

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**GIOVANA SIMONE**

**O USO DE ÓLEO VEGETAL EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO  
DE ENERGIA ELÉTRICA**

**ARARANGUÁ**

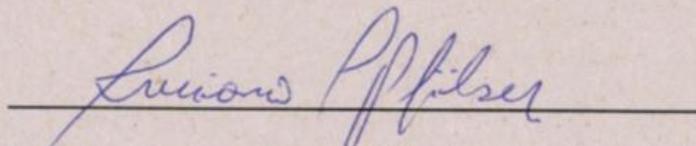
**2017**

GIOVANA SIMONE

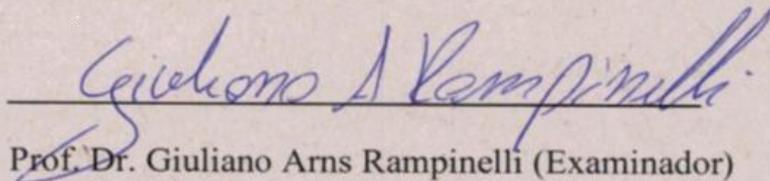
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

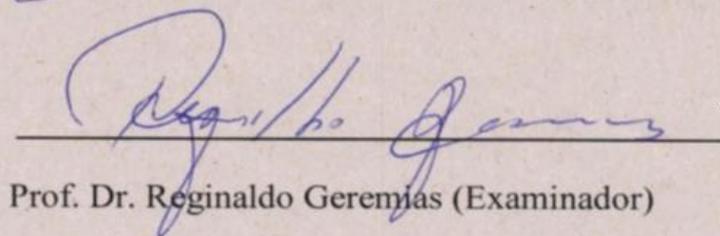
Aprovado em: 01 / 12 / 17



Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher (Orientador)



Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli (Examinador)



Prof. Dr. Reginaldo Geremias (Examinador)

Dedico este trabalho aos meus pais, que mostraram contínuo suporte e incentivo não só em minha vida acadêmica, mas em minha vida inteira, agradeço ao amor que demonstraram até nas horas mais difíceis e me ensinaram a ser forte o bastante para enfrentar todos os desafios.

O trabalho foi inspirado pelo meu pai, quem me ajudou com dados técnicos e informações sobre o conteúdo do presente trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela vida e por sua constante presença nela me ajudando através da fé a atingir meus objetivos.

“Estou convencido de que metade do que separa os empreendedores de sucesso daqueles que não são bem-sucedidos é apenas a perseverança.” (Steve Jobs)

## RESUMO

O uso de transformadores é imprescindível no setor elétrico, sendo que um dos componentes para o seu funcionamento é o óleo mineral que tem a função de isolar e refrigerar o equipamento durante sua operação. Contudo o óleo mineral é derivado do petróleo, que é proveniente de uma fonte finita, além de ser nocivo ao meio ambiente, apresentando problemas como a baixa biodegradabilidade. Do ponto de vista ambiental, viu-se a necessidade de encontrar um fluido isolante renovável e menos agressivo ao meio ambiente para substituir o óleo usualmente utilizado. O presente trabalho tem como objetivo realizar o levantamento bibliográfico do assunto através de documentos como Teses, Trabalhos de Conclusão de Curso, artigos entre outros. Por fim, explicitar as propriedades necessárias para que um fluido possa atuar com a mesma função do óleo mineral isolante em transformadores. Visa também fomentar mais estudos na área, incentivando essa troca, para que assim, o setor elétrico também tenha sua contribuição na sustentabilidade.

Palavras-chave: Transformador. Óleo mineral. Óleo vegetal

## **ABSTRACT**

The use of transformers is essential in the electrical sector, and one of the components for its operation is mineral oil which has the function of isolating and cooling the equipment during its operation. However mineral oil is derived from petroleum, which comes from a finite source, in addition to being harmful to the environment, presenting problems such as low biodegradability. From the environmental point of view, it was necessary to find a renewable insulating fluid and less aggressive to the environment to replace the oil usually used. The present work has as objective to carry out the bibliographic survey of the subject through documents such as thesis, Works of Conclusion of Course, articles among others. Finally, to explain the properties necessary for a fluid to act with the same function of the mineral insulating oil in transformers. It also aims to encourage more studies in the area, encouraging this exchange, so that the electric sector also has its contribution to sustainability.

**Keywords:** Transformer. Mineral oil. Vegetable oil

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Componentes de um transformador.....	12
Figura 2 - Funcionamento do transformador.....	13
Figura 3 - Detalhes do sistema isolante em um transformador.....	14
Figura 4 - Estrutura base dos hidrocarbonetos aromáticos.....	16
Figura 5 - Cadeias parafínicas ramificadas.....	17
Figura 6 - Estrutura química do triacilglicerol.....	20
Figura 7- Propriedades do fluido BIOTEMP.....	33
Figura 8 - Propriedades do óleo de soja.....	33
Figura 9 -Custos dos transformadores.....	35

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Produção de biocombustíveis no território brasileiro.....	21
Tabela 2 – Óleo vegetal isolante novo.....	24
Tabela 3 - Propriedades dos fluidos.....	32
Tabela 4 - Custos.....	34

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Transformadores de distribuição de energia elétrica.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Óleo mineral isolante.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>Óleo vegetal isolante.....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>Tecnologias de óleo vegetal em transformadores.....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica tornou-se tão necessário quanto a alimentação, sendo seu uso um direito básico de todo ser humano, protegido por lei. Durante o processo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica um equipamento está presente em todas estas etapas e é considerado um dos equipamentos mais importantes, o transformador. Os transformadores de distribuição têm por função rebaixar a tensão á carga de utilização do consumidor final. Tais equipamentos representam um dos últimos estágios para que a energia gerada possa ser utilizada pelo consumidor. Portanto, devem ser de alta qualidade para que o fornecimento de energia elétrica se complete.

Os transformadores são um dos equipamentos de grande importância para o sistema elétrico e um dos de maiores custos. A sua relevância está fortemente vinculada a sua continuidade no fornecimento de energia elétrica, uma vez que, uma falha ou defeito no equipamento remete a interrupção imediata no fornecimento de energia. Com isso, sua substituição demanda tempo e é muito onerosa, por se tratar de um equipamento de grande porte. Devido a este fato, a manutenção e otimização destes equipamentos são de suma importância.

A principal parte de um transformador é o seu sistema de isolamento. O tipo construtivo mais utilizado é aquele com sistema de refrigeração através da circulação de óleo. O papel essencial do óleo é promover o isolamento dielétrico entre os componentes internos do transformador, além da refrigeração por de trocas de calor. O principal óleo utilizado é o óleo mineral isolante, de base naftênica ou parafínica. Destaca-se que o óleo mineral é proveniente de uma fonte fóssil, o qual apresenta risco a saúde e ao próprio equipamento.

A crescente preocupação com o meio ambiente além da busca por fontes alternativas de energia, estimulou a procura por uma alternativa também no setor elétrico. Estudos vêm sendo feitos para que o óleo vegetal seja utilizado com a mesma finalidade do óleo mineral. O óleo vegetal é derivado de sementes de oleaginosas, sendo esta uma fonte renovável, além de ser biodegradável.

A partir deste pressuposto o presente trabalho tem como objetivo apresentar um resumo dos principais resultados obtidos até o momento pelos pesquisadores da área, além de identificar os principais aspectos técnicos considerados necessários nas

pesquisas analisadas para que seja possível a substituição do uso do óleo mineral pelo vegetal nestes equipamentos.

Salienta-se que é um trabalho de revisão bibliográfica com expectativa de que o mesmo possa contribuir para o estado da arte da temática a ser estudada, bem como os benefícios ao meio ambiente e ao próprio equipamento com a utilização óleo do vegetal.

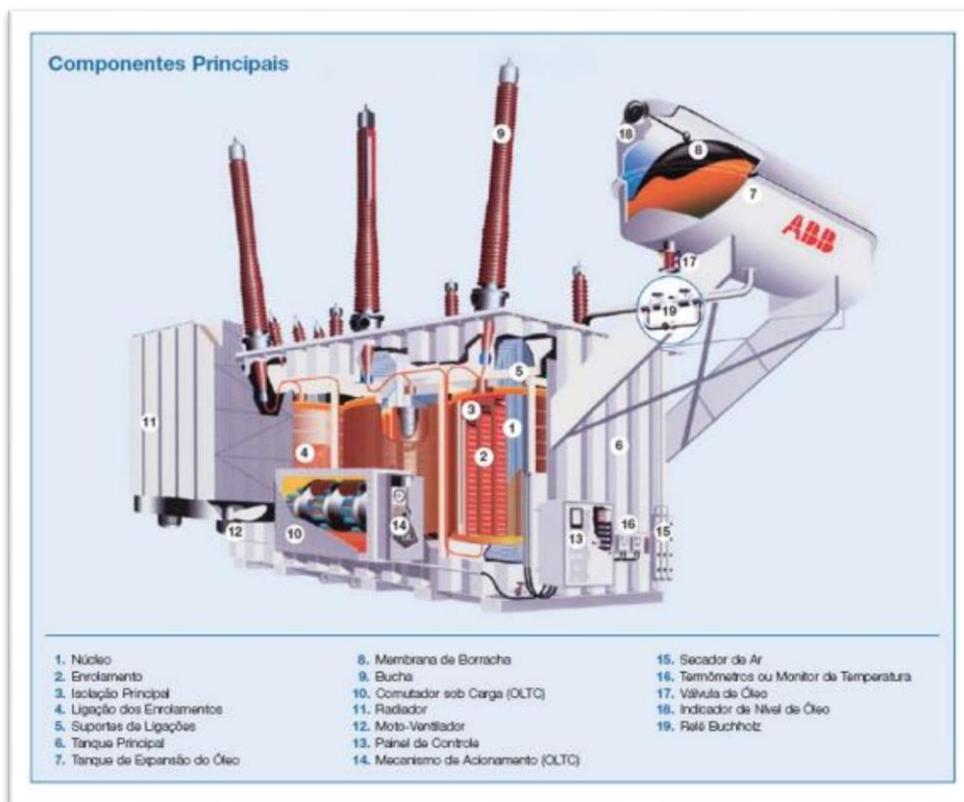
## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

A seguir serão apresentados os dados que levaram a base teórica relacionada á temática estudada no presente projeto.

### **2.1 Transformadores de distribuição de energia elétrica**

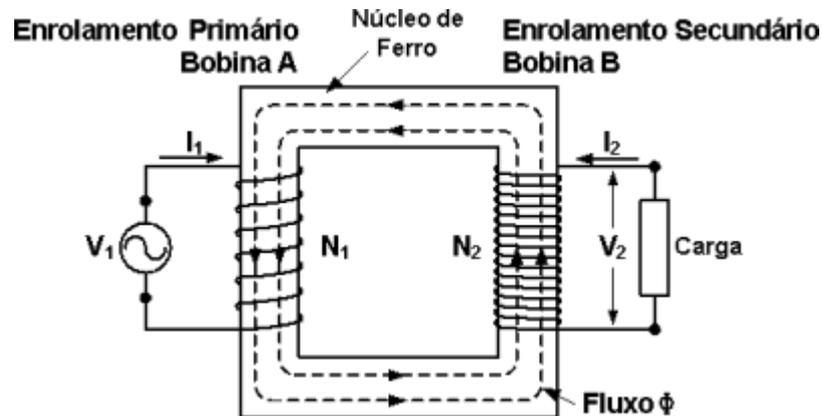
O setor elétrico é composto por grandes usinas geradoras de energia elétrica, sendo estas de fontes renováveis de energia como as hidrelétricas, eólicas e solares, até as que usam recursos não renováveis, como as termoelétricas a carvão. Todas estas estações geradoras são compostas por vários dispositivos de forma a levar energia para os consumidores, seja a indústria, casas ou até para a própria usina, sendo um dos elementos mais importantes na transmissão e distribuição da energia elétrica, o transformador, Figura 1 (STOCCO, 2009).

Figura 1- Componentes de um Transformador (ABB)



Um transformador, é um dispositivo que converte a energia elétrica de corrente alternada (CA) de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica de CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão. Isso é possível devido à ação de um campo magnético. Suas principais aplicações são para transmissão e distribuição de energia elétrica, além de adequação de níveis de tensão em circuitos elétricos, isolamento e medições. Alimentando a bobina primária com CA, será produzido um campo magnético alternado (Lei de Ampère). As linhas de fluxo são conduzidas pelo núcleo, o qual submete a bobina secundária à ação deste campo, o campo magnético alternado induzirá uma tensão na bobina secundária (Lei de Faraday), conforme a Figura 2 (CHAPMAN, 2013).

Figura 2- Funcionamento do transformador (GOMES, 2016)

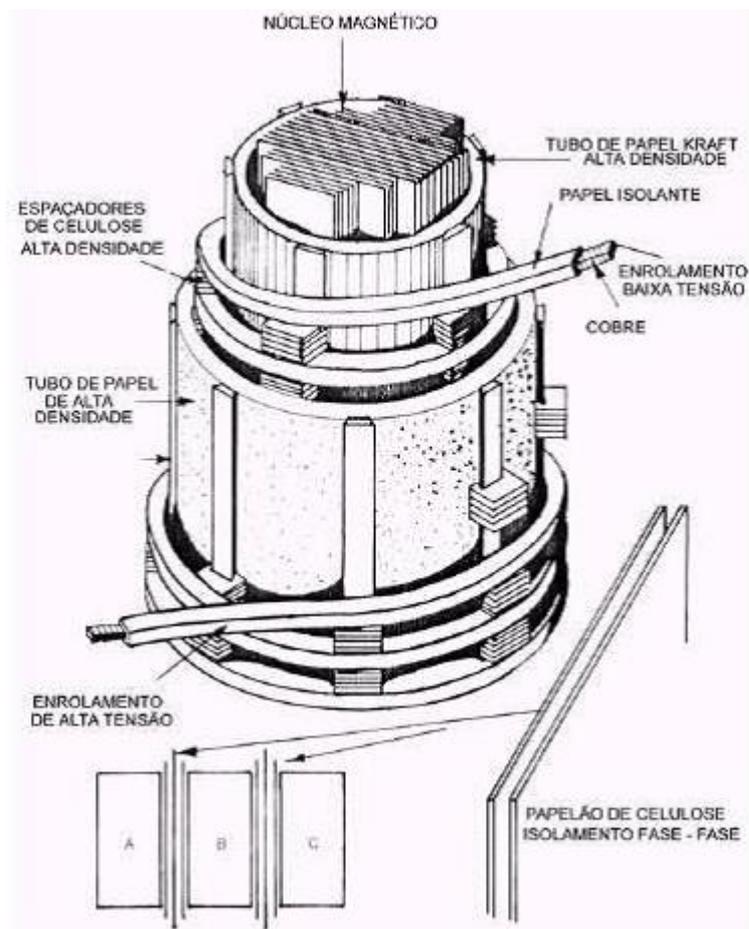


Quando o transformador entra em operação sem conexão a cargas, ocorre o aquecimento do seu núcleo devido a excitação, causando consequentemente as perdas a vazio. Ao conectar cargas, ocorrem as perdas de carga que são decorrentes do aquecimento nos condutores e demais componentes mecânicos internos. Assim, a troca de calor em um transformador se dá por condução, convecção e radiação (RIES, 2007).

O transformador (Figura 3) é composto por um núcleo de material ferromagnético, o qual possui uma alta permeabilidade magnética, que é maior que a permeabilidade do ar, geralmente de aço silício (KOSOW, 1972). Nos enrolamentos são utilizados alumínio ou cobre, calços de madeira são utilizados para a fixação da bobina, e para o isolamento das bobinas se utiliza papel, o mais utilizado é o papel Kraft. Salienta-se que os materiais citados acima estão todos em contato com o óleo (SOARES, 2015).

A troca de calor por condução ocorre entre os centros do núcleo, os enrolamentos e as superfícies em contato com o meio refrigerante, que pode ser o ar ou o óleo. A troca de calor por convecção ocorre entre as superfícies externas do núcleo, enrolamentos e o fluido isolante, e também entre o líquido isolante e as paredes internas do tanque e entre os radiadores e o ambiente externo. E, por fim, a troca de calor por radiação ocorre entre as paredes externas do tanque e dos radiadores e o ar, além daquela entre o núcleo e os enrolamentos e o óleo (SOARES, 2015).

Figura 3-Detalhes do sistema isolante em um transformador (MEYERS, 1982)



O modelo de transformador mais utilizado é aquele em que o óleo dentro do equipamento circula pelos materiais com a função de refrigerar por trocas de calor, e isolar os componentes internos. Atualmente o óleo mais utilizado para cumprir estes requisitos é o óleo mineral (STOCCO, 2009).

Durante o funcionamento do transformador, o mesmo está sujeito a processos de envelhecimento e desgaste que ocorrem na parte do isolamento. Tais processos levam a fadiga térmica, química, elétrica e mecânica do sistema, devido a vários fatores, entre eles sobre tensões e sobre aquecimento, além de vibrações. Essas alterações devem ser monitoradas para garantir que o equipamento continue funcionando com a mesma eficiência. Nos transformadores, o componente mais sujeito a desgaste é o sistema papel-óleo isolante. Assim, a vida útil do equipamento está ligada a vida do isolamento, uma vez perdido o equipamento não realizará sua tarefa básica (STOCCO, 2009).

Com isso as concessionárias de energia elétrica têm se preocupado cada vez mais com a otimização dos processos de manutenção e de diagnóstico de estado de seus equipamentos. As principais razões para essa preocupação, são os aspectos relacionados ao elevado custo de aquisição, ao reparo e a substituição destes equipamentos que podem chegar a milhões de dólares, e também a necessidade de manter uma elevada confiabilidade operativa dos serviços de fornecimento de energia, nos níveis exigidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (SOUZA, 2008).

Nos transformadores é utilizada uma grande quantidade de óleo mineral isolante derivado do petróleo, o qual pode trazer vários riscos para o aparelho e para o meio ambiente, que vai ser discutido ao decorrer do trabalho (SOUZA, 2008).

## **2.2 Óleo mineral isolante (OMI)**

Em 1892 a General Electric produziu a primeira aplicação reconhecida do óleo mineral isolante (OMI) em transformadores, com isso a indústria voltou sua atenção para determinar as propriedades necessárias para que o mesmo pudesse ser utilizado (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

O OMI tem sido utilizado desde então em equipamentos elétricos, como isolante e refrigerante (GOMES, 2010). A popularidade desse óleo se deve a sua disponibilidade e seu baixo custo, além de suas excelentes propriedades dielétricas. Atualmente é utilizado na maioria dos equipamentos elétricos. Este óleo é obtido a partir da destilação fraconada do petróleo (STOCCO, 2009).

O OMI é utilizado no transformador como refrigerante interno das partes energizadas por meio da transferência de calor, substituindo o ar existente entre estas partes, e proporcionando alta rigidez dielétrica e baixa condutividade entre si. Além desta função ele atua como isolante elétrico das partes internas (SILVA et al., 2012).

Tal óleo é constituído basicamente por hidrocarbonetos (moléculas compostas por Hidrogênio e Carbono) e ainda apresenta concentrações de outros compostos, tais como Enxofre, Nitrogênio, entre outros. Com isso, o vazamento ou derramamento do mesmo pode trazer impactos ambientais significativos, uma vez que ele contamina o solo e o sistema hídrico, sendo considerado um óleo tóxico. Além disso, ele pode trazer impactos econômicos para a concessionária (STOCCO, 2009).

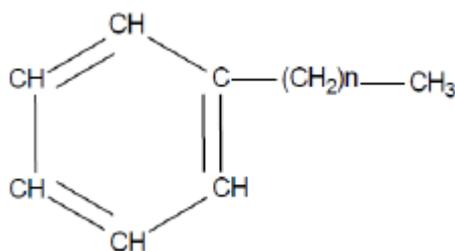
Transformadores antigos usavam o óleo ascarel, uma bifenila policlorada (PCB) com alto teor de cloro em sua fórmula. Sua utilização foi estimulada por suas características técnicas notáveis, tais como grande rigidez dielétrica, alta condutividade térmica, não-inflamabilidade, ótima estabilidade química e capacidade de resistir a altas temperaturas (650°C) (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

Contudo, o ascarel é altamente tóxico, produzindo efeitos carcinogênicos, lesões dermatológicas e alterações morfológicas. Estão presentes também características como bioacumulação e não biodegradabilidade. Em 1976, após os primeiros registros de contaminação ambiental, os países produtores de ascarel (França, China, Alemanha, entre outros) foram interrompendo sua produção e comercialização gradativamente (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

No momento presente, óleo mineral utilizado pode ser de base naftênica ou parafínico. O óleo de base naftênica é o mais utilizado, e algumas de suas características incluem uma boa condutividade térmica, alto ponto de fulgor, baixo custo de produção em larga escala, alta capacidade de regeneração, grande quantidade de testes físico-químicos, facilitando sua manutenção, entre outras (STOCCO, 2009).

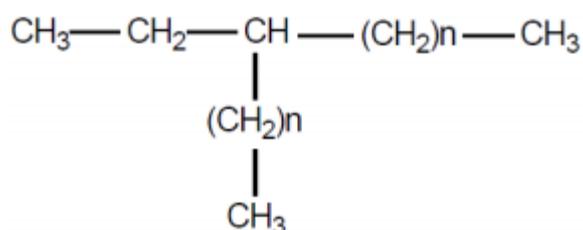
As moléculas médias do óleo possuem entre 19 a 23 átomos de carbono arranjados em estrutura naftênica. Naftenos ou cicloalcanos são hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo um ou mais anéis, os quais podem conter uma ou mais cadeias laterais. Os hidrocarbonetos presentes na composição do óleo mineral se apresentam na forma de anéis benzênicos combinados a anéis alifáticos, como mostra a Figura 4 (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

Figura 4- Estrutura base dos hidrocarbonetos aromáticos – cadeia naftênica (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014)



O óleo de base parafínica tem suas moléculas arranjadas em uma estrutura diferente dos de base naftênica, sua estrutura é parafínica. Parafinas ou alcanos são hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta linear ou ramificada, como mostra a Figura 5 (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

Figura 5- Cadeia parafínica ramificada (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014)



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

O óleo mineral tende a formar ácidos orgânicos de cadeia curta. Seus subprodutos da degradação são hidrocarbonetos nocivos ao meio ambiente (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

Independentemente se o óleo utilizado for de base parafínica ou naftênica, ambos são nocivos ao ambiente. Os compostos de hidrocarbonetos podem migrar com infiltração da água da chuva, da superfície para o lençol freático, sendo que um litro de óleo pode contaminar milhões de litros de água, tornando-a imprópria para o consumo, e o custo para tratar seus efeitos é bastante elevado (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

O potencial de contaminação de um fluido é medido pelo seu nível de biodegradabilidade, e a norma que determina estes valores é a Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD 301). Para o óleo mineral, seu nível de biodegradabilidade é da ordem de 10%, ou seja, ele é pouco biodegradável (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

Outro grande problema do óleo mineral é a inflamabilidade, devido ao fato de a temperatura de ignição do mesmo ser relativamente baixa. Em casos de falhas do equipamento, como curto circuito, o produto da combustão do óleo é perigoso e causa grande poluição do ar (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

Dentro de um transformador em operação, o OMI sofre processos de deterioração, onde há a ocorrência de mudanças em suas propriedades físico, químicas e elétricas, o que vai acarretar uma série de consequências, tais como, deterioração das propriedades isolantes do óleo, aceleração do processo de degradação da celulose do papel isolante (STOCCO, 2009).

Os principais fatores que contribuem para que aconteça a degradação e o envelhecimento do óleo são: Temperatura, Umidade e presença de Oxigênio. Com a redução das propriedades de isolamento do óleo, tem-se a formação de material sólido que se deposita sobre as partes internas imersas no óleo, ou seja, há a formação de borra, o que prejudica o equipamento (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

Durante a utilização do equipamento, o óleo mineral está sujeito a um processo de oxidação, o que resultará na formação de ácidos como produtos finais da degradação que podem ser medidos por meio do índice de neutralização ou índice de acidez. No caso do OMI, estes compostos formados, a partir de uma determinada concentração são indesejáveis, pois agredem materiais do equipamento, como o papel isolante Kraft. Isso acarreta a diminuição da vida útil do papel, e além deste problema, tais compostos podem polimerizar e formar borra. A borra ao se depositar na parte ativa ou nos trocadores de calor, dificultando a transferência de calor para o meio ambiente, diminuindo a eficiência do equipamento, ou ainda levando a falhas do mesmo (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

A umidade está sempre presente nos líquidos isolantes e a rigidez dielétrica do óleo começa a diminuir quando a saturação relativa de água no óleo atinge 50%. Para o OMI a saturação ocorre em um intervalo de 30 a 35 mg/kg de água, ou seja, em pequenas concentrações. A umidade no OMI atua como um agente catalisador na decomposição da celulose, diminuindo a vida útil do equipamento elétrico (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

Durante o uso, o fluido isolante está em constante contato com a parte metálica do equipamento, que está sujeito à corrosão, uma vez que na composição do óleo mineral tem concentrações de compostos de enxofre corrosivo, o que pode resultar na deterioração do metal. Segundo a literatura, os compostos orgânicos a base de enxofre

presentes no OMI são termicamente estáveis e inibidores naturais do processo de oxidação e, conseqüentemente, do seu envelhecimento térmico (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

Em decorrência da crescente preocupação com o meio ambiente e devido à escassez do petróleo, além das problemáticas relacionadas ao uso do mesmo, começou uma busca por alternativas para a substituição deste óleo nos transformadores (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

### **2.3 Óleo vegetal isolante (OVI)**

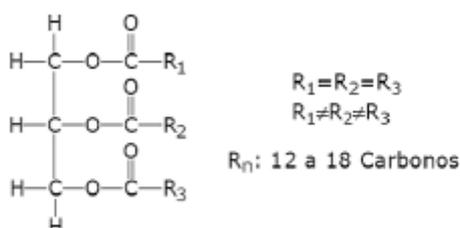
Impulsionado principalmente pela questão ambiental, foram desenvolvidos por volta de 1999 óleos vegetais isolantes (OVI) apropriados para o uso em equipamentos elétricos, para ser utilizado com a finalidade de dielétrico. O OVI é adaptado por meio de processos específicos e recebe aditivos antioxidantes além de depressores de ponto de fluidez, para que possa ser utilizado como fluido de refrigeração e isolante em transformador (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

O óleo vegetal isolante, quimicamente é formado por moléculas de acilgliceróis, que são originárias da condensação de ácidos graxos e glicerol (tri-álcool), formando ésteres de ácido graxo. Desta forma, estes compostos são classificados em mono, di ou trigliceróis, dependendo se uma, duas ou três moléculas de ácido graxo se associam em uma ligação covalente com o glicerol, para assim, formar ésteres de ácido graxo, como mostra a figura 6. É necessário enfatizar que os trigliceróis podem ser formados por ácidos graxos iguais ou diferentes entre si, dependendo da origem de sua matéria prima, e também podem ser saturados ou insaturados (STOCCO, 2009).

As unidades de acila (radical orgânico monovalente, obtido pela remoção de uma hidroxila de um ácido carboxílico) presentes no triglicerol podem conter de 4 a 30 átomos de carbono, dependendo do ácido graxo que lhe deu origem. No que diz respeito ao percentual de cada unidade de acila, existe uma composição típica para cada tipo de óleo. Os índices de neutralização típicos do OVI são mais altos que os do OMI. Os

OVIIs tendem a formar cadeias longas de ácidos graxos, o que é bem menos agressivo ao meio ambiente (STOCCO, 2009).

Figura 6- Estrutura química do triacilglicerol (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014)



Estes óleos são obtidos a partir de grãos ou sementes de plantas oleaginosas, através de processos apropriados de descortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente. As mais utilizadas são a soja, a semente de girassol a colza e o milho. Por ser obtido através de oleaginosas ele é considerado altamente biodegradável, sendo que ele se degrada totalmente em 28 dias no máximo (STOCCO, 2009). A Tabela 1 mostra a produção de produtos agrícolas cultivados no Brasil e passíveis de utilização na produção de óleo vegetal (NUNES, 2007).

Tabela 1- Produção de biocombustíveis no território brasileiro

Produto	Produção brasileira	Área cultivada atual (ha)	Produtividade brasileira (kg/ha)	% Óleo no grão ou amêndoa	Produtividade óleo (kg/ha)	Principais estados produtores
Algodão (caroço)	2.394	1.115.000	2.142	15	321	MT, BA, GO, SP, MS, MG, PR
Amendoim (em casca)	236	105.000	2.247			SP
Babaçu	118,7	extrativo	-	66%	-	MA
Cana-de-açúcar	415.205	5.633.000	73.670	-	7 m <sup>3</sup> de álcool	SP, AL, PR, PE, MG, MT.
Dendê	909	87.553	10.380	20	2.076	PA, BA.
Girassol	94	150.000	1.595	44	701	Centro-Oeste
Mamona	138.000	172.000	802	45	361	BA
Milho	41.787	12.864.000	3.248	-	-	PR, MG, SP, GO, MT
Soja	49.549	21.600.000	2.293	18	412,9	MT, PR, GO, RS, MS, MG, BA, SP, MA, TO, SC, PA
Outros*	11	extrativo	-	-	-	BA, MG, Amazônia.

Fonte: Nunes (2007)

Para se obter o óleo refinado, a partir do óleo bruto, este óleo passa pelos processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização. O Brasil é privilegiado em termos de biodiversidade de capacidade de gerar recursos renováveis em larga escala. É o país de maior biodiversidade, rico em oleaginosas, sendo a soja a primeira colocada na produção de oleaginosas no país, com isso, a mais utilizada (STOCCO, 2009).

Testes utilizando óleos vegetais como dielétricos foram feitos na mesma época de realização dos primeiros testes como óleo mineral, porém se mostraram menos atrativos devido a sua estabilidade à oxidação, ponto de fluidez, permissividade e viscosidade distintas (McShane, 2002). O primeiro produto comercial de OVI lançado no mercado foi o BIOTEMP, cuja patente foi requerida nos Estados Unidos da América em setembro de 1999 pela empresa Asea Brown Boveri (ABB) (STOCCO, 2009).

Por serem provenientes de uma fonte renovável, estes óleos apresentam alta biodegradabilidade (89% para os ésteres sintéticos e 97% para os ésteres naturais) o que é bem elevado quando comparado ao óleo mineral. Em caso de vazamento o produto se degradaria dentro de poucos dias, o que diminuiria o custo da concessionária com relação aos reparos dos danos (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

Devido a sua composição química, os óleos vegetais tem maior afinidade com a água quando comparados ao óleo mineral. Esta propriedade contribui para a migração da água na isolação sólida para o líquido, implicando na diminuição da umidade na isolação sólida, e o aumento da vida útil da mesma como consequência (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014). Com relação ao óleo mineral, a rigidez dielétrica começa a diminuir quando a saturação relativa de água no óleo atinge aproximadamente 50%. Para o óleo vegetal, 50% da saturação a temperatura ambiente corresponde ao intervalo de 500 a 600 mg/kg de água, ou seja, a quantidade de água exigida para saturar o OVI a temperatura ambiente é 20 vezes a do OMI (IEEE, 2008).

Os resultados de estudos de envelhecimento mostraram que o papel isolante tem sua vida estendida na presença de óleos vegetais, segundo Rapp e colaboradores (2002) a água no óleo vegetal consumida no processo de hidrólise do triacilglicerol (molécula do OVI) gerando ácidos graxos livres de cadeia longa (Rapp et al, 2001; Rapp et al, 2002 e Rapp et al, 2005). Este mecanismo de hidrólise favorece o deslocamento de mais moléculas de água do papel para o fluido isolante para manter o equilíbrio químico, ou seja, indiretamente este deslocamento promove a secagem do papel Kraft isolante, o que resulta na extensão da sua vida útil (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

Além disso, ele é conceituado como um fluido de segurança, uma vez que só é considerado inflamável em temperaturas acima de 340° C, o que implica em uma menor incidência de incêndios, bem como a fumaça proveniente de sua combustão ser menos densa, e menos nociva quando comparada a do óleo mineral. São compostos isentos de compostos sulfúricos, não sendo suscetíveis a falhas devido ao enxofre corrosivo, nem deterioração quando em contato com o cobre (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

Outro parâmetro que confere vantagem ao óleo vegetal em comparação ao mineral é a permissividade elétrica. A concepção do sistema de isolação de enrolamentos de um transformador faz com que a distribuição das solicitações seja inversamente proporcional a permissividade elétrica do material que a criou. Como o sistema de isolação dos enrolamentos é composto por papel e óleo, o maior valor da permissividade elétrica dos ésteres diminui a solicitação elétrica nos enrolamentos (FRIEDENBERG; SANTANA, 2014).

O óleo vegetal isolante possui viscosidade pouco superior com relação ao óleo mineral isolante, isto reduz um pouco o poder de refrigeração do OVI, visto que a troca de calor com o ambiente se torna mais lenta, contudo, isto não reduz a eficiência do uso

do óleo vegetal, sendo que ele é apenas 3° C superior (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

Vale salientar que estes óleos são considerados renováveis porque, ao contrário do óleo mineral (que é um combustível fóssil) o gás carbônico liberado em sua combustão e/ou degradação por agentes biológicos é reciclada por absorção durante o próprio crescimento das oleaginosas (fotossíntese). Com tal característica, a produção do OVI está inserida em um processo cíclico, pois há um equilíbrio entre a massa de carbono fixada e aquela liberada ou dispersa na atmosfera (UHREN, 2007).

No final da vida útil, o óleo poderá ser reutilizado para a produção de biocombustíveis. O uso do OVI já é uma realidade no setor elétrico nacional, à medida que houver a expansão do uso destes óleos isolantes de origem vegetal, o setor elétrico passará a contribuir para a sustentabilidade do país (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

No Brasil, algumas concessionárias estão utilizando o óleo de origem vegetal nos transformadores, uma delas é a Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) e as Centrais Elétricas do Norte (Eletronorte) (WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

### **3 Tecnologias de óleo vegetal em transformadores**

Como citado, o setor elétrico vem buscando novas alternativas para a substituição do tradicionalmente utilizado óleo mineral em transformadores como fluido isolante, por fluidos biodegradáveis e renováveis. Há vários estudos com este mesmo conceito. Esta seção do trabalho reúne vários trabalhos sobre o assunto e tem como objetivo apresentar uma síntese dos mesmos.

Para avaliar os parâmetros obtidos com os testes feitos pelos pesquisadores, uma norma foi utilizada como base, a ABNT NBR 15422. Esta Norma especifica o óleo vegetal novo, antes do contato com o equipamento, à base de éster natural, para uso como dielétrico e refrigerante, para uso como dielétrico e refrigerante em equipamentos elétricos novos, ou usados (ABNT NBR 15422).

A Tabela 2 mostra estes parâmetros estabelecidos pela Norma para que o óleo possa ser utilizado em equipamentos elétricos.

Tabela 2 – Óleo vegetal isolante novo

Característica	Unidade	Valor especificado
Aspecto Visual	-	O óleo deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão
Cor	-	1,0 máximo
Densidade relativa a 20/4°C	-	0,96 máximo
Viscosidade Cinemática		
20°C	cSt	150 máximo
40°C		50 máximo
100°C		15 máximo
Ponto de Fulgor	°C	275 mínimo
Ponto de Combustão	°C	300 mínimo
Ponto de Fluidez	°C	-10 mínimo
Rigidez Dielétrica	kV	30 a 42 mínimo
Fator de Perdas Elétricas		
25°C	%	0,20 máximo
90°C	%	3,6 máximo
100°C	%	4,0 máximo
Índice de Neutralização	mg KOH/g	0,08 máximo
Teor de água	mg/kg	200 máximo
Teor de PCB (bifenilapoliclorada)	mg/kg	<2,0

Fonte(ABNT,2015)

Stocco (2009) fez uma análise de 4 tipos diferentes de óleos vegetais. O OMI utilizado em sua pesquisa foi o OMI obtido comercialmente e os óleos vegetais utilizados foram denominados OV-1, OV-2, OV-3 e OV-4. Foram utilizados para o teste de desempenho destes óleos, 6 transformadores ( o óleo OV-4 não foi utilizado pois suas características físico-químicas não atendiam aos padrões exigidos pela norma ABNT NBR 15422 – óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos). Tais transformadores que foram enchidos com estes óleos vegetais continuam em operação com acompanhamento técnico periódico para que o resultado possa ser comprovado e divulgados. Os resultados dos ensaios realizados nos óleos vegetais foram comparados aos do OMI. O OMI foi caracterizado conforme a resolução ANP n°36 de 05.12.2008. Os OVI foram caracterizados de acordo com ensaios descritos na ABNT NBR 15422. Em comparação com o OMI, os óleos vegetais analisados apresentam ponto de fulgor maior, o que lhe confere a característica de fluido de segurança. Contudo, apresentou

viscosidade maior que o OMI, o que pode comprometer a refrigeração do transformador. Apresentou também maior teor de umidade em função de sua maior polaridade, que pode ser corrigido por um processo de secagem. Concluiu-se que o OV-3 e OV-2 ( óleo de girassol e óleo de arroz) não são indicados para o uso como fluido isolante para equipamentos elétricos porque suas características não atenderam as exigências elétricas solicitadas. Dessa forma, somente o OV-1 (óleo de soja) foi aprovado.

Soares (2015) desbanca a ideia de que o óleo vegetal a ser utilizado em transformadores compete com a indústria alimentícia, uma vez que os óleos mais utilizados são de girassol e soja. A partir deste pressuposto, sua pesquisa se torna relevante considerando que o óleo utilizado é do Tungue, o qual não compete com a alimentação humana. Com o intuito de buscar uma oleaginosa alternativa para a produção do óleo vegetal isolante para ser utilizado em transformadores, e que não competisse com a indústria alimentícia e que ainda possuísse uma boa produtividade, estudou-se o óleo de tungue. Uma das vantagens desta planta em relação a outras oleaginosas está na produtividade e também no rendimento da mesma, devido ao seu poder calorífico. Contudo, o óleo de tungue apresentou acidez elevada, após ensaios físico-químicos, para solucionar o problema foi necessário realizar o tratamento de adsorção por adição de Terra Fuller. Realizaram-se testes para o óleo bruto e o óleo tratado. No caso do óleo bruto, observou-se que o fator de potencia e o índice de neutralização possuíam valores elevados para a aplicação em equipamentos elétricos. Já no caso do óleo tratado, estes resultados foram melhorados através da adsorção. Foram feitos ensaios também com o óleo refinado, neste cenário, o índice de neutralização e o fator de potencia reduziram de forma significativa. Em suma, o óleo de tungue se mostrou um excelente fluido dielétrico para a substituição do óleo mineral pelo vegetal.

Preis (2013) delimitou sua área de pesquisa ao estado de Santa Catarina e contou com a ajuda da CELESC Distribuidora para a liberação de dados e informações. O trabalho tinha como objetivo a obtenção da quantidade de transformadores de transmissão no estado e o volume de cada tipo de óleo presente no estado, para que assim, com estes dados tivesse uma maior compreensão dos critérios utilizados pela distribuidora na escolha dos óleos isolantes. Após o tratamento de dados observou que 97% dos transformadores do estado utilizam o OMI. O critério utilizado para a escolha do OMI é a disponibilidade no mercado, o que afeta diretamente o preço do produto.

Em contrapartida, a escolha entre o OMI ou OVI é destacada pelas dúvidas ainda existentes em relação ao OVI, o que torna a sua escolha mais difícil. Observou-se também em seu estudo, que a principal vantagem de uma empresa ao escolher o OVI está no marketing ambiental gerado. Por fim, mostrou que a gestão de óleos isolantes ainda é um assunto delicado para o setor elétrico e evidenciou os problemas ambientais envolvidos no caso de vazamentos.

Silva et al. (2011) apresentou os resultados do estudo de características físico-químicas e dielétricas dos óleos de algodão, babaçu, girassol, milho e soja da classe comestível. As propriedades avaliadas foram a densidade, viscosidade cinemática, índice de acidez, corrosividade, teor de água, rigidez dielétrica e fator de perdas. Estas propriedades foram estudadas com cautela uma vez que, são elas que garantem a eficiência do sistema de isolamento e refrigeração dos transformadores. Após realizar testes e comparar resultados destes 5 tipos de óleo, notou-se que os óleos vegetais comestíveis apresentam acidez superior do limite estabelecido pela NBR 15422. Para adequá-los a norma, foram realizadas neutralizações. Os óleos de algodão, girassol, milho e soja apresentaram maior viscosidade em relação ao OMI, mas não superior ao limite estabelecido pela norma, ou seja, são adequados para o uso como fluidos isolantes. Já o óleo de babaçu é mais pastoso e opaco devido a elevada quantidade de triglicerídeos saturados em sua composição. Os cinco tipos de óleo não neutralizados apresentam rigidez dielétrica inferior àquela especificada na NBR 15422, para isso é necessário um processo de neutralização para que diminua as perdas dielétricas e aumente a rigidez dielétrica. Dos 5, o óleo de milho seria o melhor candidato, com maior rigidez dielétrica.

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

em óleo vegetal resiste a incrementos superiores de temperatura quando comparado ao óleo mineral, o que resulta em uma diminuição de falhas e uma otimização do equipamento.

Fernández et al. (2012) focou seu trabalho em analisar as principais propriedades de alguns fluidos favoráveis a substituição do óleo mineral. Foram apresentados 6 tipos de fluidos de isolação. O primeiro e mais conhecido é o óleo mineral que é de origem fóssil e possui excelentes propriedades dielétricas. Outro fluido citado foi o hidrocarboneto de alto peso molecular, é um refrigerante considerado o menos inflamável se tiver ponto de fulgor acima de 300°. Tem desempenho semelhante ao óleo mineral, exceto pela alta viscosidade e elevada resistência a altas temperaturas. O fato de possuir uma alta viscosidade faz dele um fluido pouco atrativo, uma vez que essa viscosidade dificulta a transferência de calor. O terceiro fluido seria o silicone, que é um nome genérico para líquidos de isolamento inertes com estabilidade térmica. Este grupo define o peso molecular do fluido chamando silicone, o que vai determinar a sua viscosidade. O próximo fluido é a base de éster, que são compostos sintéticos de ácidos orgânicos e álcoois. Podem ser classificados em éster sintético e éster natural. O éster sintético tem propriedades favoráveis e é muito biodegradável, já o éster natural possui baixa viscosidade, a qual é um requisito importante, mas é muito instável á oxidação. As propriedades analisadas para ver qual seria o melhor fluido, foram: ponto de fulgor, biodegradabilidade, viscosidade, queda de tensão, umidade, ponto de fluidez, estabilidade de oxidação e miscibilidade (importante em caso de reenchimento do equipamento). Os melhores candidatos à substituição, considerando os parâmetros citados acima são o silicone e os fluidos a base de éster.

Feil et al. (2016) realizaram um estudo para aumentar a eficiência de um transformador de distribuição, baseado em núcleo amorfo e óleo isolante do tipo vegetal. Obteve-se uma redução significativa na perda de carga e garantiu a operação em temperaturas maiores. Na metodologia apresentada, foram variados parâmetros como indução, número de voltas, densidade, e proporção das bobinas. de forma que fosse possível encontrar o melhor modelo de transformador. É importante dizer que o trabalho foi realizado para transformadores de baixa potência. A primeira análise foi feita com o núcleo amorfo, uma vez que a eficiência do transformador está diretamente relacionada com o tipo de material usado no núcleo para a produção do magnetismo. Uma das vantagens do transformador que utiliza núcleo amorfo é a baixa corrente de

magnetização. Tais equipamentos podem apresentar uma redução de até 70% no núcleo. Outra opção analisada foi a utilização do óleo vegetal em substituição ao óleo mineral. Um grave problema dos fluidos de isolamento é a umidade, a qual varia de acordo sua estrutura química. Essa umidade funciona como um catalisador para a decomposição da celulose, diminuindo assim o tempo de vida do equipamento. Este problema pode ser contornado com o uso de óleo vegetal, que devido a sua estrutura química possui uma maior afinidade com a água quando comparado ao óleo mineral, e promove uma secagem do papel celulose como consequência. Foi verificado por fim a viabilidade economia de um transformador com estas qualidades, e o transformador que possui núcleo amorfo e utiliza óleo vegetal como fluido isolante, possui preço similar ao transformador tradicional, com um payback de 5,7 anos.

Melo et al. (2011) fizeram uma análise do óleo de babaçu. Foi utilizado um transformador de 75 KVA e preenchido com este óleo vegetal aditivado em atmosfera inerte. Após concluir a montagem o autor e seu grupo realizaram testes para ver se este óleo estava dentro das especificações exigidas para ser utilizado na linha de abastecimento elétrico da rede do Piauí. O óleo provou atender todas as exigências da NBR 15422 e também se apresentou dentro dos limites de rigidez dielétrica necessária. Este transformador foi testado, aprovado e está em operação na rede elétrica urbana da cidade de Teresina. Vale salientar que este equipamento é analisado periodicamente para fim de determinar sua vida útil e perda no isolamento.

Navarro et al. (2011) verificaram que o transformador projetado para óleo isolante mineral tem uma redução de potência quando usado com óleo isolante vegetal, considerando os mesmos limites de elevação de temperatura. Seu trabalho foi efetuado em um transformador de 20/26,6 MVA 138/13,8 kV, com 10 anos de uso, que foi retirado de operação. Este mesmo equipamento foi submetido ao processo de substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal isolante e foi instalado um sistema de monitoramento, devolvido ao campo e colocado novamente em operação. Alguns testes foram feitos para verificar as principais características do óleo a considerar para que este funcione de forma eficaz em um transformador que foi projetado para o uso de óleo mineral isolante. Foram feitos testes iniciais operativos do transformador na fábrica com óleo isolante mineral, testes prévios ao enchimento com óleo vegetal isolante para verificar a compatibilidade química do óleo isolante vegetal e a pintura interna do tanque de radiadores, substituição de componentes de borracha por outros de material

compatível com óleo vegetal, como vedações, instalação de sensores e sistema de monitoramento para a avaliação dos gases dissolvidos no óleo. Após o enchimento com o óleo vegetal foram feitos testes posteriores, monitoramento e análise do desempenho.

Biçen et al. (2012) fez uma avaliação do modelo de envelhecimento nos padrões exigidos pelo IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) e IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) usando o modelo térmico de um transformador que utiliza óleo mineral em comparação com aquele que usa o óleo vegetal. O modelo térmico do equipamento baseia-se na analogia termo-elétrica, que são calculadas separadamente para o óleo de éster natural e do óleo mineral. O valor de temperatura de ponto quente de cada óleo é utilizado para calcular os parâmetros de envelhecimento. No estudo feito, ambos os óleos foram mantidos a temperaturas de 100°C e 140°C em diferentes períodos. Os resultados mostraram que o envelhecimento do éster natural é maior que a do óleo mineral, exceto a queda de tensão. Além disso, foi possível observar que o éster natural é capaz de absorver mais água. Isso significa que a deformação do papel de isolamento é mais lenta. Como os estudos anteriores, este também mostrou que o transformador imerso em éster natural é muito mais vantajoso nas condições nominais de operação.

Oliveira (2013) concentrou seu estudo na substituição do óleo mineral pelo vegetal em um transformador da Cooperativa Energética Cocal (SC). O óleo vegetal utilizado foi o BIVOLT®B adquirido de uma empresa chamada Mineraltec e o transformador, novo, foram adquiridos pela cooperativa da fabricante Romagnole Transformadores. Foram feitos ensaios elétricos de resistência nos enrolamentos, perdas a vazio, perdas em carga, resistência de enrolamento, tensão induzida e aplicada. Foram feitos estes testes para o transformador cheio de óleo mineral e óleo vegetal. A autora observou que o óleo vegetal mistura-se em todas as proporções com o óleo mineral isolante e que o óleo deverá ser completamente drenado, pois se a contaminação do óleo vegetal com o óleo mineral foi superior a 7%, o ponto de combustão do óleo vegetal diminui drasticamente. Por este motivo, antes de preencher o transformador com óleo vegetal, foi feita a lavagem do equipamento duas vezes. A adição do óleo vegetal ao transformador foi feita sob atmosfera de gás inerte. Após estes procedimentos, o equipamento foi lacrado e enviado a um laboratório para realizar os ensaios citados. Os testes de resistência nos enrolamentos, perdas a vazio e perdas em carga, são referentes ao equipamento, indiferente do fluido utilizado. Os ensaios de resistência nos

enrolamentos, que leva em consideração o tipo de fluido utilizado foram realizados para ambos os fluidos e o óleo vegetal apresentou resultados notáveis. A resistência de isolamento para o OMI é de 5 MΩ Já para o óleo vegetal este valor foi de 25 MΩ para baixa tensão, o que garante características de desempenho superior, podendo operar em sua potencia nominal com segurança. O equipamento esta em operação e o acompanhamento operacional tem que ser feito regularmente, preferivelmente em dias secos para evitar que o fluido entre em contato com a umidade.

#### **4 DISCUSSÃO**

Conforme foi mostrado em vários estudos sobre o estado da arte do assunto, e também ressaltado neste trabalho, em resumo, o óleo vegetal é um forte candidato a substituição do óleo mineral em transformadores.

O óleo mineral é o mais amplamente utilizado devido a sua disponibilidade, baixo custo e excelentes propriedades dielétricas e refrigerantes. Todavia, este óleo é de origem fóssil, baixa biodegradabilidade e considerado tóxico, nocivo ao meio ambiente, em caso de vazamento. Além disso, ele é considerado um fluido que não é muito seguro, devido ao seu ponto de fulgor ser relativamente baixo quando comparado ao do óleo vegetal. Com o tempo, o óleo passa por um processo de envelhecimento, resultado da elevação da temperatura, ação do oxigênio e do contato com os materiais metálicos do equipamento, promovendo assim a degradação das propriedades isolantes do óleo.

Devido a estes fatores, é de suma importância estudos para a substituição deste óleo por um menos agressivo ao meio ambiente e que aumente o desempenho do transformador, no caso o óleo vegetal. Muitas das características deste óleo foram apresentadas nos trabalhos utilizados como base deste. Algumas propriedades serão destacadas assim para mostrar como vale a pena a substituição.

A primeira propriedade a ser destacada, é que este óleo é proveniente de oleaginosas, o que faz dele uma fonte limpa e renovável. Vale ressaltar que o óleo precisa de aditivos para ser utilizado com a mesma finalidade do óleo mineral. Além disso, este óleo apresenta alta biodegradabilidade, podendo chegar a 95%. O gás

carbônico liberado na sua combustão ou degradação é reciclado por absorção durante o próprio crescimento das oleaginosas, no processo de fotossíntese.

Este fluido apresenta ponto de fulgor acima de 300°C, maior que o OMI, o que remete ele a característica de fluido de segurança. A melhor oleaginosa a ser utilizada para a confecção deste óleo, é a semente de soja, contudo, esta estaria competindo com a indústria alimentícia. Soares (2015) mostrou outro candidato, o óleo de tungue que não compete com esta indústria, e possui propriedades tão boas quanto a do óleo de soja.

O OVI devido a sua estrutura química tem afinidade maior com água, quando comparado ao OMI. Esta propriedade provoca a migração da água presente na isolação sólida (papel Kraft) para o líquido, implicando na diminuição da umidade no papel, o que resulta em um aumento da vida útil do equipamento, uma vez que a parte de refrigeração do equipamento é uma parte de extrema importância. Se este sistema de resfriamento sofrer alteração, pode comprometer o funcionamento do equipamento.

Outras vantagens deste fluido que podem ser destacada são a alta estabilidade a altas temperaturas, estabilidade na oxidação, compatibilidade com outros materiais, melhor tolerância a umidade, maior vida operacional dos transformadores, absorção e evolução dos gases e excelentes características térmicas. É facilmente descartado, e é reciclável.

Uma desvantagem deste óleo, que foi apresentada nos estudos, é a maior viscosidade deste fluido em comparação ao OMI. Esta propriedade faz com que as camadas do líquido prendam-se a superfície do aquecedor, sendo que seu sobreaquecimento pode decompor as ligações moleculares. A maior viscosidade faz também com que o fluido não circule com a velocidade apropriada através dos canais de refrigeração dos enrolamentos. Este fato chama atenção para que os transformadores fabricados para óleo vegetal façam estes canais mais largos para resolver esta contrariedade.

A Tabela 3 mostra uma comparação dos dois fluidos e suas propriedades.

Tabela 3- Propriedades dos fluidos

	Vegetable oil	High temp. mineral oil	Silicone 561 fluid
<b>Physical</b>			
Appearance	Light Yellow	Light Yellow	Colorless
Specific Gravity at 25°C	0,91-0,92	0,89	0,96
<b>Kinematic viscosity</b>			
0°C	170-250	2200	95
25°C	55-75	300	50
40°C	33-45	125	38
100°C	8-10	13	16
Pour point, °C	-15 to -25	-20 max.	-50 max.
Interfacial tension, dynes/cm	25	40-45	25
Flash point °C	310-325	275 min.	300 min.
Fire point °C	354-360	160-180	340
Moisture content, ppm dry oil (water solubility at 25 °C)	50-100 1200	10-25 60	50 200
<b>Thermal constantes</b>			
Heat capacity, cal/g °C	0,50-0,57	0,488	0,363
Thermal conductivity, W/mK	0,17	0,13	0,15
Coefficient of expansion/°C	0,0007	0,00073	0,00104
Chemical type	Éster	Hydrocarbon	Organo-silicon
<b>Electrical</b>			
Dielectric constant at 25°C	3,1	2,2	2,71
Biodegradability	97-99		30 Very low

Fonte- SOARES (2013)

Este óleo já é uma realidade e vem sendo usado em transformadores da rede de distribuição. O primeiro deles foi o OVI desenvolvido pela ABB, o BIOTEMP, que está sendo usado atualmente em transformadores de força e de distribuição, não só nos Brasil, mas também nos Estados Unidos (BIOTEMP, 2013). A base deste fluido é a semente de girassol. Este óleo possui rigidez dielétrica superior a do OMI. O quadro 1, mostra as propriedades deste fluido.

Quadro 1- Propriedades do fluido BIOTEMP

Propriedade		Método de Ensaio	BIOTEMP®
Aspecto visual		ASTM D1524	Transparente; Brilhante
Cor		ASTM D1500	<,5
Viscosidade cinemática (cSt)	40°C	ASTM D445	45
	100°C		10
Ponto de fulgor (°C)		ASTM D92	330
Ponto de combustão (°C)		ASTM D92	360
Rigidez dielétrica (kV)		ASTM D877	45
Fator de perdas dielétricas	25°C	ASTM D924	0,15
	100°C		2
Índice de neutralização (mg de KOH/g)		ASTM D974	0,075
Teor de água (ppm)		ASTM D1533	150

Fonte- BIOTEMP (2013)

Em 2006 a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), colocou o primeiro transformador do mundo que funciona totalmente com óleo vegetal, desenvolvido em parceria com o fabricante de equipamentos ABB.

O fluido ENVIROTEMP, comercializado pela Cooper Power Systems, fabricado pela Cargill, é a base do óleo de soja. Suas propriedades são explicitas no quadro 2.

Quadro 2- Propriedades do óleo de soja

Propriedade		Método de Ensaio	Envirotemp® FR3™
Aspecto visual		ASTM D1524	Transparente; Verde claro
Cor		ASTM D1500	0,5
Viscosidade cinemática (cSt)	40°C	ASTM D445	34
	100°C		8
Ponto de fulgor (°C)		ASTM D92	330
Ponto de combustão (°C)		ASTM D92	360
Rigidez dielétrica (kV) a 25°C		ASTM D877	56
Fator de perdas dielétricas	25°C	ASTM D924	0,08
	100°C		3
Índice de neutralização (mg de KOH/g)		ASTM D974	0,04
Teor de água (ppm)		ASTM D1533	30

Fonte- Cooper Power Systems (2013)

A ELETRONORTE e a filial brasileira da estatal francesa AREVA desenvolveram em conjunto, o primeiro reator a base de óleo vegetal no mundo.

Outro fluido utilizado é o óleo BIOVOLT, que é formulado a partir de misturas de diferentes oleaginosas especialmente tratadas e aditivadas. A empresa que produz e comercializa este óleo é a Mineraltec, e este fluido possui três classificações de acordo com a oleaginosa que foi utilizada para sua fabricação. Pode ser a base de óleo de milho, óleo de girassol e óleo de soja (BIOTEMP, 2013).

Outro produto no mercado é o AGBIOELETRIC®, o qual é patenteado pelo Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz (FAG), e que já está sendo usado por algumas indústrias de transformadores. Após cinco anos de análises, a região do lago municipal de Cascavel, a FAG e o hospital São Lucas receberam transformadores fabricados com o produto.

Oliveira (2013) fez uma análise financeira do óleo vegetal em comparação com o óleo mineral, e observou que óleo vegetal teve seu preço reduzido ao longo dos anos, e ressaltou que o preço do óleo pode variar de acordo com o mercado e a quantidade requerida. Custos de ambos os fluidos foram coletados para seu estudo em um cenário daquele ano de 2013 como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Custos

<b>Tipo de óleo</b>	<b>Custo (R\$/L)</b>
Óleo Vegetal A (novo)	22,75
Óleo Vegetal B (novo)	6,00
Óleo Mineral A (novo)	5,00
Óleo Mineral B (regenerado)	3,00

Fonte- Soares (2013)

O elevado valor do óleo A é devido a sua categoria internacional. Entretanto, o custo do óleo pode ser reduzido dependendo da quantia a ser fornecida.

Os custos relacionados a compra de transformadores que utilizam OMI e OVI, são relativamente parecidos. A diferença de preço varia de acordo com a potência do transformador, sendo que o de potência superior, possui valor mais elevado. No quadro 4 é possível observar a diferença de preços.

Quadro 4 – Custos de Transformadores

	<b>Potência Tensão Primária Tensão Secundária</b>	<b>Óleo Mineral</b>	<b>Óleo Vegetal</b>
<b>Fornecedor A</b>	30 kVA 15 kV 380 V	R\$ 4.685,00	R\$ 5.247,20
	45 kVA 15 kV 380 V	R\$ 5.324,00	R\$ 6.078,00
	75 kVA 15 kV 380 V	R\$ 6.750,00	R\$ 7.840,00
	112,5 kVA 15 kV 380 V	R\$ 8.400,00	R\$ 9.408,00
<b>Fornecedor B</b>	30 kVA 15 kV 380 V	R\$ 4.098,53	R\$ 4.918,24
	45 kVA 15 kV 380 V	R\$ 5.299,38	R\$ 6.359,25
	75 kVA 15 kV 380 V	R\$ 6.322,26	R\$ 7.586,71
	112,5 kVA 15 kV 380 V	R\$ 8.661,94	R\$ 10.394,33

Fonte – Soares (2013)

Apesar do elevado custo deste óleo, outro fator faz com que a utilização deste seja criticada, a competitividade que o mesmo tem com a indústria alimentícia. Mais de um terço da população mundial ainda passa fome, e uma questão que vem a tona é, utilizar terras para cultivar oleaginosas que serão destinadas para a produção do óleo vegetal, sendo que estas mesmas terras poderiam ser utilizadas para o cultivo de culturas comestíveis.

Além deste fator, o óleo vegetal mais indicado para a produção do óleo vegetal isolante é a soja, ou o milho. Ambos são oleaginosas comestíveis, o que faz com que a competitividade com a alimentação seja ainda maior.

Esta problemática poderia ter solução. Uma alternativa seria a reutilização de óleos vegetais, ao invés de utilizar novos. Isto faria com que acabasse com o problema citado além de ajudar a combater o descarte irregular de óleos como o de cozinha.

Contudo não seria algo fácil de ser realizado, seria necessário mais pesquisas e investimentos na área, mas é uma ideia a ser discutida e colocada em prática. O OMI também era uma novidade quando foi apresentado no mercado, se não fossem as pesquisas e testes feitos neste óleo, ele não teria obtido sucesso.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo efetuar um levantamento bibliográfico das propriedades do óleo vegetal isolante para ser usado em transformadores, com as funções dos fluidos isolantes e refrigerantes, além de incentivar mais estudos nesta área.

Por meio do levantamento bibliográfico foram mostrados os problemas e as características do uso do óleo mineral como fluido isolante e refrigerante em equipamentos elétricos, no caso, transformadores. Foi discutida também a problemática ambiental envolvida em seu uso. A gestão de óleos minerais isolantes ainda é um assunto delicado.

O óleo mineral isolante vindo de uma fonte não renovável e sendo nocivo ao meio ambiente deve ser substituído. O óleo vegetal mesmo sendo mais viscoso e mais denso que o mineral apresenta várias qualidades em relação ao óleo mineral, como a sua alta biodegradabilidade, o fato de ser proveniente de uma fonte renovável, suas propriedades dielétricas serem tão boas quanto a do óleo mineral. Além de todas estas características favoráveis, ele ainda é considerado mais seguro, sendo que seu ponto de combustão é superior ao do óleo mineral.

O óleo vegetal se mostrou um candidato atrativo para substituir aquele utilizado tradicionalmente, devido às suas favoráveis características técnicas e ambientais, contudo, ele ainda não é uma unanimidade no setor elétrico devido a algumas desvantagens, como seu alto custo. O custo do óleo vegetal é o considerado o maior entrave para sua entrada no mercado.

Outra desvantagem é a falta de resultados do óleo. Foram realizados testes em laboratórios apenas, mas ainda não tem-se resultados concretos quanto suas propriedades após os processos de envelhecimento e desgaste resultantes da operação do equipamento.

A viscosidade superior não é uma desvantagem significativa para ser considerada um problema. Mas o elevado custo em conjunto com a falta de resultados concretos sobre o óleo após seu uso fazem com que este óleo não seja amplamente utilizado.

Contudo, ele apresenta um bom custo-benefício uma vez que ele possui uma durabilidade superior a do óleo mineral. A falta de resultados se deve a falta de conhecimento, este é um problema que só pode ser resolvido com mais pesquisas na área e com o aumento da inserção deste produto no mercado.

Foi possível observar que a substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal já é uma realidade e traz inúmeros benefícios não só ao meio ambiente, mas também ao próprio equipamento, já que seu desempenho pode ser melhor e sua vida útil pode ser aumentada com a utilização deste novo óleo, considerado o “óleo do futuro”. Distribuidoras como Light, CPFL, Cemig e ELETRONORTE já estão utilizando óleos vegetais como fluidos isolantes.

A preocupação das concessionárias devido ao uso do óleo mineral é muito grande, elas buscam minimizar seus riscos ambientais e diminuir seus custos. Estes requisitos podem ser atendidos pelo óleo vegetal, ele não apresenta grande risco ao meio ambiente e seu custo benefício é alto.

A perspectiva da utilização deste óleo é positiva, as concessionárias citadas colocaram alguns transformadores em teste com o OVI pois visam trocar toda a sua rede. Os representantes destas empresas se dizem insatisfeitos com o óleo utilizado atualmente.

A viabilidade desta alteração não é meramente técnica, mas também econômica. Os principais fatores que levaram estas distribuidoras a adotar o óleo vegetal isolante, foram a preocupação com a preservação ambiental em sua área de concessão, redução dos riscos de incêndio, redução de custos de manutenção e novas obras, uma vez que o óleo mineral não agride exclusivamente o meio ambiente, mas também o próprio equipamento que o utiliza, por meio da corrosão.

## REFERÊNCIAS

CHAPMAN, S. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. New York: Bookman, 2013. p. 67

SOARES, V. **Requisitos e restrições do uso do óleo vegetal de Tungue como líquido isolante para transformadores elétricos de distribuição de média tensão**. 2015. 93 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná. 2015.

WILHELM, H; TULIO, L; UHREN, W. **Produção e uso de óleo vegetal isolante no setor elétrico**. 2009. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia. 2009.

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

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

NUNES, S. **Produção e consumo de óleos vegetais no Brasil**. Departamento de Estudos Sócio-econômicos Rurais, 2007.

RIES, Walter. **Transformadores: Fundamentos para projeto e cálculo**. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

FERNÁNDEZ, Inmaculada et al. **Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers**. Espanha: Electric Power System Research, 2012.

FEIL, D; SILVA, P; BERNADON, D. **Development of an efficient distribution transformer using amorphous core and vegetable insulating oil**. Santa Maria: Electric Power System Research, 2016.

MELO, Suely Moura; LEAL, Joelson de Sousa; FIGUEIREDO, Francisco Cardoso. **Estudo da aplicação de óleo vegetal como óleo isolante em transformador elétrico.** Universidade Federal do Piauí, Pauí, 2011.

NAVARRO, Martin A.; MARTINATO, Marilucia; P.L., Bernardo. **Desenvolvimento de Tecnologia para Substituição de Óleo Isolante Mineral por Óleo Isolante Vegetal em Transformadores de Potencia Usados.** Jundiaí, 2011.

OLIVEIRA, Beatriz Teixeira de. **Estudo da viabilidade de substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal em transformadores de redes aéreas de distribuição de energia elétrica. Estudo de caso: Cooperativa Energética Cocal.** 2013. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013.

SOARES, Valdeir Ribeiro. **Requisitos e restrições do uso do óleo vegetal de tungue como líquido isolante para transformadores elétricos de distribuição de média tensão.** 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015

BIÇEN, Yunus. **Aging of Paper Insulation in Natural Ester & Mineral Oil.** 2012. Curso de Electrical And Electronic Engineering, Industrial Electronics Dept. Duzce Univ., Turquia, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15422: Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos.** 2015.

BIOTEMP, Abb. **BIOTEMP® Transformer Oil,** 2005.

CARGILL. **Envirotemp™ Fluidos Dielétricos.** Disponível em: <[https://www.cargill.com.br/pt\\_BR/envirotemp-fluidos-dielétricos](https://www.cargill.com.br/pt_BR/envirotemp-fluidos-dielétricos)>. Acesso em: 05 dez. 2017.

MINERALTEC. **BIVOLT.** Disponível em: <<http://mineraltec.com.br/>>. Acesso em: 05 dez. 2017.