



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA**

PAULO ROBERTO NUNES FERREIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA NA UTILIZAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL
COMO AGENTE ISOLANTE E REFRIGERANTE EM SUBSTITUIÇÃO AO ÓLEO
MINERAL EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO**

**PALMAS - TO
2018**

PAULO ROBERTO NUNES FERREIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA NA UTILIZAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL
COMO AGENTE ISOLANTE E REFRIGERANTE EM TRANSFORMADORES DE
DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Agroenergia.

Orientador: Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Júnior

**PALMAS - TO
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- F383e Ferreira, Paulo Roberto Nunes .
 Estudo da Viabilidade técnica na Utilização de óleo Vegetal como
 Agente Isolante e refrigerante em Transformadores de Distribuição. /
 Paulo Roberto Nunes Ferreira. – Palmas, TO, 2018.
 74 f.
- Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do
 Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-
 Graduação (Mestrado) em Agroenergia, 2018.
 Orientador: JOEL CARLOS ZUKOWSKI JUNIOR ZUKOWSKI
 JUNIOR
1. Óleo vegetal. 2. óleo Mineral. 3. Transformador de Força. 4.
 Viscosidade cinemática , Rigidez dielétrica , Neutralização. I. Título

CDD 333.7

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de
qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde
que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime
estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica
da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITARIO DE PALMAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA NA UTILIZAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL
COMO AGENTE ISOLANTE E REFRIGERANTE EM SUBSTITUIÇÃO AO
ÓLEO MINERAL EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

ALUNO: Paulo Roberto Nunes Ferreira

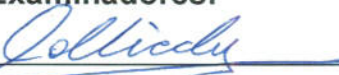
COMISSÃO EXAMINADORA

Presidente:



Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Júnior (UFT)

Examinadores:



Prof. Dr. Erich Collicchio (UFT)



Prof. Dr. Fábio Lima (IFTO)

Data da Defesa: 25/10/2018

As sugestões da Comissão Examinadora e as Normas PGA para o formato da
Dissertação foram contempladas:



Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Júnior (UFT)

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor meu Deus, inteligência suprema, causa primária de todas as coisas.

Aos meus pais, Flívio Barros (*in memoriam*) e Maria Lúcia, pela formação, incentivo e dedicação que me permitiram adquirir conhecimentos para poder estar aqui hoje.

Ao meu orientador, Professor Doutor Joel Zukowski, que com suas correções e observações, pôde me conduzir aos resultados exitosos deste trabalho.

Ao engenheiro Matuzalém, que com sua prestimosa presença permitiu a utilização de alguns de seus equipamentos e mão de obra, para que este trabalho pudesse ter êxito.

Aos Professores do Mestrado em Agroenergia-PPGAgroen, que me deram conhecimento e discernimento suficiente, capazes de me motivar na escrita deste trabalho.

RESUMO

NUNES FERREIRA, P.R, **Estudo de Viabilidade Técnica na utilização de óleo vegetal como agente isolante e refrigerante em substituição ao óleo mineral em transformadores de distribuição**. 2018. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Programa de Pós-Graduação em Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2018.

A compreensão do comportamento dos líquidos isolantes quando aplicados a transformadores de distribuição superou obstáculos antes intransponíveis em função da incipiente evolução tecnológica daquele momento. Atualmente, com a aplicação de modernas técnicas de ordem química de aditivação e, principalmente, pela melhoria da viscosidade cinemática apresentada pelo Óleo Vegetal Isolante, ele tornou-se competitivo como substituto refrigerante e isolante quando comparado ao Óleo Mineral Isolante. Neste contexto, este trabalho procurou fazer um paralelo entre as aplicações de OVI e OMI e suas implicações nas partes internas do transformador, notadamente em relação ao papel Kraft e componentes metálicos, como enrolamentos e núcleo, buscando avaliar comparativamente as vantagens e desvantagens da aplicação de ambos quanto aos parâmetros físico, químico e elétrico. Mostrou-se que o OVI, por possuir características semelhantes ao OMI e, por vezes, superiores, ultrapassou e se firma como substituto ideal por somar características de ordem ecológica e ambiental superior ao OMI. Detectou-se que OVI possui ainda vantagem adicional relativo ao ponto de fulgor (flash point elevado), que mitiga a possibilidade de ocorrência de incêndio e explosões provenientes de elevadas temperaturas de funcionamento dos equipamentos de transformação. Neste estudo, utilizou-se como substrato, o óleo de soja modificado para ser utilizado como fluído isolante e refrigerante fabricado pela Cooper Power system FR3, ENVIROTEMP³. Inicialmente analisou-se as propriedades física, química e elétrica de um óleo mineral regenerado e cujas características são previamente conhecidas contidas em um transformador trifásico 13,8 kV e de potência 15 kVA. A metodologia utilizada é a da caracterização química, física e elétrica do óleo vegetal a base de soja, quanto ao índice de acidez e viscosidade cinemática em laboratório externo e ensaio de rigidez dielétrica em campo, após a inserção do OVI neste mesmo transformador.

Palavras-chave: Óleo vegetal. Óleo mineral. Transformador. Viscosidade cinemática. Rigidez dielétrica. Neutralização.

ABSTRACT

NUNES FERREIRA, P.R, Technical Feasibility Study on the use of vegetable oil as an insulating agent and refrigerant in distribution transformers. 2018. 75f. Dissertation (Master in Agroenergy) - Graduate Program in Agroenergy, Federal University of Tocantins, Palmas, 2018.

The understanding of the behavior of the insulating liquids when applied to distribution transformers overcame previously insurmountable obstacles due to the incipient technological evolution of that moment. Nowadays, with the application of modern techniques of chemical additives, and mainly by the improvement of the kinematic viscosity presented by the OVI, it has become competitive as a refrigerant and insulating substitute when compared to the IMO. In this context, this work sought to parallel the applications of OVI and IMO and their implications on the internal parts of the transformer, especially in relation to Kraft paper and metallic components, such as windings and core, in order to comparatively evaluate the advantages and disadvantages of the application of both regarding physical, chemical and electrical parameters. It has been shown that OVI, because of its OMI-like and sometimes superior characteristics, has surpassed and established itself as an ideal substitute for adding ecological and environmental characteristics superior to IMO. It has been found that OVI has an additional advantage over the flash point (high flash point), which mitigates the possibility of fire and explosions arising from high operating temperatures of the transformation equipment. In this study, modified soybean oil was used as substrate to be used as insulating fluid and refrigerant manufactured by Cooper Power system FR3, ENVIROTEMP³. Initially the physical, chemical and electrical properties of a regenerated mineral oil were analyzed and the characteristics of the three-phase transformer 13.8 kV and 15 KVA were previously known. The methodology used is the chemical, physical and electrical characterization of the soybean based vegetable oil, as well as the acidity index and kinematic viscosity in the external laboratory and the dielectric stiffness test in the field, after insertion of the OVI in this same transformer.

Keywords: Vegetable oil. Mineral oil. Transformer. Kinematic viscosity. Dielectric strength. Neutralization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Curva de histerese.....	17
Figura 2- Exemplificação de um transformador e seu funcionamento de acordo com a lei dos transformadores.....	19
...	
Figura 3- Fórmula estrutural da glicose e celulose.....	21
Figura 4- Agentes responsáveis pela degradação da celulose.....	22
Figura 5- Degradação térmica da celulose.....	23
Figura 6- Equação logarítmica da vida da isolação de um trafo em relação à temperatura.....	23
Figura 7- Envelhecimento acelerado do papel kraft traduzido em horas de utilização com temperatura constante.....	24
Figura 8- Fitas de cobre após ensaio de corrosividade com diversos óleos neutralizados	26
Figura 9- Cadeia parafínica ramificada.....	27
Figura 10- Cadeia parafínica linear.....	27
Figura 11- Diagrama sistêmico da soja.....	32
Figura 12- Estrutura química do triglicerol.....	33
Figura 13- Falha em transformador com óleo vegetal explosão sem incêndio.....	41
Figura 14- Coleta do OMI para teste de rigidez dielétrica.....	47
Figura 15- Aparelho para medição de Rigidez Dielétrica com OMI e OVI.....	47
Figura 16- Coleta de OVI para teste de rigidez dielétrica.....	48
Figura 17- Primeira medição de rigidez dielétrica com OVI.....	49
Figura 18- Esvaziamento do Trafo contendo OMI.....	53
Figura 19- Lçamento do núcleo impregnado com OMI.....	53
Figura 20- Secador utilizado para secagem do vaso no trafo com OMI.....	54
Figura 21- Núcleo na estufa a 70° Celsius.....	54
Figura 22- Substituição da borracha nitrílica da tampa superior ao Trafo.....	55
Figura 23- Início da remontagem e conexão das buchas de AT e BT.....	55
Figura 24- Enchimento do trafo com OVI.....	56
Figura 25- Dados de placa do trafo em teste com OVI.....	56
Figura 26- Medição de isolamento do trafo com OVI.....	57
Figura 27- Energização do trafo com OVI.....	58
Figura 28- Máquina de termovácuo alimentada pelo trafo com OVI.....	58
Gráfico 1- Temperatura do ponto quente em grau celsius.....	24
Gráfico 2- Biodegradação aquático aeróbica ensaio EPA OPPTS.....	34
Gráfico 3- Segurança contra Incêndio	38

Gráfico 4- Gráfica da taxa favorável do óleo FR3.....	39
Gráfico 5- Flash e fire point dos óleos em função da temperatura.....	42
Gráfico 6- Comparação da medição de rigidez dielétrica entre OMI e OVI.....	50
Quadro 1- Testes químicos com o método ASTM em diversos óleos vegetais.....	44
Quadro 2- Testes elétricos com o método ASTM em diversos óleos vegetais.....	44
Quadro 3- Valores de referência para o OMI.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Valores normalizados para óleo mineral isolante novo	30
Tabela 2.	Valores normalizados para óleo vegetal isolante novo	30
Tabela 3.	Produção de biocombustíveis no território brasileiro	32
Tabela 4.	Transformador em seu ciclo de vida completo	37
Tabela 5.	Atributos Ambientais do FR3	38
Tabela 6.	Limites de especificação recomendados para o fluido FTR	40
Tabela 7.	Testes Físicos com Métodos ASTM em diversos óleos vegetais	41
Tabela 8	Comparação da medição de rigidez dielétrica entre OMI e OVI	48
Tabela 9.	Valores de Rigidez Dielétrica – OVI	61
Tabela 10.	Valores de Viscosidade Cinemática - OVI	63

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
AT – Alta Tensão
ASTM – American Society for Testing and Materials
ANSI – American National Standards Institute
ANP – Agência Nacional de Petróleo
BT – Baixa Tensão
C – Carbono
CO – Monóxido de carbono
CO₂ – Dióxido de carbônico
C₂H₂ – Acetileno
cSt – centi Stokes
CV- Cavalo Vapor
g/ml – grama por mililitro
gal - Galão
h - hora
H – Hidrogênio
H₂ – Gás Hidrogênio
Hz – hertz
IN – Índice de neutralização
IEC – International Electrotechnical Commission
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
kg – quilograma
KOH – Hidróxido de Potássio
KVA – quilovolt-ampère
lbs- Libras
mg – miligrama
mg KOH/g – miligrama de KOH por grama de óleo
mg/kg – miligrama por quilograma
mm - milímetro
m/m – metro/metro
KVA – Quilo volt-ampère
N - Nitrogênio
N₂ - Gás Nitrogênio

NBI – Nível Básico de Isolamento

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

NOx – Óxido de nitrogênio

O – Oxigênio

O₂ – Gás Oxigênio

OMI – Óleo Mineral Isolante

OVI – Óleo Vegetal Isolante

ppm – Parte por milhão

Trafo - Abreviatura de transformador

V – volt

W - watt

°C – Grau Celsius

Sumário

1 INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 Conceito de Energia.....	17
3.2 História dos Transformadores	17
3.2.1 Transformadores de distribuição	18
3.2.3 Influência da Temperatura do Transformador na Vida Útil.....	21
3.2.4 - Fator de aceleração de envelhecimento versus temperatura do ponto quente.....	25
3.3 Óleo Mineral Isolante (OMI).....	27
3.4 Óleo Vegetal Isolante (OVI)	29
3.5 Comparação entre o óleo vegetal e o óleo mineral	34
3.6.2 Segurança contra o risco de incêndio	38
4. METODOLOGIA.....	45
4.1 Procedimentos para a obtenção dos dados	46
Utilizou-se neste trabalho o óleo mineral isolante parafínico e óleo vegetal de soja (Fluído FR3).....	46
4.1.3 Procedimento para obtenção do índice de Acidez ou de neutralização	50
3.1.6.1 Procedimento para a energização do transformador com o óleo vegetal	57
4.2 Análise dos parâmetros Físico-Químicos e Elétricos	59
4.3 Propagação das Incertezas e Tratamento Estatístico	60
6. CONCLUSÃO.....	64
REFERÊNCIAS	66
ANEXOS.....	770
ANEXO 1	70
ANEXO 2	71
ANEXO 3	72
ANEXO 4	73
ANEXO 5	74
ANEXO 6.....	76

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são essenciais para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e são responsáveis pela transformação da energia elétrica em níveis de tensões adequados. Na maioria dos transformadores, atualmente em operação no Sistema Elétrico de Potência- SEP, utiliza-se o Óleo Mineral Isolante- OMI, como fluido refrigerante e isolante das partes internas deste equipamento. O OMI é derivado do petróleo, possui elevada toxicidade e, em contato direto com solo e água, pode provocar danos irreversíveis ao meio ambiente, como o efeito estufa.

O efeito estufa, uma das maiores preocupações da atualidade, é provocado devido ao aumento crescente da acumulação de gases de efeito estufa - GEE na atmosfera, como por exemplo, o gás carbono (CO_2), o metano (CH_4) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), que acarretam grandes alterações no equilíbrio térmico do planeta. Efeito que se denomina também como aquecimento global, estendem-se danos socioambientais importantes, como o degelo nos círculos polares, avalanches, enchentes, estiagens e secas e, ainda, transformações na vida marinha, geralmente concedidos ao aquecimento de águas profundas e modificações nas direções de correntes oceânicas. Como efeito, tem-se um considerável decréscimo da qualidade de vida e maior índice de pobreza da população das regiões mais atingidas (RAMOS et al, 2003).

Compreende-se que as concessionárias de energia, fazendo uso de fluidos dielétricos biodegradáveis e renováveis, colaborarão com o desenvolvimento econômico e social de regiões produtoras dessas oleaginosas, produzindo riquezas e divisas para o Estado. Poderão promover um maior número de empregos na área rural; fixando o homem no campo, pelo incentivo à agroindústria, e gerar mais oportunidades para o agricultor que desenvolve agricultura familiar. Ademais, a atração das concessionárias pelo uso desses fluidos biodegradáveis renováveis e nacionais justifica-se, especialmente, por causar menos danos ambientais, pela diminuição da dependência de um fluido derivado do petróleo que é um recurso não renovável e pelo uso de recursos nacionais economicamente mais exequível (RAMOS, et al, 2003).

Alternativamente à utilização do OMI, o Óleo Vegetal Isolante - OVI possui características refrigerantes e dielétricas muito próximas do óleo mineral e outras ainda superiores. Sua vantagem reside em ser um produto natural, biodegradável e

de baixo impacto ambiental. Sua obtenção se dá através da rota tecnológica de produção de óleo vegetal de diversas oleaginosas. Assim sendo, a produção do OVI contribui para a redução de gases de efeito estufa.

O óleo vegetal isolante pode competir tecnicamente com o OMI e ainda satisfazer os requisitos ambientais, sendo um produto ecologicamente correto. Questões relativas à sustentabilidade e a busca por rotas tecnológicas sustentáveis, com mitigação de riscos ambientais, devem nortear as pesquisas e inovações de ponta até se atingir o estado da arte, e fazer com que o termo “síntese verde” possa ser aplicado em larga escala e em substituição aos processos químicos tradicionais.

Nesse cenário, o presente estudo avaliou os diversos resultados discutidos na literatura do tema em questão, confrontando-os com os resultados obtidos nos ensaios elétricos, físico-químicos e cromatográficos realizados no campo, quando da utilização do OVI em substituição ao OMI em transformadores de distribuição.

Assim sendo, para responder à questão deste estudo, qual é a viabilidade técnica na utilização de óleo vegetal como agente isolante e refrigerante em transformadores de distribuição?, neste trabalho, procurou-se fazer um paralelo entre as aplicações de OVI e OMI e suas implicações nas partes internas do transformador, notadamente em relação ao papel Kraft e componentes metálicos como enrolamentos e núcleo, e busca avaliar comparativamente as vantagens e desvantagens da aplicação de ambos quanto aos parâmetros físico, químico e elétrico.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica na utilização de óleo vegetal como agente isolante e refrigerante em substituição ao óleo mineral em transformadores de distribuição.

2.2 Objetivos Específicos

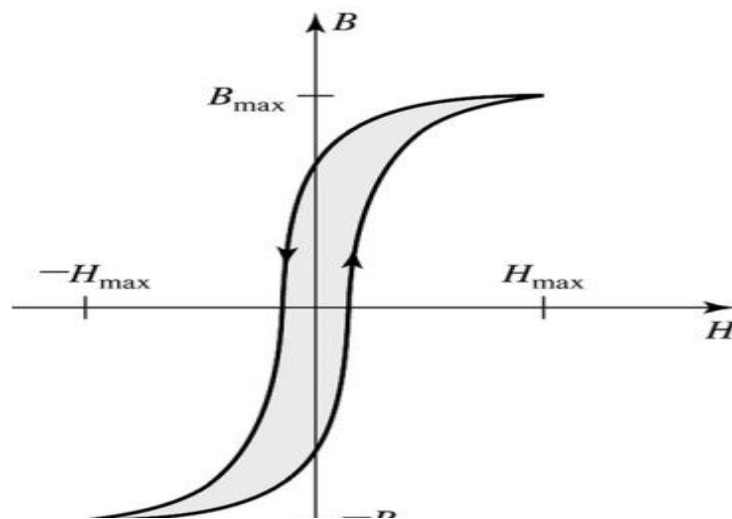
- Analisar os parâmetros Viscosidade e Índice de Neutralização, aplicáveis ao Óleo Vegetal Isolante, quando este substituir o Óleo Mineral Isolante em transformadores de distribuição (ABNT NBR 10441 e ABNT NBR 14428, respectivamente);
- Avaliar a rigidez dielétrica (ABNT NBR 6869) do óleo mineral puro de origem parafínica, do óleo vegetal puro a base de éster, e do OVI quando este substituir ao óleo mineral no transformador trifásico de 15 kVA (Número de série 195445), fabricação Romagnole, com impregnação máxima residual admissível de 7% de OMI.

3.1 Conceito de Energia

Energia, para Maxwell (1982 apud Nogueira, 2001, p.2), é “aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança”.

Na matéria prima existente no núcleo do transformador, diversos autores são unânimes em afirmar que o ferro é o elemento por natureza que melhor permite a passagem de linhas de força por unidade de área e, conseqüentemente, possibilita a magnetização do núcleo ($B \times H$). Figura 1 comparativamente ao que disse Maxwell (1982), a resistência seria o núcleo ferroso do transformador e a força seria a indução magnética B . A mudança é a magnetização nuclear que junto com as perdas joule no enrolamento provoca o aquecimento do núcleo ferroso quando da sua ocorrência, exigindo que o óleo, seja qual for a sua origem ou composição, exerça o papel de refrigerante para propiciar a troca de calor com o meio externo sem que haja perda das suas características originais.

Figura 1- Curva de histerese



Fonte: Fitzgerald; Santana (2014)

3.2 História dos Transformadores

A história dos transformadores teve início em 1885 com a construção de um transformador nos Estados Unidos, com projeto a seco e utilização de ar como dielétrico. A ideia de que transformadores usando óleo mineral como dielétrico

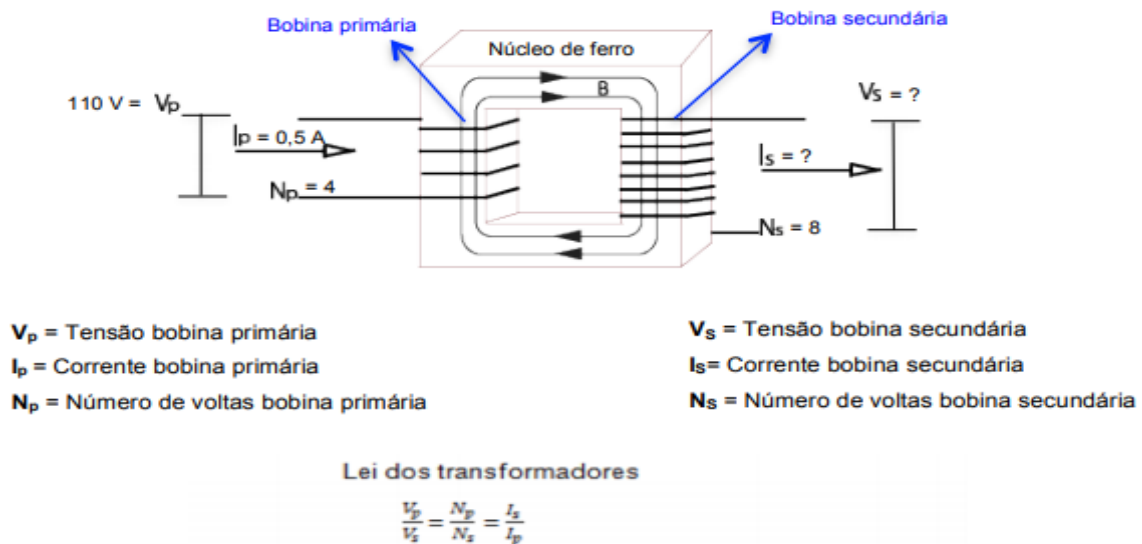
pudessem ser menores e mais eficientes foi patenteada em 1882, pelo professor Elihu Thompson, mas levou uma década até que fosse colocada em prática. Em 1892, a General Electric produziu a primeira aplicação reconhecida de óleo mineral em um transformador. Então, a indústria focou sua atenção em determinar quais as propriedades ideais para o óleo mineral para aplicações como dielétrico e, também, no desenvolvimento de processos para a produção de um Óleo Mineral Isolante - OMI de melhor qualidade. As principais propriedades de desempenho foram identificadas e por volta de 1899 pelo menos uma refinaria começou a produzir óleo mineral especialmente desenvolvido para transformadores. (MCSHANE, 2002).

3.2.1 Transformadores de distribuição

Segundo Milasch; Milan (1983), um transformador é formado por enrolamentos acoplados de cada lado de um núcleo de ferro, formando de um lado uma bobina primária e do outro uma secundária. Este núcleo é laminado e impregnado de grãos de aço silício orientados para que haja um aumento da corrente de magnetização. Assim, uma corrente alternada na bobina primária produz um campo magnético que passará através do centro da bobina secundária e induzirá uma corrente alternada nesta. Os valores produzidos de corrente e tensão pelo transformador seguem a lei dos transformadores, demonstrando que a razão das tensões é proporcional à razão entre o número de voltas das espiras e inversamente proporcional à razão de correntes, como pode ser observado na Figura 2. Os transformadores operam segundo a Lei de Faraday (1831): “Uma corrente elétrica é induzida em um circuito se este estiver sob a ação de um campo magnético variável”. Assim, pode-se dizer matematicamente que a força eletromotriz induzida aplicada no tempo é função do volume do núcleo de sua permissividade, originando seu vetor indução magnética e é função do número de espiras ou enrolamentos do primário e secundário do transformador. Todo este processo de transformação, como descreve Milasch; Milan (1983), contribui para o aumento da temperatura interna do transformador e que se não minimizado pode levar a quebra da cadeia parafínica do OMI, e a conseqüente produção de gases que ficarão dissolvidos no óleo, podendo levá-lo a explosão.

Ao longo do funcionamento dos transformadores, muitos processos de desgaste e de envelhecimento dá-se no sistema de isolamento. Os efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como, pontos quentes, sobre-aquecimentos, sobre-tensões e vibração são causadores de alterações do sistema isolante e precisam ser acompanhados 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 (MILASH; MILAN, 1983).

Figura 2 - Exemplificação de um transformador e seu funcionamento de acordo com a lei dos transformadores.



Fonte: http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/documentos/lei_transf_3.pdf

3.2.2 Fatores Influentes na Perda de Vida Útil

A parte ativa de um transformador de potência, que é composta pelo núcleo e enrolamentos, é constituída por materiais metálicos e isolantes. De acordo à ANELL (2000, p.3),

em condições normais e quando comparado com os materiais metálicos, os materiais isolantes são os que possuem menor tempo de vida útil. Daí, podemos concluir que, em condições normais de envelhecimento ao longo dos anos, a vida útil do transformador é função dos materiais isolantes. A maioria dos materiais isolantes utilizados em transformadores é fabricada a partir da celulose. Estes materiais, principalmente o papel Kraft normal ou papel termicamente estabilizado, são degradados ao longo do tempo. O

papel é constituído de fibra de celulose que é extraída de alguma fonte de origem vegetal, normalmente da madeira.

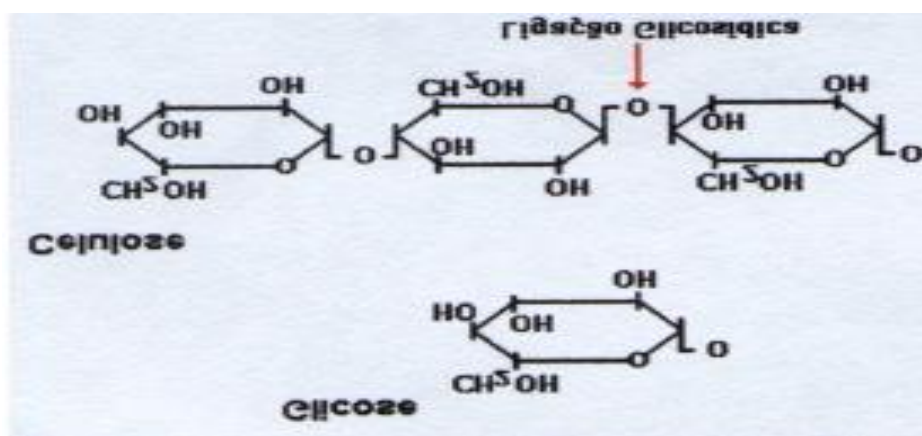
A fibra de celulose consiste de um conjunto de moléculas de celulose de diferentes tamanhos, formadas por pontes de hidrogênio e pelo grupo hidroxila ou oxidrila. A celulose é um polissacarídeo linear do tipo glucose β (1- \rightarrow 4). A lignina confere firmeza ao conjunto de fibras da celulose. O tamanho das moléculas de celulose é medido pelo grau de polimerização (GP), ou seja, é a média do número de unidades de glicose pelo de moléculas de celulose. O (GP) determina, portanto, o comprimento da molécula de celulose que exprime o número médio de unidades de glucose por cadeia de celulose na faixa entre 1000 a 1400, o papel isolante Kraft novo (SHROFF;STANNET, 1985, et al).

Ainda, conforme à ANEEL (2000, p.3),

o mecanismo de degradação da celulose depende das condições a que está sujeita. Entretanto existem três principais agentes que promovem e aceleram a degradação: a temperatura elevada, o oxigênio (agentes oxidantes) e a umidade. Em síntese, se quisermos prolongar a vida útil do material isolante e, por conseguinte, a do transformador, teremos que buscar meios de minimizar a contribuição desses três agentes.

Um dos aspectos mais importantes de um transformador de distribuição é seu papel isolante elétrico sólido. Sua escolha dá-se em face de seu baixo custo e fácil obtenção e, também, em função de suas propriedades elétricas e mecânicas quando imerso em OMI (Morais, 1990 e MILASH, et al , 1984).

Figura 3 - Fórmula Estrutural da Glicose e Celulose



Fonte: Nota Técnica nº 007/2000-SRT/ANEEL

No mercado de matérias-primas, existe uma infinidade de opções de papéis para a isolação de condutores em aplicações envolvendo eletricidade. Dependendo da matéria-prima utilizada e seu processo de fabricação, pode-se obter diferentes composições de papel com diferentes características quando se objetiva sua aplicação (ZIRBES, 2003).

Assim, existe uma família de papéis produzidos simplesmente para o uso em transformadores de potência, com as características necessárias para a aplicação como material isolante, dentre os quais podemos citar os seguintes compostos celulósicos, de acordo com Milasch (1984) e Silva (2005):

- Papel Kraft e papelão Kraft: feitos em sulfato de polpa de madeira obtida de coníferas ou outras árvores de madeira macia (SHUGG, 1995);
- Papel Manilha: feito em fibras de madeira e cânhamo;
- Pressboard: feito em papelão com fibra de algodão.

Estes papéis possuem a mesma origem e são compostos por: Pentoses, que são carboidratos complexos que ao sofrerem hidrólise se transformam em açúcar. A Lignina é um polímero de estrutura amorfa que tem a finalidade de manter as fibras de celulose unidas. Após a retirada destes compostos, o restante do material é agitado em um tambor composto por uma parte fixa e outra móvel, ambas equipadas com lâminas. O tempo de agitação da mistura modifica as características que se deseja do papel, quanto mais tempo for agitada, maior a absorção de umidade do composto resultante. (SILVA, 2005).

3.2.3 Influência da Temperatura do Transformador na Vida Útil

O aquecimento da celulose, mesmo na ausência de agentes oxidantes e umidade, tende a quebrar a ligação glicosídica e abrir o anel de glicose. Essa reação produz moléculas de glicose livres, umidade, monóxido e dióxido de carbono, além de ácidos orgânicos. A elevação da temperatura provoca danos irreparáveis no isolamento do transformador, tendo em vista o caráter irreversível das reações químicas ocorridas. Estas reações vão degradar as características físicas do papel isolante, enfraquecendo a rigidez dielétrica e, conseqüentemente, diminuindo o tempo de vida útil do transformador. O efeito pode ser aferido através da medição do grau de polimerização (DP) do papel. Estudos publicados consideram para o papel novo um número da ordem de 1.200 como referência para o grau de polimerização.

Quando o grau de polimerização atinge valores da ordem de 150 – 200, o transformador é considerado em final de vida útil. (SRT/ANEEL, 2000, p.4). Segundo Darveniza (1991), quanto maior o (GP), melhor a resistência mecânica do papel Kraft, em função de sua massa molar a qual se situará entre os valores compreendidos entre 1000 e 1400 para papel novo e 250 a 400 para papel envelhecido. A determinação do (GP) é realizada através da medição da viscosidade específica e é determinada pelo ensaio da viscosidade intrínseca (η) (ABNT, 1983, et al) que é dado pela seguinte equação:

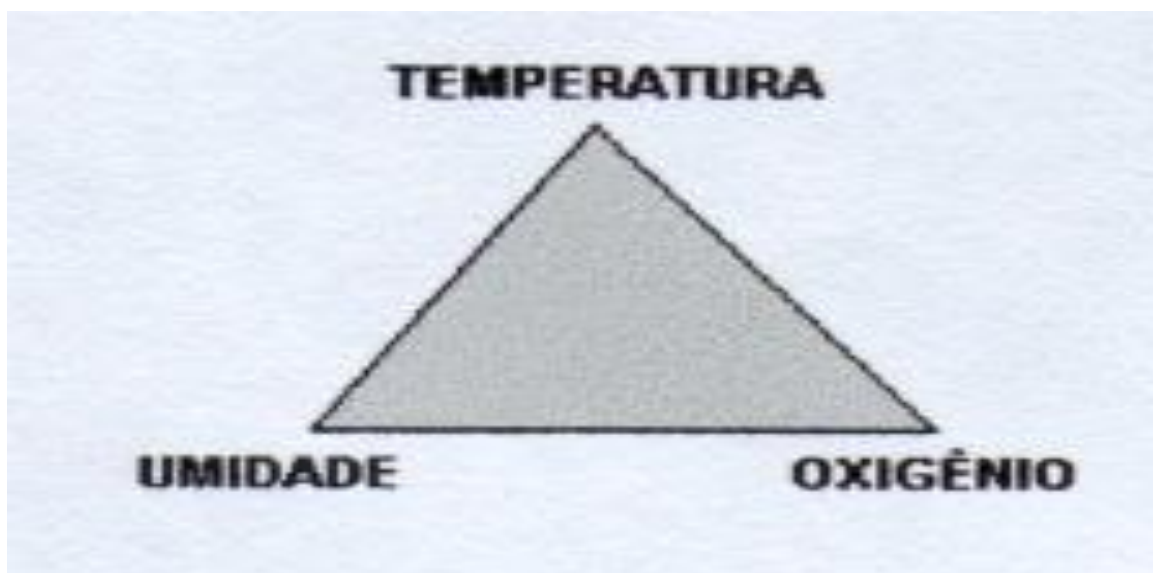
$$(\eta) = K (GP^v)^{\theta}, \text{ onde}$$

K-> Característica polímero-solvente (papel / etilenodiamina cúprica e monômero, $K=0,14$);

GP-> Grau de polimerização;

θ (teta) -> 1

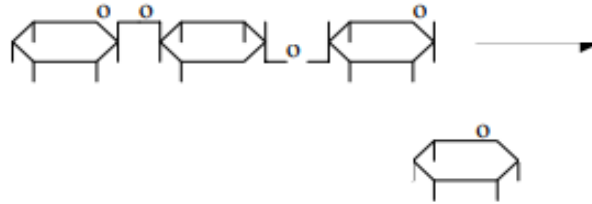
Figura 4 – Agentes responsáveis pela degradação da celulose



Fonte: Darveniza (1991)

O aquecimento da celulose, mesmo na ausência de agentes oxidantes e umidade, tende a quebrar a ligação glicosídica e abrir o anel de glicose. Essa reação produz moléculas de glicose livres, umidade, monóxido e dióxido de carbono, além de ácidos orgânicos

Figura 5 – Degradação térmica da celulose



Fonte: Darveniza (1991)

Os efeitos da temperatura de operação na isolação, ao longo do tempo, pode ser medida de várias maneiras. A NBR 5.416 (1997) segue uma adaptação da “teoria de Arrhenius”, segundo a qual o logaritmo da vida da isolação é uma função do inverso da temperatura absoluta, expressa na equação:

Figura 6 – Logarítmica da vida da isolação de um trafo em relação à temperatura

$$Life (T) = A \cdot e^{\frac{15000}{T+273}}$$

Fonte (Darveniza, 1991)

A norma do IEEE C57.91, similar a NBR 5416, em que ambas aceitam uma adaptação similar de ARREHNIUS (IEEE C57.91, 1995 – NBR ABNT 5416,2004). Logo pela análise da curva, é possível se estabelecer uma relação direta entre o envelhecimento do papel em função do aumento da temperatura interna do transformador, seja por sobrecarga no transformador ou pela presença de curto-circuito entre espiras. Pela análise do papel, pode ser estabelecer o tempo útil de vida do equipamento. A desnaturação da estrutura lignocelulósica do Kraft traz consigo a liberação de ácidos orgânicos com o consequente aumento do índice de neutralização e diminuição da rigidez dielétrica.

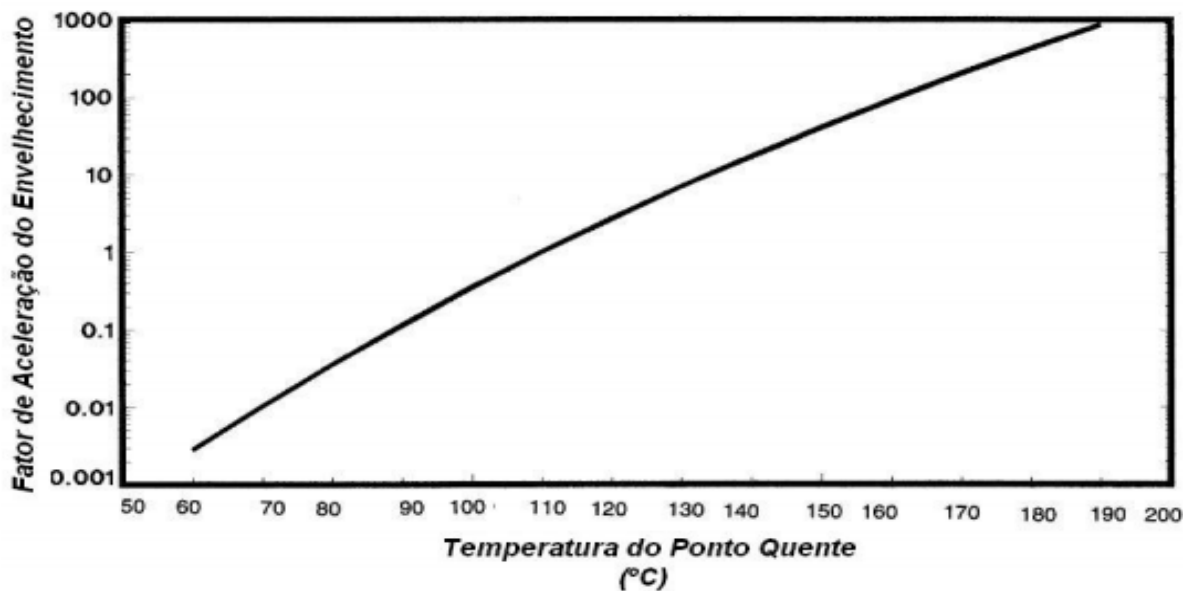
Figura 7 - Envelhecimento acelerado do papel kraft traduzido em horas de utilização com temperatura constante



Fonte: Cargill, INCORPORATED, (2016)

Gráfico 1 - Temperatura do ponto quente em grau celsius

Fonte: ABNT (2004)



Envelhecimento do papel celulósico em função do aumento da temperatura. A curva logarítmica no gráfico expressa a degradação do papel.

3.2.4 - Fator de aceleração de envelhecimento versus temperatura do ponto quente

Extensas cadeias de ácidos graxos se formam a partir da oxidação do OVI e são menos agressivas aos constituintes internos do transformador comparados aos do OMI, que possuem cadeias curtas de ácido orgânico (Wilhelm et al, 2006). A polimerização do OVI, ao contrário, preserva o papel Kraft, por não propiciar quando da sua oxidação a formação de borras.

O número de neutralização é definido como a quantidade em massa em miligramas de KOH (Hidróxido de Potássio), suficientes para neutralizar o ácido contido em 1 grama de óleo. O método é descrito na ABNT MB-101, e consiste na dissolução do óleo em uma mistura de tolueno e álcool isopropílico adicionada à água. Logo após, a mistura é titulada na temperatura ambiente, na presença de um indicador benzênico, apresentando-se em 2 cores (laranja para meio ácido e verde para meio básico). O número de neutralização do óleo indica a sua deterioração em função da presença de ácido que tem função catalítica, deteriorando a isolamento celulósica.

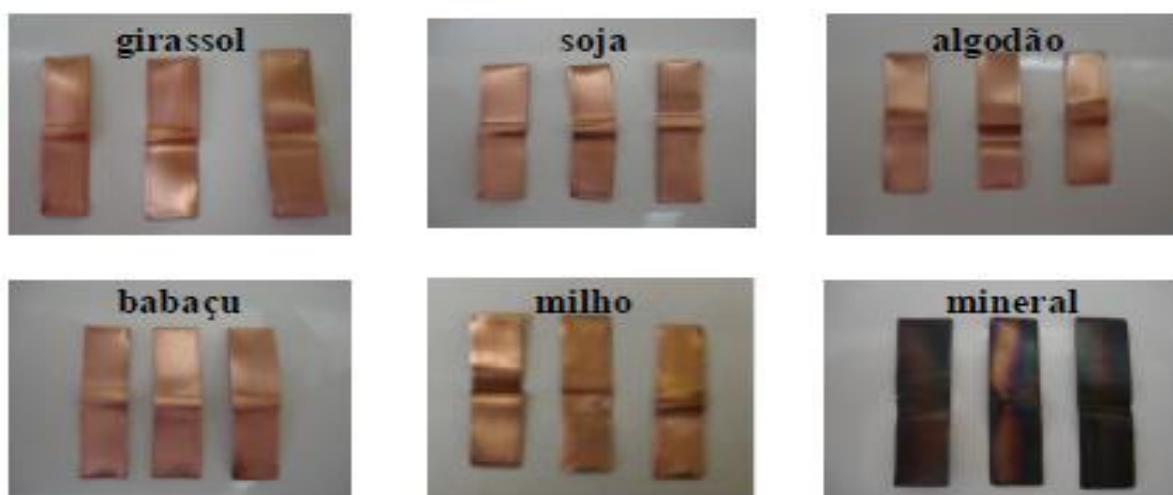
São necessários 3 moléculas-grama de iodo para 2 de água, e a oxidação do SO₂ se dará somente com a presença de água. Este método não é sensível a presença de água no óleo até 80% da saturação, de ácidos e sedimento (borra) proveniente de sua deterioração, (MILASH, MILAN,1983). Um óleo novo não deve apresentar um coeficiente de acidez superior a 0,05mg KOH/g (LIMA, LUCIANO D. M, 2005). Desta forma, o índice de acidez do OMI é superior ao do OVI, o que lhe confere uma característica negativa quando comparado ao índice de neutralização do OVI, na medida em que quanto maior o índice de neutralização do OMI, maior a formação de borra interna ao transformador, reduzindo o escoamento do óleo e, conseqüentemente, reduzindo a troca de calor, aumentando a possibilidade de ocorrência de pirólise, facilitando a formação de gases. No OVI, o índice de neutralização é menor, não há a formação de borra, a viscosidade é menor, a troca de calor é maior, preservando as características físico-químicas do óleo.

Uma rigidez dielétrica de 24kV sugere que a isolamento do transformador dever ser submetida a testes, todavia, uma isolamento inferior a 22 kV determina que o transformador precisa de secagem. O OVI, por ser polar, apresenta maior afinidade com a água e, por isto seu comportamento a presença de umidade é mais

satisfatório do que o OMI. A umidade em excesso prejudica os constituintes internos do transformador, na medida em que uma descarga ou ruptura interna pode ocasionar, no caso do OMI, a quebra da cadeia naftênica ou parafínica, ocasionando o surgimento dos gases inflamáveis e entre eles o acetileno. A degradação térmica do óleo mineral, através da pirólise gera hidrocarbonetos de menor peso molecular: hidrogênio (H₂), metano (CH₄), etano (C₂H₆), etileno (C₂H₄), acetileno (C₂H₂). Vale salientar que as reações que geram o metano, o etileno e o acetileno, são as que necessitam de maior temperatura nesta sequência. Assim, pode-se dizer com segurança que a presença do gás acetileno no óleo indica falha excessiva na isolação pela presença de umidade (água), acelerando o envelhecimento do óleo pelo aumento do índice de neutralização.

Os parâmetros de ordem física de um transformador são extremamente interdependentes, por exemplo, maior presença de água no óleo leva a menor rigidez dielétrica, assim como uma maior presença de gases dissolvidos pela quebra da cadeia parafínica ou naftênica, são como uma reação em cadeia, em que os resultados se somam.

Figura 8 - Fitas de cobre após ensaio de corrosividade com diversos óleos neutralizados



Fonte: Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental (2011)

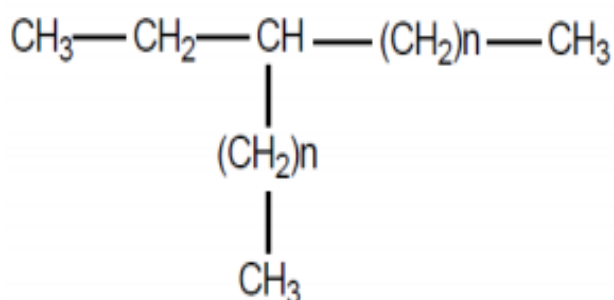
O resultado dos testes de corrosividade dos óleos neutralizados, na Figura 8, demonstra que os óleos vegetais não são corrosivos, objetivado pela não mudança da coloração da fita de cobre quando ensaiados. O OMI possui caráter corrosivo. O caráter não corrosivo apresentado pelo óleo vegetal é um aspecto bastante positivo

(Castelo-Branco & Torres et al,2011), haja visto que as reações de corrosão produzem sulfeto de cobre que tem elevada condutividade e, ao se dispersar sobre o papel isolante do transformador, reduz sua rigidez dielétrica

3.3 Óleo Mineral Isolante (OMI)

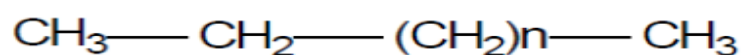
Atualmente, o OMI é o fluido dielétrico mundialmente mais utilizado no setor elétrico. Experimentos empregando óleos vegetais como dielétrico foram realizados na mesma época que ocorreram os primeiros testes com óleo mineral. Porém, os óleos vegetais revelaram-se menos atrativos que o mineral devido à sua estabilidade à oxidação, ponto de fluidez, permissividade e viscosidade distintas, (MCSHANE, 2002).

Figura 9 - Cadeia parafínica ramificada



Fonte: Friedenber; Santana (2014)

Figura 10 - Cadeia parafínica linear



Fonte: Friedenber; Santana (2014)

Os parâmetros gerais de um óleo mineral para transformadores são divididos em elétrico (rigidez dielétrica, fator de perdas elétricas), químicos (conteúdo de água) e físicos (tensão interfacial, viscosidade, ponto de fulgor e ponto de fluidez) (STOCCO, 2009).

Segundo Friedenber; Santana (2014), o óleo mineral propende a formar ácidos orgânicos de cadeia curta. Seus subprodutos da degradação são hidrocarbonetos nocivos ao meio ambiente. Independentemente se o óleo utilizado for de base parafínica ou naftênica, ambos são nocivos ao ambiente. Os compostos de hidrocarbonetos podem migrar com infiltração da água da chuva, da superfície para o lençol freático, sendo que um litro de óleo pode contaminar milhões de litros de água, tornando-a imprópria para o consumo, e o custo para tratar seus efeitos é bastante elevado

O óleo mineral é, sem dúvida, o dielétrico de maior utilização nos transformadores de distribuição. As suas características físicas e químicas, o bom resultado da associação com os isolantes de papel e o seu preço coloca-o em destaque como o dielétrico por excelência. Pode-se dizer que a quase totalidade dos transformadores de distribuição instalados na rede faz uso do óleo mineral como líquido dielétrico e como meio de arrefecimento da máquina. No entanto, o baixíssimo flash point (baixo ponto de fulgor), há muito que condiciona a sua utilização exigindo um tratamento especial. Na eventualidade de um derrame acidental, o óleo mineral além de representar um potencial risco de incêndio, constitui uma ameaça ambiental, uma vez que contamina o solo, penetrando nos lençóis freáticos.

Mesmo sendo biodegradável, o óleo mineral isolante é bastante nocivo ao meio ambiente. Em caso de falhas ou vazamentos em transformadores, os compostos de hidrocarbonetos, devido sua relativa alta solubilidade na água, podem migrar, com infiltração da água de chuva, da superfície para a primeira camada do lençol freático. Por exemplo, 1 kg de óleo, que tenha vazado de um transformador para um reservatório, torna 5 milhões de litros de água impróprios para consumo.

A medida do potencial de contaminação de um fluido é medida pelo seu nível de biodegradabilidade. Para o óleo mineral, este fator é muito baixo, sendo, de acordo com a norma OECD 301, de apenas 10%. Isto significa que, após 28 dias da entrada do óleo no meio ambiente, somente uma pequena parte dele é autodegradada. Assim, as falhas relativas à explosão devido a curto-circuito e vazamentos de óleo mineral, em geral, são bastante nocivas ao meio ambiente (água, ar, solo), e os custos, para tratar seus efeitos, bastante altos. (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

3.4 Óleo Vegetal Isolante (OVI)

Segundo Stocco (2009), os OVI originam dos grãos ou sementes de plantas oleaginosas por meio de processos apropriados de descortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente. A soja, a semente do girassol, o milho e a colza são as mais usadas.

O Óleo Vegetal Isolante (OVI) atende às características refrigerantes e isolantes preconizadas pela Norma Brasileira NBR 15422 – Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos, pode ser considerado fluido de segurança, por ser biodegradável e proveniente de fonte renovável (ABNT, 2015). Caso haja derramamento do OVI no solo e no lençol freático, os custos referentes a tal fato, serão minimizados em função da biodegradabilidade, conforme a NBR 15088 - Eco toxicologia aquática - Toxicidade aguda - Método de ensaio com peixes - Cyprinidae. Justifica - se a sua utilização quando os riscos de explosão e incêndios devem ser minimizados por ser ele um fluido de segurança (ABNT, 2016).

Para ser considerado um fluido de segurança, o líquido isolante deve apresentar um ponto de combustão de no mínimo 300°C. Como os OVI's apresentam pontos de combustão superiores a 300°C, estes são considerados fluidos de segurança ao contrário do OMI que possui um ponto de combustão em torno de 150°C. Resultados mostraram que a adição do OMI ao OVI reduz significativamente os pontos de fulgor (menor temperatura na qual se formam vapores inflamáveis na superfície do óleo e são identificados pela formação de um lampejo quando em presença de uma chama) e de combustão das misturas em relação ao OVI puro. Para ser considerado fluido de segurança, o OVI pode assumir teores de OMI de até 7% (UHREN, 2007).

Na Tabela 1, destaca-se os valores de rigidez dielétrica do óleo mineral novo, quando comparados ao óleo mineral usado, e pode-se observar uma diferença de aproximadamente 10 KV (dez quilovolts), o que caracteriza o envelhecimento do óleo causado pelo excesso de oxidação.

Tabela 1 - Valores normalizados para Óleo Mineral Isolante novo

Ensaio	Resultados típicos			Valores limites						Método de Ensaio	
	Óleo Novo (B)	Óleo Novo (A)	Óleo Novo	Satisfatório		A recondicionar		Óleo usado	Após tratamento		
				Até 230 KV	Acima >35	Até 230 KV	Acima	A Regenerar	Até 230 KV	Acima	
Rigidez Dielétrica	50	>40	30	>30	>35	25 - 30	25		>	>	ASTM D877
	65	>70	-	>60	>70	50 - 60	35		33	38	
	-	-	-	>24	>27	20 - 24	50		>	>	(NBR 6869)
	70	>58	-	>48	>54	40 - 40	70		66	76	
								20		>	>
							-				
							27		25	30	

Fonte: WEG (2010); ABNT (2017)

Na Tabela 2, ressalta-se os valores normalizados pela NBR 15422, notadamente viscosidade e rigidez dielétrica, os quais são os pontos fulcrais de nosso trabalho quanto à viabilidade técnica da utilização do OVI novo.

Tabela 2 - Valores normalizados para Óleo Vegetal Isolante novo

Característica	Unidade	Método de Ensaio	Valor Especificado
Aspecto Visual	-	-	O óleo deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão.
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máximo
Densidade relativa a 20/4 °C	-	ABNT NBR 7148	0,96 máximo
Viscosidade cinemática 20°	cSt	ABNT NBR 10441	150 máximo 50 máximo 15 máximo

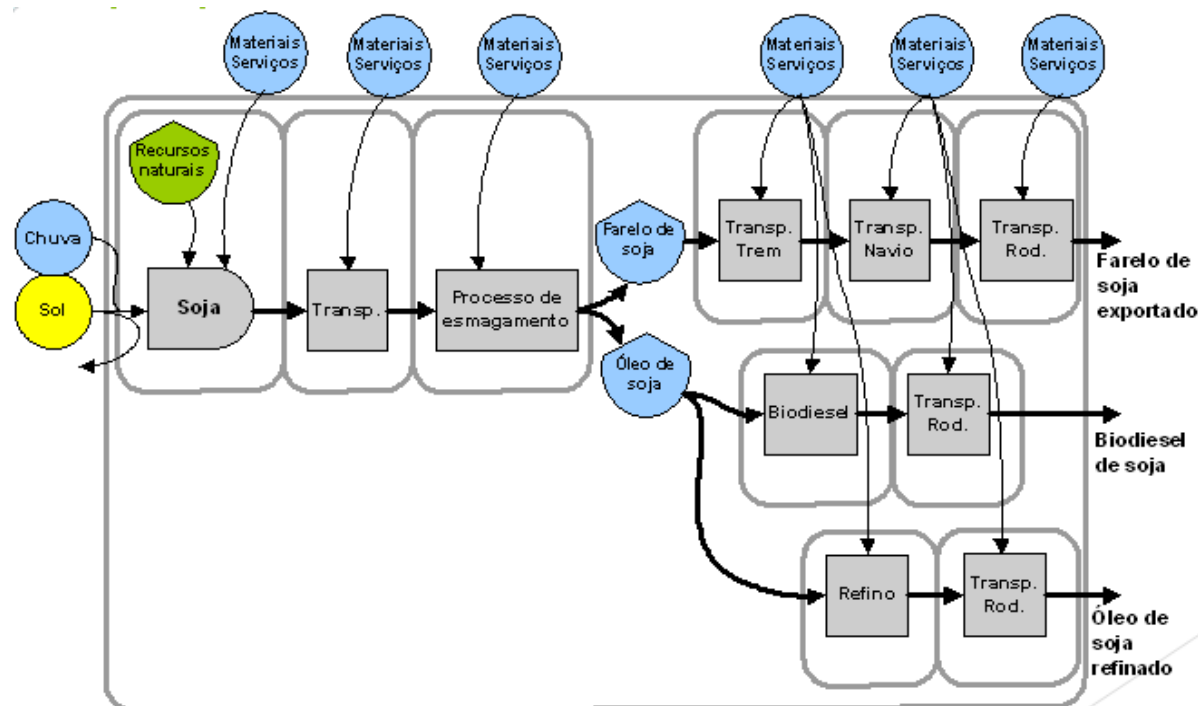
Característica	Unidade	Método de Ensaio	Valor Especificado
40° 100°			
Ponto de fulgor	°C	ABNT NBR 11341	275 mínimo
Ponto de combustão	°C	ABNT NBR 11341	300 mínimo
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	-10 máximo
Rigidez Dielétrica			
Eletrodo de disco	kV	ABNT NBR 6869	30 mínimo
Eletrodo de calota		ABNT NBR IEC 60156	42 mínimo

Fonte: WEG (2010); (ABNT:2015)

Os Óleos Vegetais Isolantes (OVIs) apresentam alta degradabilidade, sendo que 95% ou mais destes produtos biodegradam no ensaio de 28 dias. (WILHELM et al.,2009). Por volta de 1999 e, levando em consideração as questões ambientais, deu-se nova roupagem ao OVI e através da adição de aditivos e supressores e métodos específicos, pode-se adaptar um novo arranjo de óleo em substituição ao até então usado OMI. Em resumo, atualmente, ambos possuem condições satisfatórias como óleos isolantes e capazes de satisfazer e manter funcionalmente o equipamento de transformação. Wilhelm; Tulio; Uhren (2009) apresentam uma análise comparativa de propriedades térmicas, físico-químicas e elétricas de algumas variedades de óleos vegetais com relação ao óleo mineral e constataram que os óleos vegetais têm viscosidades semelhantes às do óleo de silicone e muito inferior a do fluido comercial HMWH (High Molecular Weight Hydrocarbons) usados pelo setor elétrico.

Óleos vegetais (OVI) são obtidos a partir de grãos ou sementes de plantas oleaginosas, através de processos apropriados (trituração, cozimento, prensagem mecânica, extração por solvente). Na Figura 11, pode-se observar todo o ciclo sistêmico da soja, incluindo as componentes exergéticas e emergéticas que o compõe. Exergéticas no tocante aos insumos alocados para a produção da soja e emergéticas ao destacar outras componentes naturais além do sol, tais como a chuva e recursos naturais.

Figura 11 - Diagrama sistêmico da soja



Fonte: Cavalett (2008)

Estes óleos são obtidos a partir de grãos ou sementes de plantas oleaginosas, através de processos apropriados de desmortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente. As mais utilizadas são a soja, a semente de girassol a colza e o milho. Por ser obtido através de oleaginosas, ele é considerado altamente biodegradável, sendo que ele se degrada totalmente em 28 dias no máximo (STOCCO, et 2009). A Tabela 3 mostra a produção de produtos agrícolas cultivados no Brasil e passíveis de utilização na produção de óleo vegetal (NUNES, ET AL 2007).

Tabela 3 – Produção de biocombustíveis no Brasil - 2006

Produto	Produção brasileira	Área Cultivada atual (há)	Produtividade brasileira (Kg/ha)	% Óleo no grão de amêndoa	Produtividade do óleo (Kg/ha)	Principais estados produtivos
Algodão (caroço)	2.394	1.115.000	2.142	15	321	MT, BA, GO, SP, MS, MG, PR
Amendoim casca	236	105.000	2.247	-	-	SP
Babaçu	118,7	extrativo	-	66%	-	MA
Cana de açúcar	415.205	5.633.000	73.760	-	7m3 de álcool	SP, AL, PR, PE, MG, MT
Dendê	909	87.553	10.380	20	2.076	PA, BA
Girassol	94	150.000	1.595	44	701	Centro-Oeste
Mamona	138.000	172.000	802	45	361	BA
Milho	41.787	12.864.000	3.248	-	-	PR, MG,

Produto	Produção brasileira	Área Cultivada atual (há)	Produtividade brasileira (Kg/ha)	% Óleo no grão de amêndoa	Produtividade do óleo (Kg/ha)	Principais estados produtivos
Soja	49.549	21.600.00	2.293	18	412,9	SP, GO, MT MT, PR, GO, RS, MS, MG, BA, SP, MA, TO, SC, PA
Outros	11	extrativo	-	-	-	BA, MG, Amazônia

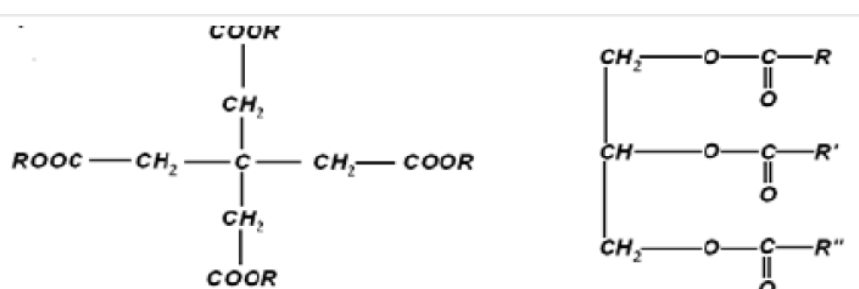
Fonte: Nunes (2007)

O Brasil é privilegiado em termos de biodiversidade de capacidade de gerar recursos renováveis em larga escala. O país é rico em oleaginosas, sendo a soja a primeira colocada na produção de oleaginosas no país e, também, a mais utilizada (STOCCO, 2009).

Baseados em tal comprovação, (IMAD-U-KHAN, 2018), defende que óleos vegetais podem ser facilmente utilizados sem necessidade de redução da viscosidade. Todavia, destacam a possibilidade de alterar essa propriedade para níveis desejados, mediante a adição de fluidos adequados. O OVI, para sua melhor adequação como líquido isolante, recebe aditivos antioxidantes e redutores do ponto de fluidez, apresentando alta degradabilidade, sendo que 95% se degradam totalmente no ensaio em 28 dias.

O óleo vegetal é formado por moléculas de acilgliceróis, que são originárias da condensação entre ácidos graxos e o glicerol (tri-álcool), formando ésteres de ácidos graxos. Assim, estes compostos são classificados em mono, di ou triacilgliceróis, dependendo se uma, duas ou três moléculas de ácido graxo se associam covalentemente ao glicerol, respectivamente, formando ésteres de ácido graxo. Os óleos vegetais são formados predominantemente por triacilgliceróis que podem ser formados por ácidos graxos iguais ou diferentes entre si, dependendo da origem da matéria prima, saturados ou insaturados (MORETTO e FETT et al, 1998).

Figura 12- Estrutura química do triacilglicerol

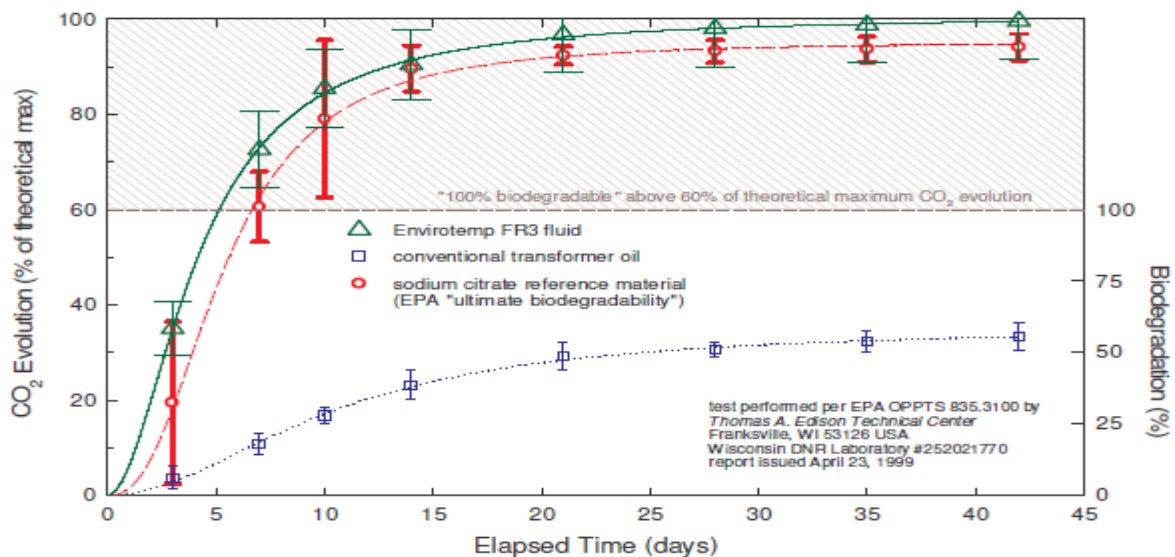


Fonte: Friedenber; Santana (2014)

As Agências de Proteção Ambiental dos EUA e Califórnia publicaram um Relatório de Verificação de Tecnologia Ambiental do fluido Envirotemp™ FR3™. O processo de verificação inclui ensaios de biodegradabilidade e toxidez. Os resultados dos ensaios de biodegradabilidade aquática confirmaram que a taxa de biodegradação do fluido FR3 é tão boa quanto o material de referência da norma. O fluido FR3 não é tóxico, conforme ensaio de toxidez oral aguda. A inerente viscosidade do fluido FR3 e tendência à polimerização de suas camadas finas num ambiente externo ajudam a prevenir a infiltração do fluido da superfície para o subsolo. O fluido FR3 não é listado como perigoso pela EPA, OSHA ou DOT. Os subprodutos de sua combustão completa são essencialmente CO₂ e água.

O Gráfico 2, da biodegradação do FR3, demonstra que o OVI se degrada quase que na totalidade em 5 dias, enquanto o OMI se degrada em 55 % ao fim de 40 dias atingindo o seu ponto máximo.

Gráfico 2 - Biodegradação aquático aeróbico ensaio do fluido FR3 EPA OPPTS 835.3100



Fonte: Bulletin Cooper Power Systems (2002)

3.5 Comparação entre o óleo vegetal e o óleo mineral

A natureza química do OVI é diferente da natureza do OMI. O OVI possui um caráter mais polar enquanto que o do mineral é apolar. Esta diferença se reflete nas suas propriedades físico-químicas e na estabilidade à oxidação (WILHELM et al,

2007). O óleo mineral isolante é de origem petrolífera e é obtido por hidrogenação catalítica e tratamento ácido. É constituído por cadeias de carbono e hidrogênio e sua funcionalidade é de isolamento dos constitutivos internos do transformador. As características e suas capacidades elétricas, entretanto, vão diminuindo com o passar do tempo pela presença de umidade e oxigênio, contaminando-o lentamente, originando resíduos (borra) e, segundo Milasch; Milan (1983), dificultando a troca de calor e aumentando a temperatura interna do transformador. Alguns autores defendem que a cada 10°C de aumento na temperatura causa uma redução de tempo médio de vida útil na metade.

O mecanismo de degradação predominante para o OMI é o da peroxidação. Para o OVI, o mecanismo predominante dependerá do teor de oxigênio e do teor de água do sistema isolante (óleo e papel). No caso de equipamentos operando com vazamentos, com entrada de ar, o mecanismo predominante será o da oxidação, refletido pelo aumento da viscosidade. Em equipamentos selados, a degradação do óleo se dará pela via hidrolítica, refletido pelo aumento no índice de neutralização (WILHELM et al, 2007).

Marulanda et al. (2008) realizaram um trabalho de desempenho de um transformador de distribuição usando um fluido dielétrico de éster natural comparado ao uso do óleo mineral normalmente utilizado. Primeiramente foram feitos testes em transformadores sobre condições reais de operação, estes testes incluíam teste de viscosidade (dinâmica e cinemática), ponto de fulgor e tensão de ruptura dielétrica. Em seguida, foram feitos testes sobre condições simuladas, que envolvia análise de gases dissolvidos por cromatografia e teste de aquecimento para amostras de papel Kraft. Após ter todos os resultados, o autor verificou que o uso de óleo vegetal em transformadores pode aumentar em até 42,86% a vida útil de um transformador de distribuição. Observou também que o comportamento do papel Kraft, quando imerso em óleo vegetal, resiste a incrementos superiores de temperatura quando comparado ao óleo mineral, o que resulta em uma diminuição de falhas e uma otimização do equipamento.

3.5.1 – Tipos de óleos biodegradáveis

Existem vários tipos de óleos biodegradáveis consoantes com os diversos fabricantes. Alguns dos mais usados são os seguintes: Envirotemp FR3 (Éster Natural), Midel 7131, Biotrans1000, BIOTEMP, ECO Fluid

3.6 Propriedades fluído isolante ENVIROTEMP® FR3™

A questão ambiental tem preocupado a comunidade internacional de forma crescente. As novas tendências apontam para a utilização de dielétricos líquidos de base vegetal da classe dos Ésteres. São óleos com uma elevada resistência ao fogo, *flash point* da ordem dos 330 °C e cujas propriedades ambientais, químicas e físicas, elétricas e de segurança contra incêndio lhe conferem o estatuto de “óleo do futuro”. São formulados à base de óleo de sementes de oleaginosas com aditivos de classe alimentar de forma a aumentar a sua eficácia. Não derivam do petróleo e têm a propriedade de se degradarem rapidamente, tanto em meios sólidos como em meios líquidos.

3.6.1 Ciclo de vida e emissões de Gases de efeito estufa

O software BEES - Building and Fire Research Laboratory, (Edificando para Sustentabilidade Econômica e Ambiental) utiliza uma abordagem de avaliação de ciclo de vida analisando a aquisição de matérias primas, fabricação, transporte, instalação, utilização, reciclagem e gestão de resíduos para determinar o potencial de aquecimento global de um produto.

O óleo mineral tem custo alto em termos de emissão de gás carbônico, enquanto o fluído FR3 tem custo relativamente baixo, cerca de 0,98 ton/m³ (8.2 lbs/gal), ou seja, menos GEE são emitidos para produzi-lo. Além disso, o estudo reporta que o impacto ambiental total do fluído FR3 é 1/4 do impacto reportado para óleo mineral (sem considerar as propriedades do fluído FR3 de extensão de vida útil do isolamento do transformador). Esta pontuação cumulativa resulta da soma dos impactos do consumo de água, poluição atmosférica, redução de ozônio, qualidade do ar, saúde humana, alteração de habitat, aquecimento global, redução de

combustíveis fósseis, eutrofização, toxicidade ecológica, poluentes críticos de ar e acidificação (CARGILL, 2013).

A Tabela 4 demonstra o impacto na produção em gramas por unidade de OMI versus OVI, no tocante a matéria prima, produção, transporte, utilização e final de vida.

Tabela 4 – Transformador em seu Ciclo de Vida Completo

Categoria	Gramas por Unidade		Toneladas por 1 000 Galões (3785 litros)	
	Óleo Mineral	Fluido FR3	Óleo Mineral	Fluido FR3
Matéria Prima	1.048.184	-381.590	2.306	-0,839
Produção	544.363	160.212	1.198	0,352
Transporte	122.478	71.498	0,269	0,157
Utilização	154.124	153.450	0,339	0,338
Final de Vida	30.825	30.690	0,68	0,068
Total	1.899.973	34.260	4.180	0,075

Fonte: Cargill (2013)

Tabela 5 - Atributos ambientais do fluído isolante FR3

Atributos	Resultados	Métodos
Biodegradação Aquática	>99%	EPA OPPTS 835.3100
Fácil Biodegradação	>99%	EPA OPPTS 835.3110 ou OECD 301B, C ou F
Toxidez Aquática Aguda	Não Tóxico	OECD 203
Toxidez Oral Aguda	Não Tóxico	OECD 420
Conteúdo de Material Biológico	>98,5%	USDA Biopreferred program
Emissão de Carbono Ciclo Total de Vida	Carbono neutro	Departamento de Comércio NIST BEES V4.0
Impacto Ambiental Total	¼ do Impacto do Óleo Mineral	Departamento de Comércio NIST BEES V4.0

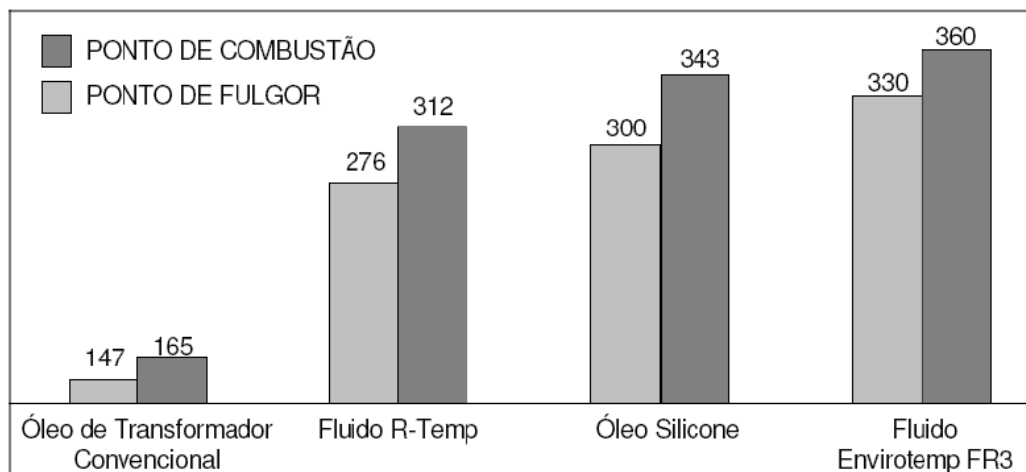
Fonte: Cargill (2018)

3.6.2 Segurança contra o risco de incêndio

O fluido FR3 tem um ponto de combustão típico de aproximadamente 360°C, conforme apresenta o Gráfico 3. Este é bem acima do mínimo de 300°C exigido para classificação como fluido de “alto ponto de combustão”, “resistente ao fogo” ou “IEC classe K”.

Seu ponto de fulgor (330°C) é maior que o ponto de combustão da maioria dos fluidos resistentes ao fogo em uso atualmente.

Gráfico 3 – Segurança contra incêndio



Fonte: Cargill (2018)

3.6.3 Comportamento em Caso de Incêndio

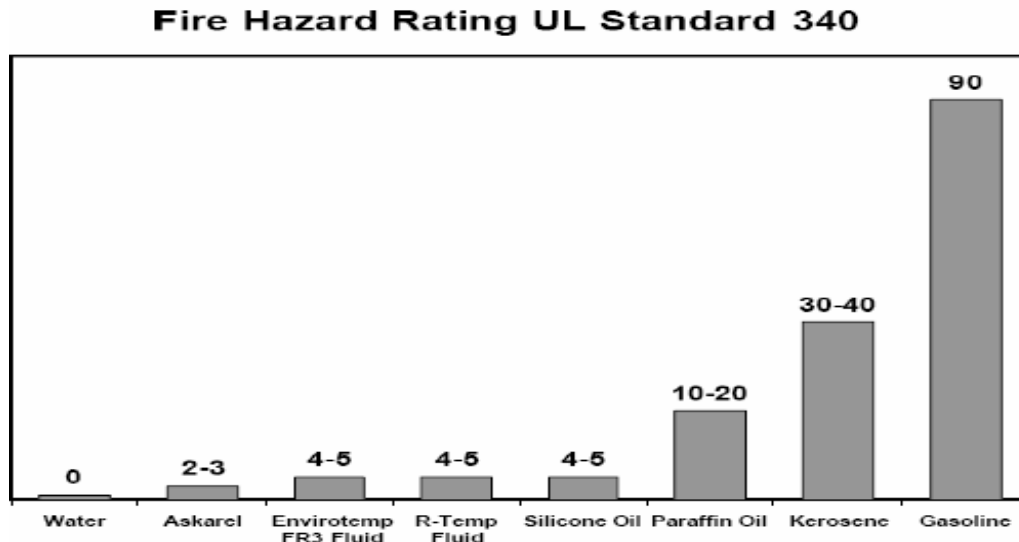
O FR3 é certificado como óleo refrigerante dielétrico resistente ao fogo, pela FM® (Factory Mutual Global) e UL® (Underwriters Laboratories), de acordo com a lista de requisitos da NEC® (USA National Electric Code), sendo que não há relato de incêndios ou explosões envolvendo transformadores imersos em FR3.

A possibilidade de um incêndio que envolva FR3 é tão baixa, que não demanda a determinação de libertação de calor, nem requisitos para a instalação do FR3.

Assim, é possível afirmar que estes transformadores imersos em FR3 protegem as pessoas e os edifícios nas zonas que circundam o transformador. A UL (Underwriters Laboratories) desenvolveu a Norma 340 para comparar a taxa de

perigo ao fogo de diferentes líquidos. O Gráfico 4 mostra a taxa favorável do óleo FR3.

Gráfico 4 - Taxa de risco ao fogo favorável do óleo FR3 em relação a diferentes líquidos



Fonte: FEUP (2005).

A leitura do gráfico permite afirmar que o óleo Envirotemp FR3 tem uma taxa de perigo ao fogo aproximada ao do Askarel e um pouco melhor que o silicone. Comparado ao óleo mineral (óleo parafínico ou naftênico), é possível observar a sua grande vantagem.

Tabela 6 - Limites de especificação recomendados para fluido Envirottemp FR3

Propriedade	Método de Ensaio		Limites de Especificação	
	ASTM	ISO/IEC	ASTM D6871 / IEEE C57.147	IEC 62770
Elétrica				
Rigidez Dielétrica (kV)	D877		≥ 30	
1 mm gap	D1818		≥ 20	
2 mm gap	D1818		≥ 35	
2,5 mm gap		IEC 60156		≥ 35
Fator de Dissipação 25°C (%)	D924		≤ 0,20	
90°C (tan δ)		IEC 60247		≤ 0,05
100°C (%)	D924		≤ 4,0	
Tendência a Gases (mm/min)	D2300		≤ 0	
Física				
Cor	D1500	ISO 2211	≤ 1,0	
Visual	D1524	IEC 62770 4.2.1	límpido & claro	claro, livre de sedimentos e material em suspensão
Viscosidade (mm ² /sec) 100°C	D445	ISO 3104	≤ 15	≤ 15
40°C			≤ 50	≤ 50
-20°C			≤ 500	
Ponto de Fluidez (°C)	D97	ISO 3018	≤ -10	≤ -10
Densidade a 20°C (g/cm ³)		ISO 3675		≤ 1,0
Densidade Relativa 15°C/15°C	D1298		≤ 0,98	
Saúde, segurança e ambiente				
Ponto de Combustão (°C)	D92	ISO 2592	≥ 300	> 300
Ponto de Fulgor (°C)				
Copo Aberto Cleveland	D92	ISO 2592	≥ 275	
Copo Fechado Pensky-Martens	D93	ISO 2719		≥ 250
Biodegradação		OECD 301	rapidamente biodegradável	rapidamente biodegradável
Química				
Conteúdo de Umidade (mg/kg)	D1533	IEC 60814	≤ 200	≤ 200
Índice de Neutralização (mg KOH/g)	D974	IEC 62021.3	≤ 0,06	≤ 0,06
Enxofre Corrosivo	D1275	IEC 62897	não corrosivo	não corrosivo
Conteúdo de PCB (mg/kg)	D4059		não detectável	livre de PCBs
Aditivos totais		IEC 60868		max. fração mássica 5 %
Estabilidade Oxidação (48 hrs, 120°C)*				
Acidez Total (mg KOH/g)		IEC 62021.3		≤ 0,6
Viscosidade a 40°C (mm ² /sec)		ISO 3104		≤ 30% aumento
Fator de Dissipação a 90°C (tan δ)		IEC 60247		≤ 0,5

Fonte: Cargill (2015)

Os limites de especificação para fluido novo conforme ASTM D6871, IEEE C57. 147 e IEC 62770 são apresentados na Tabela 6. O fluido FR3 é formulado à base de óleo de sementes e aditivos de melhoria de desempenho, não contendo petróleo, halogênios, silicões ou enxofre corrosivo. O fluido FR3 se biodegrada rapidamente e completamente no meio ambiente, é determinado como não tóxico, conforme ensaios de toxidez oral e aguda em ambiente aquático. A tonalidade verde do fluido FR3 reflete seu perfil ambiental favorável e claramente o distingue dos óleos à base de petróleo.

O fluido FR3 possui pontos de fulgor/combustão excepcionalmente altos, de aproximadamente 330/360°C – a mais alta resistência à ignição de qualquer fluido dielétrico de alto ponto de combustão disponível atualmente – sendo classificado

como fluido de “alto ponto de combustão”, “resistente ao fogo”, “IEC classe K”, fluido “não propagante”, aprovado pela FM Global e classificado pela Underwriters Laboratories como Líquido Dielétrico Resistente ao Fogo para uso conforme NEC (USA National Electric Code) e normas industriais de segurança.

A figura 13 representa a explosão de um transformador, pelo curto circuitamento do secundário do transformador, sem a ocorrência de incêndio em função da utilização de OVI.

Figura 13 - Falha em transformador com óleo vegetal - explosão sem incêndio



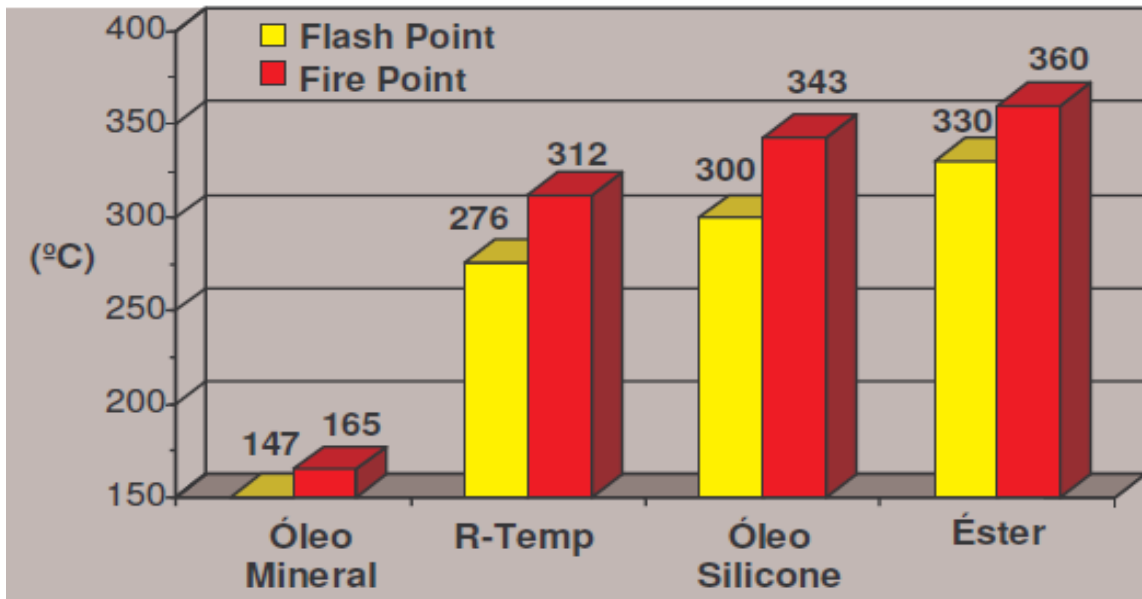
Fonte: Eletronorte (2017)

3.6.4 Resistência ao fogo

Os líquidos para serem considerados como resistentes ao fogo devem ter um fire point superior a 300 °C.

O Gráfico 4 mostra uma comparação entre o Flash e o Fire point de alguns fluidos, destacando que o OMI, entre todos possui o pior desempenho e que o OVI a base de éster, ao contrário, traz consigo uma performance acima da média (FEUP, 2005).

Gráfico 5 - Flash e fire point dos óleos em função da temperatura



Fonte: FEUP – Universidade do Porto (2005)

3.6. 5 Propriedades típicas do fluido Envirotemp® FR3™

São apresentadas a Tabela 8, Quadro 1 e 2 que mostram os testes físicos, químicos e elétricos comparando o FR3 com outros vegetais. Retirados da publicação do “Laboratory Testing of Natural Ester Dielectric Liquids”, estes resultados para o caso do FR3 poderão ter pequenas diferenças aos publicados pela Cooper Power Systems, fabricante do óleo biodegradável Envirotemp FR3. O Envirotemp FR3 apresenta elevado ponto de fulgor, e rigidez dielétrica acima de 30 kV.

A Tabela 7 apresenta o desempenho dos diversos óleos vegetais existentes no Mercado e seus resultados e características físicas típicas.

Tabela 7 - Testes físicos pelo método ASTM em diversos óleos vegetais

Testes Físicos					
ASTM test (Método de Ensaio)	Mineral Oil Typical Values	Envirotemp FR3	Biotemp	Coconut Oil	Eco Fluid
Data Source		Doble	Doble	Producer	Producer
Aniline Point D 616, °C.	≤ 80	2,4	25		
Color, D 15000	≤ 0,5	L 0,5 (Green)	L0,5		1
Flash Point, D 92°C.	>145	326	328	225	321
Fire Point, D 92°C.	180	362	358		341
Interfacial Tension, D 971, mN/m	>40	24	26		26
Pour Ponte, D 97°C	≤(-40)	-21	-12	20	-12
Relative Density, D1298, 60160	≤910	0,923	0,919	0,917	0,920
Viscosity at 40 °C, D445	≤11	33,8	41,4	29	92
Refractive index at 20 °C, D 1807	1.4808	1.475	1.4708		1.46
Visual, D 1524	Clear /Bright	Clear	Clear	Clear	Clear /Bright

Fonte: Cargill –Cooper Power System (2016)

Os principais fatores observados são a viscosidade cinemática e o flash e fire point, pois determinam respectivamente a capacidade de troca de calor e o ponto de formação de chama interna ao transformador.

O Quadro 1 reforça os dados históricos já sabidos sobre o desempenho dos diversos óleos vegetais existentes no Mercado e seus resultados e características químicas típicas, principalmente no tocante ao índice de neutralização para que não haja a produção de borras ou estruturas ácidas capazes de danificar o papel isolante.

Quadro 1 – Testes químicos com o método ASTM em diversos óleos vegetais

Testes Químicos					
ASTM test (Método de Ensaio)	Mineral Oil Typical Values	Envirotemp FR3	BIOTEMP	Coconut Oil	ECO Fluid
Data source		Doble	Doble	Producer	Producer
Corrosive sulfur D1275	Non- corrosive	Non- corrosive	Non- corrosive		Non- corrosive
Water Content, D 1533, ppm	≤ 30	< 80	< 80	1,0	110
Neutralization Number, D 974, mg KOH/g	≤ 0,015	0,02	0,02		0,05
Oxidation Inhibitor; D2668, %	≤ 0,30	ND	ND		0,15
Furanic Compounds, D 5837, µg/L	all < 5	654 HMF	all < 5		
Benzotriazole, Double, µg/L	≤ 10 ^a	≤ 10	≤ 10		
Polychlorinated Biphenyls, D4049, ppm	< 2	< 2	< 2		< 2

Fonte: Cargill –Cooper Power System (2016)

O quadro 2 reforça os dados de rigidez dielétrica típicos dos diversos óleos isolantes existentes no mercado (dielectric breakdown acima de 30 kV).

Quadro 2 – Testes elétricos com o método ASTM em diversos óleos vegetais

Testes Eléctricos				
ASTM test (Método de Ensaio)	Mineral Oil Typical Values	Envirotemp FR3	BIOTEMP	ECO Fluid
Data source		Doble	Doble	Producer
Dielectric Breakdown, D 877, kV	≥30	51	38	45
Dielectric Breakdown, D 1816 kV, 1mm gap	≥20	36	33	61
Power Factor at 20-25 °C, D924, %	≤ 0,05	0,0610	0,0093	0,09
Power Factor at 100 °C, D924, %	≤ 0,30	1,850	0,59	0,30
Dielectric Constant at 25 ° C, D924	2,2	3,1	3,1	2,86
Impulse Breakdown, D 3300, kV	≥145	Insufficient Sample	134	148
Gassing Tendency, D2300, µL/min	negative	-80,5	-52,7	+22,0

Fonte: (Cargill –Cooper Power System 2016)

4. METODOLOGIA

Para diagnosticar a qualidade de novos óleos isolantes ou em serviço, são realizados ensaios estabelecidos em normas. A NBR 15422 da ABNT (2006c) serve como guia para utilização de óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos. Com base no exposto, considera-se imprescindível caracterizar óleos vegetais disponíveis no Brasil, no sentido de se chegar a alternativas viáveis uma vez que, em regra, materiais comerciais apresentam segredos de preparação. Nesse caso, especificamente, utiliza-se o óleo de soja, porém outras fontes provenientes de outras oleaginosas podem ser utilizadas, tais como: babaçu, mamona, girassol e o milho, entre outras. O óleo mineral novo possui uma série de propriedades físico-químicas e elétricas, a qual aborda-se algumas que são comuns quando comparadas as mesmas propriedades do óleo vegetal isolante. Entre as físicas cita-se: Viscosidade Cinemática (resistência ao escoamento por turbulência, inércia que o óleo oferece nas partes internas ao transformador, facilitando a troca de calor e, conseqüentemente, aumentando a refrigeração e, neste caso, quanto menor melhor), dado em mm^2/s (cSt). Como propriedade química, analisa-se o Índice de Acidez do óleo dado em (mgKOH/g). Como propriedade elétrica, aborda-se a Rigidez Dielétrica, a qual é propriedade de um dielétrico de se opor a uma descarga disruptiva medida pelo gradiente de potencial. (MILASH, MILAN, 1983), dado em KV. No caso da rigidez dielétrica, quanto maior melhor, pois inibirá o fluxo de uma corrente de curto-circuito interna ao equipamento, mantendo a isolação dele nas condições ótima de projeto.

O transformador possui, como partes construtivas, a parte ativa constituída de enrolamentos, confeccionados em fios de cobre eletrolítico superpostos em núcleos de material ferro magnético e impregnados em aço silício, bem como material celulósico, poroso e altamente higroscópico (papel Kraft). O papel Kraft é obtido da polpa da madeira tratada com sulfato de sódio e absorve cerca de 10 (dez por cento) do óleo isolante. Sua capacidade de absorção de umidade é cerca de 800 vezes a do óleo (Lima, Luciano D. M, 2005). Durante a utilização do óleo isolante no equipamento, ele está sujeito a um processo de oxidação, formando ácidos como produtos finais da degradação que podem ser mensurados por meio do índice de neutralização ou índice de acidez. No caso destes compostos, a partir de certa concentração, são indesejáveis, pois agredem os materiais do equipamento,

principalmente o papel Kraft isolante, diminuindo, conseqüentemente, a sua vida útil. Tais compostos podem, ainda, polimerizar e formar borra que ao se depositar na parte ativa ou nos trocadores de calor, dificulta a transferência de calor para o meio ambiente. (GRANATO, LEVY E TULLIO, 2001).

Neste trabalho, os Testes de Índice de Neutralização e Viscosidade Cinemática foram realizados no ACS Laboratórios – Tecnologia e Confiabilidade em Análises Químicas na Avenida T-15, 1575 Qd. 158, Lote 19, Setor Bueno, Goiânia - GO

4.1 Procedimentos para a obtenção dos dados

Utilizou-se neste trabalho o óleo mineral isolante parafínico e óleo vegetal de soja (Fluído FR3).

4.1.1 Procedimento para obtenção da viscosidade Cinemática

A viscosidade cinemática dos óleos foi determinada utilizando viscosímetro capilar Cannon-Fenske, imerso em banho com temperatura controlada. Esta determinação consiste em avaliar o tempo que um volume fixo de líquido leva para escoar entre dois pontos fixos do capilar do viscosímetro calibrado, sob ação da gravidade. A viscosidade cinemática é que o produto desse tempo pela constante de calibração do viscosímetro. O ensaio de viscosidade foi realizado na temperatura recomendadas pela NBR 10576 (32 graus) em triplicata.

4.1.2 Procedimento para a obtenção da Rigidez Dielétrica

Neste teste, os óleos foram submetidos a uma tensão elétrica sob condições prescritas no método de ensaio NBR 6869. Segundo esta norma, o aumento da tensão foi de 3 kV/min e o equipamento usado foi o Electric Test SERTA.

Foram realizados três testes consecutivos para cada vez que a célula era cheia com óleo (OMI e OVI), o número de ensaios dependia da validade dos resultados, que era verificada usando critérios de consistência estatística: “Para que o ensaio seja considerado válido, com um desvio padrão não muito elevado, a

diferença entre o valor máximo e mínimo multiplicado por três não deve ser superior ao valor mais próximo do valor mínimo das cinco determinações” (ABNT, 1989).

Se este princípio fosse satisfeito, a rigidez dielétrica da amostra seria determinada calculando a média aritmética dos três ensaios.

Na Figura 14, o transformador trifásico passando por abertura da escotilha superior e retirada de OMI para a realização de teste de rigidez dielétrica

Figura 14 - Coleta do OMI para teste de rigidez dielétrica



Fonte: Próprio autor

Na Figura 15, o equipamento utilizado para a medição é o Electric Test SERTA. Na primeira medição da rigidez dielétrica com o OMI, obteve-se um valor de 55,6 kV, quando a norma determina um valor acima de 30 kV, estando, portanto este valor dentro dos níveis aceitáveis, pois apenas fluxo eletromagnético pode circular dentro do transformador.

Figura 15 – Aparelho para medição de Rigidez Dielétrica com OMI e OVI



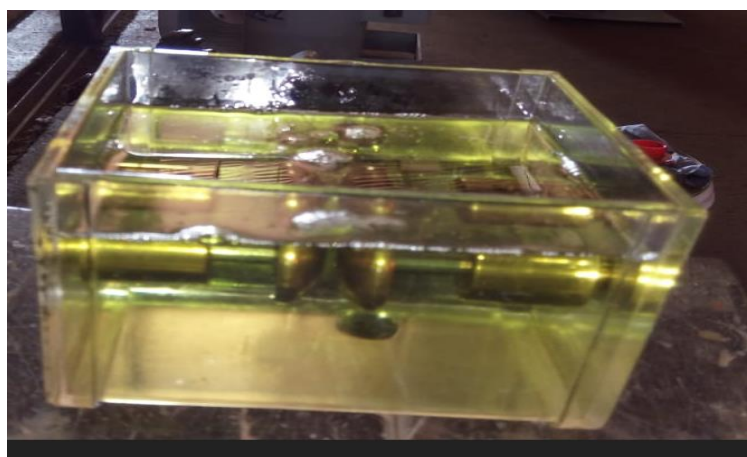
Fonte: Próprio autor

Após o OMI descansar por cerca de 4 minutos, foi novamente submetido a teste obtendo-se o valor de 62,1 kV, satisfatório, conforme a norma ABNT NBR 15422.

Novamente, após 4 minutos, tornamos a fazer o mesmo teste, obtendo como resultado o valor de 50,9 kV. Esse resultado traduz que o OMI já precisa de um tempo maior para a sua recomposição, uma vez que a sua característica elétrica (rigidez), já começa a dar sinais de falha.

De forma idêntica, coletou-se o OVI, após a energização do transformador com o intuito de testar sua rigidez.

Figura 16 – Coleta de OVI para teste de Rigidez Dielétrica



Fonte: Autor

Na primeira medição, obteve-se o resultado de rigidez de 58,5 kV, também dentro do especificado pela ABNT NBR 15422, ou seja, maior que 30 kV.

Figura 17 – Primeira medição de Rigidez Dielétrica com OVI



Fonte: Autor

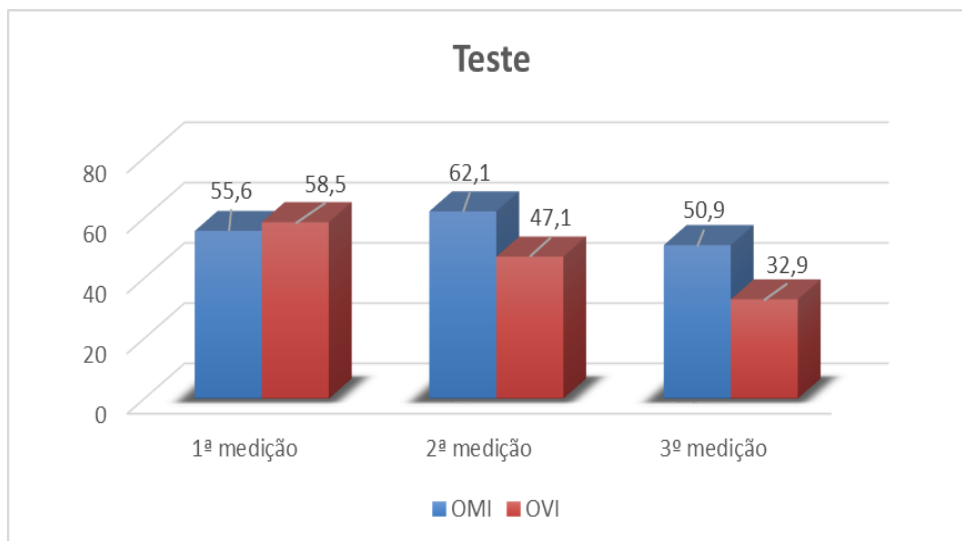
Após 4 minutos de descanso do OVI, torna-se a fazer o teste e agora o resultado foi um valor menor de rigidez dielétrica de 47,1 kV, o que denota que o OVI, tal qual o OMI, precisa de um tempo para a sua recomposição dielétrica, porém, os resultados são satisfatórios com base nas normas ABNT NBR 15422.

Realiza-se um terceiro teste e, novamente, observa-se a continuidade da degradação da rigidez dielétrica, obtendo-se como resultado 32,9 kV.

Tabela 8 - Comparação da medição de rigidez dielétrica entre OMI e OVI

Teste	OMI	OVI
1ª medição	55,6 kV	58,5 kV
2ª medição	62,1 kV	47,1 kV
3ª medição	50,9 kV	32,9 kV

Fonte: Autor

Gráfico 6 Comparação da medição de rigidez dielétrica entre OMI e OVI

Fonte: Autor

4.1.3 Procedimento para obtenção do índice de Acidez ou de neutralização

O óleo vegetal objeto deste estudo (Envirotemp FR3) apresenta índice de neutralização dentro do limite estabelecido pela NBR 15422 que é de 0,06 mgKOH/g. Assim, o que se quer é avaliar se após a inserção do OVI no vaso do transformador, que anteriormente acondicionava OMI, e, após secagem deste transformador, colocando-se em substituição ao OVI e, após energização, medir-se novamente a acidez para avaliação e daí verificar se as características foram mantidas ou alteraram-se. Porém, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos pela NBR 15422.

De acordo com Moretto; Fett (1988), as condições da neutralização dependem do percentual de ácidos graxos livres presentes no óleo, sendo assim, fazem recomendações a respeito dos níveis de concentração de solução alcalina a ser usada durante o processo de neutralização. O óleo foi colocado num Becker e esperou-se o aquecimento do mesmo entre 90 e 95°C, então se adicionou a solução quente de hidróxido de sódio em água (3%), sob agitação. A razão em volume de solução-óleo foi de 1:10. A mistura permaneceu por 30 minutos sob aquecimento cuidadosamente para manter a temperatura constante.

Ao término deste tempo, a solução foi deixada em repouso por cerca de três horas para separação de sabão e borra. A retirada da borra foi feita utilizando funil

de decantação. Após isto, iniciou-se a lavagem do óleo com água destilada, respeitando um intervalo de aproximadamente 30 minutos entre cada adição de água, intercalando água morna com água fria. A remoção de sabão e hidróxidos remanescentes foi confirmada usando gotas de fenolftaleína como indicador na fase removida após lavagem. Quando não mais se visualizou coloração rosa naquela fase, foi encerrado este processo de lavagem do óleo, submetendo-o à secagem em estufa por cerca de 3 horas a 100°C. Para a obtenção do índice de acidez, este ensaio foi realizado em triplicata. Tal procedimento foi relatado no artigo de Leite & Carvalho (2014) e é o mesmo procedimento realizado pelo laboratório ACS de Goiânia.

Caracterizações físico-químicas e dielétricas foram realizadas, novamente, a fim de verificar se o processo de neutralização modificou as características iniciais dos óleos. O Quadro 3 destaca as características físicas, químicas e elétricas presentes em uma amostra de OMI novo e tomados como valores de referência.

Quadro 3 – Valores de referência para o OMI

Características	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado
Aspecto visual	-	-	O óleo deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máximo
Densidade relativa a 20/4°C	-	ABNT NBR 7148	0,96 máximo
Viscosidade cinemática ¹⁾	20 °C 40 °C 100 °C	cSt ABNTNBR 10441	150 máximo 50 máximo 15 máximo
Ponto de fulgor	°C	ABNT NBR 11341	275 mínimo
Ponto de combustão	°C	ABNT NBR 11341	300 mínimo
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 10 máximo
Rigidez dielétrica ²⁾		ABNT NBR 6869	30 mínimo
Eletrodo de disco	kV		
Eletrodo de calota		ABNT NBR IEC 60156	42 mínimo
Rigidez dielétrica a impulso	kV	ASTM D 3300	130 mínimo
Fator de perdas dielétricas ³⁾			
	25 °C 90 °C 100 °C	% ABNT NBR 12133	0,20 máximo 3,6 máximo 4,0 máximo
Enxofre corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo
Índice de neutralização	mg KOH/ g	ABNT NBR 14248	0,06 máximo
Teor de água	mg/ kg	ABNT NBR 10710 - Método B	200
Teor de PCB (bifenilapoliclorada) ⁴⁾	mg/ kg	ABNT NBR 13882 - Método B	Não detectável

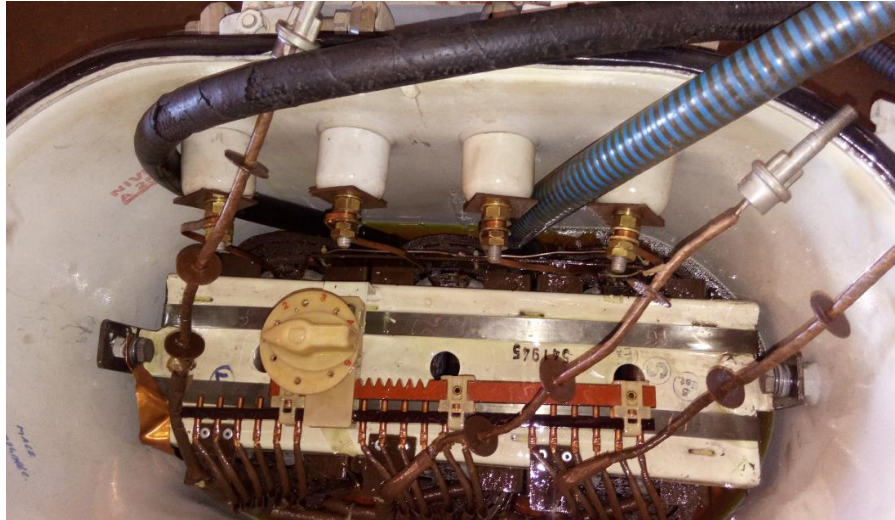
Fonte: Autor

Após a realização dos testes de rigidez dielétrica, iniciou-se a desmontagem do transformador de distribuição com o objetivo da retirada do OMI das partes

internas, secagem do núcleo para a eliminação da impregnação residual do OMI, e também do vaso do referido trafo, Figura 18. O núcleo foi içado por um pórtico rolante, Figura 19, e, em seguida, foi colocado dentro de uma estufa a uma temperatura de 70°C, durante 15 dias. Para a secagem do vaso do trafo, desconectou-se os terminais da alta tensão e da baixa tensão e, durante uma hora, até a eliminação total de resíduo de OMI, utilizou-se um secador a uma temperatura de 200°C, Figura 20. Vinte e quatro horas antes da retirada do núcleo da estufa, torna-se a fazer secagem do vaso com o secador, de forma a receber o núcleo quase isento de OMI, Figura 21, durante 30 minutos. Durante a remontagem do transformador, percebeu-se que a borracha nitrílica de vedação do trafo na parte superior estava ressecada e quebradiça e fez-se a troca, a fim de que ao energizar o transformador e colocar carga, não houvesse vazamento de óleo na tampa superior, Figura 22. O processo de recolocação do núcleo no trafo se deu de forma idêntica ao da sua retirada, usando um pórtico rolante.

Em seguida reconectou-se as ligações da alta e baixa tensão do transformador, bem como a reconexão dos terminais das buchas de alta e baixa tensão, Figura 23, e, posteriormente, preencheu-se o núcleo com OVI de forma manual e por gravidade, Figura 24, através da tampa de inspeção superior. O trafo foi fabricado pela Romagnole com capacidade para 40 litros, de número de série 541945, com fasorial DYn1 (Delta no primário e estrela no secundário), com nível de tensão primária de 13.8 KV e tensão secundária 380/220 Volts, conforme dados de placa, Figura 25. Em seguida, efetuou-se a medição da isolação dos enrolamentos do trafo após a colocação do OVI, antes da sua energização como medida de segurança elétrica, Figura 26, obtendo-se os seguintes resultados: Alta contra baixa tensão: 6 GΩ , Alta contra carcaça : 3,8GΩ , Baixa contra carcaça : 3,0GΩ.

Figura 18 - Esvaziamento do trafo contendo OMI



Fonte: Autor

As mangueira na cor azul e preta esvaziando o Transformador contendo OMI.

Figura 19 – Içamento do núcleo impregnado com OMI



Fonte: Autor

Na figura19, Retirou-se o núcleo do vaso do transformador para ir para a estufa.

Figura 20 – Secador utilizado para secagem do vaso no trafo com OMI



Fonte: Autor

Na figura 20, utiliza-se o secador para a secagem do vaso do transformador, no intuito de eliminar a presença de OMI.

Figura 21 – Núcleo na estufa a 70°C



Fonte: Autor

Na figura 21, o núcleo é colocado na estufa por período de 22 dias, com o objetivo de eliminar a impregnação de OMI nos enrolamentos e no papel, à temperatura 70°C para secar o OMI.

Figura 22 - Substituição da borracha nitrílica da tampa superior do trafo



Fonte: Autor

Na figura 22, a borracha nitrílica é substituída por apresentar ressecamento e poderia promover vazamentos de óleo na parte superior do transformador.

Figura 23 - Início da remontagem e conexão das buchas de AT e BT



Fonte: Autor

Na Figura 23, visualiza-se os terminais de alta tensão e de baixa tensão, além das borrachas de vedação e buchas de alta tensão.

Figura 24 – Enchimento do trafo com OVI



Fonte: Autor

A figura 24 , destaca a colocação no transformador do OVI na tampa superior do transformador , destacando que este último estava acondicionado em granel.

Figura 25 – Dados de placa do trafo em teste com OVI



Foto: Autor

Na figura 25, os dados de placa do transformador são destacados, demonstrando-se sua ligação fasorial, meio refrigerante, fabricante e potência.

Figura 26 – Medição de isolamento do trafo com OVI



Fonte: Autor

Após a colocação do OVI no transformador, o valor da resistência ôhmica de isolamento pode sofrer alterações significativas para maior, se o OVI sofrer alguma contaminação com particulados em suspensão. Daí a necessidade de se medir (Figura 26). Neste caso, quando da energização do transformador, poderá haver alguma condução entre o primário e secundário do trafo propiciando curto-circuito interno no equipamento.

3.1.6.1 Procedimento para a energização do transformador com o óleo vegetal

Na figura 27, o transformador em teste com o óleo vegetal foi alimentado pelo enrolamento da alta tensão, partindo do enrolamento da alta tensão de uma trafo de 75 KVA. Este trafo funcionou como um trafo elevador reproduzindo a alta tensão em suas buchas primárias.

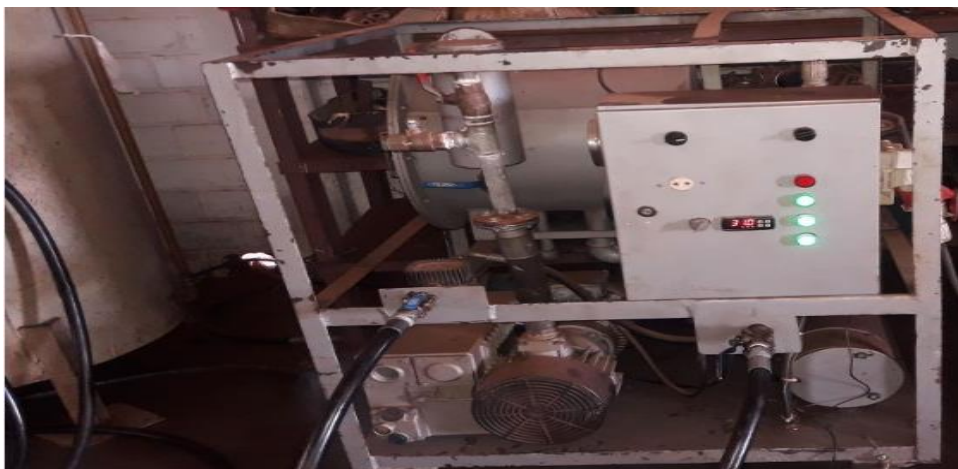
Figura 27 – Energização do trafo com OVI



Fonte: Autor

A baixa tensão do trafo com OVI , alimentou uma máquina termovácuo com potência de 10 CV , por 72 horas ininterruptas, Figura 28. A utilização da termovácuo deu-se apenas para o enchimento de um cilindro de óleo em ciclo fechado, ou seja, enchimento e esvaziamento contínuo do referido cilindro de forma constante, de forma a avaliar o desempenho e funcionamento do trafo com OVI.

Figura 28 - Máquina termovácuo alimentada pelo trafo com OVI



Fonte: Autor

4.2 Análise dos parâmetros Físico-Químicos e Elétricos

No parâmetro físico Viscosidade: o procedimento adotado será o da metodologia do viscosímetro capilar imerso em banho com temperatura controlada. Este ensaio se baseará nas três temperaturas recomendadas pela NBR 15422 20, 40 e 100°C. (ABNT 2006c).

Parâmetro Químico Índice de Acidez: será determinado pela metodologia que utiliza solução de hidróxido de potássio como titulante. O teste estatístico para análise será a triplicata, em que a fonte de resposta matemática ao ensaio se baseará na seguinte equação: IA (índice de acidez) = a.f.M.e/p, em que (a) representa a volume em (mL) da solução de KOH/g na titulação, (f) representa o fator de correção da solução de KOH/g, (P) representa massa em grama de óleo usado (e) representa o equivalente em grama de KOH utilizado e (M) representa a concentração molar da solução titulante.

Parâmetro Elétrico Rigidez Dielétrica: 3 amostras de óleo serão submetidas, a primeira conterá apenas OMI de origem parafínica, fornecida pela empresa MCZ Transformadores na cidade de Paraíso do Tocantins. A segunda amostra será de OVI, fornecido pela Cargill (email de solicitação anexo). E a terceira amostra será proveniente da mistura do OVI com a impregnação residual numa proporção de 10% de OMI isolante, após secagem por 192 horas numa temperatura correspondente a 70°C em estufa (alguns autores recomendam impregnação máxima de 7%). Esta proporção é estimativa e baseia-se na impregnação residual por OMI nas partes ativas de um transformador de 15 KVA, quando do preparo deste para receber o OVI. Todas as amostras serão submetidas a uma tensão elétrica sob condições prescritas no método de ensaio NBR 6869 (ABNT, 1989).

Todos os ensaios foram realizados em triplicata, sendo o valor médio da triplicata a melhor estimativa dos resultados das amostras, enquanto que o desvio padrão estima o erro experimental em uma determinação. O erro padrão no valor médio da triplicata é menor pelo fator $1/\sqrt{3}$, em que o valor médio do intervalo de confiança será expresso pela equação:

$$\mu = \bar{x} \pm t_{N-1} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad \text{Equação 1}$$

que representa a média, σ corresponde ao desvio padrão, N é o número de réplicas (3 no caso da triplicata) e t é o valor crítico da distribuição t de Student com $N-1$ graus de liberdade. (ZAMBROZI; KAORI; BRUNS; SCARMINIO, 2011).

4.3 Propagação das Incertezas e Tratamento Estatístico

Via de regra as grandezas físicas apresentam incertezas durante as suas medições. O desvio quadrático da média expressa a confiabilidade de um resultado. Segundo o teorema do limite central de Laplace, quando muitos fatores intervêm como fonte de erros em uma medida, a distribuição dos seus valores obedece a uma curva gaussiana (ZUKOSWSKI, 1999).

$$\text{Gauss } (\epsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) \quad (2) \text{ demonstrou que o erro}$$

dessas medidas é dado por

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Pela teoria dos erros, em processos físicos que se comportam de acordo com a distribuição normal (ou gaussiana), σ representa a variância total de vários processos independentes é a soma direta das variâncias de cada um deles, conforme equação. (ZUKOSWSKI, 1999).

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2 \quad (3)$$

No caso em estudo, para determinar o erro das grandezas viscosidade cinemática, índice de neutralização e rigidez dielétrica, determina-se o erro de leitura dos valores e análise dos erros sistemáticos de cada grandeza, proveniente das medições de laboratório (ambiente controlado).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Limite de quantificação (LQ) das técnicas referentes às metodologias de ensaios em transformadores de distribuição contendo OVI, seguiram como monitoramento o especificado conforme a norma NBR 16518. Assim, a incerteza de medição expandida (U), do ensaio mencionado, é baseada na incerteza padrão combinada, com um nível de confiança de 95%.

A NBR 15422 estabelece limites de especificações para o óleo vegetal isolante atendendo aos seguintes valores: Elétrica: Rigidez dielétrica em quilovolt, variando de maior ou igual a 35 kV para amostra em granel, que foi o caso do presente estudo, até maior ou igual a 60 kV para amostra em tambor; b) física: Viscosidade cinemática, para 40° Celsius, menor ou igual a 50 kV e para 100°C, menor ou igual a 15 kV; c). Químico: Índice de Neutralização, menor ou igual a 0,06 mgKOH/g.

5.1 Índices de Neutralização

Ao proceder-se à análise físico-química de óleo vegetal N° 66351, N° 66352, N° 66756 da ACS laboratórios, realizada no dia 12/09/2018 e, em cumprimento a norma 14248:2009, obteve-se em triplicata os seguintes valores: 1ª medição: 0,05 mgKOH/g; 2ª medição: 0,05 mgKOH/g; 3ª medição: 0,05 mgKOH/g.

Assim sendo, para a grandeza química Índice de neutralização, os resultados permaneceram constantes em todas as análises, e, por não se ter nenhuma variação apreciável, o desvio padrão é nulo e, conseqüentemente, não há erro apreciável, estando a amostra analisada dentro dos padrões recomendados pela NBR 10576:2017.

5.2 Rigidezes Dielétricas

A análise de rigidez dielétrica demonstrou que o OVI, após ser submetido a uma tensão de 3KV, através do equipamento de teste de rigidez, precisa de um tempo para recompor as suas características dielétricas de aproximadamente 4 minutos, o que é perfeitamente compreensível quando também se adota o mesmo padrão para o OMI, segundo a ABNT NBR 6869. Assim sendo, obteve-se os

seguintes resultados para o OVI: 1ª medição (58,5 kV); 2ª medição (47,1 kV); 3ª medição (32,9 kV); em intervalos de tempo correspondentes a cada medição de 3 minutos. A norma ABNT NBR 15422 preconiza que os valores de rigidez para o OVI não deverão ser inferiores a 35 kV, o que coloca os resultados obtidos dentro dos limites recomendáveis.

Tabela 9 – Valores de Rigidez Dielétrica - OVI em kV

Valor Referência	1ª medição – OVI	2ª medição – OVI	3ª medição - OVI
>35	58,5 KV	47,1 KV	32,9 KV

Fonte: Autor

5.2.1 Tratamentos Estatísticos para a análise da rigidez dielétrica

Teste de média (μ): $\mu = (58,5+47,1+32,9) / 3 = 46,16$ kV

Erro (ϵ), foi determinado pela equação 2. O valor obtido foi 7,40 kV. O nível de confiança de 95% e foi realizado dentro do preconizado pela NBR 10576:2017.

A Gaussiana reflete o comportamento amostral dos valores de viscosidade e rigidez dielétrica. Desta forma, quanto maior for o valor do desvio padrão (σ) em relação à média (μ), tanto maior será o coeficiente de variação (variância), e maior será o erro.

Como o tratamento é quantitativo, faz-se o uso da regressão e estabelece-se o coeficiente de variação. Assim:

$CV (\%) = 100 \sqrt{QM \text{ erro}} / \mu \Leftrightarrow 100 \sqrt{7,40} / 46,16 = 5,89\%$ e que, segundo Pimentel Gomes (1987), um coeficiente de variação compreendido entre 0 a 10%, traduz uma alta condição homogênea e quanto menor o coeficiente de variação, menor o erro apresentado no experimento. A Gaussiana, acima, indica que quanto maior o desvio padrão, tanto maior o coeficiente de variação e maior o erro experimental, o que não é o caso aqui mencionado, pois o erro é pequeno e existe homogeneidade no tratamento com um nível de confiança de 95%.

5.3 Viscosidade Cinemática

Ao realizar a análise física de óleo vegetal N° 66352 N° 66757, N° 66759, no dia 12/09/2018, obteve-se os seguintes resultados: 1ª medição (35 cSt); 2ª medição (35,3 cSt); 3ª medição (34,9 cSt). A norma ABNT NBR 16518, preconiza que os valores de viscosidade cinemática para o OVI deverão ser inferiores a 50,0 cSt, o que coloca os resultados dentro dos limites recomendáveis.

Tabela 10 --Valores de Viscosidade Cinemática – OVI em CsT

Valor de Referência	1ª medição – OVI	2ª medição – OVI	3ª medição - OVI
<50,0	35 CsT	35,3 CsT	34,9 CsT

Fonte: Autor

5.3.1 Tratamentos Estatísticos para a análise da viscosidade cinemática

Teste de média (μ): $(35,0 + 35,3 + 34,9) / 3 = 35,06$ cSt

6. CONCLUSÃO

Conseguiu-se atingir objetivo geral desse trabalho quando se demonstrou a viabilidade técnica da utilização de óleo vegetal isolante em substituição ao óleo mineral isolante sem alteração das características construtivas do transformador, apenas promovendo a sua secagem em estufa específica, e avaliação/desempenho do comportamento do OVI sob a ótica de um parâmetro físico (Viscosidade cinemática em cSt), um parâmetro químico (Índice de Neutralização mgKOH/g) e um parâmetro elétrico (rigidez dielétrica kV), sob a égide da NBR ABNT 15422.

As análises laboratoriais controladas e seus resultados reforçam que o OVI, após ser submetido à tensão de trabalho primária de 13,8 kV, com a presença de carga no secundário do transformador, apresentou valores acreditados pela coordenação geral de acreditação do INMETRO – CGCRE, sob o nº CRL0976 (anexo resultados dos ensaios).

Em relação ao objetivo específico proposto sobre a análise dos parâmetros Viscosidade e Índice de neutralização, aplicáveis ao Óleo Vegetal Isolante, quando este substituir o Óleo Mineral Isolante em transformadores de distribuição (ABNT NBR 10441 e ABNT NBR 14428, respectivamente), cumpriu-se, pois a análise realizada evidencia que ambos os parâmetros encontram-se dentro dos níveis aceitáveis, ou seja, para a Viscosidade cinemática maior que 35 cSt e, no caso do Índice de Neutralização, menor que 0,06 mgKOH/g.

Sob a análise da rigidez dielétrica (ABNT NBR 6869) do óleo mineral puro de origem parafínica, do óleo vegetal puro a base de éster, e do OVI, quando este substituir o óleo mineral no transformador trifásico de 15 KVA (Número de série 195445), fabricação Romagnole, com impregnação máxima residual admissível de 7% de OMI, foi avaliado e o resultado é positivo. A norma diz que, para OVI em granel, o valor de rigidez não pode ser menor que 35 kV. No caso específico, o valor de rigidez dielétrica medido tem um valor médio de 46,16 kV (item 5.2.1) e, portanto, acima da média.

Os resultados obtidos de ordem física, química ou elétrica são de extrema importância, entretanto, questões de ordem econômica e de sustentabilidade devem ser avaliadas, inclusive suas transversalidades. A utilização do óleo vegetal permitirá mitigar a utilização de elementos fósseis e poluidores através da imediata substituição em transformadores de distribuição de OMI por OVI. Criar-se-ia, um

círculo virtuoso, com a formação de um nicho de mercado voltado não apenas para a produção de biocombustíveis, mas, sobretudo, para a produção de óleo refrigerante e isolante em larga escala.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS – ABNT. **Norma regulamentadora NBR 6869** – Líquidos isolantes elétricos. 1989. 4 p.

_____. **Norma regulamentadora NBR 15422** – Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos. 2015. 11 p.

_____. **Norma regulamentadora NBR 15088** – Ecotoxicologia aquática - Toxicidade aguda - Método de ensaio com peixes – Cyprinidae. 2016.

_____. Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos - **Diretrizes para supervisão e manutenção**. 2017. 38 p.

ANAEEL **Nota Técnica nº 007/2000** - SRT/ANEEL, 15 de março de 2000.

ASTMD6871, **Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus,** ASTM International, Volume 10.03, West Conshohocken, PA, 2014.

BEES, “Building and Fire Research Laboratory,” National Institute of Standards and Technology, Version 4.0 e August 2007. Disponível em: <http://www.bfrl.nist.gov/oae/software/bees/>. Acessado em: 5 fev. 2018.

CARGILL. **Envirotemp™ Fluidos Dielétricos**. Disponível em: <https://www.cargill.com.br/pt_BR/envirotemp-fluidos-dielétricos>. Acesso em: 05 dez. 2017.

CAVALETT, Otávio. **Análise do ciclo de vida da soja** – Dissertação de Doutorado Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008. Disponível em <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/256262/1/Cavalett_Otavio_D.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2017.

ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte. **Óleos Isolantes: Riscos e Fatores favoráveis**. Disponível em < <http://www.eletronorte.gov.br>>. Acesso em: 14 jun. de 2017.

EPA, “Relatório de Verificação de Tecnologia Ambiental, ” DTSC R-02-02, may, 2002.

FRIEDENBERG, L; SANTANA, R. **Propriedades de óleos isolantes de transformadores e a proteção do meio ambiente**. In: LX SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. 2014, Porto Alegre-RS. ENERGIA E AMBIENTE. 2014. p. 1 - 12.

GRANATO, R. **Óleo mineral isolante LACTEC**. Apostila. Paraná, 2001.

IEEE C57, 147, IEEE **Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers,** Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA, 2008.

LEOPOLDINO, R. **Estudos sobre gases dissolvidos em óleos vegetais isolantes:** influência de arco elétrico e superaquecimento de sensibilidade em um sistema de refrigeração por absorção água- amônia: 2011. 89f. Dissertação (Mestrado em – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.2011.

LIMA, L. D. M. **Transformadores, reatores, reguladores:** ferramentas para uma manutenção baseada em confiabilidade. Recife: Bagaço, 1966. p. 343.

MARTINS, M. M.; **Óleo vegetal isolante envirotemp® FR3™ e sua influência no envelhecimento de Transformadores:** Superação de Equipamentos – Aspectos conceituais, critérios e procedimentos. Rio de Janeiro: Cigré Brasil, Cepel, 2008.

MARULANDA, AR; ARTIGAS, MA; GAVIDIA, A.; LABARCA, F. y PAZ, N. Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer. En *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America* , 2008, pp. 1- 6. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4641781>. Acessado em 10 jun.2017.

MCSHANE, C.P. Caracterização físico-química e dielétrica de óleos biodegradáveis para transformadores elétricos: 2002. 5f. Artigo, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.303-313, 2002.

MILASCH, Milan. **Manutenção de transformadores em líquido isolante.** São Paulo: Editora edgard blcher.1983. 354 p.

MORETTO, E; FETT, R. **Tecnologia de óleos Vegetais e Gorduras Vegetais na Indústria de Alimentos.** São Paulo: Varela, 1998.

NOGUEIRA, L. A. H. **Energia: Conceitos e Fundamentos.** In: MARQUES, M.; HADDAD, J. e MARTINS, A. R S. (eds), *Conservação de Energia Elétrica – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*, 3ª ed., Capítulo 11, Itajubá: ELETROBRÁS/PROCEL, Editora da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2001.

NUNES, S. **Produção e consumo de óleos vegetais no Brasil.** Departamento de Estudos Socioeconômicos Rurais, 2007. 10.p.

OLIVEIRA, J. C.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. **Transformadores:** teorias e ensaios. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1984. p.173.

PIMENTEL-GOMES, **Curso de Estatística Experimental.** Piracicaba. ESALQ/USP,1985. 162 p.

RAMOS, L. P. **Aspectos técnicos sobre o processo de produção de biodiesel.** In: SEMINÁRIO PARANAENSE DE BIODIESEL, 1., 2003, Londrina. Anais eletrônicos. Londrina Embrapa. Disponível em: Acesso em: 23 de agosto de 2003.16 p.

SANTANA, R. M. C. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Materiais. Bento Gonçalves, 9500, **Agronomia**. Porto Alegre - RS (ruth.santana@ufrgs.br).

SILVA, J. R. da. **Avaliação "On-line" de temperatura do transformador de potência através de modelagem numérica magnética e termodinâmica**. 2015. 151 f, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015.

_____. **Modelagem para monitoramento térmico de transformadores em operação e avaliação do envelhecimento em função do perfil de carregamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2005.

STOCCO, M. **Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2009.

UHREN, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos Elétricos, em substituição ao óleo mineral**: 2007. 121f. Dissertação (Mestrado em Profissional) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realizado pelo Instituto de Tecnologia (LACTEC) em parceria com o instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Paraná. 2007.

UL, "Underwriters Laboratories," Organização independente, sem fins lucrativos, de certificação e teste de produtos, EOVK.MH10678 Transformer Fluids, 2011. UL Listed and Classified Products, Underwriters Laboratories, Northbrook, IL, USA and, EOUV.MH10678, Dielectric Mediums, UL Listed and Classified Products, Underwriters Laboratories, Northbrook, IL, USA.

WILHELM, C.J., REEVES, J.M., PHILLIPS, T.J., & MITCHELL, S. H. (2007). Mouse lines selected for alcohol consumption differ on certain measures of impulsivity. *Alcoholism: Clinical and experimental research*, 31, 1839-1845. doi:10.1111/j.1530-0277.2007.00508.x

WILHELM, H. M.; H. M.; TULIO, L.; UHREN, Wilson. **Produção e uso de óleos vegetais isolantes no setor elétrico**. Ver. Engenharia Elétrica (online). 2009, vol.1, n.592, pp.120-124. Disponível em: http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao592/Art_Eng_Eletrica_2.pdf. Acessado em: 12 dez. 2017.

ZAMBROZI, Livia Maria; KAORI, Patrícia Soares; BRUNS, Roy Edward; SCARMINIO, Ieda Spacino. **Estatística aplicada à química: dez dúvidas comuns**. Porque nas aulas de laboratório de química as determinações são feitas em triplicata? Campinas: UNICAMP/UDEL 2011.

ZUKOSWSKI Jr, J.C. **Estudo de sensibilidade em um sistema de refrigeração por absorção água- amônia**: 1999. 237f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

ANEXOS

ANEXO 1

ANEXO 2

ANEXO 3

ANEXO 4

ANEXO 5