTUDOS

- Realizar estudos de regeneração de OVI utilizando outros agentes adsorventes
- Avaliar novos aditivos antioxidantes que permitam uma maior vida útil ao OVI após sua regeneração.
- A recuperação do agente adsorvente utilizado no processo de regeneração do OVI.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15422. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Óleos vegetais isolantes para equipamentos elétricos – Especificação.** 2006.

ABNT NBR 14248. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Produtos de petróleo - Determinação do número de acidez e de basicidade - Método do indicador.** 2004.

ABNT NBR 10710/B. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Líquido isolante elétrico - Determinação do teor de água.** 2006.

ABNT NBR 14483. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Produtos de petróleo - Determinação da cor - Método do colorímetro ASTM.** 2005.

ABNT NBR 14065. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Destilados de petróleo e óleos viscosos - Determinação da massa específica e da densidade relativa pelo densímetro digital.** 2006.

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

ABNT NBR 11341. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.** 2004.

ABNT NBR 6869. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Líquidos isolantes elétricos - Determinação da rigidez dielétrica (eletrodos de disco).** 1989.

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

ABNT NBR 10505. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Óleo mineral isolante - Determinação de enxofre corrosivo.** 2006.

ABNT NBR 13882/B. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Líquidos isolantes elétricos - Determinação do teor de bifenilas policloradas (PCB).** 2005.

ABNT NBR 11349. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Produto de petróleo - Determinação do ponto de fluidez.** 2005.

ABNT NBR 6234. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Óleo-água - Determinação de tensão interfacial.** 1965.

ABNT NBR 12134 A. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Óleo mineral isolante - Determinação do teor de 2,6-di-terciário-butil paracresol.** 1991.

ABNT NBR 10504. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Óleo mineral isolante - Determinação da estabilidade à oxidação.** 1988.

ANP. **AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.** Resolução nº 36, de 5 de dezembro de 2008. Especificações dos óleos minerais isolantes tipo A e tipo B, de origem nacional ou importada, comercializados em todo o território nacional, consoante às disposições contidas no Regulamento Técnico ANP nº 4/2008, parte integrante desta Resolução. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petro/legis_qualidade.asp> Acesso em: 24 de agosto de 2009.

ASTM D2140. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Calculating Carbon-Type Composition of Insulating Oils of Petroleum Origin,** 1991.

ASTM D6871. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus.** 2003.

ASTM D3300. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Under Impulse Conditions.** 1994.

ALSBERG, C. L.; TAYLOR, A. E.; **The fats and oils, a general view.** California: Food Research Institute Stanford University, 1928.

BIELLA, C. A.; SILVA, D. E. **Processos de secagem de transformadores.** São Paulo: CESP/CEM, 1986.

BATISTA, D. A.; **Desenvolvimento de metodologia colorimétrica para dosagem de compostos furânicos em óleo mineral isolante.** PIPE/UFPR. p. 86, 2005.

BS EN 14112:2003. **BRITISH STANDARDS. Fat and oil derivatives. Fatty acid methyl esters (FAME). Determination of oxidation stability (accelerated oxidation test).** 2003.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL. Final Decision to Certify Hazardous Waste Environmental Technologies, 2003. Disponível em http://www.dtsc.ca.gov/TechnologyDevelopment/TechCert/upload/SPPTD_PN_Cooper_Final.pdf e acessado em 15 de março de 2008.

CELESC. **Centrais Elétricas de Santa Catarina.** Disponível em <<http://www.celesc.com.br>> Acessado em 29 de maio de 2008.

CIGRÉ DO BRASIL. **COMITÊ NACIONAL BRASILEIRO DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. Relatório técnico D1-01-002/05 **Enxofre corrosivo em óleo mineral isolante**. Grupo de Trabalho D1-01-Líquidos Isolantes, outubro, 2005, 14 p.

CIGRÉ DO BRASIL. **COMITÊ NACIONAL BRASILEIRO DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. Atualização do Relatório técnico D1-01-002/05 **Enxofre corrosivo em óleo mineral isolante**. Grupo de Trabalho D1-01-Líquidos Isolantes, dez, 2006, 5p.

CLAIBORNE, C. C., CHERRY, D. B. **A status update on the use of natural ester (vegetable oil) dielectric fluids in transformers**. Doble, 2006.

CLARK, F. M. **Insulating materials for design and engineering practice**. New York: John Wiley and Sons, 1962, 393 p.

COOPER POWER SYSTEMS. **BULLETIN 04003. Insulating paper aging comparison Envirotemp® FR3™ fluid vs. mineral oil**. 2004.
COELHO JR 2007

COPEL. Companhia Paranaense de Energia. **Copel usa transformadores isolados com óleo vegetal**. Disponível em <<http://copel.gov.br>>. Acessado em 27 de julho de 2006.

COPEL. Companhia Paranaense de Energia. Disponível em <<http://copel.gov.br>>. Acessado em 22 de maio de 2009.

DARVENIZA, M.; HILL, D. J. T.; LE, T. T.; SAHA, T. K. Studies of the condition of insulation in aged power transformers, part 2 – fundamental electrical and chemical considerations. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS**, 3., 1991, Tokyo, Japan. Proceedings IEEE, Tokyo, 1991. p. 1120-1123.

DUVAL, M. **Dissolved gas analysis: it can save your transformer**. IEEE Electrical Insulation Magazine, Nov/dez 1989.

ELETRONORTE. **Centrais elétricas do Norte**. Disponível em <<http://www.eletronorte.gov.br>>. Acessado em 29 de maio de 2008.

FERNANDES, P. O. Apostila: **Manutenção de transformadores através do controle do óleo isolante mineral**: notas de aula do curso de manutenção de transformadores. Westinghouse do Brasil – Divisão de Serviços Industriais. 1988. 17p.

GOMES, A. L. **Desenvolvimento e aplicação de espumas uretânicas para a adsorção de bifenilas policloradas em óleo mineral isolante**. Curitiba, 2006. 101 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante - PRODETEC) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná.

GRANATO, R. C.; LEVY, N. M.; TULIO, L. Apostila: **Manutenção de transformadores baseada em ensaios físico-químicos e cromatográficos no sistema isolante**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, agosto, 2001, 25p.

IEEE - **INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. C57.147™. Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers**. 2008, 31p.

IMAD-U-KHAN, WANG, Z., COTTON, I. **Dissolved gas analysis of alternative fluids for power transformers**. IEEE Electrical Insulation Magazine, Sep/oct 2007.

KALTNER, F. **O Biodiesel no Brasil. WORKSHOP: A Expansão da Agro-Energia e seus Impactos sobre os Ecossistemas Brasileiros**. Rio de Janeiro, 2007. p.140.

KARSAI, K.; KERENYI, D.; KISS, L. **Large power transformer**. New York: Elsevier Company, 1987.

KUMARATHASAN, R.; RAJKUMAR, A. B.; HUNTER, N. R. **Autoxidation and yellowing of methyl linolenate**. Prog. Lipid Research. v.31, n.2, p. 109-126, 1992.

LEÃO, R. **GTD – Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. Universidade Federal do Ceará, 2007. Disponível em [http:// www.dee.ufc.br](http://www.dee.ufc.br) e acessado em 03 de março de 2008.

LEWAND, L.R. **Natural ester dielectric liquids**. Chemist's Perspective, Neta World, 2004.

LIPSHTEIN, R. A.; SHAKHNOVICH, M. I. **Transformer oil**. 2. ed. Jerusalem, Israel: 1970. 275p.

MARTINS DE SOUZA, M.S. **Métodos analíticos para lubrificantes e isolantes**. Disponível em: <<http://www.quimica.com.br/revista/qd382/oleos3.htm>>. Acesso em: 12 de fevereiro 2008.

McSHANE, C. P., GAUGER, G.A., LUKSICH, J. **Determining and interpreting key properties of ester based dielectric fluids**. 66th Annual international conference of Doble clients, Boston, Mass, April/1999.

McSHANE, C. P. **Vegetable-Oil-Based Dielectric Coolants**. IEEE Industry Applications Magazine, v.8, n.3, p.34-41, 2002.

McSHANE, C. P., MARTINS, M. N. **Desenvolvimento e aplicação de fluido dielétrico de base vegetal para transformadores de distribuição e potência**. IV Conferência Doble no Brasil. Belo Horizonte, agosto 2003.

McSHANE, C. P., MARTINS, M. N. **Experiência com óleos vegetais isolantes – A primeira década**. III Workshop da química e meio ambiente, ELETRONORTE, Belém, PA, agosto de 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Matriz energética nacional 2030**. Disponível em <http://www.mme.gov.br> e acessado em 23 de agosto de 2009.

MILASH, M. **Manutenção de transformadores em líquido isolante**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1984. 354 p.

MORAIS, R. M. N. de. **Estudo do envelhecimento térmico do papel isolante elétrico**. Rio de Janeiro, 1990. 152 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais**. São Paulo: Varela Editora e Livraria Ltda, 1998. 150 p.

MYERS, S. D.; KELLY, J.J.; PARRISH, R.H. **A guide to transformer maintenance**. Ohio: Transformer Maintenance Institute, 1982.

NUNES JUNIOR, J. L.; GALDEANO, C.A.; CAMPOS, E. A. **Secagem da parte ativa de transformadores de potência, energizados, utilizando filtros absorvedores de água**. In: Seminário Interno de Manutenção de Subestações da CTEEP e EPTE, 2000. Disponível em <http://www.avimach.com.br/eletrica/epte.html> e acessado em 10 de março de 2008.

NYNÄS NAPHTHENICS AB. **Transformer oil handbook**. 1 ed., Sweden: Linderoths in Vingåker, 2004. 223 p.

OLIVEIRA, T. F., QUEIROZ, J. C. B., SARAIVA, A. C. F., MOURA, H. P., **Utilização de SPLINE na avaliação do aditivo antioxidante DBPC em óleo isolante**. Revista Materiais e Estatística, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 7-18, 2005.

OOMMEN, T. V.; CLAIBORNE, C. C.; WALSH, E. J.; BAKER, J. P. **A new Vegetable Oil Based Transformer Fluid: Development and Verification**. In: 2000 CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2000, USA. Cooper Power Systems, Bulletin 00092, Product Information, June 2001.

OOMMEN, T.V. **Vegetable oils for liquid-filled transformers**. IEEE Electrical Insulation Magazine, jan, 6-11, 2002.

PRANKL, X.; SCHINDLBAUER, X. **Oxidation stability of fatty acid methyl esters**. In: European Conference on Biomass for Energy and Industry, 10, 1998, Würzburg, Germany. Anais. Würzburg: BLT, 1998. p. 1-5.

RAAP, J. L. K, McSHANE, C. P., CORKRAN, J. L., GAUGER, G.A., LUKSICH, J. **Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid**. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. Atlanta, nov, 2001. 5p.

RAAP, J. L. K., McSHANE, C. P., CORKRAN, J. L., GAUGER, G. A., LUKSICH, J. **Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid. Proceedings of 14th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)**. Austria, jul, 173-177, 2002.

RAAP, J. L. K., McSHANE, C. P., LUKSICH, J. **Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper**. 15th International conference on dielectric liquids, Coimbra, Portugal, Jun, 2005.

RAMALHO, V. C., JORGE, N., **Antioxidante utilizados em óleos, gorduras e alimentos gordurosos**. Química Nova, São Paulo, v. 29, n. 4, 2006.

RAMOS, L. P. **Aspectos técnicos sobre o processo de produção de biodiesel**. In: SEMINÁRIO PARANAENSE DE BIODIESEL, 1., 2003, Londrina. Anais eletrônicos. Disponível em: <http://www.tecpar.br/cerbio/Seminario-palestras.htm> e acessado em 12 de março de 2008.

RELATÓRIO TÉCNICO D1.01-002/06 – **Enxofre corrosivo em OMI**, Grupo de Trabalho – Líquidos isolantes, CIGRÉ, dezembro 2006.

ROLLAND, N. **Explosões e incêndios em transformadores: método de avaliação de custos, benefício financeiro do transformer protector**. Copyright©SERGI. 2004. 9p.

SIEROTA, A.; RUNGIS, J. **Electrical insulating oils part I: characterization and pre-treatment of new transformer oils**. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 11, nº 1, p. 8-18, 1995.

STOCCO, G. B., GRANATO, R. C., TRINDADE, E. M., TULIO, L. **Regeneração de agentes adsorvetes**. Relatório Técnico apresentado a Manaus Energia, Manaus/AM, p 59, 2004.

STOURNAS, S.; LOIS, E.; SERDARI, A. **Effects of fatty acid derivatives on the ignition quality and cold flow of diesel fuel**. J. Am. Oil Chem. Soc. v.72, n.4, p. 436-437, 1995.

STOCCO, G. B., TULIO, L., FEITOSA G. L., SANTOS, C. L. M., KEREZCZ, A. F., WILHELM, H. M., **Relatório Técnico Final “Regeneração de Óleo Vegetal Isolante (OVI) – Estudo em Escala Laboratorial – LACTEC/DPTM 31614/2009 – 34 p.**, 2009.
TULIO, L. **Estudo do envelhecimento acelerado de óleo vegetal isolante estudo em escala laboratorial**. PRODETEC, p. 123, 2008.

TRINDADE, E. **Resultados de pesquisa recente em óleo mineral contaminado com enxofre corrosivo**. My Transfo, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

TUMIATTI, V., TUMIATTI, M., ACTIS, R., ROGGERO, C., MAINA, R., MAINA, S., KAPILA, S. The “**Corrosive Sulfur Risk**” and Countermeasures for Transformers and Oils: the “**DBDS & Corrosion Free**” Program. My Transfo, Rio de Janeiro, RJ, março, 2007.

UHREN, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao óleo mineral isolante**. Curitiba, 2007. 123 p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante - PRODETEC) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná.

WILHELM, H. M., GRANATO, R. C., TULIO, L., STOCCO, G. B., RAVAGLIO M. A., BATISTA, D. A., MATTOSO, M., TRINDADE, E. M., UHREN, W., JÚNIOR, S. B. G., ADONIS, N. G. **Aspectos relacionados com a utilização de óleo vegetal isolante no Brasil.** Anais do IV International Workshop on Power Transformer (IV WORKSPOT). Abril 2006, 9p.

WILHELM, H. M., GRANATO, R. C., TULIO, L., BATISTA, D. A., STOCCO, G. B., SABEC, D., OLIVEIRA, J., UHREN, W., JASINSKI, R., NUNO G. ADONIS, N. G., JÚNIOR, S. B. G. **Desempenho de óleo vegetal isolante frente ao envelhecimento acelerado.** Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica realizado em Outubro de 2007.

WILHELM, H. M.; STOCCO, G. B. **Determinação da Estabilidade à Oxidação de Óleos Vegetais Isolantes pelo Método Condutivimétrico.** 2007, 6 p. Relatório Técnico apresentado no CIGRÉ.

WILHELM, H. M. **Resultados de pesquisas recentes sobre os efeitos de óleos isolantes vegetais em transformadores.** Anais do WORKSHOP de OVI do CEPEL, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

WILHELM, H. M., TULIO, L. **Envelhecimento acelerado de fluidos isolantes a base de ésteres naturais.** Artigo submetido, 2009a.

WILHELM, H. M., TULIO, L. **Normalização do óleo vegetal isolante no Brasil.** Artigo aceito para apresentação oral no XX SNTPEE, a ser realizado em 11/2009, Recife, PE. 2009b.

WILSON, A. C. M. **Insulating liquids: their uses manufacture and properties.** London: Peter Peregrinus Ltd., 1980. 221p.

WYKROTA, R. **Poliestireno-divinilbenzeno funcionalizado na regeneração de óleo mineral isolante envelhecido: remoção de produtos de oxidação.** Curitiba, 2004. 118 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná, UFPR.

YAMAOKA, R. S. **Plantas oleaginosas para produção de biodiesel.** II Workshop da Rede Bionerg. 2007.