



Universidade Federal  
de Campina Grande

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

AMANDA KARLA RODRIGUES OLIVEIRA EULÁLIO

**APLICAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL PARA TRANSFORMADORES**

Campina Grande - Paraíba  
2014

AMANDA KARLA RODRIGUES OLIVEIRA EULÁLIO

## APLICAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL PARA TRANSFORMADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Edson Guedes da Costa

Campina Grande - Paraíba  
2014

AMANDA KARLA RODRIGUES OLIVEIRA EULÁLIO

## APLICAÇÃO DE ÓLEO VEGETAL PARA TRANSFORMADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**

Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Edson Guedes da Costa**

Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

## AGRADECIMENTOS

Antes de agradecer a qualquer pessoa, agradeço a Deus, pelo dom da minha vida, pela Sua presença e proteção e pelo dom da perseverança e sabedoria, que foram de fundamental importância para trilhar os meus caminhos acadêmicos, permitindo a conclusão deste trabalho e a vitória em mais uma etapa do meu longo caminho profissional.

Agradeço também aos meus pais, Saulo Nascimento Eulálio e Ana Letice R. O. Eulálio, por terem sido meu alicerce, meus grandes exemplos de superação e determinação, além de despertarem em mim um caráter inquestionável, pela boa educação e doação de cada um deles. Por todas as noites que me esperaram chegar depois de longas e incontáveis madrugadas de estudos, pela paciência extra nas semanas cansativas e sem fim de provas e principalmente por me acolherem de braços e corações abertos em cada um dos meus tropeços.

A todos os meus familiares por sempre torcerem por cada passo meu, e que sei que continuarão a torcer durante todo o meu caminhar.

Agradeço ao meu orientador, o professor Edson Guedes da Costa, por ter me proporcionado, por meio deste trabalho e de sua orientação, a oportunidade de adquirir conhecimentos a cerca do assunto tratado.

Em especial agradeço ao Sr. David Sundin, diretor Técnico da Empresa SVB Environmental Lubricants, que com sua vasta experiência no assunto, já que participou da primeira pesquisa que resultou em Fluído Envirotemp® FR3™ enquanto gerente técnico na Cooper, a primeira pesquisa sob contrato com ABB que resultou no Fluído Biotemp® e hoje na atual empresa fabrica óleos especiais (resistente a fogo, principalmente), mostrou-se muito solícito com a minha pesquisa e gentilmente me cedeu informações técnicas dos produtos relatados neste trabalho.

Estendo os agradecimentos a Companhia Energética de Minas Gerais, pela disponibilidade e abertura que obtive por intermédio do meu orientador.

Agradeço também aos meus colegas de curso, Daniel Carlos Pereira, Igor Henrique Ferreira Moreno P. da Silva e Renata Japiassú, que sempre foram apoio nos estudos e na vida. Amigos que compartilharam os risos e desesperos, o café e energético, o viver ou viver. Pessoas que mesmo de longe tem a lembrança viva comigo.

Aos amigos de fé, irmãos peregrinos, irmãos em Cristo que se fizeram presente por meio de orações e boas energias, que me mantiveram no caminho de Deus, reluzindo através de seus sorrisos, cuidados simples, e corações generosos.

E para que não falte ninguém, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou e das conquistas que tenho hoje.

*“Tudo o que fizerdes,  
Fazei-o de bom coração,  
Como para o Senhor,  
E não para os homens.”*

Colossenses 3,23.

## RESUMO

A isolação e arrefecimento de um transformador de potência estão intimamente ligados ao fluído isolante que se utiliza. O óleo mineral isolante, produzido por destilação do petróleo é, até o momento, o fluído mais utilizado como dielétrico, em alguns equipamentos elétricos. No entanto, as crescentes preocupações ambientais com a sua baixa biodegradabilidade e a existência de limitadas reservas tornaram atraente a proposta de ter os óleos vegetais, à base de ésteres naturais e provenientes de fontes renováveis, como uma alternativa aos óleos minerais. Com base neste fato, o trabalho de conclusão de curso tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica que contemple a aplicação dos óleos vegetais isolantes, fluídos denominados ecologicamente corretos, em transformadores no setor elétrico. A finalidade principal é obter, em resumo de fontes, a identificação de pontos fortes e fracos na aplicação do óleo vegetal isolante em transformadores de potência em substituição ao óleo mineral isolante. Ao final do trabalho serão apresentadas aplicações já palpáveis do óleo vegetal em transformadores.

**Palavras-Chaves:** Ecologicamente corretos, Óleo Mineral, Óleo Vegetal, Setor Elétrico, Transformadores.

## ABSTRACT

Insulation and cooling of a power transformer are closely related to the insulating fluid being used. The transformer oil, produced through oil distillation is, so far, the most used liquid dielectric in electrical equipment. However, increasing environmental concerns about its low biodegradability and the existence of limited reserves the use of vegetable oils, based on natural esters and extracted from renewable resources, it is very attractive as an alternative to mineral oils. Based on this fact, this work proposes a literature review covering the application of vegetable oil based transformer fluids, the so called eco-friendly oil, in transformers in the electricity sector. The main purpose is to identify, in articles` abstracts, fortes and weaknesses in the application of vegetable oil based transformer fluids in power transformers to replace the mineral-based oils. At the end of this work, tangible applications of vegetable oil in transformers will be presented.

Keywords: eco-friendly; mineral oil; vegetable oil; electricity sector; transformers.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Detalhe do núcleo de um transformador de potência.....	13
<b>Figura 2:</b> Cadeia carbônica saturada de cadeia fechada de óleo mineral isolante naftênico. ....	19
<b>Figura 3:</b> Cadeia carbônica aberta e ramificada de óleo mineral isolante parafínico. ....	19
<b>Figura 4:</b> Cadeia carbônica aromática de óleo mineral isolante aromático. ....	19
<b>Figura 5:</b> representação esquemática de um triacilglicerol. ....	21
<b>Figura 6:</b> Sementes de soja.....	37
<b>Figura 7:</b> Gráfico de comparação da biodegradação aquática aeróbica dos fluidos dielétricos. ....	38
<b>Figura 8:</b> Gráfico do aumento de temperatura/potência sem perda da vida útil. ....	39
<b>Figura 9:</b> Sementes de girassol.....	40
<b>Figura 10:</b> Classificação de biodegradabilidade de fluidos dielétricos em 21 dias. ....	40
<b>Figura 11:</b> Pontos de combustão e fulgor de fluidos dielétricos (°C). ....	41
<b>Figura 12:</b> Transformador de 88 kVA de éster natural em produção no Brasil: vista externa (a) e interna (b)....	44
<b>Figura 13:</b> Transformador de potência ecológico resultado da parceria entre CEMIG e ABB. ....	45
<b>Figura 14:</b> Célula de testes de rigidez dielétrica, DTA 100c da BAUR. ....	52
<b>Figura 15:</b> Configuração do eletrodo, (1,2) eletrodo tipo Rogowski, (3) eletrodo plano, (4) eletrodo ponto.....	52
<b>Figura 16:</b> Distribuição da tensão de ruptura do óleo vegetal (FR3) com eletrodos de Rogowski afastados de ou diâmetro de 2,5 mm. ....	53
<b>Figura 17:</b> Distribuição da tensão de ruptura do óleo mineral com eletrodos de Rogowski afastados de ou diâmetro de 2,5 mm. ....	53
<b>Figura 18:</b> Distribuição da tensão de ruptura do óleo vegetal (FR3) com eletrodos ponto-plano afastados de ou diâmetro de 2,5 mm. ....	54
<b>Figura 19:</b> Distribuição da tensão de ruptura do óleo mineral com eletrodos ponto-plano afastados de ou diâmetro de 2,5 mm.....	54
<b>Figura 20:</b> Probabilidade e densidade de probabilidade do óleo vegetal (FR3) pela tensão de ruptura com eletrodos de Rogowski com gap de 2,5 mm. ....	55
<b>Figura 21:</b> Probabilidade e densidade de probabilidade do óleo mineral pela tensão de ruptura com eletrodos de Rogowski com gap de 2,5 mm. ....	55
<b>Figura 22:</b> Probabilidade e densidade de probabilidade do óleo vegetal (FR3) pela tensão de ruptura com eletrodos ponto-plano com gap de 2,5 mm.....	56
<b>Figura 23:</b> Probabilidade e densidade de probabilidade do óleo mineral pela tensão de ruptura com eletrodos ponto-plano com gap de 2,5 mm. ....	56
<b>Figura 24:</b> Índice de neutralização para amostras do papel Kraft/OVI envelhecidas em estufa. ....	58
<b>Figura 25:</b> Valores de [2Fal] no óleo, para diferentes temperaturas. ....	61
<b>Figura 26:</b> Valores de [2Fal] no papel, para diferentes temperaturas. ....	61
<b>Figura 27:</b> Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 0 minutos. ....	64
<b>Figura 28:</b> Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 5 minutos. ....	65
<b>Figura 29:</b> Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 10 minutos. ....	65
<b>Figura 30:</b> Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 15 minutos. ....	66
<b>Figura 31:</b> Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 20 minutos. ....	66
<b>Figura 32:</b> Transformador 145 kV - 100% óleo vegetal, produzido pela CEMIG em parceria com a ABB. ....	73
<b>Figura 33:</b> Transformador revitalizado. ....	74

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Característica dos OVI novos.</b> .....	28
<b>Tabela 2: Características do Ambient Prime® Fluid.</b> .....	42
<b>Tabela 3: Características do Ambient® Fluid.</b> .....	42
<b>Tabela 4: Característica do óleo vegetal isolante MIDEL eN.</b> .....	43
<b>Tabela 5: Grau de polimerização (GP) para o Papel Kraft isolante envelhecido em OVI.</b> .....	59
<b>Tabela 6: Ensaio físico-químicos das misturas OVI (Envirotemp® FR3™)/OMI.</b> .....	63

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1 FLUÍDO ISOLANTE EM TRANSFORMADORES.....	12
1.1 Tipos de fluídos isolantes .....	17
1.2 Fluidos de segurança .....	17
1.2.1 Óleo mineral isolante.....	18
1.2.2 Ascarel.....	20
1.2.3 Óleo vegetal isolante .....	20
2 ÓLEO VEGETAL ISOLANTE.....	23
2.1 Óleos obtidos de sementes oleaginosas .....	23
2.1.1 Óleo de soja.....	23
2.1.2 Óleo de milho .....	24
2.1.3 Óleo de algodão.....	24
2.1.4 Óleo de girassol .....	24
2.1.5 Óleo de babaçu .....	25
2.2 Aditivos oxidantes para óleos vegetais isolantes .....	26
2.3 Especificação técnica.....	27
2.3.1 Caracterizações físico-químicas .....	28
2.3.2 Propriedades térmicas.....	33
2.4 Envelhecimento do óleo isolante.....	34
2.5 Óleos comercialmente disponíveis .....	35
2.5.1 Exemplos de fluidos comercializados .....	37
2.6 Transformador verde .....	43
2.7 Reenchimento de transformadores .....	46
3 ESTUDOS E TESTES .....	48
3.1 Testes.....	51
3.1.1 Rigidez dielétrica.....	51
3.1.2 Envelhecimento acelerado do sistema papel Kraft/OVI e papel Kraft/OMI. ....	57
3.1.3 Avaliação do efeito da adição de OMI ao OVI.....	62
3.1.4 Análise de gases dissolvidos.....	63
4 Comparação.....	67
5 Aplicações .....	72
6 Conclusão .....	76
Bibliografia.....	77

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica está presente em inúmeros atos cotidianos da sociedade moderna, pode-se afirmar, inclusive, que é uma das energias mais utilizadas no mundo. Uma eventual interrupção do serviço de abastecimento ou até mesmo o mau funcionamento de um transformador acarreta prejuízos consideráveis para a economia do local afetado e para a concessionária responsável.

Por ser um produto que não pode ser armazenado a baixo custo e em grande escala, a energia elétrica tem que ser consumida no momento em que é gerada. Esse é um fato que une, diretamente, a geração, transmissão e a distribuição de energia, sendo fundamental que o sistema elétrico possua confiabilidade e disponibilidade.

Os transformadores elétricos são equipamentos-chave nos sistemas de distribuição e transmissão de energia. São, portanto, essenciais para o padrão de vida e consumo do mundo contemporâneo. Qualquer que seja a matriz energética predominante nos diversos países, nuclear, hídrica ou fóssil, a transmissão e distribuição da energia gerada requer o uso dos transformadores (FERNANDES, 1992).

Desse modo, a história dos transformadores teve início em 1885 por meio da construção de um transformador nos Estados Unidos, com projeto a seco e utilização do ar como dielétrico. A ideia deste equipamento, usando óleo mineral como dielétrico, ser menor e mais eficiente foi patenteada em 1882, pelo professor Elihu Thompson, mas perdurou uma década até que sua idealização fosse colocada em prática (GOMES 2006).

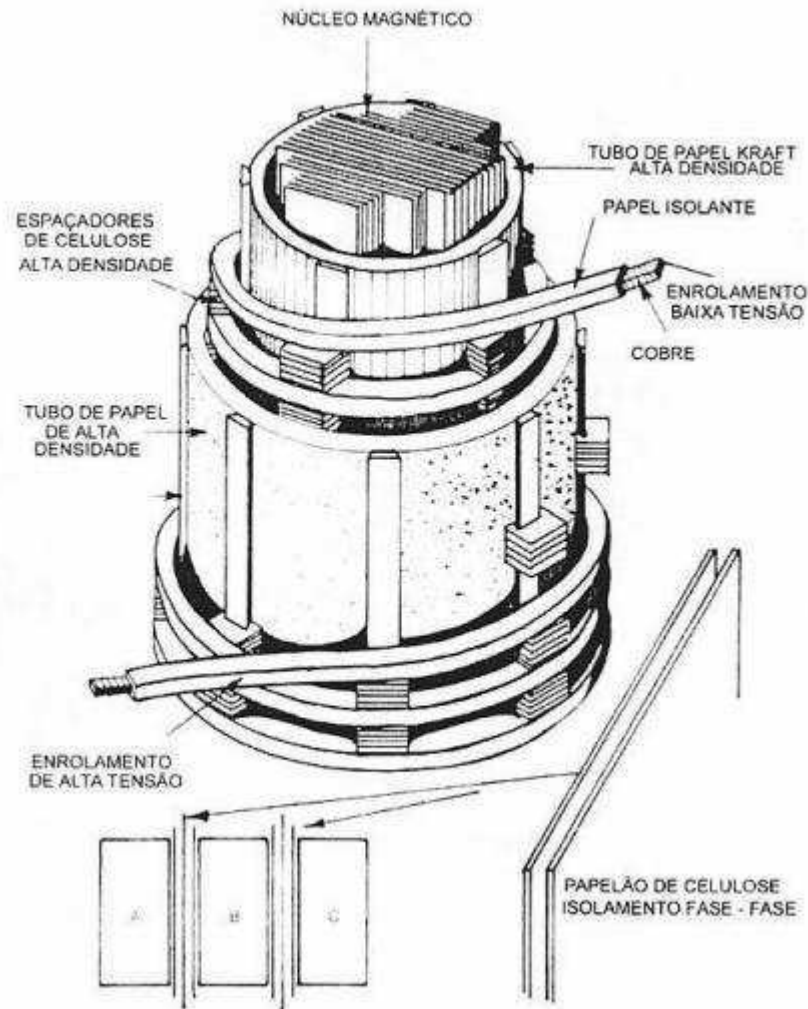
Nos dias atuais, existem diversas classes de transformadores, de diferentes potências e aplicações específicas, no entanto, todos utilizam o mesmo princípio básico, que é o fluxo magnético gerado pela corrente elétrica. Os transformadores de força são utilizados para geração, transmissão e distribuição de energia em concessionárias e subestações de grandes indústrias (GALESI NETO, 1997).

Nos transformadores, a passagem da corrente elétrica pelas espiras de material condutor da bobina primária induz um campo eletromagnético no núcleo de material ferromagnético, que induz por consequência uma corrente elétrica na bobina do secundário.

O isolamento elétrico entre as espiras é feito por meio de um isolante sólido, normalmente papel, e os vernizes colocados sobre a superfície do condutor, já que é necessário manter o isolamento entre as espiras de uma mesma bobina, ou das bobinas para o

núcleo e partes aterradas. Na Figura 1, é mostrado em detalhe o núcleo de transformador, ilustrando o uso do papel.

**Figura 1:** Detalhe do núcleo de um transformador de potência.



**Fonte:** Adaptado de MEYERS, KELLY; PARRISH, (1982).

Então, a resistência elétrica dos condutores das bobinas causa o seu aquecimento ao haver a passagem de corrente, no qual o calor é responsável pela degradação térmica do material isolante.

Segundo Neto (2004), em um transformador de potência, o óleo isolante tem a função de aumentar a isolação elétrica, sendo responsável pelo isolamento das superfícies metálicas nuas, preenchimento dos espaços vazios entre as partes energizadas, impregnação do isolamento sólido do transformador e, também, a função de dissipação de calor. Nos grandes transformadores, o óleo isolante é também utilizado como meio de monitoramento do estado de envelhecimento, mediante medição e análise de parâmetros químicos.

Vale ressaltar que, para minimizar os efeitos térmicos nas espiras usa-se a refrigeração por meio de fluidos isolantes. O óleo mineral isolante (OMI), apesar de idealizado há décadas, em conjunto com o papel Kraft ainda é o sistema isolante fluido/sólido mais usado, atualmente.

No entanto, impulsionado principalmente pela questão ambiental que tem sido motivo de preocupação da comunidade mundial de forma crescente, foram desenvolvidos, por volta de 1999, óleos vegetais apropriados para uso em equipamentos elétricos (LEWAND, 2004).

Recentemente, óleos de éster natural foram introduzidos como substitutos de óleo mineral, devido às suas propriedades. Especificamente, os óleos de éster natural (vegetal) devido à sua biodegradabilidade e não toxicidade, acompanhado de suas propriedades resistentes ao fogo em alta temperatura, são enfatizados como um substituto de óleos minerais dielétricos (PEPPAS, PYGIORTI, CHARALAMPAKOS, 2013).

Diante de progressos significativos acerca desses fluidos, empresas e instituições encabeçaram o estudo, em conjunto com testes laboratoriais e em campo, haja vista as crescentes preocupações ambientais com a baixa biodegradabilidade do fluido atualmente utilizado.

No desenvolvimento do trabalho é feita uma revisão bibliográfica que contempla, inicialmente, uma apresentação e caracterização dos óleos vegetais e minerais, utilizados como isolantes e refrigerantes no transformador, procurando explicitar os aspectos do ponto de vista físico-químico e dielétrico determinados por norma. Concomitantemente com os estudos e ensaios utilizados para a aquisição dos dados dos fluidos em uso; são apresentados simulações e os resultados obtidos em laboratório do envelhecimento dos materiais isolantes, papel/líquido.

Posteriormente é introduzida a comparação entre os óleos em questão, acentuando os prós e contra de cada um deles, dando enfoque nas características exigidas para intitular-se fluido isolante.

Na etapa seguinte, faz-se uma exposição palpável da aplicação do óleo vegetal isolante em transformador; que tem como um dos impulsionadores a Companhia Paulista de Força e Luz, a CPFL Energia, que atua nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul, ao lançar em meios de comunicação a migração de seus transformadores tradicionais, a óleo mineral, por transformadores verdes que utilizam óleo vegetal.

A razão principal deste trabalho é salientar que há condições de promover melhorias contínuas nos processos que envolvem a utilização de fluido dielétrico em equipamentos do setor elétrico, cooperando com a preservação do meio ambiente e gerando desenvolvimento

econômico e social sustentável. Assim, de forma geral, será abordado um estudo sobre a aplicação de óleos vegetais para transformadores em, comparação ao óleo mineral isolante utilizado atualmente. O trabalho é finalizado com o encaminhamento das conclusões.

## 2 FLUÍDO ISOLANTE EM TRANSFORMADORES

Nos transformadores de potência, a refrigeração e isolamento são realizados através da combinação do fluido dielétrico e papel isolante. A eficiência deste conjunto garante o seu bom funcionamento e conseqüentemente, o da transmissão de energia elétrica.

Para que o fluido atenda a demanda de isolamento do equipamento, este deve apresentar elevada rigidez dielétrica e atuar como extintor de arco entre partes de potencial elétrico diferente. A rigidez dielétrica do papel impregnado com óleo é maior do que seus componentes individuais (KARSAI; KERENYI; KISS, 1987).

Na função de arrefecimento, o fluido deve possuir viscosidade adequada e alta condutividade térmica, para que o aquecimento gerado pela passagem de corrente pelas espiras possa ser disperso por convecção natural.

Durante a utilização do óleo isolante no equipamento, o fluido está sujeito a um processo de oxidação, formando ácidos como produtos finais de degradação, e é por esse motivo que também deve apresentar como característica boa estabilidade à oxidação. Parâmetros fundamentais e adicionais são requeridos aos dielétricos, tais como boa condutividade térmica, baixa viscosidade, estabilidade térmica, baixa reatividade química e resistência ao fogo (ABNT NBR 10576, 2006). Ainda, além destes aspectos, é levada em consideração a biodegradabilidade, como também a disponibilidade de mercado.

As propriedades do óleo isolante podem sofrer alterações devido à oxidação, umidade, temperatura, instabilidade elétrica e também devido ao contato com materiais utilizados na construção de transformadores como papel, verniz, madeira, ar, silício e papelão (ABNT NBR 10576, 2006).

As alterações das propriedades físicas, químicas e elétricas do isolante, resultam no processo de envelhecimento do fluido. No caso do OMI, ocorre à redução das propriedades de isolamento do óleo e em um estágio avançado de oxidação, precipitação de borra (material sólido que se deposita sobre as partes internas imersas no óleo) e, por conseguinte, diminuem a vida útil do equipamento elétrico.

O monitoramento do estado do óleo isolante é de extrema importância e essa avaliação pode dar-se por análise cromatográfica que quantifica e acompanha periodicamente a formação de gases no fluido; e/ ou análise físico-química que verifica se as funções de isolamento, refrigeração e o estado de envelhecimento ainda estão satisfatórios, dessa forma, a



dependem dos resultados obtidos nas análises, o fluido poderá ser tratado regenerado ou substituído.

Os fluidos isolantes, mediante sua aplicação, podem ser classificados em fluidos de uso geral ou fluidos de segurança, e suas características serão abordadas no tópico seguinte.

## **2.1 Tipos de fluidos isolantes**

Os óleos isolantes podem ser divididos em dois grupos principais, levando em consideração sua aplicação, os fluidos de uso geral e os fluidos de segurança que são apresentados a seguir.

### **I. Fluidos de uso geral**

Os fluidos de uso geral são óleos isolantes, de origem mineral, obtidos através do refino do petróleo, compostos de hidrocarbonetos, os quais são apropriados para aproximadamente 90% das aplicações, sendo bons isolantes elétricos e refrigerantes, além de apresentarem menor custo quando comparados a outros fluidos. Entre eles, têm-se:

- i. Óleo mineral isolante tipo A: base naftênica.
- ii. Óleo mineral isolante tipo B: base parafínica.

### **II. Fluidos de segurança**

Os fluidos de segurança são líquidos isolantes resistentes ao fogo e/ou não propagadores de chama, indicados para locais que não devem oferecer risco de incêndio e explosão bem como aplicações que possibilitem a contaminação do meio ambiente. Assim, podem ser destacados os seguintes:

- i. Óleo mineral de alto ponto de fulgor;
- ii. Ascarel;
- iii. Óleo vegetal.

## **2.2 Fluidos de segurança**

O parâmetro fundamental para ser considerado um fluido de segurança é o alto ponto de combustão, que confere ao óleo a característica de retardador de chama, oferecendo menores riscos de incêndios e explosão.

### 2.2.1 Óleo mineral isolante

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

Em função da característica do petróleo utilizado, o OMI resultante pode apresentar característica parafínica ou naftênica, como visto anteriormente. Os óleos minerais parafínicos e os naftênicos são usados para a produção de óleos isolantes. Uma vez selecionada a viscosidade adequada, o óleo é submetido a um processo ou a uma combinação dos seguintes tratamentos (SANTOS, 2013):

- I. Tratamento a ácido: ocorre a remoção dos ácidos através de neutralização com hidróxido de sódio (NaOH), lavagem com água e tratamento com argila;
- II. Tratamento a extração por solvente: o óleo entra em contato com o produto furfural<sup>1</sup> para a separação dos carbonatos aromáticos, sendo tratado com argila;
- III. Tratamento a hidrogenação: promove-se a reação com hidrogênio na presença de catalisador seguida de tratamento com vapor de água e argila.

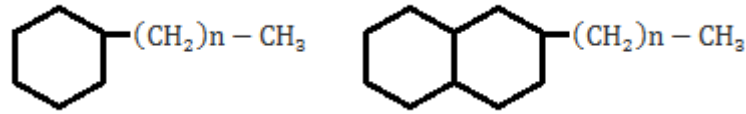
Óleo mineral isolante tipo A é utilizado em equipamentos elétricos e de manobra por suas excelentes propriedades dielétricas e refrigerantes (baixa viscosidade). Ele tem sua origem do petróleo de base naftênica, sendo uma substância química orgânica insolúvel na água e de baixa volatilidade.

Os hidrocarbonetos naftênicos formam em sua estrutura molecular ciclos, composto de hidrocarboneto saturado de cadeia fechada contendo de um a seis anéis, podendo possuir uma ou mais cadeias laterais lineares ramificadas. Uma desvantagem dos óleos naftênicos é a sua incompatibilidade com materiais sintéticos e elastômeros, o que leva a uma tendência de maior comprometimento aos constituintes dos equipamentos elétricos. A estrutura molecular do óleo mineral isolante de base naftênica pode ser observada na Figura 2.

---

<sup>1</sup>**Furfural** é um composto orgânico heterocíclico aromático, usada para síntese de polímeros, além de que polimeriza com fenol, acetona, uréia.

**Figura 2:** Cadeia carbônica saturada de cadeia fechada de óleo mineral isolante naftênico.



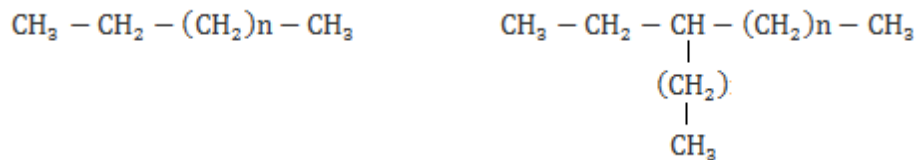
Fonte: MILASCH, (1984).

No caso do óleo mineral isolante tipo B, obtido do petróleo de base parafínica, segundo Leopoldino (2011):

“possui ligações químicas relativamente estáveis e resistentes e não podem ser modificadas facilmente por influências químicas. Eles contêm, em sua composição química, hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta ou ramificada, sendo os hidrocarbonetos de parafina em maior proporção, demonstra uma densidade menor e é menos sensível a alteração de viscosidade/temperatura. A grande desvantagem é seu comportamento em temperaturas baixas, já que as parafinas tendem a sedimentar-se.” (LEOPOLDINO, 2011: 25).

Na Figura 3 pode-se observar a exemplificação da composição química do óleo mineral parafínico.

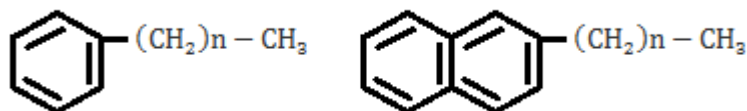
**Figura 3:** Cadeia carbônica aberta e ramificada de óleo mineral isolante parafínico.



Fonte: MILASCH, (1984).

Os óleos aromáticos contêm um ou mais anéis aromáticos, podendo apresentar ou não cadeias laterais, conforme se encontra na Figura 4.

**Figura 4:** Cadeia carbônica aromática de óleo mineral isolante aromático.



Fonte: MILASCH, (1984).

### 2.2.2 Ascarel

A necessidade de dispor de transformadores mais seguros para uso interno a edificações, subestações abrigadas e uso em áreas próximas a grandes centros, incentivaram o estudo acerca dos isolantes líquidos para torná-los menos susceptíveis a explosões e incêndios.

Na década de 30, foi iniciada a comercialização do óleo ascarel – bifenilapoliclorada (PCB), que apresentava boa estabilidade química, resistia a temperaturas elevadas e era praticamente não inflamável, o que lhe conferia certo grau de segurança.

A não biodegradabilidade desses óleos causou impacto negativo em seu uso, dentre eles a contaminação do solo e água, o ascarel, além de possuir reconhecida ação carcinogênica (provocam o câncer), pode causar danos irreversíveis ao sistema nervoso central. A Convenção de Estocolmo encerrou o seu uso e a legislação brasileira proibiu a fabricação e comercialização do ascarel, por meio da Portaria Interministerial MIC/MI/MME nº 19 (de 29/1/81).

Na ocasião, também foram determinadas as formas de descarte a serem empregadas nessa eliminação, visto que tais óleos eram estáveis quimicamente, não se decompunham nem se combinavam com outros elementos e eram praticamente incombustíveis (FARIA, 2013).

### 2.2.3 Óleo vegetal isolante

Óleos vegetais são lipídios líquidos à temperatura de 25°C e são obtidos a partir de sementes de plantas oleaginosas, a exemplo do milho, da soja e do girassol, ou de seus frutos, como é o caso da palma, do babaçu, da azeitona e do coco. Na sua forma natural, os óleos vegetais contêm majoritariamente triacilgliceróis, oriundos da esterificação completa do glicerol com ácidos graxos (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2007; GIOIELLI, 1996).

Inicialmente, o material vegetal percorre uma preparação para, então, ser extraído seu óleo bruto, posteriormente, caso necessite, submete-se a um processo de purificação (refinação) e modificação, de acordo com a finalidade de uso. Não há apenas um processo de extração e purificação de óleos, pois ele depende das características da fonte oleaginosa (GIOIELLI, 1996; RAMALHO; SUAREZ, 2013).

As etapas preliminares à extração do óleo de grãos em geral envolvem: limpeza (para eliminação de impurezas); descorticação (retirada da fibra em torno das sementes);

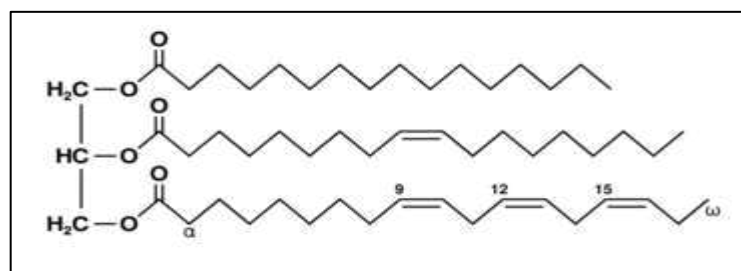
descascamento; trituração e laminação (para redução do tamanho dos grãos e aumento da superfície de contato); e cozimento (para redução da viscosidade) (MORETTO; FETT, 1998).

O processo de extração normalmente é feito por prensagem mecânica, sob pressão e temperatura específicas para cada oleaginosa, seguida de filtração; ou por solventes orgânicos, como o n-hexano, seguida de evaporação do solvente; ou pela combinação de ambos. Ao final dos processos, obtém-se o óleo bruto, que, muitas vezes, contém impurezas, a exemplo de ácidos graxos livres e outros componentes.

Com o intuito de minimizar as impurezas, o óleo passa por purificação ou refinamento, incluindo os processos de degomagem (retirada de gomas – fosfatídeos hidratáveis, proteínas e outras substâncias coloidais), neutralização (remoção de ácidos graxos livres), desodorização e clarificação ou branqueamento (remoção de odores e corantes, respectivamente), obtendo-se o óleo refinado. Na sequência, caso haja necessidade, pode-se submeter a modificações químicas para ajustar suas propriedades e atender às diversas aplicações industriais. Se permanecerem traços de componentes indesejados, com forte odor, ou sabor acentuado, ou com coloração intensa, ocorre prejuízo à qualidade e estabilidade do óleo refinado obtido (MORETTO; FETT, 1998, RAMALHO; SUAREZ, 2013, REDA; CARNEIRO, 2007).

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, os compostos são classificados em mono, di ou triacilgliceróis, dependendo se uma, duas ou três moléculas de ácido graxo se associa(m) 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, 1998). Na Figura 5 pode-se observar a representação esquemática do triacilglicerol.

**Figura 5:** representação esquemática de um triacilglicerol.



**Fonte:** MILASCH, (1984).

Para utilização como dielétrico, o óleo vegetal isolante (OVI) têm suas características adequadas a essa utilização, através de processos específicos, recebendo aditivos antioxidantes e redutores de ponto de fluidez, além de componentes que lhe conferem características biodegradáveis.

Na seção seguinte, apresentam-se informações acerca do OVI, como por exemplo, as suas especificações técnicas, características físico-químicas e propriedades térmicas.

### 3 ÓLEO VEGETAL ISOLANTE

Em 1990 uma nova classe obtida de fluidos isolantes a partir do óleo vegetal foi desenvolvida para uso em transformadores, sendo denominados de fluidos ecologicamente corretos, devido, principalmente, a sua característica biodegradável e renovável.

O interesse pelo fluido vegetal foi despertado com a variação da disponibilidade de produtos derivados de petróleo; os riscos de esgotamento das suas reservas mundiais, em conjunto com a crescente preocupação da comunidade mundial em relação à preservação ambiental. Aliados à aplicação de severas multas por órgãos ambientais, no caso de destruição e/ou contaminação de ecossistemas, empresas de diferentes setores, incluindo as do setor elétrico, interessaram-se pela utilização de fontes alternativas biodegradáveis e renováveis. Desse modo, apontou-se a possibilidade do OVI, como meio dielétrico e de refrigeração, em equipamentos elétricos, ser um possível substituto ao OMI (FARIA, 2013; WILHELM et al., 2006; 2007; 2009).

A próxima seção é voltada a apresentação de óleos que possuem base vegetal, tais como: soja, milho e girassol.

#### 3.1 Óleos obtidos de sementes oleaginosas

Óleos vegetais isolantes são obtidos a partir de grãos ou sementes de plantas oleaginosas, através de processos apropriados. As oleaginosas mais conhecidas e utilizadas para essa obtenção são a soja, a semente de girassol e o milho, mas outras plantas oleaginosas conhecidas estão sendo introduzidas no processo. Seguem-se características de óleos que possuem base de éster vegetal.

##### 3.1.1 Óleo de soja

A soja (*Glycine Max*) é predominante no mercado mundial, tendo enorme importância para a balança comercial brasileira tanto de proteína vegetal, como de óleo comestível. De acordo com pesquisas realizadas pelo IBGE, mencionadas por Pereira (2007), a soja é a oleaginosa mais cultivada no Brasil, pois pode ser plantada em qualquer região. O Brasil ocupa a 2ª posição do ranking da produção mundial, perdendo apenas para os Estados Unidos.

Os principais ácidos graxos que compõem o óleo de soja são o linoleico e oleico (MORETTO; FETT, 1998).

### 3.1.2 Óleo de milho

O milho é uma planta pertencente à família das gramíneas e é, provavelmente, o grão mais antigo cultivado nas Américas. O Brasil ocupa a terceira posição no ranking mundial de produção, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e China (PEREIRA, 2007).

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

### 3.1.3 Óleo de algodão

O óleo de algodão é derivado da semente de *Gossypium hirsutum*; um subproduto do beneficiamento e/ou descaroçamento, visando a separação da fibra. A semente de algodão contém de 15 a 24% em média de óleo. A composição média do óleo é: 22% de ácido oleico, 52% de ácido linoleico e 24% de ácido palmítico, e menos que 1% de ácido linolênico, além de outros ácidos graxos em menor proporção (MORETTO; FETT, 1998).

### 3.1.4 Óleo de girassol

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

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



### 3.1.5 Óleo de babaçu

O óleo de babaçu é obtido das amêndoas contidas nos frutos da palmeira de babaçu (*Orbignya martiana*), uma das mais importantes representantes das palmeiras brasileiras. Atualmente, no Brasil, encontram-se vastos babaçuais espalhados ao sul da bacia amazônica.

O Nordeste brasileiro possui uma área de cerca de 12 milhões de hectares plantados com babaçu, sendo que a maior parte está concentrada no estado do Maranhão (MORETTO; FETT, 1998; SANTOS, 2008).

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

Em uma visão geral, o Brasil ocupa uma posição privilegiada tanto em termos de biodiversidade quanto em capacidade de gerar recursos renováveis em grande escala. O nosso país é detentor de uma grande extensão territorial, país de maior biodiversidade mundial, sendo a cultura da soja a primeira colocada na produção de oleaginosas no Brasil.

O setor elétrico tem buscado, através de projetos de pesquisas, aproveitar essa diversidade natural brasileira para aprimorar uma alternativa biodegradável. Experimentos utilizando óleos vegetais, como dielétrico, foram conduzidos na mesma época de realização dos primeiros testes com óleo mineral. Porém, os óleos vegetais demonstraram ser menos atrativos que o mineral devido à sua estabilidade à oxidação, ponto de fluidez, permissividade e viscosidade distintas (MCSHANE, RAAP, GAUGER, CORKRAN, LUKSICH, 2002).

No entanto, em virtude de suas inúmeras vantagens, especialmente relacionadas com a propriedade de serem fluidos biodegradáveis e resistentes ao incêndio, as empresas privadas tomaram a dianteira dessas pesquisas e testes laboratoriais e aplicações em campo estão sendo executados, atualmente, para dar suporte real e estatístico a possível substituição.

Desde então, algumas patentes foram publicadas e os resultados de pesquisas levaram ao desenvolvimento de fluidos, isolantes vegetais comerciais. O fluido Biotemp® foi patenteado nos Estados Unidos, em setembro de 1999, pela ABB Power T&D Company, Inc. (OOMMEN; CLAIBORNE, 1999). Outra patente foi emitida em 1999, como resultado de estudos com óleo de soja, sob o domínio da Waverly Light & Power (CANNON; HONARY, 1999). Em março de 2000, a patente do fluido Envirottemp® FR3™ foi concedida à Cooper Industries (McSHANE *et al.*, 2000). Estas são as razões que justificam o desenvolvimento de fluidos dielétricos naturais (SILVA; CARVALHO; CONRADO; FOOK; LEITE, 2012).

Para a utilização do OVI em transformadores há a necessidade de adequações e intervenções na produção dos ésteres vegetais, tornando-os aptos para uso como material

dielétrico. Assim, os fornecedores acrescentam adjuvantes, como, por exemplo, aditivos antioxidantes e depressores de ponto de fluidez para a estabilização do óleo vegetal isolante, além de sementes previamente selecionadas para a produção, de modo a atender as especificações técnicas para OVI novo (ABNT NBR 15422, 2006; FARIA, 2013).

### 3.2 Aditivos antioxidantes para óleos vegetais isolantes

As formas de deterioração de óleos vegetais são a hidrólise, a oxidação e a polimerização. A oxidação é a principal reação de decomposição e frequentemente causa mudanças químicas indesejáveis.

No óleo vegetal a deterioração se dá pela reação da oxidação do radical livre que é comum a todos os hidrocarbonetos. O que faz a reação ser diferente é o fato que as cadeias dos triglicerídeos possuem alguns locais altamente reativos.

Segundo Bailey (1996), os antioxidantes podem ser classificados em primários, sinergistas, removedores de oxigênio, biológicos, agentes quelantes e antioxidantes mistos. Desse modo, os antioxidantes primários são fenólicos que promovem a remoção ou inativação dos radicais livres, formados durante a iniciação ou propagação da reação, pela doação de átomos de hidrogênio a estas moléculas, interrompendo a reação em cadeia (SIMIC; JAVANOVIC, 1994).

O átomo de hidrogênio ativo do antioxidante é abstraído pelos radicais livres  $R^\bullet$  e  $ROO^\bullet$  com maior facilidade que os hidrogênios alílicos das moléculas insaturadas. Assim, formam-se espécies inativas para a reação em cadeia e um radical inerte ( $A^\bullet$ ) procedente do antioxidante. Este radical, estabilizado por ressonância, não tem a capacidade de iniciar ou propagar as reações oxidativas (RAMALHO; JORGE, 1996).

Já os sinergistas são substâncias com pouca ou nenhuma atividade antioxidante, que podem aumentar a atividade dos antioxidantes primários quando usados em combinação adequada com eles. Alguns antioxidantes primários, quando usados em combinação, podem atuar sinergisticamente (BAILEY, 1996).

Os removedores de oxigênio são compostos que atuam capturando o oxigênio presente no meio, através de reações químicas estáveis tornando-os, conseqüentemente, indisponíveis para atuarem como propagadores da autooxidação. Ácido ascórbico, seus isômeros e seus derivados são os melhores exemplos deste grupo. O ácido ascórbico pode atuar também como sinergista na regeneração de antioxidantes primários (BAILEY, 1996).

Conforme Bailey (1996), os antioxidantes biológicos incluem várias enzimas, como glucose oxidase, superóxido dismutase e catalases. Estas substâncias podem remover oxigênio ou compostos altamente reativos de um sistema alimentício.

Os agentes quelantes/sequestrantes complexam íons metálicos, principalmente cobre e ferro, que catalisam a oxidação lipídica. Um par de elétrons não compartilhado na sua estrutura molecular promove a ação de complexação (BAILEY, 1996).

De acordo com Chasan (1994), os óleos vegetais degradam pelos mesmos mecanismos que os óleos minerais, mas oxidam em uma taxa mais rápida (reage muito mais rápido com o oxigênio). Da mesma forma que os OMI, os fluidos a base de éster natural devem possuir, como um de seus parâmetros, boa estabilidade oxidativa e atender as demais características determinadas por normas específicas.

### **3.3 Especificação técnica**

Para avaliação dos OVI novos, foi publicada, em 2006, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas a norma ABNT NBR 15422, “Óleo Vegetal Isolante para Equipamentos Elétricos”, a qual especifica o óleo vegetal isolante novo à base de éster natural, para uso como dielétrico e refrigerante em equipamentos elétricos novos ou usados como, por exemplo, transformadores e equipamentos auxiliares, e estabelece orientações para sua embalagem, rotulagem, armazenamento e manuseio. Em paralelo, as especificações técnicas do óleo novo, devem ser seguidas conforme a norma ASTM D6871 “*Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus*”.

Os óleos vegetais isolantes novos, quando ensaiados segundo os métodos indicados na norma ABNT NBR 15422, devem apresentar características com valores limites especificados na Tabela 1.

**Tabela 1: Característica dos OVI novos.**

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO (ABNT NBR)	VALORES LIMITES
<b>Aspecto visual</b>	-	Visual	Óleo deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão.
<b>Cor</b>		14483	1,0 máx.
<b>Densidade relativa a 20/4° C</b>	-	7148	0,96 máx.
<b>Viscosidade Cinemática</b>		10441	
<b>20°C</b>	cSt		150 máx.
<b>40°C</b>	cSt		50 máx.
<b>100°C</b>	cSt		15 máx.
<b>Teor de água</b>	Ppm(m/m)	5758	200 máx.
<b>Ponto de Fulgor</b>	°C	11341	275 mín.
<b>Ponto de Combustão</b>	°C	11341	300 mín.
<b>Ponto de Fluides</b>	°C	11349	-10 máx.
<b>Rigidez Dielétrica</b>	kV	6869 e 60156	30 mín.
<b>Fator de Perdas dielétricas</b>		12133	
<b>25°C</b>	%		0,2% máx.
<b>90°C</b>	%		3,6% máx.
<b>100°C</b>	%		4,0% máx.
<b>Índice de Neutralização</b>	Mg KOH/g óleo	14248	0,06 máx.
<b>Enxofre Corrosivo</b>	-	10505	Não Corrosivo
<b>Teor de bifenilspolicloradas (PCB)</b>	Mg/Kg	13822	Não detectável

Fonte: ABNT NBR 15422, 2006.

### 3.3.1 Caracterizações físico-químicas

O óleo isolante ideal é aquele que tem baixa viscosidade; alto poder dielétrico e alto ponto de fulgor; é isento de ácidos e enxofre corrosivo; resiste à oxidação e à formação de borras; tem baixo ponto de fluides e não ataca os materiais usados na construção de transformadores e artefatos elétricos; tem baixa perda dielétrica e não contém produtos que possam agredir o homem ou o meio ambiente.

O monitoramento do fluido isolante, por meio de testes estabelecidos na norma NBR 15422, garante a sua qualidade e a extensão da vida útil do transformador.

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

O envelhecimento do isolamento sólido depende das solicitações às quais o mesmo está submetido no transformador. O processo é acelerado pelos efeitos combinados de temperatura, umidade e oxigênio. São três os mecanismos predominantes que promovem sua deterioração em transformadores em operação, o envelhecimento térmico, o oxidativo e o

hidrolítico, apresentados a seguir (PABLO; PAHLAVANPOUR, 1997, SHROFF; STANNET, 198, LEVY *et al.*, 1994a, LEVY *et al.*, 1994b e BOGNAR *et al.*, 1990).

- Envelhecimento térmico – Sob a ação do calor, a cadeia da celulose passa por modificações nas suas ligações produzindo cadeias menores que a original (diminuição da massa molar). Os produtos finais provenientes do envelhecimento térmico incluem água ( $H_2O$ ), óxidos de carbono (CO e  $CO_2$ ), hidrogênio ( $H_2$ ) e compostos furânicos;
- Envelhecimento oxidativo – Na presença de oxigênio as ligações intermoleculares (ligações de hidrogênio), que mantêm as cadeias poliméricas unidas, tornam-se mais fracas. Os grupos hidroxila reagem convertendo-se em grupos carbonila (aldeídos e cetonas) e carboxila (ácidos). O enfraquecimento das ligações glucosídicas pode levar à cisão da cadeia polimérica. No processo de oxidação são produzidos CO,  $CO_2$  e  $H_2O$ , que contribui numa reação secundária de hidrólise;
- Envelhecimento hidrolítico – A água e os ácidos afetam a ligação glucosídica, causando ruptura da cadeia. O resultado é o encurtamento da cadeia polimérica (diminuição da massa molar) com o conseqüente enfraquecimento das fibras, desidratação e formação de compostos furânicos.

O furfuraldeído, (2-furfuraldeído, ou 2FAL, como é habitualmente designado) é o composto furânico cuja concentração no óleo é mais usada como indicador do estado de degradação do papel, devido ao fato de ser, dos cinco compostos furânicos, o que (no caso do papel Kraft) é produzido em maior quantidade.

A análise das propriedades físico-químicas e dielétricas é importante por determinar a condição e o estado de envelhecimento do óleo isolante. Quando os valores encontram-se dentro dos limites recomendados, pré-estabelecidos em normas, proporcionam uma indicação de que o óleo isolante está atendendo sua capacidade de isolamento e refrigeração. Valores fora dos limites pré-estabelecidos indicam necessidade de tratamento ou até mesmo da substituição do fluido.

Para a elaboração do diagnóstico a respeito da qualidade do óleo é necessário a verificação de diferentes propriedades através de experimentos. Os ensaios físico-químicos no óleo isolante têm como premissa a avaliação quantitativa e qualitativa dos produtos de degradação, bem como os processos que aceleram seu envelhecimento.

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

Dentre os ensaios físico-químicos que se utilizam para atestar a qualidade do fluido em uso, destacam-se:

### I. Viscosidade

Viscosidade é a propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento, a uma dada temperatura. Quanto maior a viscosidade, maior é a resistência ao movimento e menor é sua capacidade de escoar. Segundo Moretto; Fett (1998), a viscosidade dos óleos aumenta com o comprimento das cadeias dos ácidos graxos dos triacilglicerídeos e diminui quando aumenta a insaturação.

Os fluidos isolantes elétricos são também isolantes térmicos. Para compensar esta deficiência natural de refrigeração do transformador, é necessário que o líquido a ser utilizado tenha uma baixa viscosidade que permita a sua rápida circulação entre as fontes de calor e o meio externo.

### II. Teor de água

A água pode estar presente no óleo devido a falhas de vedação do equipamento e como produto da degradação. Pode ser encontrada tanto emulsificada com o óleo ou no estado livre, tendo sua solubilidade elevada rapidamente com o aumento de temperatura.

Principalmente no estado emulsificado, até mesmo em pequenas quantidades, algumas partes por milhão (ppm), a água promove passagem de corrente elétrica através do óleo, provocando diminuição da sua rigidez dielétrica, portanto, a redução na capacidade isolante do mesmo e consequente a formação de arco voltaico.

Devido à estrutura química, os óleos vegetais têm maior limite de saturação do que os óleos minerais, diminuindo a probabilidade de degradação do papel pela umidade, aumentando, consequentemente, a vida útil do transformador.

### III. Ponto de fulgor e combustão

O ponto de fulgor consiste na menor temperatura na qual os vapores formados na superfície do óleo se inflamam momentaneamente, quando em presença de uma fonte de calor, em contra partida o ponto de fulgor não é suficiente para que a combustão seja mantida.

Já o ponto de combustão é a temperatura na qual o fluido se incendeia. Para o óleo vegetal isolante, seu valor fica em torno de 300°C, em detrimento ao fluido mineral é cerca de 150°C.

### IV. Índice de acidez (IA)

Durante a utilização no equipamento, o óleo sofre oxidação e, conseqüentemente, há formação de ácidos que degradam o papel e corroem as partes metálicas. É necessário um baixo teor de acidez total do fluido isolante à base de óleo vegetal para minimizar a condução elétrica e corrosão metálica, aumentando a vida útil do sistema isolante.

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

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

### V. Rigidez dielétrica

Uma das características mais importantes de um material isolante é a sua resistência à passagem de corrente elétrica quando se é aplicado tensão. A rigidez dielétrica é definida como a tensão na qual ocorre a passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos, sob as condições prescritas pelo teste.

O valor da tensão de ruptura é, acentuadamente, influenciado pela eventual existência de impurezas, que, muitas vezes, não podem ser eliminadas.

Outro fator importante é a temperatura. Cada isolante líquido possui um limite de temperatura até o qual pouca influência é notada. A sua elevação interfere nas propriedades isolantes, aquecimentos que aparecem devido às perdas, reduzem a rigidez dielétrica.

Embora a determinação da rigidez dielétrica não seja um método utilizável para se prever a vida útil do fluido isolante, pelo fato de não ser uma função da composição do óleo,

determinações periódicas são importantes para indicar o momento da sua troca ou a necessidade de regeneração da carga.

#### VI. Fator de perdas (TG $\delta$ )

Ao se submeter um fluido isolante a um campo elétrico ele passa por perdas de energia, chamadas dielétricas. Esse consumo de energia se apresenta na forma de calor.

Quando um dielétrico está sujeito a um campo elétrico alternado, a corrente que o atravessa deve ser defasada de  $90^\circ$  da tensão. Na prática, o isolante perfeito não existe e a defasagem acaba sendo menor por apresentar uma queda ôhmica através da massa do isolante, assim, tem-se um ângulo de perdas  $\delta$ .

Além das perdas devidas à circulação de correntes transversais e de consumo de energia no trabalho de polarização, há outros agentes redutores de características isolantes. A umidade, presença de carbono e óxidos, entre outros aumentam as perdas dielétricas. Valores acima do admissível levam a um aquecimento do isolante, podendo atingir sua destruição, uma vez que as propriedades isolantes são praticamente todas afetadas pela elevação de temperatura e cada isolante tem uma temperatura limite acima da qual o material não deve mais ser utilizado (TERÉIEV *et al.*, 1988).

#### VII. Ponto de fluidez

O ponto de fluidez do óleo vegetal isolante é importante como índice da temperatura mais baixa na qual o material pode ser esfriado sem limitar seriamente seu grau de circulação no equipamento, que deve ser compatível com a mínima temperatura em que o óleo vai ser utilizado.

Alguns fluidos à base de óleo vegetal são sensíveis ao armazenamento prolongado em baixas temperaturas e seus pontos de fluidez podem não prognosticar adequadamente suas propriedades de escoamento em baixas temperaturas.

As propriedades elétricas, mecânicas e físicas do isolante usados em eletricidade dependem acentuadamente da temperatura. Como os dielétricos ficam frequentemente sujeitos, em serviço, a acentuadas variações de temperatura, é imprescindível conhecer os limites térmicos de um material e qual a variação das propriedades em função da temperatura e da sua capacidade de conduzir calor. Justifica-se, assim, o interesse em se usar isolamentos capazes de suportar temperaturas cada vez mais elevadas (TERÉIEV *et al.*, 1988).



### 3.3.2 Propriedades térmicas

A estabilidade térmica de um material é definida como a capacidade de uma substância manter suas propriedades durante o processamento térmico, o mais próximo possível das características iniciais. Análises são feitas para atestar que o fluido atende aos requisitos de temperatura, dentre as quais se podem destacar:

#### I. Termogravimetria (TG)

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

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

#### II. Estabilidade à oxidação

A estabilidade térmica e oxidativa é um dos aspectos mais críticos na maioria das aplicações dos óleos isolantes, uma vez que está relacionada com a vida útil do fluido dielétrico em serviço. A oxidação decorre da exposição do óleo a agentes como calor, oxigênio, metais e umidade.

A oxidação ocorre quando o oxigênio atmosférico ou dissolvido no óleo reage com ácidos graxos insaturados, que são tanto mais reativos quanto maior o número de insaturações em suas cadeias. As reações químicas envolvidas no processo de oxidação de óleos são extremamente complexas (ARAÚJO *et al.* apud BRUSCATTO *et al.*, 2007).

Atualmente, existem vários métodos usados na predição de alterações que ocorrem em óleos pela influência de processos oxidativos. Comumente, para se avaliar a suscetibilidade à oxidação, o óleo é submetido a teste de oxidação acelerada, a partir de condições padronizadas e um ponto final é escolhido, no qual se observam sinais de deterioração. Para se acelerar a oxidação, os testes incluem elevação de temperatura, adição de metais, aumento da pressão e oxigênio, estocagem sob luz e agitação.

Em geral, a partir destes ensaios, obtém-se o período de indução que é definido como o tempo para se atingir nível de oxidação detectável ou surpreendente mudança na taxa de oxidação. O período de indução também é conhecido como *Oil Stability Index* (OSI). Este parâmetro é muito utilizado para comparar a resistência à oxidação de diferentes tipos de óleos e para avaliar a eficiência da adição de antioxidantes (ANTONIASSI, 2001).

Como mencionado em alguns pontos dessa seção, o óleo responsável pelo isolamento e arrefecimento do transformador sofre alguns estresse durante sua operação, como a oxidação, por exemplo, que podem alterar suas características físico-químicas com o tempo, denominando assim o envelhecimento do fluido. Equipamentos que trabalham com os seu sistema isolante fluido/sólido envelhecido está passivo de falhas, o que compromete diretamente o fornecimento de energia, além de transtorno e prejuízo financeiro, mostrando, mais uma vez, a necessidade do monitoramento do estado do fluido isolante.

### **3.4 Envelhecimento do óleo isolante**

O óleo isolante dos transformadores sofre processo de envelhecimento com o uso e o passar do tempo. A garantia de boas condições para funcionamento adequado do equipamento proporciona o prolongamento de sua vida útil, visto que, além de isolante elétrico e arrefecimento, o óleo tem como função proteger o papel isolante, que se degrada mais rapidamente pelo contato com óleo deteriorado.

A reação de oxidação é o principal exemplo de degradação do fluido isolante, e é acelerada pela temperatura elevada e presença de catalisadores como o cobre, oriundo da parte elétrica do equipamento. Decréscimo da tensão interfacial, um aumento do índice de acidez e da viscosidade do óleo, e alteração da cor, são consequências desse processo. Ademais, as propriedades físicas, químicas e elétricas do fluido se alteram, reduzindo sua capacidade de isolamento.

Os óleos vegetais são mais susceptíveis à degradação oxidativa que os óleos minerais. Segundo Wilhelm *et al.*(2010), a estabilidade oxidativa do OVI dependerá do tipo e do teor de ácidos graxos presentes, bem como de sua formulação final e de seu processo de produção. Por exemplo, o Envirotemp® FR3™ é mais susceptível à oxidação que o Biotemp® devido à presença majoritária dos ácidos linoléico e linolênico, com duas e três ligações duplas, respectivamente, que podem reagir mais facilmente com o oxigênio (WILHELM *et al.*, 2007).

A presença de metais, umidade, oxigênio e temperatura favorecem a degradação dos óleos vegetais isolantes por meio de dois mecanismos principais: oxidação e hidrólise, enquanto que nos óleos minerais isolantes há o predomínio da peroxidação (TULIO, 2008; WILHELM *et al.*, 2007). Os OVI oxidados tendem a formar longas cadeias de ácidos graxos enquanto que OMI tendem a formar ácidos orgânicos de cadeia curta, que são muito mais agressivos (WILHELM *et al.*, 2006).

Para o OVI, o mecanismo 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).

Conforme Wilhelm *et al.* (2007), viscosidade, índice de neutralização e fator de perdas dielétricas a 90°C são parâmetros importantes e que devem ser inseridos nos ensaios de manutenção preditiva de equipamentos isolados a óleo vegetal.

Além de atuar como catalisador da degradação da celulose no papel isolante, a presença de umidade está envolvida na redução da rigidez dielétrica, fato este que ocorre quando sua saturação relativa no óleo atinge aproximadamente 50%. A quantidade de água exigida para saturar o OVI à temperatura ambiente é aproximadamente 20 vezes a do OMI e, por isso, o seu uso contribui para o aumento da vida útil da isolação sólida (WILHELM *et al.*, 2009b).

Não havendo possibilidade de regeneração do óleo vegetal isolante, como ocorre quando a viscosidade atinge o limite da norma para óleo em uso (10% acima do valor original), o OVI envelhecido deve ser substituído e pode ser filtrado, reciclado e reutilizado em outras aplicações (ARAUJO *et al.*, 2006; FARIA, 2013).

### **3.5 Óleos comercialmente disponíveis**

Foram desenvolvidos, por volta de 1999, óleos vegetais apropriados para uso em equipamentos elétricos (LEWAND, 2004). Os primeiros produtos comerciais de OVI, lançados no mercado nacional, foram o Biotemp® e o Envirotemp® FR3™. Em 2003, foram lançados, no mercado nacional, os óleos Biovolt® (WILHELM, 2008).

Atualmente, no Brasil, o fluido Envirotemp® FR3® é comercializado pela Cooper Power Systems e fabricado pela Cargill, enquanto que o Biotemp® é importado da Suécia

pela ABB Brasil. Os óleos Biovolt® A e Biovolt® B são produzidos e comercializados por uma empresa paranaense, a Mineraltec, instalada em Pato Branco, os quais não se obteve informações técnicas.

No âmbito internacional, tem-se o Ambient® Fluid e o Ambient Prime® Fluid, fabricados pela SVB Environmental Lubricants, empresa que tem mais de 30 anos de experiência em fabricar óleos isolantes especiais nos EUA. O Midel eN é fabricado pela M & I Materials Limited, empresa internacional com escritórios no Reino Unido, Índia e China, seguido do NeuGen Plus, que é fabricado pela Bioelectric Pty Ltd e distribuída pela IMCD Australia Ltd.

### 3.5.1 Exemplos de fluidos comercializados

Atualmente, temos, ainda que pequena, uma variedade de óleos vegetais isolantes disponíveis em mercado. No âmbito nacional e internacional, podemos destacar o Envirotemp® FR3™, o Biotemp®, os fluidos Ambient® e o MIDEL eN, apresentados na sequência.

#### I. Envirotemp® FR3®

Comercializado pela Cooper Power Systems e produzido pela Cargill, o Envirotemp® FR3™ é um fluido isolante à base de éster natural, destinado ao uso como meio isolante e refrigerante em transformadores de distribuição e potência. Desenvolvido à base de óleo de semente de soja, como as que são apresentadas na Figura 6. É aditivado com agentes naturais não derivados de petróleo, halogêneos ou silicones, o que lhe confere maior biodegradabilidade.

**Figura 6:** Sementes de soja.



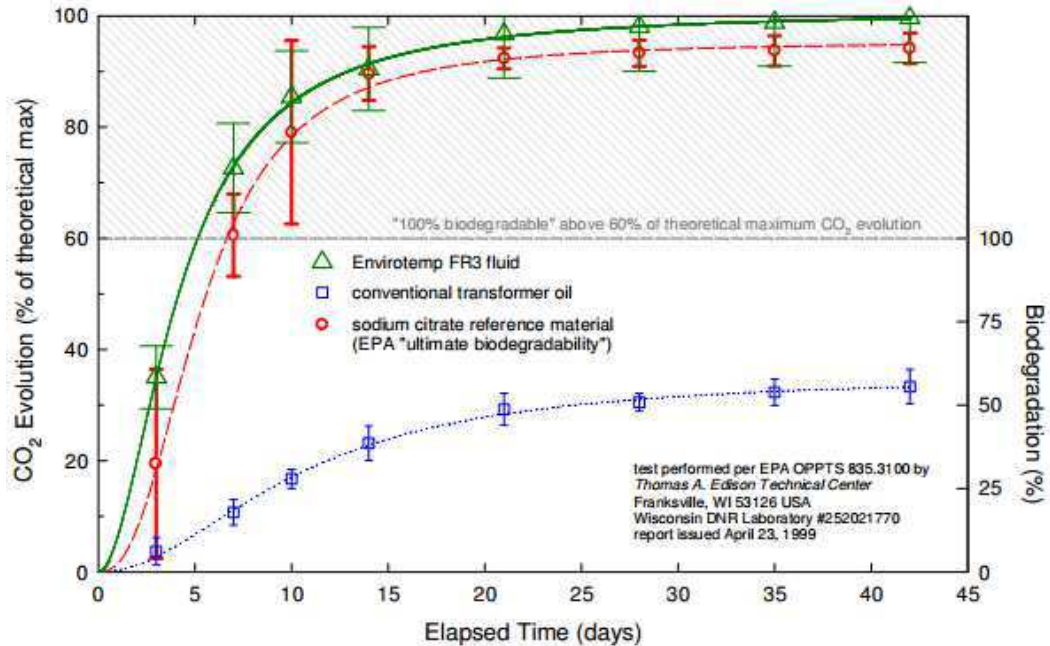
**Fonte:** Revista plantar (2012).

O FR3 é biodegradável tanto em ambiente sólidos quanto aquáticos. No teste muito sensível de toxidez aquática aguda (Método OECD 203), obteve melhor desempenho que outros fluidos dielétricos ao alcançar a taxa de mortalidade zero.

“Este fluido não é listado como perigoso e nem classificado como acumulativo ou mutagênico pela Environmental Protection Agency (EPA), pela Occupational Health and Safety Administration (OSHA) e pelo Department of Transportation (DOT)”. (LEOPOLDINO, 2001, p.40-41).

Segundo Gouveia (2008), a decomposição térmica dos subprodutos do fluido vegetal é essencialmente limitada ao  $CO_2$  e  $H_2O$ , com traços de  $CO$ , dependendo da temperatura e disponibilidade de oxigênio, não produz PCDF (Furanos), PCDD (Dioxinas) ou silicatos, sendo considerado pela EPA “máximo biodegradável”.

**Figura 7:** Gráfico de comparação da biodegradação aquática aeróbica dos fluidos dielétricos.



**Fonte:** *Bulletin Cooper Power System*, (2002).

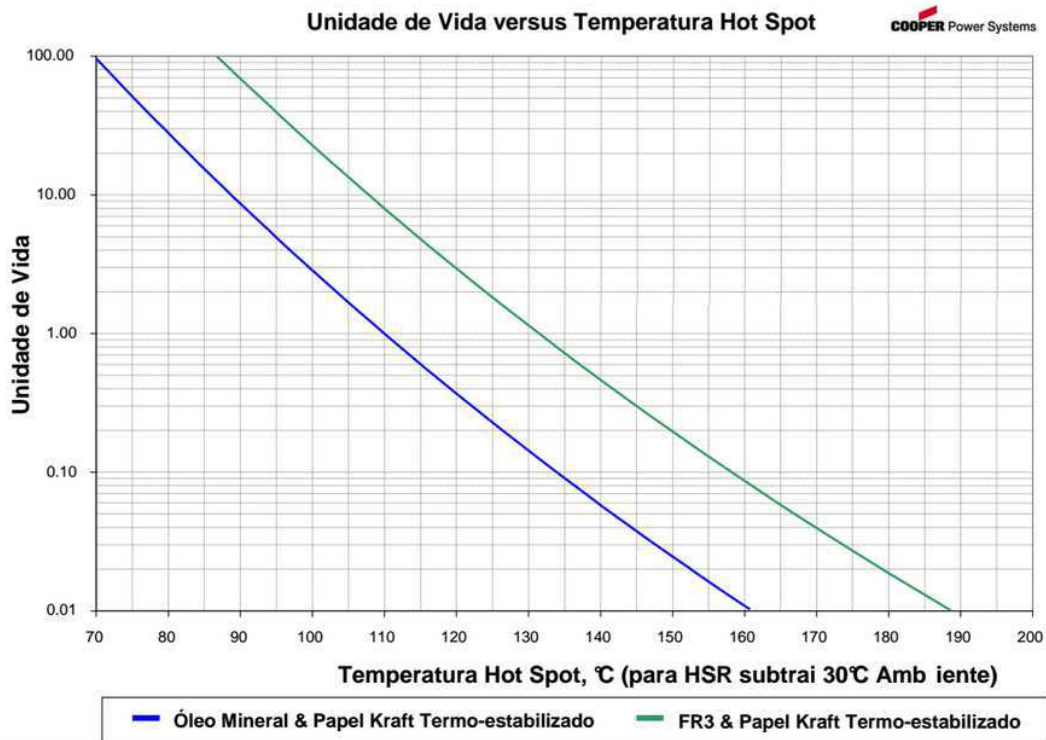
Como se pode observar através do gráfico na Figura 7, que representa a biodegradação dos fluidos dielétricos, o FR3 é totalmente biodegradável em cerca de 5 dias, já o óleo mineral ao fim de 40 dias atinge o seu nível de biodegradação máxima que é da ordem dos 55%.

Ademais, o OVI em questão apresenta outros atrativos, além da sua biodegradabilidade, como a ampliação na vida útil do transformador, ainda o aumento do limite de temperatura operacional e segurança contra fogo.

A característica hidrofílica dos ésteres naturais confere ao fluido Envirotemp® FR3™ a capacidade de absorver o excesso de água que acelera a degradação do isolante sólido do transformador, aumentando, por consequência, a vida útil do equipamento. A água migra do isolamento sólido para o dielétrico e reage com este por meio da hidrólise.

A Cooper Power System divulgou, em boletim técnico, que o FR3 provê margem adicional de temperatura de operação de +21°C para papel termo-estabilizado, +30°C para papel Kraft normal, além de conferir maior capacidade de sobrecarga e melhor desempenho em ambientes de alta temperatura, como é exposto na Figura 8.

**Figura 8:** Gráfico do aumento de temperatura/potência sem perda da vida útil.



**Fonte:** *Bulletin Cooper Power System*, (2002).

O fluido FR3 proporciona um desempenho confiável e maior segurança contra incêndios. Classificado pela Underwriters Laboratories (UL) e Aprovado pela Factory Mutual (FM), para uso conforme NEC (USA National Electric Code) como fluido resistente ao fogo, o fluido Envirotemp® FR3™ possui ponto de fulgor de aproximadamente 330°C e ponto de combustão de 360°C.

## II. Biotemp®

No mundo, transformadores isolados com óleos vegetais entraram em operação a partir da década de 90. O primeiro produto comercial lançado no mercado foi o Biotemp®, cuja patente foi requerida nos Estados Unidos da América, em setembro de 1999, pela empresa ABB sendo o produto desenvolvido em seu laboratório de transformadores.

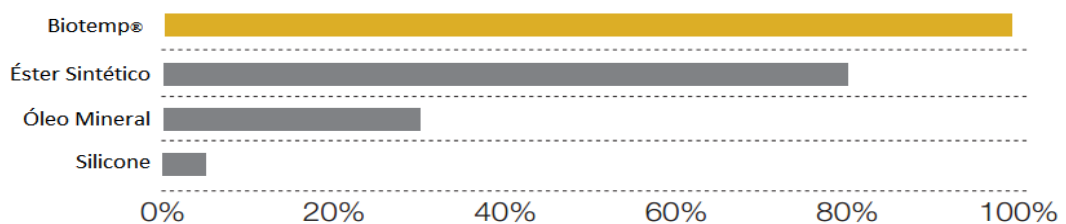
O fluido base usado é o óleo de girassol, obtido a partir de sementes geneticamente selecionadas ou manipuladas, como se pode observar na Figura 9, combinado com aditivos para potencializar a estabilidade à oxidação.

**Figura 9:** Sementes de girassol.

**Fonte:** Campana (2014).

O Biotemp® tem como objetivo oferecer uma solução sustentável para as mais variadas aplicações dos transformadores ao reunir características não prejudiciais tanto ao meio ambiente, por meio da sua alta biodegradabilidade, quanto à segurança, através da resistência superior ao fogo e, também, no que diz respeito à confiabilidade, por possuir elevada capacidade de sobrecarga.

O fluido não contém em sua composição petróleo, alógenos, silicones ou outros materiais que podem afetar adversamente o meio ambiente, sendo 97% biodegradável em 21 dias. Na figura 10, é exposta a comparação do nível de biodegradabilidade de alguns fluidos.

**Figura 10:** Classificação de biodegradabilidade de fluidos dielétricos em 21 dias.

**Fonte:** ABB (2009).

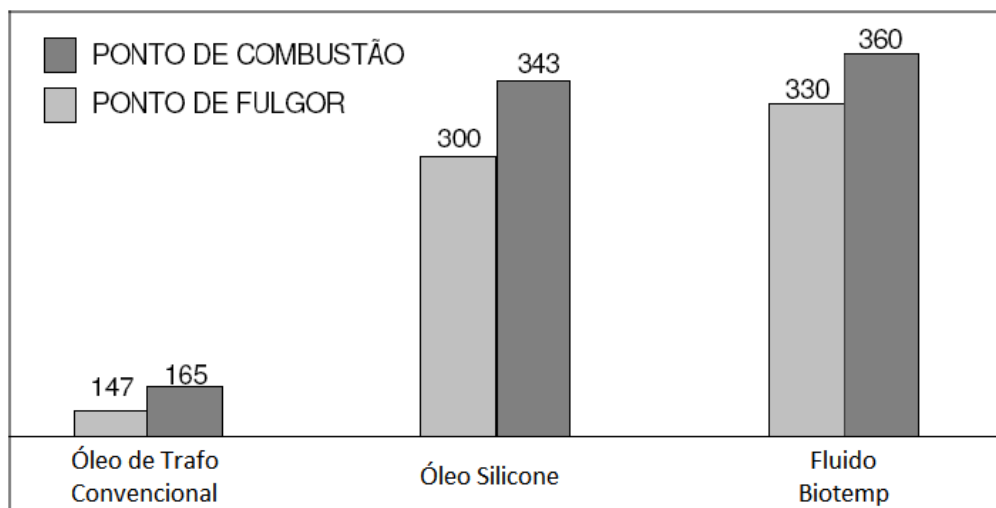
Segundo publicação feita pela ABB, em boletim técnico, a empresa afirma compromisso com um futuro mais sustentável em harmonia com o Meio Ambiente, através de seu programa de transformadores sustentáveis, que traz consigo os seguintes benefícios: reduz perdas em vazio de 40 a 70%, reduzindo o custo total de aquisição (TOC) e as emissões de CO<sub>2</sub>; para cada GW (Giga-Watts) economizado, uma redução de 5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano; uma unidade de 1.000 kVA pode reduzir 7 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano; solução total para transformadores de alta eficiência, para tecnologias novas e convencionais.

Em comparação ao óleo mineral, o Biotemp® possui características térmicas superiores e maior condutividade que resulta numa melhor transferência de calor.



Sua estrutura molecular apresenta três longas cadeias de ácidos graxos ligados a um esqueleto de glicerol. Considera-se um éster de oleico elevado natural, porque o teor de ácidos gordos oleico é maior do que 75% da composição total do óleo vegetal. Com um ponto de combustão superior a 300° C, o Biotemp®, é listado como um fluido dielétrico "menos inflamável", pela companhia de seguros Mundial FM e UL, a organização independente de certificação de segurança do produto. Tem uma classificação de perigo K2 fogo, de acordo com a norma IEC 61100 mencionado em seu catálogo de tecnologia sustentável. Na Figura 11, podem-se encontrar os gráficos que comparam os pontos de combustão e fulgor de alguns fluidos isolantes.

**Figura 11:** Pontos de combustão e fulgor de fluidos dielétricos (°C).



**Fonte:** Adaptado de BULLETIN COOPER POWER SYSTEMS (2002).

### III. Fluidos Ambient

A SVB *Environmental Lubricants*, com sua planta industrial instalada em Tyler, Texas, USA, é a empresa que representa mais de 30 anos de experiência na manipulação e fabricação de lubrificantes, em que seus produtos são vendidos e utilizados em milhares de aplicações em todo o mundo.

Desde 2009, seus produtos são importados e comercializados no Brasil através da *Synthetic Lubrificantes Especiais Ltda*, com sua sede em Itu, SP, onde tem a capacidade de distribuir a linha completa da SVB para o Brasil inteiro.

*Ambiant Prime® Fluid* e o *Ambiant® Fluid* são gerações mais recentes de óleos isolantes biodegradáveis, feitos com um mistura de óleos vegetais estabilizados, e aditivos avançados que lhe permitem cumprir as normas ASTM para estabilidade de oxidação padrão dos fluidos dielétricos.

Produtos *Ambiant* não deixam uma camada de brilho visível sobre a água, possuem um alto ponto de fogo (> 300°C) para uma margem extra de segurança contra incêndios. Tem excelentes características elétricas e de transferência de calor, atendendo as normas para óleos vegetais isolantes ASTM D6871 e IEEE C57.147.

**Tabela 2: Características do Ambient Prime® Fluid.**

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS	
Característica e Teste ASTM	Ambiant Prime® Fluid.
Ponto de Combustão, D92, °C.	336
Viscosidade, D88, cSt. @ 40 °C.	41
Viscosidade, D88, cSt. @ 100 °C.	8.9
Ponto de Fluidez, D97, °C.	-21
Rigidez Dielétrica, D877, kV.	55
Fator de Dissipação, 20 °C, D924, %.	0.13

Fonte: SVB 2010.

**Tabela 3: Características do Ambient® Fluid.**

CARACTERÍSTICAS TÍPICAS	
Característica e Teste ASTM	Ambiant® Fluid.
Ponto de Combustão, D92, °C.	350
Viscosidade, D88, cSt. @ 40 °C.	39
Viscosidade, D88, cSt. @ 100 °C.	8.3
Ponto de Fluidez, D97, °C.	-18
Rigidez Dielétrica, D877, kV.	65
Fator de Dissipação, 20 °C, D924, %.	0.10
Valor de Ácido, D664, mg KOH/g	0.10

Fonte: SVB 2010.

#### IV. Midel eN

Segundo a empresa MIDEL, o fluido MIDEL eN é uma alternativa ecológica para fluidos de transformadores convencionais, por ser classificado como facilmente biodegradável e não-perigoso. Ele também tem uma pegada de carbono menor do que os fluidos de óleo mineral devido às matérias-primas renováveis utilizadas durante a fabricação.

O fluido dielétrico, à base de éster natural, é fabricado a partir de óleo de sementes comestíveis. Sua fórmula proporciona um dielétrico de custo eficaz para utilização em transformadores selados em condições de clima temperado. Também, é ideal para instalações internas, onde a segurança contra incêndios é uma prioridade, já que possui classe K, de acordo com IEC 61039 (MIDEL, 2014).

**Tabela 4: Característica do óleo vegetal isolante MIDEL eN.**

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO	Valores típicos de MIDEL eN
Ponto de Combustão °C.	ISO 2592 / ASTM D92	360
Viscosidade 0°C	ISO 367/ ASTM D445	232
40°C.		37
100°C		9,3
Ponto de Fulgor °C	ISO 2592 / ASTM D92	327
Ponto de Fluidez °C.	ISO 3016 / ASTM D97	-31
Fator de Dissipação, 25 °C, %.	ASTM D 924	0.023

Fonte: MIDEL, 2014.

Os óleos isolantes, com base de éster natural, foram uma revolução no âmbito da biodegradabilidade e trouxeram consigo outras inovações, como o desenvolvimento do projeto de transformadores totalmente isolados e arrefecidos por óleo vegetal.

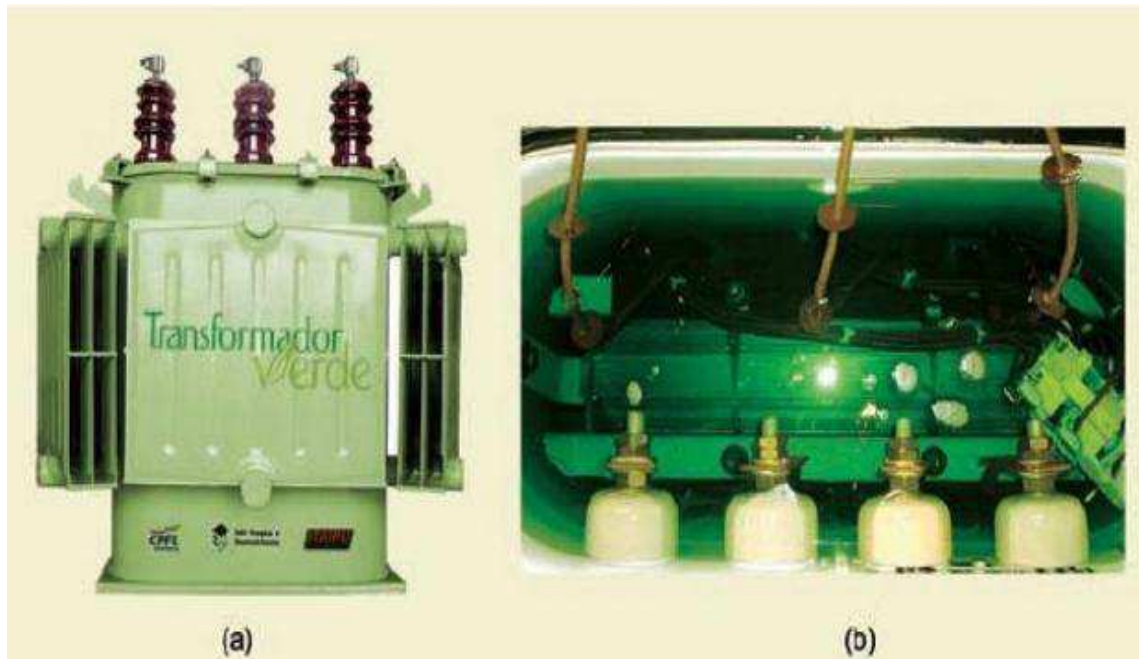
### 3.6 Transformador verde

A principal novidade dos transformadores que agrega maior valor de vida útil e menor agressividade ambiental é o uso de óleo vegetal como isolante. O óleo permite ampliar a potência do transformador, que passa a comportar mais kVA por quilo e ajuda a diminuir as falhas técnicas, além de possuir a característica biodegradável.

O projeto do transformador verde começou a ser idealizado em 2002, quando a CPFL Energia iniciou um programa de pesquisa em tecnologia de transformadores verdes, viabilizado por uma iniciativa pioneira da Itaipu Transformadores, e logo passou a testar os novos equipamentos em campo.

Na Figura 12, é apresentado um transformador de distribuição de 88 kVA, preenchido com óleo vegetal isolante (11,4 ou 13,8 kV – 127/220 V), atualmente em produção no Brasil. Em geral, os transformadores “verdes” apresentam maior capacidade, são menores e utilizam menos óleo isolante, resultando num menor custo total (materiais, instalação, manutenção), peso e volume (BINGENHEIMER *et al.*, 2011; VASCONCELLOS *et al.*, 2008).

**Figura 12:** Transformador de 88 KVA de éster natural em produção no Brasil: vista externa (a) e interna (b).



**Fonte:** BINGENHEIMER *et al.*, 2011.

Mais de 150.000 transformadores de distribuição preenchidos com óleo vegetal já foram instalados. No Brasil, a concessionária de energia elétrica CPFL, implantou o “Projeto Transformador Verde”, que utiliza o óleo isolante vegetal Envirotemp® FR3™, fabricado pela Cooper Power Systems. Quanto à instalação dos transformadores de potência, são mais de 200. Na figura 13, mostra-se um transformador (25 MVA) instalado na subestação da concessionária de energia de CEMIG, preenchido com óleo isolante vegetal Biotemp®, produzido pela ABB (CLAIBORNE; CHERRY, 2006).

**Figura 13:** Transformador de potência ecológico resultado da parceria entre CEMIG e ABB.



Fonte: CPFL (2014).

Um dos maiores grupos privados do segmento, a CPFL, tem investido, desde 2006, na instalação de transformadores verdes em sua rede de distribuição. Além de alcançar eficiência operacional cerca de 30% maior do que um aparelho comum, o equipamento tem vida útil mais longa, permanece por menos tempo em manutenção e economiza matérias-primas como ferro, cobre, alumínio, madeira, porcelana e óleo. O transformador verde ainda consome óleo vegetal biodegradável, que não é inflamável na temperatura de operação de um transformador e se decompõe em poucos dias, diminuindo os impactos ao meio ambiente.

Além de serem menos nocivos para o meio ambiente, os transformadores com óleo vegetal são também seguros contra incêndio. O FR3 da Cargill possui ponto de combustão duas vezes mais alto que o do óleo mineral e é auto extingüível, reduzindo, assim, o risco de incêndios. “Transformadores que utilizam óleo vegetal também têm maior capacidade de absorver problemas na rede como, por exemplo, sobrecargas”, afirma Caius Vinícius Sampaio Malagoli, gerente de Manutenção e Padrões de Engenharia, da CPFL Energia.

### 3.7 Reenchimento de transformadores

A utilização de óleos vegetais isolantes iniciou com a substituição do óleo mineral pelo vegetal (*retrofilling* ou reenchimento) em transformadores em operação. O primeiro teste, sob este enfoque, foi realizado em dois transformadores de 225 kVA, tipo *pad-mounted*, alimentando fornos, instalados no início de 1970, sujeitos a um carregamento contínuo com 80% da corrente nominal (McSHANE; LUKSICH; RAPP, 2003).

Em outubro de 2001, a empresa Alliant Energy fez o reenchimento do primeiro transformador de potência (fabricante: Pennsylvania; dados de placa do equipamento: trifásico, 50 MVA, 69 kV, NBI 350 kV, 7 000 galões de óleo, fabricado em 1957) com óleo vegetal isolante (McSHANE; LUKSICH; RAAP, 2003).

É válido ressaltar que o óleo residual em um transformador corretamente reenchido não deve reduzir o ponto de combustão do óleo vegetal isolante abaixo do mínimo de 300° C, valor determinado pela norma NBR 15422. Isso deve ser válido mesmo depois do equilíbrio completo ser alcançado entre o fluido de substituição e o óleo mineral residual no papel.

Segundo o fabricante, o fluido FR3 é miscível com o óleo convencional de transformador, hidrocarbonetos de alto peso molecular, PCB (Ascarel) e a maioria dos substitutos PCB, exceto silicone. Fluido FR3 não é miscível com silicone e não devem ser aplicados em transformadores anteriormente contendo esse produto (CARGILL, 2013).

As vantagens adicionais de obturação com fluido FR3 incluem alta rigidez dielétrica, extensão da vida útil do isolante sólido, excelente lubrificidade, compatibilidade de materiais, e um coeficiente de expansão similar ao óleo de transformador convencional (CARGILL, 2013).

Mediante publicação em sua página *online*, a empresa MIDEL reporta que com a introdução do fluido MIDEL eN, com base de éster natural, os clientes têm outra opção para encher transformadores de distribuição selados. Este líquido é produzido a partir de matérias renováveis e, por conseguinte, reduzem o impacto ambiental ainda mais. O reenchimento com ésteres MIDEL (que são da classe K) incrementa o ponto de combustão do isolante líquido do equipamento de 170° C a cerca de 300° C, aumentando a segurança contra incêndios.

Mesmo sendo uma alternativa vantajosa, o *retrofilling* requer cuidados específicos. Diretrizes são apontadas, por algumas empresas do ramo de transformadores e/ou fluidos isolantes, para o reenchimento dos transformadores, cada um com suas peculiaridades. No geral, recomenda-se a retirada do óleo isolante existente, uma espera significativa para que seja drenado todo o fluido, e, em seguida, uma “lavagem” do transformador com o óleo

substituto e a sua evacuação adequada antes de ser preenchido de fato com o novo fluido isolante, com a ressalva do cuidado em evitar a umidade e a introdução de ar no equipamento em cada uma das etapas.

Dessa forma, garante-se que o óleo residual será o mínimo possível, para que não haja alteração das características originais no fluido substituto e de suas funções de isolamento e arrefecimento no transformador.

## 4 EXPOSIÇÃO DE ESTUDOS E TESTES

Dentre as várias possibilidades atualmente em estudo, a ênfase tem sido dada à substituição de óleos isolantes de base mineral por novos fluidos dielétricos não agressivos ao meio ambiente, denominados ecologicamente corretos. Isto exige que esses fluidos cumpram ou superem critérios mínimos de ensaio e que também tenham um impacto reduzido no meio ambiente.

Em equipamentos modernos, os materiais usados na fabricação e operação, incluindo o dielétrico líquido, formam um sistema extremamente integrado e a mudança de um componente exige análise cuidadosa para determinar o impacto sobre todo o sistema do transformador.

Estão resumidas, abaixo, as propriedades que os fluidos devem possuir:

### I. Propriedades físicas:

- Alto ponto de combustão adequado para a operação segura do equipamento elétrico;
- Ponto de fluidez suficientemente baixo que permita a operação do equipamento a baixas temperaturas;
- Um peso específico suficiente para a efetiva transferência de calor;
- Uma relação de viscosidade e viscosidade-temperatura propícia à transferência de calor dentro da variação da temperatura de operação do transformador.

### II. Propriedades químicas:

- Baixo teor de água;
- A ausência de enxofre corrosivo para proteger as superfícies metálicas em contato com o fluido;
- Baixa acidez;
- Estabilidade à oxidação adequada para controlar o envelhecimento e a formação de partículas (suspensas e sedimentos);
- Tendências aceitáveis à formação de gases.



### III. Propriedades dielétricas:

- Fator de potência adequado;
- Rigidez dielétrica adequada;
- Rigidez dielétrica a impulso.

A qualidade de fluidos dielétricos é mais crítica hoje do que no passado devido à complexidade dos projetos dos equipamentos e à carga dos mesmos. Cargas maiores resultam em solicitações térmicas maiores e, portanto, a necessidade de ter melhores qualidades inibidoras no óleo. Com isso, as funções do fluido isolante se tornam mais importantes devido à tendência nas concessionárias de forçar o uso e à carga de transformadores no limite máximo de projeto para maximizar o investimento.

Os óleos atuais de transformador são parafínicos e falham em relação à biodegradabilidade. Em comparação, os óleos de transformador à base de óleos vegetais são altamente biodegradáveis e podem ser considerados não tóxicos ao ambiente aquático através da escolha de aditivos adequados. Estes são óleos de transformadores não agressivos ao meio ambiente, mas levantam questões sobre o uso não crítico em transformadores. Alguns destes óleos foram desenvolvidos para transformadores específicos. O questionamento se relaciona a sua estabilidade à oxidação e química de longo prazo.

Existem muitas instituições envolvidas na pesquisa de fluidos de transformador à base de óleo vegetal:

- Central Power Research Inst., Bangalore, Índia;
- ABB Power T & D Co Inc, Raleigh, NC, EEUU;
- ABB Secheron Sa, Genebra, Suíça;
- Lab. d'Electrostatique et de Materiaux Diélectriques, França;
- Institute of Electrical Energy Systems, Technical University, Berlim, Alemanha;
- Institute of Materials for Electrical and Electronics Engineering, University of Karlsruhe, Alemanha;
- Cooper Power Systems, USA;
- LACTEC- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento;
- LABELEEC - Estudos, Desenvolvimento e Actividades Laboratoriais, S.A.

Dentre tantas empresas e testes que já foram publicados, uma triagem foi realizada e organizada na seção apresentada a seguir.

## 4.1 Testes

Nesta seção apresentam-se testes selecionados de pesquisas e artigos científicos, que em sua maioria envolve comparações entre os óleos isolantes, mineral e vegetal, com a finalidade de apresentar o comportamento dos mesmos em relação às características físico-químicas requeridas aos fluidos dielétricos.

### 4.1.1 Rigidez dielétrica

O teste de rigidez dielétrica destina-se à avaliação do grau de contaminação de líquidos isolantes através de partículas estranhas e água. Ele é previsto por lei e economicamente adequado, para proteger equipamentos elétricos como transformadores, conversores de corrente e chaves, bem como equipamentos médicos e de segurança, contra danos e falhas. A causa mais frequente de tais danos se dá em função do estado deficiente do óleo isolante.

I. Technological Educational Inst. of Patras, Greece.

O instituto de Technological Educational Inst. of Patras foi o responsável pelo teste apresentado a seguir, com direção de Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013), apresentado em forma de artigo no 18° International Symposium on High Voltage Engineering.

#### i. Material e método.

O óleo de éster natural, utilizado durante os ensaios, foi o fluido Envirotemp® FR3™ da Cooper Power Systems, e o óleo mineral, o de PPC (Public Power Company) transformadores de fornecimento de petróleo da Grécia, numa quantidade de 400 ml de cada um deles.

Foram utilizados três tipos diferentes de eletrodos, tipo Rogowski, um eletrodo plano com diâmetro de 35 milímetros e um eletrodo em forma de ponto.

#### ii. Procedimento experimental

A tensão de ruptura foi medida, de acordo com o padrão do IEC 60156, usando um equipamento para teste de óleo DTA 100C da BAUR, como se observa na Figura 14. O equipamento para testes de óleo, concebido em laboratório para a operação contínua, destaca-se pela combinação de propriedades extraordinárias. Como equipamento de alta capacidade com uma tensão de teste de até 100 kV, com uma clara detecção de ruptura dielétrica e resultados de medição absolutamente confiáveis, mesmo após vários processos de medição, o

DTA 100 C da BAUR é o equipamento de teste líder para usuários na área de eletricidade, em institutos de teste e na indústria.

**Figura 14:** Célula de testes de rigidez dielétrica, DTA 100c da BAUR.



**Fonte:** Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013).

Duas configurações de eletrodos diferentes foram usadas durante os experimentos. A primeira era uma configuração de eletrodo de Rogowski, o segundo foi uma combinação de eletrodos de ponto-plano. Usam-se estas configurações de eletrodos, a fim de estudar a distribuição estatística da tensão de ruptura, não só no caso de campos elétricos homogêneos, mas, também, no caso de campos elétricos fortemente heterogêneos. Campos heterogêneos aparecem inevitavelmente dentro de transformadores, devido ao seu design e, devido à presença de defeitos.

A tensão alternada aplicada foi aumentada com uma velocidade de 2 kV/s com uma tensão máxima de 100kVrms, à frequência de 50Hz. Amostras de óleo foram continuamente agitadas com um agitador magnético durante as medições. Um tempo de relaxamento de 2 minutos entre cada composição foi implementada, com o propósito de deixar a descarga dos subprodutos e bolhas de gás para difundir. Na Figura 15 podem-se observar os tipos de configuração de eletrodos utilizados no presente teste.

**Figura 15:** Configuração do eletrodo, (1,2) eletrodo tipo Rogowski, (3) eletrodo plano, (4) eletrodo ponto.



**Fonte:** Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013),

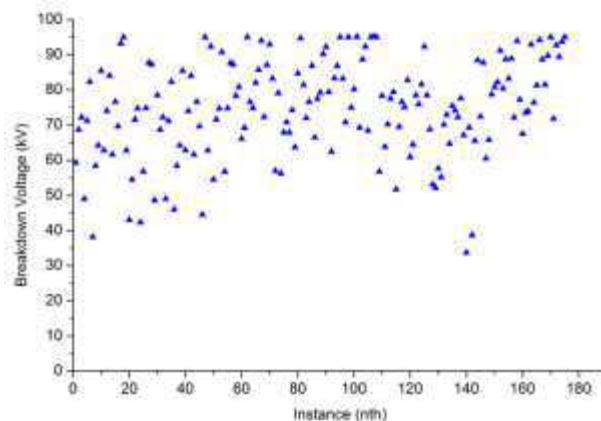
A fim de dispor de uma grande amostra de dados, foram obtidos cerca de cento e oitenta testes consistiram por trinta conjuntos de seis avarias (6x30), com uma pausa de 5 minutos entre cada conjunto. A amostra de óleo foi substituída a cada 50-60 avarias por uma nova. O dispositivo de teste DTA 100C é equipado com relé de corrente, assim, a degradação do óleo por várias avarias foi minimizado.

Foi tomado cuidado especial durante as experiências, a fim de assegurar que o óleo não seria afetado pela umidade, a oxidação e não seria contaminado por impurezas sólidas. Todas as experiências foram realizadas à temperatura ambiente e à pressão ambiente.

### iii. Resultado e comentários

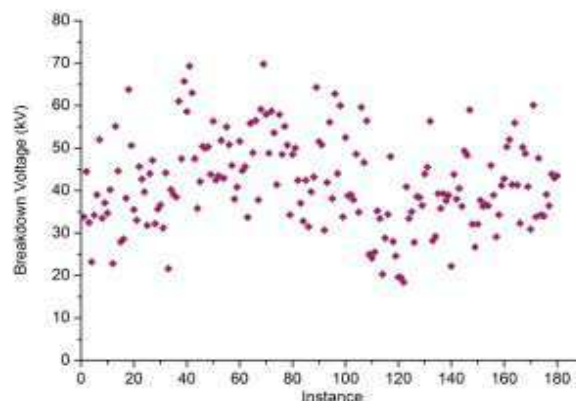
As distribuições das tensões de ruptura são plotados nas Figuras 16-19. Os valores de tensão de ruptura medidos (BDV) estão espalhados em torno de um valor médio. Em que o BDV significativo do óleo de éster natural é maior do que o óleo mineral.

**Figura 16:** Distribuição da tensão de ruptura do óleo vegetal (FR3) com eletrodos de Rogowski com gap de 2,5 mm.



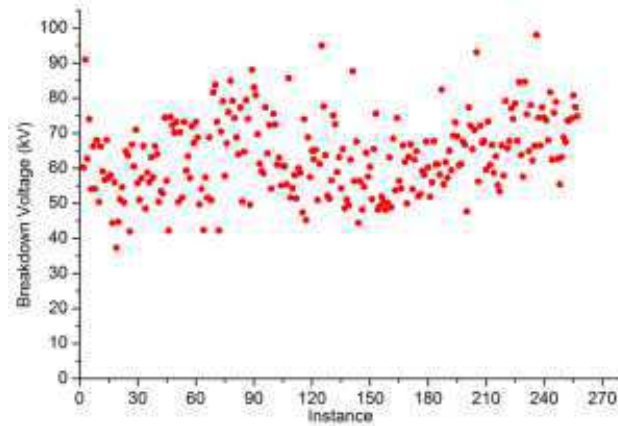
**Fonte:** Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013).

**Figura 17:** Distribuição da tensão de ruptura do óleo mineral com eletrodos de Rogowski com gap de 2,5 mm.



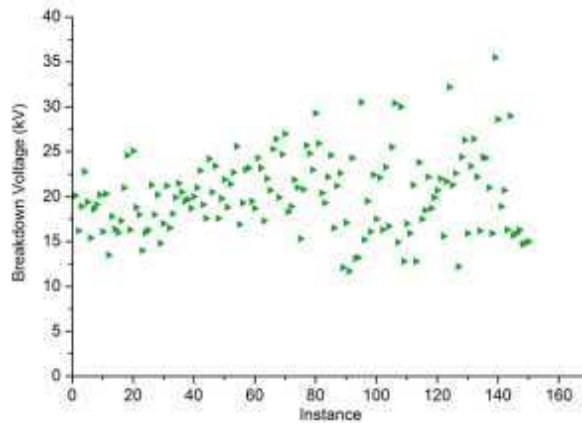
**Fonte:** Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013).

**Figura 18:** Distribuição da tensão de ruptura do óleo vegetal (FR3) com eletrodos ponto-plano com gap de 2,5 mm.



**Fonte:** Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013).

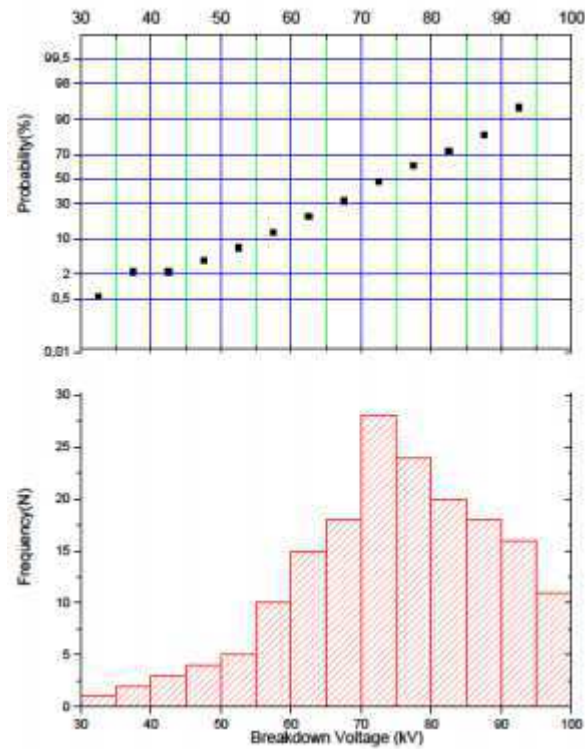
**Figura 19:** Distribuição da tensão de ruptura do óleo mineral com eletrodos ponto-plano com gap de 2,5 mm.



**Fonte:** Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013).

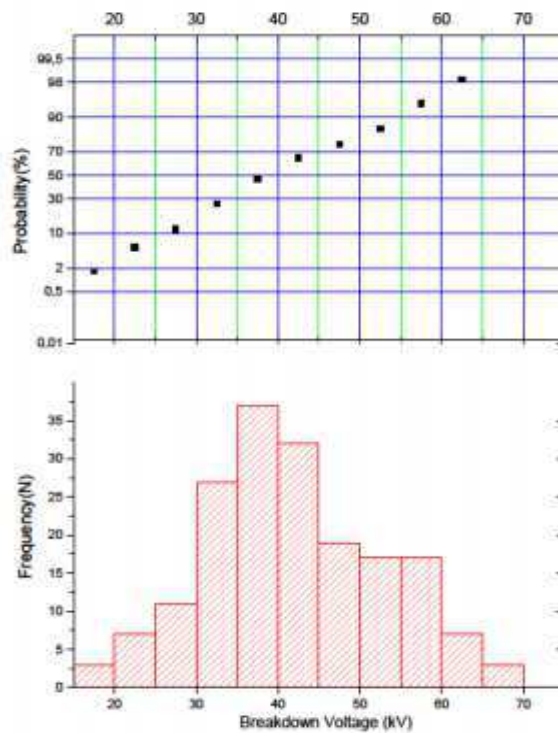
A fim de aplicar a distribuição estatística da análise de probabilidade dos BDV, é aplicado o teste de hipótese, para controlar a distribuição de dados a que se segue. Assim, a distribuição normal (Gauss) é considerada nas Figuras 20-23.

**Figura 20:** Probabilidade e densidade de probabilidade do óleo vegetal (FR3) pela tensão de ruptura com eletrodos de Rogowski com gap de 2,5 mm.



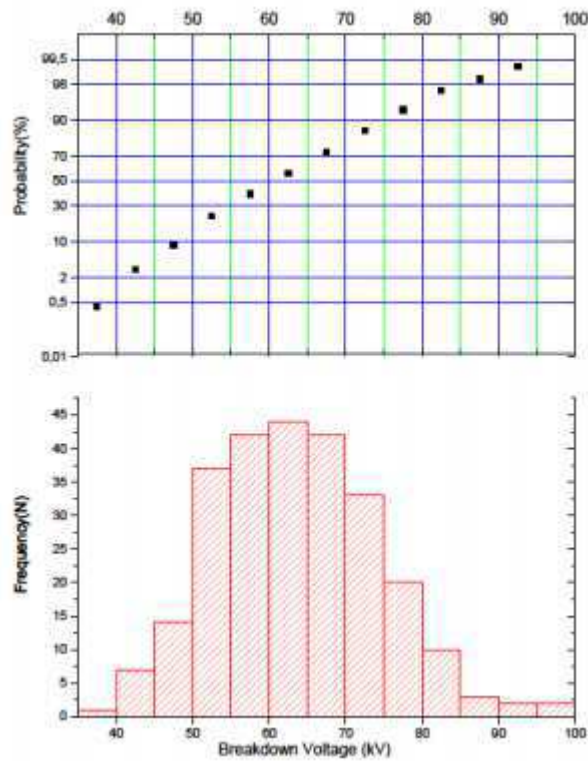
**Fonte:** Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013).

**Figura 21:** Probabilidade e densidade de probabilidade do óleo mineral pela tensão de ruptura com eletrodos de Rogowski com gap de 2,5 mm.



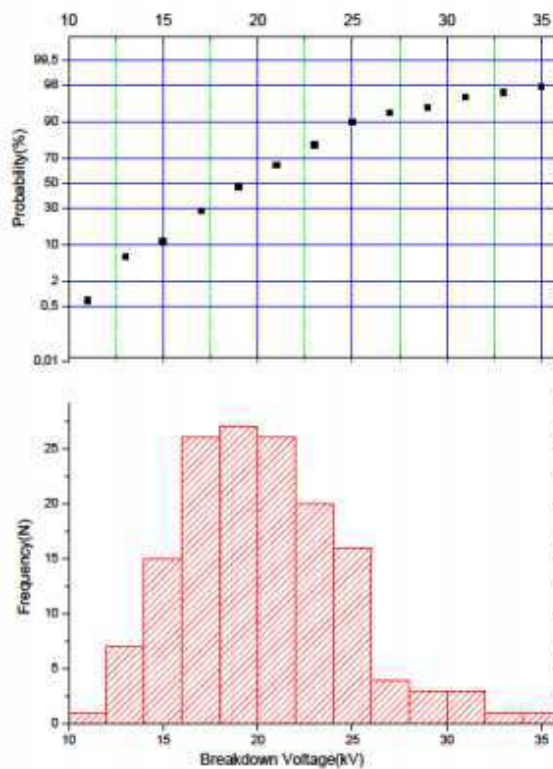
**Fonte:** Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013).

**Figura 22:** Probabilidade e densidade de probabilidade do óleo vegetal (FR3) pela tensão de ruptura com eletrodos ponto-plano com gap de 2,5 mm.



Fonte: Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013).

**Figura 23:** Probabilidade e densidade de probabilidade do óleo mineral pela tensão de ruptura com eletrodos ponto-plano com gap de 2,5 mm.



Fonte: Peppas, Pyrgioti e Charalampakos (2013).



#### iv. Conclusão

A análise estatística dos dados experimentais que mostra que o BDV medido de FR3 é suficientemente maior do que o óleo mineral, os valores médios, no caso da configuração do eletrodo de Rogowski, bem como no caso da configuração do eletrodo de Ponto-Plano. Ainda mais importante é o fato das tensões de ruptura  $U1\%$  e  $U10\%$  são também mais elevados no caso de óleo de éster natural, em comparação com o óleo mineral. Isto significa que as tensões periféricas de degradação são mais prováveis de ocorrer em óleo mineral que no óleo de éster natural.

Os dados experimentais mostram que o óleo de éster natural FR3 tem um melhor conjunto de desempenho em comparação com o óleo mineral, que é, atualmente, usado como isolante de transformadores por PPC, na Grécia. Isto significa que pode ser adequado como um substituto ambientalmente aceitável do óleo mineral como isolante de transformador.

#### 4.1.2 Envelhecimento acelerado do sistema papel Kraft/OVI e papel Kraft/OMI.

O papel isolante pode envelhecer durante a produção, armazenamento e operação do equipamento, levando à degradação da celulose. Ocorre rompimento de ligações glicosídicas entre duas unidades de glucose da cadeia polimérica, formando moléculas de celulose com menor grau de polimerização (mais curtas) e, portanto, menos resistentes mecanicamente (SÁ; NEPOMUCENO, 1997).

Análises da relação entre o grau de polimerização (GP) das moléculas de celulose e a resistência mecânica do papel Kraft evidenciaram que para um GP de aproximadamente 250, a resistência do papel já está com um valor inferior à metade daquele do papel novo.

Quando a resistência mecânica à tração alcança a metade do valor do papel novo, o transformador está no fim de sua vida útil (SÁ; NEPOMUCENO, 1997).

#### I. LACTEC

O Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, foi o responsável pelo teste de envelhecimento acelerado de comparação entre dois óleos vegetais, com direção da doutora Helena Wilhelm (2006), apresentado em forma de artigo científico.

i. Material e método.

Para o ensaio de envelhecimento acelerado dos sistemas papel Kraft/OVI, foram utilizados 20 ml de Óleo vegetal isolante: Envirotemp® FR3™, Biotemp® e 6,75 g de papel isolante para cada amostra.

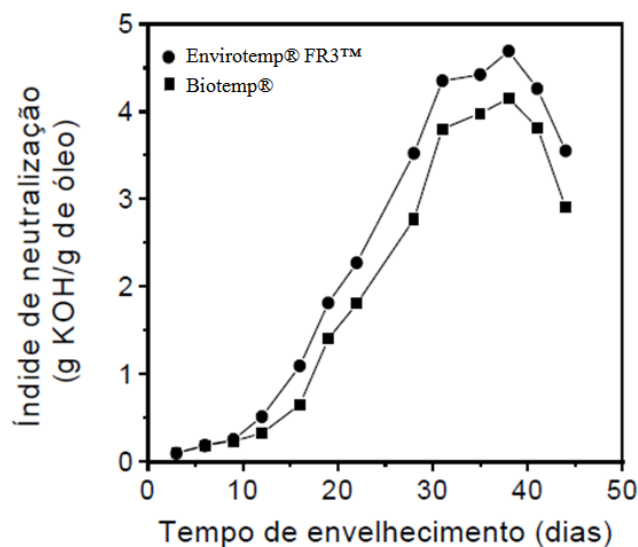
O envelhecimento acelerado foi realizado em estufa, a 120°C e as amostras foram retiradas, em estados regulares de tempo, sendo o óleo separado do papel por filtração e acondicionado em frasco âmbar, devidamente selado, ao abrigo da luz.

O papel Kraft envelhecido foi submetido ao ensaio de determinação do grau de polimerização e o óleo aos ensaios físico-químicos. Os GP, para o papel Kraft isolante antes e após o envelhecimento em OVI, foram determinados através do método viscosímetro baseados em norma IEC, utilizando-se um viscosímetro capilar imerso em um banho termostático a  $20 \pm 0,1^\circ\text{C}$  e etilenodiamina cúprica como solvente. Para remoção do óleo foi utilizado sistema de extração acelerada por solvente (ASE).

ii. Resultado e comentários

Para avaliar a degradação do papel Kraft isolante na matriz de OVI, foi realizado um envelhecimento acelerado em laboratório do papel nestes fluidos isolantes. O índice de neutralização para esses óleos envelhecidos na presença de papel Kraft isolante está apresentado na Figura 24 e o GP na Tabela 5.

**Figura 24:** Índice de neutralização para amostras do papel Kraft/OVI envelhecidas em estufa.



Fonte: Wilhelm (2006),

Para os óleos vegetais isolantes envelhecidos, pode-se observar um aumento significativo no índice de neutralização para ambos os óleos vegetais, Envirotemp® FR3™ e Biotemp®, seguido de uma redução após aproximadamente 36 dias de envelhecimento. Isso mostra que o índice de neutralização não é um parâmetro significativo para a manutenção preditiva dos OVI.

**Tabela 5: Grau de polimerização (GP) para o Papel Kraft isolante envelhecido em OVI.**

Tempo de Envelhecimento (dias)	GP médio para o papel envelhecido	
	Biotemp®	Envirotemp® FR3™
3	979	817
6	888	937
9	902	886
12	734	872
16	942	807
19	808	839
22	719	930
28	670	642
31	779	816
35	785	704
38	753	825
41	776	841
44	640	667
47	552	727

**Fonte:** Wilhelm (2006).

Mediante resultados da Tabela 5, conclui-se que houve uma diminuição nos valores do grau de polimerização em ambos os óleos, no entanto, o óleo Envirotemp® FR3™ obteve melhor comportamento.

## II. LABELEC

Na direção de Martins (2008), um artigo científico foi publicado, em que são expostos testes relacionados à degradação do sistema papel Kraft/Óleo Isolante, com o apoio do Laboratório Estudos, Desenvolvimento e Actividades Laboratoriais, S.A., LABELEC, Portugal.

### i. Material e método

Realizou-se a comparação entre o comportamento de óleos isolantes, mineral e vegetal, em termos do seu envelhecimento térmico e, principalmente, da sua influência sobre o envelhecimento do papel isolante, imersos em ambos os fluidos.

Óleo vegetal foi representado pelo Biotemp®, já o óleo mineral utilizado foi óleo naftênico não inibido – NynasNytro 11 EN, ao qual foi adicionado 0,3% de inibidor Di-ter-butil-para-cresol (DBPC) e 25 mg de Benzotriazole (BTA), passivador de cobre/ kg <sub>óleo</sub>. O papel Kraft foi cedido pela ABB Sécheron S.A (Suíça).

A experiência de envelhecimento, executada por Martins (2008), foi efetuada em ampolas cilíndricas, de vidro borossilicato, de cerca de 3,8 cm de diâmetro e 20 cm de altura, munidas de um gargalo de 4 cm de altura e 1 cm de diâmetro. Todas as ampolas foram previamente preparadas, por lavagem com água, seguida de acetona e secagem a 100°C.

A preparação das amostras seguiu os seguintes passos: o óleo foi previamente seco (até um teor de água  $\leq 5$ ppm) por aquecimento a 60°C sob vácuo, seguido de saturação com ar; o Papel Kraft, usado nesta experiência, foi previamente seco, por aquecimento a 80°C, sob vácuo (até um teor de água  $< 0,5\%$ ).

Após enchimento, as ampolas, com a amostra de 150 ml de óleo, foram fechadas de forma estanque, com auxílio dum maçarico oxi-acetilénico e a seguir aquecidas numa estufa, à temperatura de 70°C, onde permaneceram 24 horas a esta temperatura. Retiradas as primeiras ampolas, foram incrementados 10°C na temperatura da estufa, tendo as ampolas permanecido 24 horas a esta nova temperatura, antes de serem retiradas e, assim, sucessivamente, até 190°C, temperatura à qual também as ampolas remanescentes permaneceram 24 horas.

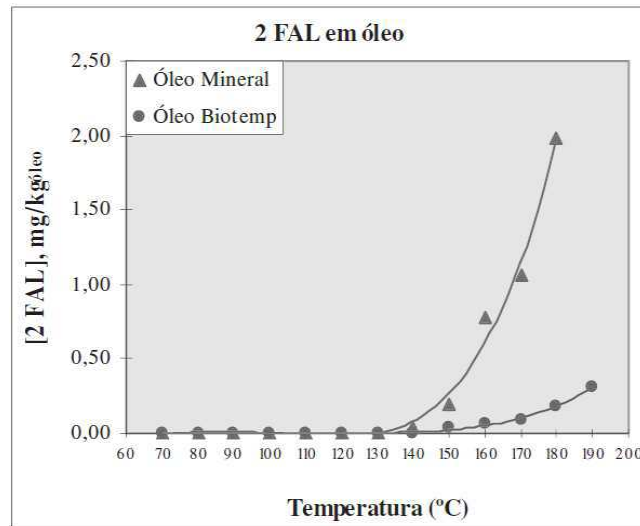
O procedimento posterior a retirada da estufa consistiu no arrefecimento das ampolas no escuro, até à temperatura ambiente, tendo, na sequência, sido realizadas as seguintes análises: análise dos compostos furânicos dissolvidos no óleo (CEI 61198) e dos compostos furânicos absorvidos no papel e, finalmente, o grau de polimerização viscosimétrico médio do papel isolante (DP<sub>v</sub>) (CEI 60450) .

### ii. Resultado e comentários

Segundo Martins (2008), os únicos compostos furânicos detectados, tanto no óleo Biotemp® como no óleo mineral, foram o furfuraldeído (2FAL) e o 5-hidroxi-metil-2-furfuraldeído (5HMF). Os restantes compostos não foram encontrados, nem dissolvidos no óleo, nem sequer absorvidos no papel.

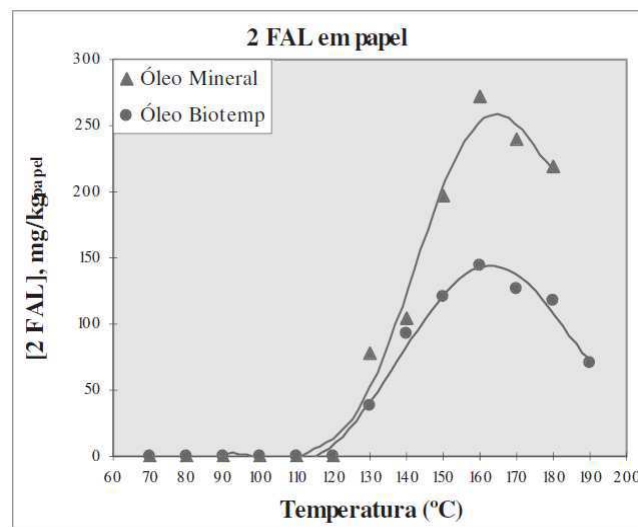
Até cerca de 130°C, não há produção de compostos furânicos, uma vez que estes não são encontrados nem no óleo, nem no papel (tanto para o óleo vegetal, como para o óleo mineral), o que, em contra partida, ocorre para o 2FAL, visível nas Figuras 25 e 26 que apresentam, respectivamente, a variação com a temperatura, do 2FAL dissolvido no óleo e absorvido no papel.

**Figura 25:** Valores de [2Fal] no óleo, para diferentes temperaturas.



Fonte: Martins (2008).

**Figura 26:** Valores de [2Fal] no papel, para diferentes temperaturas.



Fonte: Martins (2008).

Acima de 150°C, a concentração de 2FAL dissolvidos no óleo mineral, é superior à concentração deste composto dissolvido no óleo vegetal, verificando-se o mesmo para uma temperatura superior a 130°C, absorvido no papel. Conclui-se, assim, que o 2FAL que se produz no papel desde 130°C, só começam a exsudar para o óleo a partir de 150°C.

Isto permite concluir que, à temperatura de 160°C para o 2FAL, o equilíbrio deste produto, que se estabelece para cada temperatura, entre a fração que permanece no papel e a que se dissolve no óleo, é deslocado no sentido da passagem destes produtos furânicos, do papel para o óleo.

#### 4.1.3 Avaliação do efeito da adição de OMI ao OVI

##### I. LACTEC

Diante do artigo científico, Wilhelm (2006) também contempla o ensaio físico-químico nas misturas OVI/OMI, que será apresentado nesta seção.

##### i. Material e método

Visando conhecer a influência que o óleo isolante mineral remanescente nos equipamentos possui, após a troca direta de OMI por OVI ou a simples complementação de volume de fluido isolante com óleo isolante vegetal, foram preparadas misturas de OMI/OVI, nas proporções de 7, 15, 30, 50 e 75%, e realizados ensaios físico-químicos estabelecidos na norma NBR 15422.

As amostras de óleo foram compostas pelo OMI, neste caso, o AV-58 da PETROBRAS, e para o OVI, utilizou-se do Envirotemp® FR3™.

##### ii. Resultado e comentários.

As misturas de OVI/OMI foram analisadas quanto às suas características básicas, as quais subsidiam informações para a equipe de manutenção. Para o índice de neutralização, teor de água, fator de potência, rigidez dielétrica, densidade e viscosidade, disposto na Tabela 6, os resultados obtidos podem ser considerados normais, pois estão de acordo com o esperado.

No entanto, os pontos de fulgor e de combustão, para essas misturas, foram, significativamente, alterados comparativamente aos componentes puros, destacados na Tabela 6. A incorporação de apenas 7% de OMI ao OVI gerou uma mistura que não pode ser caracterizada como fluido de segurança, resistente ao fogo, pois o mínimo exigido para o ponto de fulgor, para esta condição é de 300°C, segundo a norma ASTM D 5222-92.

Tabela 6: Ensaio físico-químicos das misturas OVI (Envirotemp® FR3™)/OMI.

PROPRIEDADES	Misturas OVI (Envirotemp® FR3™)/OMI						
	100/0	93/07	85/15	70/30	50/50	25/75	0/100
Índice de neutralização (mg KOH/g óleo)	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01
Teor de água (ppm)	68	70	57	57	51	41	16
Fator de potência a 100°C (%)	1,2	0,79	0,5	0,55	0,30	0,18	0,17
Rigidez dielétrica (kV)	45	45	47	47	48	48	53
Tensão Interfacial (dina/cm)	27,3	25,6	25,7	25,7	26,6	28,3	50,8
Densidade a 20°C (g/ml)	0,9197	0,9171	0,9158	0,9113	0,9056	0,8985	0,8880
Viscosidade	34,19	33,06	30,49	26,44	21,07	14,48	9,63
Ponto de Fulgor °C	319	196*	167*	160*	162*	140*	142*
Ponto de Combustão °C	347	310	192*	176*	174*	154*	154*

\* Valores abaixo dos requeridos pela norma ASTM D 5222-92, que classifica o fluido de segurança.

Fonte: Wilhelm (2006)

#### 4.1.4 Análise de gases dissolvidos

Durante a operação do transformador de potência, podem ocorrer arcos elétricos no isolamento líquido, que degradam as propriedades físico-químicas do óleo, aumentam os gases dissolvidos e induzem falhas nos equipamentos (SUWARNO, 2006).

Falhas podem ser detectadas através da análise dos gases encontrados no fluido, tendo o teste de análise de gases dissolvidos (DGA) grande importância em manutenções preventivas.

#### I. LACTEC

Testes sobre Gases dissolvidos nos óleos isolantes foram realizados por Leopoldino (2011) e publicados em dissertação, com o apoio do Instituto LACTEC e supervisão da doutora Helena Wilhelm, coordenadora da pesquisa.

##### i. Material e método

O óleo vegetal Envirotemp® FR3™ e o óleo mineral de transformador 65 Repsol® foram usados na quantidade de 2 litros, para a análise de gases combustíveis dissolvidos no fluido isolante por arco elétrico.

O ensaio de arco elétrico é composto por transformador ressonante de altas frequências, conhecido como bobina de Tesla – classe 200 kV, com relação de transformação

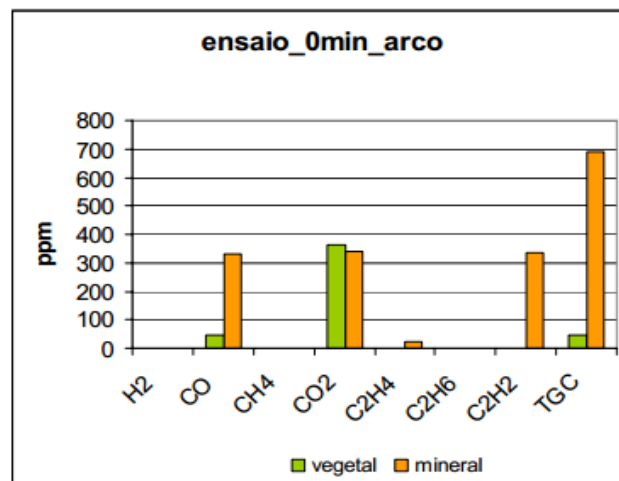
de 12/1; regulador de tensão e uma câmara de acrílico com eletrodos de latão, provida de válvula de alívio, termômetro e manômetro (LEOPOLDINO, 2011).

Os procedimentos do teste ocorreram da seguinte forma: incrementou-se a tensão do transformador de potência de 0,6 a 12 kV para uma corrente de 0,02 A e também aumentando-se os tempos de aplicação de 5 a 20 minutos. Para cada uma das tensões, foram retiradas amostras a cada 5, 10, 15 e 20 minutos, com seringas plásticas de 20 ml, e enviadas ao laboratório específico, para análise de cromatografia dos gases dissolvidos no óleo isolante, utilizando o diagnóstico e método de ensaio recomendados pelas normas ABNT 7070 e 7274.

## ii. Resultado e comentários.

Segundo diretrizes de Leopoldino (2011), foram efetuadas análises cromatográficas em amostras de óleo virgem vegetal e mineral, para efeito de comparação, antes da aplicação de tensão, como é ilustrado na Figura 27. Como não se observou aumento significativo na formação de gases, para tensões abaixo de 10 kV, para os tempos considerados, elas não foram aqui apresentadas.

**Figura 27:** Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 0 minutos.



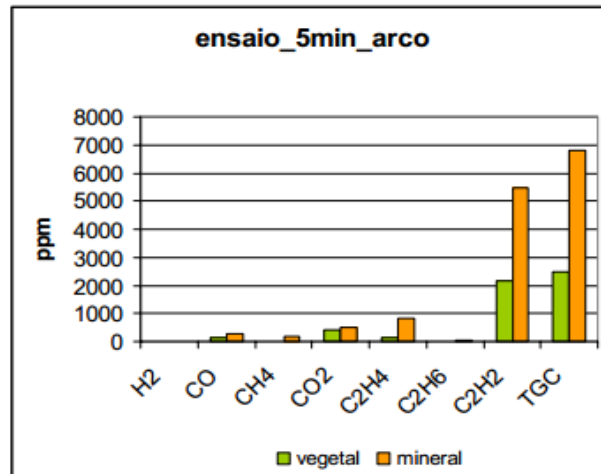
Fonte: Leopoldino (2011).

Nas Figuras 28, 29, 30 e 31 estão representados os resultados cromatográficos dos gases dissolvidos no óleo mineral e vegetal para arcos produzidos com tensão de 12 kV e corrente de 0,02 A, nos tempos de 5, 10, 15 e 20 minutos, respectivamente.



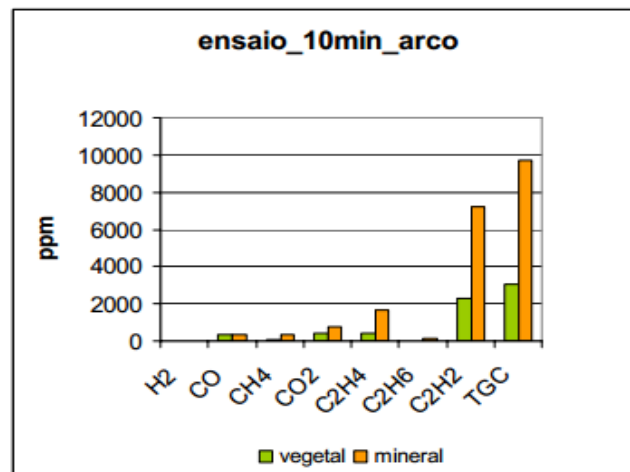
Na amostra para o tempo de aplicação de cinco minutos, já se inicia a formação dos gases acetileno e etano no óleo vegetal, conforme a figura 28. Observa-se que a concentração de gases sempre é maior no isolante mineral.

**Figura 28:** Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 5 minutos.



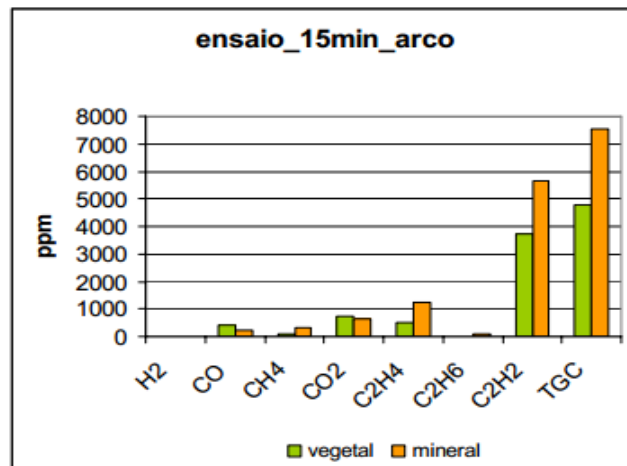
**Fonte:** Leopoldino (2011).

**Figura 29:** Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 10 minutos.



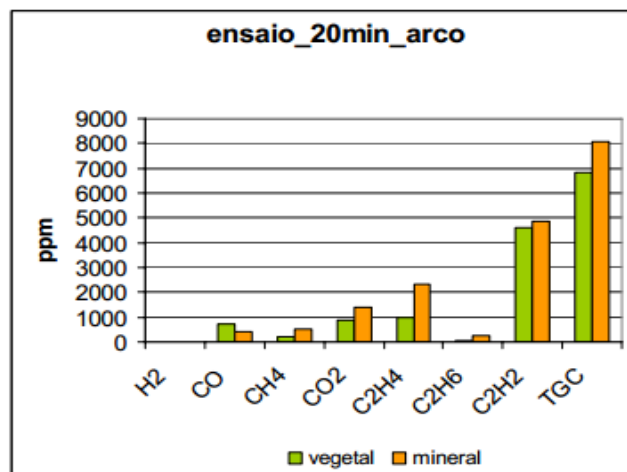
**Fonte:** Leopoldino (2011).

**Figura 30:** Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 15 minutos.



Fonte: Leopoldino (2011).

**Figura 31:** Análise cromatográfica comparativa do óleo vegetal e mineral com arco de 20 minutos.



Fonte: Leopoldino (2011).

Pode-se concluir, ao final dos experimentos, que há a formação de gases combustíveis nos óleos vegetais similares aos óleos minerais, só que em menor proporção. O gás chave para o arco elétrico continua sendo o acetileno, cuja concentração aumenta com a energia do arco elétrico.

## 5 COMPARAÇÃO

Os transformadores são considerados, pelas companhias de seguro e gerentes de risco, como os equipamentos mais críticos de uma planta industrial, dado a existência simultânea de uma grande quantidade de óleo e elementos submetidos a altas tensões elétricas. Explosões ou incêndios podem ocorrer nas redes de abastecimento e, com isso, gerar repercussões consideráveis, tanto para as companhias de energia elétrica como para a comunidade em geral (ROLLAND, 2004).

E para que haja uma garantia de continuidade e confiabilidade no fornecimento de energia, é de fundamental importância garantir o bom funcionamento dos transformadores, em que, um dos pontos relevantes a se destacar é o fluido dielétrico, por ser detentor de funções de isolamento e de arrefecimento.

Os transformadores de potência tradicionalmente utilizam óleos de tipo mineral, originário do petróleo, apolares, constituídos por moléculas de hidrocarbonetos em diferentes estruturas. No entanto, se apresenta como recurso não renovável, uma fonte finita, cuja escassez está alarmando todos os continentes.

Em contra partida, o óleo vegetal isolante, além de atender às características dielétricas e refrigerantes, apresenta algumas vantagens em relação ao óleo mineral isolante, principalmente, por ser considerado fluido de segurança, ser biodegradável e ser proveniente de fonte renovável. Por estas razões, pode-se considerar o OVI para uso em transformadores como o “óleo do futuro” em aplicações nas quais tais vantagens são requeridas.

O OMI apresenta baixa biodegradabilidade, podendo, em caso de vazamentos ou derramamentos, contaminar o solo e os recursos hídricos. As agências regulatórias ambientais do governo impõem altas penalidades às empresas quando da notificação de acidentes desta natureza. Além deste desembolso financeiro, as empresas precisam adotar medidas para remediar os sistemas impactados, que, geralmente, são baseadas em processos bastante onerosos. Por ser biodegradável, o OVI é facilmente degradado pelos micro-organismos no meio ambiente, sendo que 95% ou mais destes produtos biodegradam no ensaio de 28 dias (WILHELM, TULIO; UHREN, 2009).

Em casos de acidentes onde ocorram vazamentos e/ou derramamentos do fluido vegetal, por exemplo, é esperada uma redução nos custos financeiros inerentes à mitigação dos sistemas impactados, como solo e lençol freático, em função da sua elevada biodegradabilidade.

Em contraste, a queima do óleo mineral se dá aos 160°C e sua biodegradabilidade é de apenas 25,2%, levando, em média, 15 anos para ser totalmente degradado (FERREIRA JUNIOR, 2006). Além disso, o óleo vegetal é atóxico, oferece menor risco de acidentes no manuseio e armazenamento, possui melhor tolerância à umidade, tem boa rigidez dielétrica, melhor eficiência na troca de calor pelas excelentes características térmicas e, ainda, amplia a vida útil do equipamento.

Outro ponto relevante, no que diz respeito a parâmetros intrínsecos ao fluido, são os índices de neutralização, por exemplo, que podem indicar o estado de envelhecimento do óleo, gerando a necessidade de monitoramento. Sabe-se que, nos dielétricos vegetais, estes índices são normalmente mais altos do que os do OMI, e, adicionalmente, a literatura reporta que os produtos de oxidação do OVI não são nocivos ao papel Kraft isolante, ao contrário, evitam a sua degradação precoce (RAPP; McSHANE; LUKSICH, 2005). Se, eventualmente, os produtos de oxidação do OVI polimerizarem, esta polimerização não gera borra ou depósitos sobre os materiais internos do transformador.

Apesar de seus produtos de oxidação não serem nocivos, uma desvantagem dos óleos vegetais é que por apresentam menor estabilidade à oxidação, em comparação com óleos minerais, levanta, assim, o principal obstáculo para sua utilização como base para o desenvolvimento de fluidos dielétricos.

Medidas preventivas sobre o óleo e o próprio transformador podem ser tomadas mediante as análises físico-químicas, já que, alterações destas características podem indicar tanto o envelhecimento do óleo isolante quanto sua contaminação.

É importante adquirir informações sobre o envelhecimento não só do fluido dielétrico, mas também, do papel isolante imerso em óleo, tendo em vista que a vida útil de um transformador é dada pela vida útil de seu isolamento sólido (MARTINS, 2008).

O isolamento sólido se decompõe na presença de umidade, já que a mesma atua como agente catalisador, alterando o tempo de vida útil do equipamento elétrico. Devido a sua natureza química, o OVI apresenta grande afinidade com a água, e em acréscimo, resultados de estudos de envelhecimento mostraram que o papel isolante tem sua vida estendida na presença de óleos de base vegetal, em comparação aos transformadores isolados com óleo mineral (CLAIBORNE; CHERRY, 2006).

Adicionalmente, temos que os compostos ácidos livres de cadeia longa, formados a partir da hidrólise do triacilglicerol, reagem com as hidroxilas da celulose via reação de esterificação, impedindo a degradação do isolante sólido por estes sítios ativos (RAPP *et al.*, 2005).

Na faixa de temperaturas 70°C-130°C, a velocidade de degradação do papel é um pouco superior no óleo vegetal isolante, em relação à verificada no OMI. Para temperaturas superiores a 130°C/140°C, a velocidade de degradação do papel no OVI é um pouco inferior a que ocorre no OMI (MARTINS, 2008).

Estas observações, relativas à degradação do papel num e noutro tipo de óleo, permitiram considerar o óleo vegetal como possível competidor do óleo mineral, não só para os pequenos transformadores de distribuição, mas, também, para transformadores de maior potência, que normalmente operam com temperaturas mais elevadas (MARTINS, 2008).

Outro fator importante relacionado à presença de umidade nos líquidos isolantes é a capacidade de, além de atuar como catalisador da degradação da celulose no papel isolante, discutida anteriormente, a água está envolvida na redução da rigidez dielétrica, fato este que ocorre quando sua saturação relativa no óleo atinge aproximadamente 50%.

Para o OMI, 50% da saturação a temperatura ambiente corresponde ao intervalo entre 30 a 35 mg.kg-1 de água e para o OVI, de 500 a 600 mg.kg-1 de água (CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2003). Ou seja, a quantidade de água exigida para saturar o OVI à temperatura ambiente é aproximadamente 20 vezes a do OMI (IEEE, 2008).

Vantagens adicionais do óleo isolante a base de éster natural em comparação ao óleo de base mineral, incluem sua alta rigidez dielétrica, sua constante dielétrica muito próxima à do papel Kraft isolante, sua excelente lubrificidade, compatibilidade de material e seu coeficiente de expansão similar ao óleo de transformador convencional.

Embora o óleo vegetal apresente vantagens, o uso de óleo mineral isolante em transformadores ainda é o mais utilizado e dar-se devido o seu baixo custo, características físico-químicas adequadas e suas excelentes propriedades dielétricas. Porém, o OMI tem desvantagens como um baixo ponto de combustão (~150°C).

O óleo vegetal, além de apresentar as vantagens ambientais sobre o OMI, dentre as quais se destacam os pontos de fulgor e combustão mais altos, este óleo ainda possui a possibilidade de reutilização como biodiesel depois de findada sua vida útil. Adicionalmente, tem-se a redução do efeito estufa, a criação de consciência ecológica e a atenuação de eventuais impactos ambientais.

Na sequência de vantagens relacionadas ao uso do óleo vegetal, temos que ele permite ampliar a potência do transformador, que passa a comportar mais kVA por quilo e ajuda a diminuir as falhas técnicas, além de gerar a possibilidade de reenchimento em transformadores. (OOMMEN; CLAIBORNE, 1999).

A opção de reenchimento de transformador com isolante vegetal também é atrativa pelo fato da elevação do ponto de combustão, questões ambientais, etc. No entanto, pouco se tem desenvolvido, em termos de estudos, sobre a questão de compatibilidade do fluido substituto e os materiais internos do equipamento.

Segundo a Siemens, em boletim técnico, cada óleo tem uma determinada reação química com outros materiais. Os materiais usados normalmente no transformador ou nos processos para OMI podem apresentar reações inaceitáveis com OVI. Destacam-se com maior potencial de risco de incompatibilidade com o OVI os seguintes materiais: tinta interna do tanque e a tinta interna dos radiadores; bolsa de borracha do conservador; borrachas das juntas e vedações, incluindo anéis *O'ring*; colas; esmaltes de fio; fiação de circuitos de controle; mangueiras e dutos para circulação do óleo; materiais em contato com o OVI nos processos de transporte e tratamento do óleo, como tanques (NAVARRO, MARTINATO, SALUM, SILVEIRA, 2011).

Outro ponto em que o óleo vegetal se torna menos atrativo é o custo de fabricação dos fluidos isolantes. Apesar da preocupação ambiental e fatores físico-químicos, o valor a ser despendido por litro de óleo é um fator importante, dado que a quantidade do mesmo nos transformadores é considerável. Em 2009, segundo Uhren (2007), o valor do óleo mineral da marca Lubrax AV-60-IN da Petrobras S/A tinha um custo por litro de R\$ 7,88, enquanto que o óleo vegetal Envirotemp® FR3™ da Cooper Power System Inc. custava R\$ 9,30 o litro.

Ainda falando sobre custos, outra vantagem dos óleos isolantes minerais utilizados em transformadores, é a possibilidade de recuperação/tratamento do fluido. Através de manutenções preventivas e filtragem do fluido, evita a necessidade de trocar o óleo, e é capaz de recuperar algumas de suas principais características, fica límpido e devidamente filtrado. A quantidade de água é diminuída, pedaços de partículas sólidas do transformador que caem no óleo são retirados na filtragem, os gases nocivos são totalmente retirados.

A decisão de aplicar um processo de regeneração no lugar de substituir o óleo em uso por fluido novo é basicamente econômica, quando considerados os fatores custo e qualidade do fluido isolante (BEZERRA, 2009).

Em resumo, tem-se que, apesar de possuir desvantagens em comparação ao óleo mineral, o óleo isolante a base de éster vegetal, traz consigo alternativas vantajosas que impulsionam a ideia do óleo ecologicamente correto como possível substituto ao mineral atualmente utilizado.

De forma prática, podem ser elencadas tais vantagens de acordo com a seguinte divisão: no que diz respeito ao ambiente atual; em relação à adição de valores as concessionárias; e os benefícios que podem ser gerados aos clientes.

I. No que diz respeito ao ambiente atual:

- Fonte de óleo mineral é limitada e não renovável;
- Razões ambientais como legislação controladora de emissão de gás de efeito-estufa (emissão de CO<sub>2</sub>);
- Esforços locais/regionais para aplicação de combustíveis de fontes renováveis;
- Substituir consumo de óleo mineral importado por razões econômicas;
- Minimiza risco à saúde humana, por não conter hidrocarbonetos poliaromáticos.

II. Adição de Valor para Concessionárias:

- Elevar a confiabilidade e otimizar o fornecimento de energia elétrica aos consumidores;
- Maior capacidade de carregamento;
- Extensão da vida útil;
- Aplicação de óleo isolante de fonte renovável;
- Segurança e otimização das instalações;
- Biodegradabilidade e segurança ambiental.

III. Benefícios para Clientes:

- Alta confiabilidade do transformador;
- Redução dos custos de instalações;
- Simplificação e otimização futura dos arranjos de subestações e de área (espaço) necessária;
- Extensão da vida útil do transformador;
- Transformador com óleo vegetal e segurança:
- Redução do risco de explosão;
- Redução do risco de incêndio;
- Redução de contaminação de água e solo em caso de vazamento de óleo.

## 6 APLICAÇÕES

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

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

Outro ponto da COPEL foi inserir esta nova tecnologia no projeto da rede subterrânea de Foz do Iguaçu. O projeto da rede subterrânea de distribuição de eletricidade na Avenida Brasil em Foz do Iguaçu, Paraná, incorpora algumas inovações técnicas que estão sendo introduzidas de forma pioneira no sistema elétrico brasileiro.

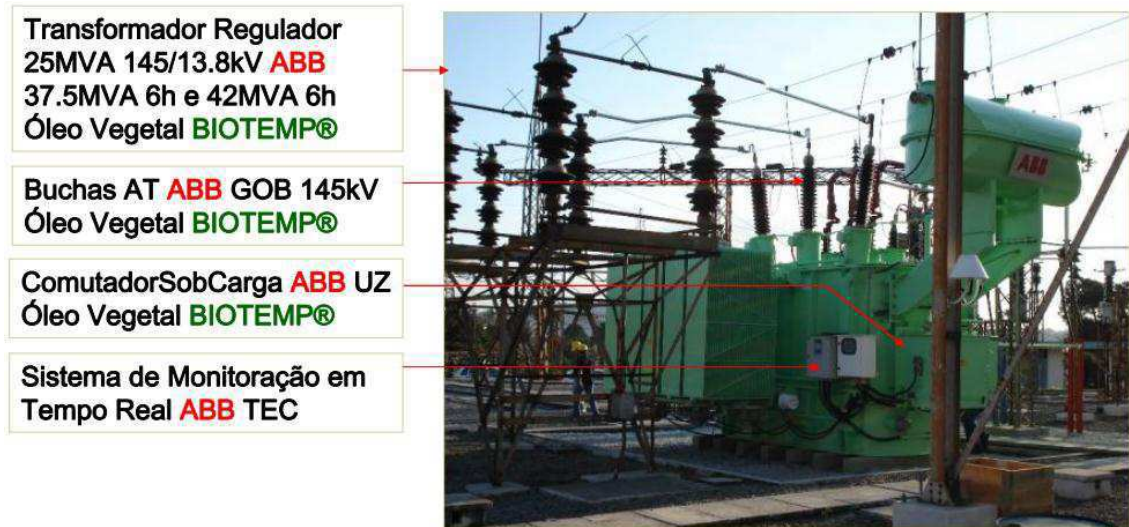
Inaugurada em junho de 2006, uma delas é a adoção de transformadores que usam óleo vegetal como isolante elétrico em lugar do óleo mineral (COPEL, 2006). A rede subterrânea da Avenida Brasil tem 18 transformadores desse tipo, com potência individual de 500 kVA e operando confinados em câmaras especiais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

A CELESC Distribuição (Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.) tem investido em óleo vegetal como isolante de transformadores de alta e baixa tensão e afirma que este alcança o seu ponto de combustão aos 360°C e tem taxa de biodegradação de 97%. Em fevereiro de 2007, a empresa instalou na rede elétrica que atende a região central de Florianópolis, seu primeiro transformador, de 750 kVA, subterrâneo, isolado com óleo vegetal a partir da semente de girassol (MACARIN; LUZ; MATTOZO, 2007).

A CEMIG Distribuição S.A. (Companhia Energética de Minas Gerais), motivada pela necessidade de repotenciar transformadores com mais de 22 anos de funcionamento, criou, em conjunto com a ABB, o primeiro equipamento deste tipo no mundo na classe de 145 kV, totalmente isolado e refrigerado a óleo isolante vegetal, que se encontra na Figura 32. O equipamento foi devidamente monitorado e mostrou-se capaz de suportar operação em regime nominal e em sobrecarga.



**Figura 32:** Transformador 145 KV - 100% óleo vegetal, produzido pela CEMIG em parceria com a ABB.



- Transformador Regulador  
25MVA 145/13.8kV **ABB**  
37.5MVA 6h e 42MVA 6h  
Óleo Vegetal **BIOTEMP®**
- Buchas AT **ABB** GOB 145kV  
Óleo Vegetal **BIOTEMP®**
- Comutador Sob Carga **ABB** UZ  
Óleo Vegetal **BIOTEMP®**
- Sistema de Monitoração em  
Tempo Real **ABB** TEC

Fonte: MENDES (2008).

Técnicas de isolamento híbrida (combinação de celulose e materiais isolantes sólidos resistentes a altas temperaturas) em conjunto com refrigeração líquida a óleo vegetal foram estudadas pela CEMIG. Os resultados mostraram que as características singulares do transformador repotenciado com isolamento híbrido e óleo vegetal garantem um enorme custo/benefício em relação à aquisição de uma nova unidade tradicional. O aumento da vida útil resulta em uma operação prolongada do transformador e elimina os custos de compra de um novo equipamento.

Além disso, a possibilidade de sobrecarga, com reserva de potência de até 70%, é extremamente importante e estratégica para suprir demandas em horários de ponta, bem como em situações emergenciais. No decorrer dos estudos de viabilidade econômica que antecederam à revitalização, observou-se que a repotenciação geraria um retorno de investimento consideravelmente maior. O sistema de isolamento e refrigeração líquida foram baseadas no óleo isolante vegetal comercial Biotemp®. O emprego desse óleo foi estendido a todas as partes do transformador: tanque principal, comutador de derivação sob carga e buchas de alta tensão (CANGUSSU, 2007).

O transformador escolhido para protótipo tinha potência inicial de 15 MVA, 138/13,8 kV, apresentado na Figura 33. Com a repotenciação, a potência nominal subiu para 25 MVA. As características proporcionadas pelo emprego das novas tecnologias possibilitaram a operação do equipamento submetido a uma sobrecarga de 37,5 MVA durante seis horas e de 42,5 MVA por quatro horas consecutivas, sem perda de vida útil. Segundo a empresa, entre as numerosas vantagens obtidas nas condições de operação e manutenção, pode-se citar a

extensão da vida útil do transformador de 50 para até 400 anos, dado estimado por simulações de envelhecimento acelerado nos laboratórios (CANGUSSU, 2007).

**Figura 33:** Transformador revitalizado.

	<b>Original</b>	<b>Revitalizado</b>
<b>Número de Série</b>	54381	
<b>Fabricante</b>	<b>ASEA</b>	<b>ABB</b>
<b>Ano</b>	1974	2006
<b>Frequência, Hz</b>	60	60
<b>Tensões</b>	138 ± 2x2.5% / 13.8 ± 16x0.625 kV	
<b>Potência, MVA</b>	15 (ONAF2)	25 (ONAF2)
<b>Sobrecarga, MVA</b>	-	37.5 (6h, 150%) 42 (4h, 170%)
<b>OLTC</b>	UZERN 250/300	UZF 250
<b>Isolação</b>	Celulose	Híbrida (Nomex+Celulose)
<b>Óleo Isolante</b>	Mineral	<b>BIOTEMP®</b>



**ABB**

ABB Brasil JCM A-28  
Divisão de Transformadores

**Fonte:** MENDES (2008).

A CEMIG também instalou, em maio de 2007, dois transformadores, um de 150 kVA e outro de 300 kVA, com óleo vegetal Biotemp® para atender a região do Boulevard Arrudas, em Belo Horizonte. É a primeira vez que essa empresa utiliza transformadores desse tipo para atendimento à iluminação pública e a consumidores (CEMIG, 2007).

A Companhia Paulista de Força e Luz, a CPFL Energia, iniciou a idealização do projeto do transformador verde em 2002, ao promover um programa de pesquisa em tecnologia de transformadores verdes, viabilizado por uma iniciativa pioneira da Itaipu Transformadores.

No entanto, o ápice se deu neste ano de 2014, onde, segundo nota publicada em sua página *online*, a Companhia CPFL de Energia divulgou uma extraordinária parceria feita com a Cargill, que promove a migração de toda a sua rede de distribuição para transformadores verdes que utilizam o óleo vegetal Envirotemp® FR3™.

Essa iniciativa a torna a primeira empresa de energia no Brasil a iniciar a troca de todo o parque instalado de transformadores por equipamentos desenvolvidos com tecnologia sustentável. O trabalho é resultado de um estruturado programa de pesquisa e

desenvolvimento que durou mais de uma década e culminou com a parceria com a Cargill (CPFL, 2014).

Com mais de 5.000 transformadores verdes em operação, a migração de todo o parque da CPFL Energia envolve a compra de 11.000 transformadores verdes em 2014, que utilizam o óleo vegetal FR3™ da Cargill, e a conversão dos equipamentos antigos ao longo dos próximos anos, um investimento inicial da ordem de R\$ 55,8 milhões (CPFL, 2014).

## 7 CONCLUSÃO

O presente trabalho expôs um estudo acerca da aplicação do óleo vegetal para transformadores. Mediante as buscas por alternativas biodegradáveis de substituição ao óleo atualmente empregado como isolante, tem sido enfatizada a possibilidade do uso do óleo isolante de base vegetal. Uma revisão bibliográfica foi realizada em torno do assunto, contemplando desde traços de sua composição química, até aplicações palpáveis do seu uso no setor elétrico atualmente.

A introdução dos óleos vegetais isolantes ao mercado de fluidos dielétricos trouxe consigo condições de promover melhorias no sistema isolante fluido/sólido de um transformador, proporcionando um avanço tecnológico sustentável. No entanto, para que se possa atestar a sua capacidade dielétrica, faz-se necessário que esses fluidos substitutos atendam aos requisitos mínimos para serem considerados fluidos isolantes.

Na seção de teste, foram apresentadas análises comumente utilizadas no monitoramento do estado de envelhecimento do óleo isolante, estabelecidas na norma NBR 15422, para avaliar o comportamento do fluido à base de éster natural comparado ao de base mineral. Os resultados obtidos encontram-se dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma e evidenciam a capacidade físico-química dos óleos vegetais serem utilizados como fluido dielétrico.

No capítulo 5, foram realizadas comparações entre os dois fluidos em questão, abordados pontos favoráveis e contrários ao uso, tanto dos óleos vegetais como meio dielétrico, quanto os óleos minerais. Quando comparados, apesar de serem propensos à oxidação e de possuírem custos mais elevados, os óleos à base de éster naturais demonstram um resultado muito mais proveitoso, capaz de compensar os inconvenientes citados.

Os dados obtidos e aqui descritos, mesmo que recentes e por ora inconclusivos, trazem consigo mostras de que os benefícios a serem obtidos com o aprofundamento e domínio acerca do fluido isolante ecologicamente correto serão de grande monta. Temos, portanto, ao nosso alcance o óleo do futuro, renovável e sustentável.

## BIBLIOGRAFIA

ABB. **Catálogo Tecnologias sustentáveis – Inovação em Transformadores de Distribuição para um Consumo Consciente.** Disponível em:

<<[http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/7544c93c9bf1c02e83257a06004eb779/\\$file/Catálogo%20Tecnologia%20Sustentavel.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/7544c93c9bf1c02e83257a06004eb779/$file/Catálogo%20Tecnologia%20Sustentavel.pdf)> . Acesso em: 3 de outubro de 2014.

ANTONIASI, R. **Métodos de avaliação da estabilidade oxidativa de óleos e gorduras.** Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos, Curitiba, v. 19, n. 2, , 2001.

ARAUJO, D. C. P. et al. **As vantagens da revitalização de transformadores de potência utilizando repotenciação e óleo vegetal.** In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE, 2006, Campina Grande. Anais... Campina Grande, 2006. Disponível em:

>[http://www.sbse2006.ufcg.edu.br/anais/132\\_sbse2006\\_final.pdf](http://www.sbse2006.ufcg.edu.br/anais/132_sbse2006_final.pdf)>. Acesso em: 15/05/2013.

ABB. **BIOTEMP®–ABB sensible solution. The superior biodegradable, high fire point dielectric insulating fluid.** Biotemp® Brochure. 2009.

ASTM D6871. **Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus.** 2008.

ASTM D5222-92. **Standard guide for high fire-point electrical insulating oils from petroleum origin.**2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15422. Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10576: Guia para acompanhamento de óleo mineral isolante de equipamentos elétricos.**Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

BAILEY, A. E.; Bailey's **Industrial Oil and Fat Products**, 5th ed., John Wiley: New York, 1996, vol. 3.

BAUR. **The BAUR Oil Tester DTA 100C.** Disponível em: <<http://www.baur.at/en/products/insulating-fluids-testing/break-down-voltage/dta-100-c.html>> Acesso em: 3 de novembro de 2014.

BELTRÃO, N.E.M.; OLIVEIRA, M.I.P. **Oleaginosas potenciais do Nordeste para produção de biodiesel.** Campina Grande: EMBRAPA. 53p. (Embrapa Algodão.Documentos, 177). 2007.

BEZERRA, C. M. S. **Estimativa de Custo para o Tratamento de Óleo Mineral Isolante em Transformadores de Energia: Estudo de Caso COPEL.** Curitiba, 2009.

BINGENHEIMER, D.; FIACCO, E. D.; RAPP, K.; MAK, J.; FRANCHINI, L.. **Benefícios do uso de fluidos de ésteres naturais nos sistemas de isolamento.** Eletricidade moderna, p. 178-183, out. 2011. c Disponível em:

<<http://www.buenomak.com.br/wp-content/uploads/2011/11/ArtigoTransformadores-Eletricidade-Moderna.pdf>>. Acesso em: 29 de setembro de 2014.

BOGNAR, A. et. al. **Diagnostic tests of high voltage oil : paper insulating systems using DC dielectrometrics.** Paris, 1990. Cigré, 15/33-08, p. 6.

BRUSCATTO, M. H.; ZAMBIAZI, R.; OTERO, D.; PAIVA, F.; LIMA, R.; PESTANA, V.R. **Estabilidade Oxidativa do Óleo de Arroz.** In: IX Encontro de Pós-graduação da Universidade Federal de Pelotas, 11, 2007.

Pelotas - RS. Disponível em: <[http://www.ufpel.tche.br/cic/2007/cd/pdf/CA/CA\\_01399.pdf](http://www.ufpel.tche.br/cic/2007/cd/pdf/CA/CA_01399.pdf)> Acesso em: 18 de outubro 2014.

**CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL.** Final Decision to Certify Hazardous Waste Environmental Technologies, 2003. Disponível em <[http://www.dtsc.ca.gov/TechnologyDevelopment/TechCert/upload/SPPTD\\_PN\\_Cooper\\_Final.pdf](http://www.dtsc.ca.gov/TechnologyDevelopment/TechCert/upload/SPPTD_PN_Cooper_Final.pdf)> Acesso em: 15 de outubro de 2014.

CAMPANA, E. **Gergelim.** NG Revista. Ed. março 2014. Disponível em: <<http://ngrevista.com.br/gergelim-edicao-de-marco-de-2014/>>. Acesso em 27 de outubro de 2014.

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

CANNON, G. S.; HONARY, L.; US Patent 5.958,851, Soybean based transformer oil and transmission line fluid. 1999. p. 9.

CARGILL. **Guia do Produto.** 2013. Disponível em <<http://www.cargill.com.br/wcm/groups/public/@ccom/documents/document/na3076871.pdf>>. Acesso em: 24 de outubro de 2014.

CEI 60450. **Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic insulating materials.** 2<sup>nd</sup> edition, April, 2004.

CEI 61198 – “**Mineral insulating oils – Methods for the determination of 2-furfural and related compounds**” – 1<sup>st</sup> edition, September 1993.

CEMIG - **CENTRAIS ELÉTRICAS DE MINAS GERAIS.** 2007. Disponível em <<http://cemig.com.br>>. Acesso em: 24 de outubro de 2014.

CHASAN, D. E.: **Oxidative Stabilization of Natural Oils. Technical Development Manager Additives For Lubricants,** Ciba Additives, Ardsley, NY, 1994.

CLAIBORNE, C. C.; CHERRY, D. B. - **A status update on the use of natural ester (vegetable oil) dielectric fluids in transformers.** Anais do 74th Doble International Client Conference, Boston, MA, 2006.

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

COPEL - Companhia Paranaense de Energia. **COPEL usa transformadores isolados com óleo vegetal.** Reportagem publicadas no COPEL On-line em 27 de junho de 2006.

CPFL. **CPFL Adota Óleo Vegetal Da Cargill Em Sua Rede De Distribuição.** Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br/releases/Paginas/cpfl-energia-adota-oleo-vegetal-da-cargill-em-sua-rede-de-distribuicao.aspx>>. Acesso em: 15 setembro de 2014.

FARIA, F. **Óleo mineral x óleo vegetal.** Energia+ Especialistas do Setor Energético, 2013. Disponível em: <[energiamais.com.br/noticias/comparativo-oleo-mineral-x-oleo-vegetal](http://energiamais.com.br/noticias/comparativo-oleo-mineral-x-oleo-vegetal)>. Acesso em: 15 de outubro de 2014.

FERNANDES, P. O. **Líquidos isolantes.** WPA, Apostila, 1992

FERREIRA JUNIOR, W. **A CPFL cumpre seu papel,** Revista P&D: Projetos ambientais. ANEEL, v.1, p.23-24, 2006.

GALES NETO, Í. **Vida média de transformador de distribuição**. 1997. Monografia (Especialização em Engenharia de Qualidade) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 1997.

GIOIELLI, L. A. **Óleos e gorduras vegetais: composição e tecnologia**. Revista Brasileira de Farmacognosia, São Paulo, v. 5, n. 2, 1996.

GOMES, A. **Desenvolvimento e aplicação de espumas uretânicas para a adsorção de bifenilas policloradas em óleo mineral isolante**. Curitiba: PRODECTEC, 2006.

GOUVEIA, DÊNIS A. G. **Determinação de gases combustíveis em óleo isolante para transformadores, por meio de aquecimento prévio**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-05072008-155748/>>. Acesso em: 04 de novembro de 2014.

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

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

LEOPOLDINO, R. **Estudo sobre gases dissolvidos em óleos vegetais Isolantes - Influência de Arco Elétrico e Superaquecimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia São Carlos. São Paulo, 2011.

LEVY, N. M.; NAKAMORI, A.; PEREIRA, N., et . al. **Determinação de envelhecimento relativo de transformadores de potência, através da correlação dos teores de produtos de degradação da isolação sólida e líquida**. In: IV SEMINÁRIO DE MATERIAIS NO SETOR ELÉTRICO, 4, 1994, Curitiba. Anais... Curitiba: 1994. 813p. p.349-354.

LEVY, N. M.; RIBEIRO, L. H.; NACHVALGER, E. E., et. al. **Determinação de carboidratos em óleo mineral isolante originados da degradação da isolação celulósica, através de método espectrofotométrico**. In: IV SEMINÁRIO DE MATERIAIS NO SETOR ELÉTRICO, 4, 1994, Curitiba. Anais... Curitiba : 1994. 813p. p.561-566

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

LIMA J. R. O.; SILVA R. B.; SILVA C. M. Biodiesel de Babaçu (*Orgignya sp.*) obtido por via etanólica, Química Nova, 30: 600, 2007.

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

MACARIN, L.; LUZ, R.; MATTOZO, V. CELESC Distribuição **Investe em óleo Vegetal como Isolante de Transformadores de Alta e Baixa Tensão**. 2007. Disponível em: <[http://www.acionista.com.br/home/celesc/260207\\_oleo\\_vegetal.htm](http://www.acionista.com.br/home/celesc/260207_oleo_vegetal.htm)>. Acesso em: 31 de outubro de 2014.

MARTINS, M. A. G. – **Será o óleo vegetal um possível substituto do óleo mineral para transformadores?** Revista Ciência & Tecnologia, Vol.20, No 3/4, 2008.

McSHANE, C. P.; CORKRAN, J. L.; HARTHUN, R. A.; GAUGER, G. A.; RAPP, K. J.; HOWELLS, E.; US Patent 6.037,537, CooperIndustries, Inc., Houston, TX. **Vegetable oil based dielectric coolant.** 2000.

McSHANE, C. P.; LUKSICH, J.; RAPP, K. J. **Retrofilling aging transformers with natural ester based dielectric coolant for safety and life extension.** IEEE – IAS/PCA Cement Industry Conference, Dallas, TX, USA, 2003.

McSHANE, C. P.; RAAP, K. J.; GAUGER, G. A.; CORKRAN, J. L., LUKSICH, J. **Aging of kraft paper in natural ester dielectric fluid.** Proceedings of International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Austria, 2002.

MENDES, J. C. **Apresentação do Biotemp. Workshop Óleo Vegetal para CEPEL.** São Paulo, 2008.

MIDEL. **Descripción general del líquido aislante dieléctrico basado em un éster natural.** 2014. Disponível em <<http://www.midel.com/products/midel/midel-en>>. Acesso em: 16 de outubro de 2014.

MIDEL. **Retrolenado.** Disponível em: <<http://www.midel.com/es/applications/retrofilling>>. Acesso em: 31 de outubro de 2014.

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

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

NAVARRO, M. A.; MARTINATO, M.; SALUM, B. P. L.; SILVEIRA, J. G. G. **Desenvolvimento de Tecnologia para Substituição de Óleo Isolante Mineral por Óleo Isolante Vegetal em Transformadores de potência Usados.** CINETEL, 2011.

NETO, R.C. **Avaliação da Eficiência de Antioxidantes na Inibição à Oxidação em Óleo Isolante Mineral.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 15, Curitiba-PR, 2004.

OOMMEN, T. V.; CLAIBORNE C. C.; US Patent 5, 949, 017 1999. ABB Power T&D Company Inc. (Raleigh, NC). **Electrical transformers containing electrical insulation fluids comprising high oleic acid compositions.**

PABLO. A.; PAHLAVANPOUR, B. **Furanic Compounds Analysis: A tool for predictive maintenance of oil filled electrical equipment.** ELECTRA, n.175, p. 9-31, dez. 1997.

PAIXÃO, L. A. **Avaliação da Qualidade do Óleo Isolante em Transformadores com o Emprego da Função Discriminante Quadrática.** Curitiba, 2006.



PEPPAS, GEORGIOS D.; PYRGIOTI, ELEFThERIA C.; CHARALAMPAKOS, VASILIOS P. **Investigation of statistical breakdown in mineral and natural ester oils under ac voltage**, Session OE2: Eco-Friendly Oil, 18<sup>o</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul-Korea, Agosto, 2013.

PEREIRA, A. F. C. **Determinação simultânea de acidez, índice de refração e viscosidade em óleos vegetais usando espectrometria NIR, calibração multivariada e seleção de variáveis**. Paraíba, 2007.

Portaria Interministerial MIC/MI/MME nº 19 (de 29/1/81). Ministério do Meio Ambiente. Disponível no Portal <[www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br)>. Acesso em: 15 de outubro de 2014.

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

RAMALHO, H. F.; SUAREZ, P. A. Z. **A química dos óleos e gorduras e seus processos de extração e refino**. Revista Virtual de Química, v. 5, p. 2-15, 2013.

RAMALHO, V. C.; JORGE, N. **Antioxidantes utilizados em óleos, gorduras e alimentos gordurosos**. Quím. Nova vol.29 n°.4 São Paulo, 2006.

REDA, S. Y.; CARNEIRO, P. I. B. **Óleos e gorduras: Aplicações e implicações**. Revista Analytica. Fevereiro/Março 2007. Nº 27.

REVISTA PLANTAR. **Governo quer mais milho e menos soja**. Disponível em: <<http://www.revistaplantar.com.br/governo-quer-mais-milho-e-menos-soja/>>. Acesso em: 27 de outubro de 2014.

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

SÁ, A. L. C. R.; NEPOMUCENO, P. R. **Avaliação do grau de polimerização antes e após secagem de transformadores em fábrica**. In: SNPTTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., Belém, PA, 1997. Disponível em: <[http://www.buenomak.com.br/publicacoes/pdf/ISOLACAO\\_avaliacao\\_%20GP\\_%20antes\\_pos\\_secagem\\_celg.pdf](http://www.buenomak.com.br/publicacoes/pdf/ISOLACAO_avaliacao_%20GP_%20antes_pos_secagem_celg.pdf)>. Acesso em: 1 de outubro de 2014.

SBV. **Ficha Técnica: Ambient® Dielétric Fluid**. SVB Environmental Lubricants, Ltda. 2010.

SANTOS, F. C., **Resíduos Impregnados com óleo mineral isolante na CEMIG: avaliação das técnicas de compostagem, fitorremediação e processo oxidativo pra seu tratamento**. Minas Gerais, 2013.

SANTOS, N. A. dos. **Propriedades termo-oxidativas e do fluxo de biodiesel de babaçu (Orbignya phalerata)**. Dissertação (Mestrado) – UFPB, Paraíba, 2008.

SHROFF, D. H.; STANNET, A. W., **A review of paper aging in power transformers**. IEE Proceedings. v. 132, n.6, p. 312-319, Nov. 1985.

SILVA, C. R.; CARVALHO, M. W. N. C.; CONRADO, L. de S.; FOOK, M. V. L.; LEITE, K. P. dos S. **Caracterização físico-química e dielétrica de óleos biodegradáveis para transformadores elétricos**. Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient. vol.16 n°.2 Campina Grande Feb. 2012.

SIMIC, M. G.; JAVANOVIC, S. V. **Inactivation of oxygen radicals by dietary phenolic compounds in anticarcinogenesis**; Ho, C. T.; OSAWA, T.; HUANG, T. M.; ROSEN, R. T., eds.; Food Phytochemicals for Cancer Prevention: Washington, 1994, p. 20.

SUWARNO. **The Influence of Arc on Dissolved Gases in Transformer Oils**. In 8<sup>th</sup> International Conference of Properties and Applications of Dielectric Materials, 2006, p. 498-501, Indonesia. IEEE 2006.

TULIO, L. **Estudo do envelhecimento acelerado de óleo vegetal isolante em escala laboratorial**. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) e Instituto de Engenharia do Paraná (IEP). Curitiba, 2008.

UHREN, W. **Óleos Ecológicos para Transformadores de Distribuição**. 2007.

VASCONCELLOS, V. et al. **Desenvolvimento de transformador de distribuição de maior vida útil e menor agressividade ambiental**. In: Congresso Latino-americano De Distribucion Electrica (CLADE), Mar del Plata, Argentina, sep. 2008.

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

WILHELM, H. M. et al. **Aspectos relacionados com a estabilidade a oxidação e o tratamento de Óleo Vegetal Isolante (OVI) em uso**. International Workshop On Power Transformers, Foz do Iguaçu, 2010.

WILHELM, H. M. et al. **Desempenho de óleo vegetal isolante frente ao envelhecimento acelerado**. SNPTEE – 19° Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2007.

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

WILHELM, H. M.; STOCCO, G. B. - **Determinação da Estabilidade à Oxidação de OVIs pelo Método Condutivimétrico**. Relatório Técnico apresentado no Cigré, 2007.

WILHELM, H. M.; TULIO, L.; UHREN, W. – **Produção e uso de OVIs no setor elétrico**. Revista Brasil Engenharia, 2009, p. 120-124.

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