



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

ANA CLAUDIA CABRAL DOS SANTOS REIS

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO DE CRAMBE (CRAMBE ABYSSINICA
HOECHST) COMO FLUIDO ISOLANTE EM
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

Londrina
2022

ANA CLAUDIA CABRAL DOS SANTOS REIS

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO DE CRAMBE (CRAMBE ABYSSINICA
HOECHST) COMO FLUIDO ISOLANTE EM
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Química no Programa de Doutorado em Química Associado UEL – UEPG e UNICENTRO.

Orientador: Prof. Dra. Carmen Luisa Barbosa Guedes (UEL).

Londrina
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Reis, Ana Claudia Cabral dos Santos.

Avaliação do óleo de crambe (*crambe abyssinica* hoechst) como fluido isolante em transformadores elétricos / Ana Claudia Cabral dos Santos Reis. - Londrina, 2022. 75 f.

Orientador: Carmen Luisa Barbosa Guedes.

Tese (Doutorado em Química) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Química, 2022.

Inclui bibliografia.

1. Óleo vegetal isolante - Tese. 2. Óleo de Crambe - Tese. 3. Química Orgânica - Tese. 4. Química Verde - Tese. I. Barbosa Guedes, Carmen Luisa. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Química. III. Título.

CDU 54

ANA CLAUDIA CABRAL DOS SANTOS REIS

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO DE CRAMBE (CRAMBE ABYSSINICA
HOECHST) COMO FLUIDO ISOLANTE EM
TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Química no Programa de Doutorado em Química Associado UEL – UEPG e UNICENTRO.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Profa. Dra. Carmen Luisa Barbosa
Guedes
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Henrique de Santana
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dra. Juliani Chico Piai Paiva
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Paulo Rogério Pinto Rodrigues
Universidade Estadual do Centro Oeste –
Unicentro

Prof. Dra. Helvia Nancy Fuzer Lira
Universidade Tecnológica Federal do Paraná –
UTFPR

Londrina, 27 de maio de 2022.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo Dom da Vida!

Agradeço à minha orientadora, Dra Carmen, por todos os ensinamentos passados, pelas conversas e orientações, por todas as vezes que foi mais que orientadora!

Agradeço aos meus pais/avós pelo carinho, apoio e confiança!

Agradeço a Amora, minha dose diária de alegria!

E, minha gratidão eterna ao ser mais iluminado, que me dá mais força e vontade de seguir em frente, ao meu filho Luke Eduardo. Querido Filho, essa é uma conquista nossa!!

Agradeço a todos os amigos e familiares que fizeram parte desta conquista!

Agradeço ao Centro Universitário FAG e a Universidade Estadual de Londrina pelos espaços, materiais, financiamentos e ensinamentos que me permitiram realizar esse trabalho!

A todos, o meu muito obrigada!!!

***“A busca da excelência
não deve ser um objetivo.
E, sim, um hábito”.***

ARISTÓTELES

RESUMO

REIS, A. C. C. Dos. S. **Avaliação do óleo de crambe (*Crambe abyssinica* Hoechst) como fluido isolante em transformadores elétricos**. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina – Pr. 2022. Orientadora: Profa. Dra. Carmen Luisa Barbosa Guedes.

Os transformadores são importantes equipamentos no setor elétrico e para sua eficiente operação utiliza um sistema de isolamento líquido. Os óleos de origem vegetal estão ganhando espaço no mercado de fluidos isolantes. O crambe é uma oleaginosa que, enquanto matéria-prima para produção de óleo vegetal, pode fornecer até 33% de óleo bruto. O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do óleo de Crambe como fluido isolante em transformadores elétricos. O óleo foi extraído pelo método STHT (*Short Time High Temperature*) e submetido aos testes de caracterização físico-química e dielétricas segundo a norma técnica ABNT NBR 15422. O óleo bruto foi então submetido às etapas de refino (filtração, degomagem, neutralização, secagem, branqueamento e aditivização) e, após, foi submetido aos testes determinados pela ABNT NBR 15422. Também foi realizado testes de compatibilidade com os componentes internos (papel kraft, borracha nitrílica, aço silício, tinta de revestimento interno e fio de cobre). O óleo de Crambe bruto não apresentou valores adequados com a Norma ABNT NBR 15422. Contudo, após as etapas de refino, apresentou características físico-químicas e dielétricas adequadas para o uso como fluido isolante em transformadores. Como exemplo, o índice de neutralização que apresentou um valor de 0,06 g de KOH/g de óleo. O teor de umidade foi de 71 ppm. O fator de perdas dielétricas e rigidez dielétricas que apresentaram valores de 1,65 % (90 °C) e 48 kV (eletrodo de disco), respectivamente. No que se refere à presença de substâncias tóxicas no óleo, foi possível perceber que o óleo de Crambe se apresentou não corrosivo no teste de enxofre corrosivo e níveis baixos de PCB (bifenilas policloradas), valores ideais para um isolante elétrico. Por fim, nos testes relacionados à inflamabilidade do óleo foi possível observar que este apresenta elevadas temperaturas nos testes de ponto de fulgor (321 °C) e ponto de combustão (354 °C), sugerindo uma maior segurança quando em operação no equipamento. Apresentou bom desempenho nos testes de acidez, rigidez dielétrica, viscosidade e cor após ser submetido ao envelhecimento acelerado na presença dos materiais internos (papel kraft, aço silício, fio de cobre, elastômero e tinta de revestimento interno). Porém, apresentou variação do fator de potência de 4,3% com o papel kraft, 56,23% com a borracha nitrílica (elastômero), 30,4% com a tinta de revestimento interno e 4,6% com o fio de cobre, sendo que foram acima do permitido pela norma ABNT NBR 16431 que determina que a variação máxima permitida é de 3% em comparação ao teste em branco. Esses dados podem sugerir uma baixa estabilidade do óleo de Crambe, o que acarretou em variação no seu fator de perdas dielétricas, bem como, uma possível incompatibilidade do óleo com os componentes internos que alteraram seu fator de perdas dielétricas.

Palavras-chave: isolamento líquido; refino de óleo vegetal; isolamento transformadores.

ABSTRACT

REIS, A. C. C S. **Evaluation of crambe oil (*crambe abyssinica* hoechst) as an insulating fluid in electrical transformers.** Thesis (Doctorate in Chemistry) – State University of Londrina (UEL), Londrina – Pr. 2022. Advisor: Profa. Dr. Carmen Luisa Barbosa Guedes.

Transformers are important equipment in the electrical sector and for their efficient operation it uses a liquid insulation system. Vegetable oils are gaining ground in the insulating fluid market. Crambe is an oleaginous plant that, as a raw material for the production of vegetable oil, can provide up to 33% of crude oil. The objective of this work was to evaluate the use of Crambe oil as an insulating fluid in electrical transformers. The oil was extracted by SHT (Short Time High Temperature) and observed in the physicochemical and dielectric characterization tests according to the technical standard ABNT NBR 15422. The crude oil was then administered to the refining stages (filtration, degumming, neutralization, drying, bleaching and additives) and, afterwards, it was submitted to the tests determined by ABNT NBR 15422. Compatibility tests were also carried out with the internal components (kraft paper, nitrile rubber, silicon steel, internal coating paint and copper wire). Crude Crambe oil did not show adequate values according to the ABNT NBR 15422 Standard. However, after the refining stages, it showed physical-chemical and dielectric characteristics suitable for use as an isolated fluid in transformers. As an example, the neutralization index that presented a value of 0.06 g of KOH/g of oil. The moisture content was 71 ppm. The dielectric loss factor and dielectric strength that presented values of 1.65% (90 °C) and 48 kV (disc electrode), respectively. With regard to the presence of toxic substances in the oil, it was possible to see that Crambe oil was non-corrosive in the corrosive sulfur test and low levels of PCB (polychlorinated biphenyls), ideal values for an electrical insulator. Finally, in the tests related to the flammability of the oil, it was possible to observe that it presents high temperatures in the flash point (321 °C) and combustion point (354 °C) tests, suggesting greater safety when operating the equipment. It performed well in acidity, dielectric strength, viscosity and color tests after being subjected to accelerated aging in the presence of internal materials (kraft paper, silicon steel, copper wire, elastomer and internal coating paint). However, it presented a power factor variation of 4.3% with kraft paper, 56.23% with nitrile rubber (elastomer), 30.4% with internal coating ink and 4.6% with copper wire, which were above what is allowed by the ABNT NBR 16431 standard, which determines that the maximum variation allowed is 3% compared to the blank test. These data may suggest a low stability of the Crambe oil, which led to a variation in its dielectric loss factor, as well as a possible incompatibility of the oil with the internal components that altered its dielectric loss factor.

Keywords: liquid insulation; vegetable oil refining; transformer insulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Estrutura do Ácido Erúcido presente no óleo de Crambe.....	2
Figura 2	– Transformador Elétrico de Potência.....	5
Figura 3	– Estrutura química do óleo ascarel (Bifenila policlorada - PCB).....	6
Figura 4	– Estrutura básica dos Hidrocarbonetos	10
Figura 5	– Formação de uma molécula de triglicerídeo	13
Figura 6	– Esquema geral oxidação dos óleos vegetais	15
Figura 7	– Captação de moléculas de água pelos glicerídeos do óleo	16
Figura 8	– Estrutura geral de um Triglicerídeo	20
Figura 9	– Conjunto de extrusora, rosca alimentadora e prensa utilizados na extração do óleo.....	27
Figura 10	– Processo de extrusão do óleo de Crambe	27
Figura 11	– Rosca alimentadora	28
Figura 12	– Decantador do óleo bruto de Crambe	28
Figura 13	– Torta originada do processo de extração do óleo de Crambe.....	29
Figura 14	– Aparelho para determinar o índice de acidez.....	34
Figura 15	– Equipamento Titulador Karl Fischer	35
Figura 16	– Unidade de refino utilizada para as etapas de refino do óleo de Crambe	36
Figura 17	– Comparação do aspecto físico entre o óleo de Crambe bruto e refinado	42
Figura 18	– Componentes internos	47
Figura 19	– Frascos o experimento de compatibilidade	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição em percentual de óleo parafínico e naftênico.....	9
Tabela 2	– Composição de ácidos graxos em óleos vegetais	13
Tabela 3	– Trabalhos publicados sobre a utilização de fluídos vegetais isolantes	17
Tabela 4	– Pesquisas referentes ao uso do Óleo de Crambe.....	18
Tabela 5	– Composição de ácidos graxos na composição do óleo de Crambe	21
Tabela 6	– Valores de Referência para testes de caracterização físico-química para óleo vegetal isolante novo	22
Tabela 7	– Características físico químicas do óleo vegetal isolante, de acordo com NBR 15422 e ASTM D6871.....	30
Tabela 8	– Proporções utilizadas no teste de compatibilidade do óleo de Crambe	39
Tabela 9	– Análise Físico-química do óleo vegetal de Crambe conforme Norma ABNT NBR 15422	41
Tabela 10	– Quantidades e medidas dos componentes internos	46
Tabela 11	– Variações máximas permitidas pela Norma ABNT NBR 16431	48
Tabela 12	– Variações obtidas nas amostras de óleos submetidos ao teste de compatibilidade quando comparadas ao teste em branco	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
OMI	Óleo Mineral Isolante
OVI	Óleo Vegetal Isolante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	DESENVOLVIMENTO	4
2.1	TRANSFORMADORES ELÉTRICOS.....	4
2.2	ÓLEO MINERAL ISOLANTE.....	8
2.3	ÓLEO VEGETAL ISOLANTE	13
2.3.1	Óleo de Crambe	19
2.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E DIELÉTRICAS DOS ÓLEOS VEGETAIS ISOLANTES.....	22
3	METODOLOGIA: MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	26
3.1.1	Extração do Óleo de Crambe	26
3.1.2	Caracterização Físico-química e Dielétrica do Óleo de Crambe	29
3.1.2.1	Aspecto visual	30
3.1.2.2	Cor	30
3.1.2.3	Densidade relativa a 20/4 °C.....	31
3.1.2.4	Viscosidade cinemática a 40 °C	31
3.1.2.5	Ponto de fluidez/ nevoa	31
3.1.2.6	Ponto de fulgor	32
3.1.2.7	Ponto de combustão	32
3.1.2.8	Rigidez dielétrica	33
3.1.2.9	Fator de perdas dielétricas a 25 e 100 °C	33
3.1.2.10	Índice de neutralização	34
3.1.2.11	Teor de umidade	34
3.1.2.12	Enxofre corrosivo	35
3.1.2.13	Teor de PCB.....	36
3.1.3	Processo de Refino do Óleo de Crambe	36
3.2	TESTES DE COMPATIBILIDADE COM OS COMPONENTES INTERNOS DO TRANSFORMADOR.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40

4.1	REFINO DO ÓLEO DE CRAMBE.....	40
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO ÓLEO DE CRAMBE	40
4.3	DETERMINAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DE MATERIAIS EMPREGADOS COMO ÓLEO VEGETAL ISOLANTE	45
	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Por mais de 100 anos, o óleo mineral (OMI) tem sido usado como isolante líquido para transformadores de potência e distribuição (Garcia et. al., 2021). Os transformadores estão entre os equipamentos mais importantes em uma rede de energia elétrica (Rao et. al., 2019). Este equipamento é responsável por elevar ou diminuir a tensão elétrica das linhas de transmissão e redes de distribuição (Nogueira & Alves, 2009; Oliveira, 2009).

Devido a extensa linha de transmissão de energia que se estende das usinas até as residências, é possível relacionar o grande número de transformadores que se encontram em operação no setor de energia elétrica. Os transformadores operam como um sistema de isolamento, este pode ser sólido, líquido ou gasoso.

Os óleos minerais à base de petróleo têm sido amplamente utilizados como isolantes fluidos desde 1887 devido ao seu bom desempenho e custo razoável. No entanto, devido ao baixo ponto de fulgor e de combustão desses óleos, ficam muito aquém do requisito de segurança do transformador (Shen et. al., 2021).

Nas últimas décadas, o uso de fluidos de origem vegetal e outros líquidos biodegradáveis sintéticos aumentaram significativamente. Um tipo de líquido natural biodegradável usado como alternativa ao óleo mineral são os ésteres naturais (óleos vegetais isolantes) obtidos de diferentes sementes de hortaliças (Garcia et al., 2021).

Além de derivar de uma fonte renovável de energia, os ésteres naturais, ainda, são materiais biodegradáveis, portanto o risco e o impacto ambiental, bem como os custos com os descartes dos líquidos são minimizados. Além disso, o ponto de fulgor dos ésteres é muito maior do que o dos OMI, o que significa que o risco de incêndio de transformadores preenchidos com éster é drasticamente menor. E, ainda, podem absorver quantidades mais significativas de água do que o OMI, permitindo que o papel isolante do transformador opere de forma mais seca, o que pode prolongar a vida útil do equipamento (Garcia et al., 2021).

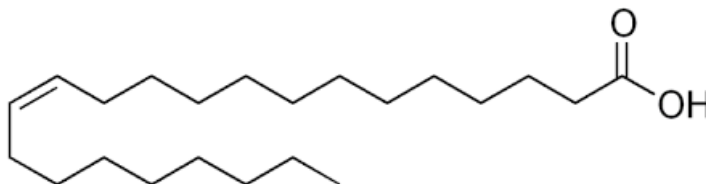
Os óleos vegetais isolantes são obtidos a partir de oleaginosas, principalmente soja, milho e girassol, as quais fornecem óleos utilizados, também, na indústria de alimentos. No mercado nacional, os primeiros produtos comerciais de OVIs foram o BIOTEMP® (importado da Suécia pela ABB Brasil) e o ENVIROTEMP® FR3TM

(comercializado pela Cooper Power Systems, fabricado pela Cargill) (Stocco, 2009). Em 2007, foram lançados, no mercado nacional, os óleos BIOVOLT®, produzidos e comercializados a partir de uma tecnologia 100% nacional, pela empresa Mineraltec (Wilhelm, Granato & Tulio, 2007).

O Crambe (*Crambe abyssinica*) é uma planta oleaginosa que pertence à família Brassicaceae. É uma cultura que tem boa adaptabilidade a solos quentes e frios, sendo resistente a pragas e doenças, com um teor de óleo de cerca de 35% (Rosa et. al., 2014). O óleo extraído do Crambe pode ser aproveitado para diversos fins, como, produção de biodiesel (Bassegio et. al., 2016; Wazilewski et. al., 2013; Mello et. al., 2017), lubrificante (Santos et. al., 2015; Santos et. al., 2013), inibidor (Santos et. al., 2013), fabricação de borracha (Santos et. al., 2013), na indústria de plástico e adesivos (Rogério et. al., 2013; Santos et. al., 2015) e como isolante elétrico (Rogério et. al., 2013).

O óleo de Crambe apresenta em sua composição cerca de 50 a 60% de ácido erúcido (Lara-Fioreze et. al., 2013; Bassegio et. al., 2016; Rogério et. al., 2013), este ácido contém 22 átomos e apenas uma ligação dupla (Figura 1). O ácido erúcido (C22:1) apresenta diversas aplicabilidades na indústria química devido propriedades como, ponto de inflamação baixo e boas qualidades de combustão e lubrificação (Bassegio et. al., 2016). Devido à elevada concentração de ácido erúcido em sua composição, o óleo de Crambe não é adequado para consumo humano. Com isso, o óleo de Crambe deve ser utilizado apenas para fim das indústrias químicas e de energia.

Figura 1: Estrutura do Ácido Erúcido presente no óleo de Crambe



O óleo mineral isolante é o fluido mais utilizado em sistemas de isolamento elétrico. Para que seja substituído, o novo óleo precisa demonstrar eficácia e, propriedades químicas, físicas e dielétricas adequadas para uso nos equipamentos

elétricos. Para atestar se o óleo vegetal a substituir o óleo mineral é eficaz ao equipamento, este deve passar por testes descritos na Norma ABNT NBR 15422. O óleo será submetido ao teste de cor, viscosidade cinemática, fator de fluidez, ponto de fulgor e de combustão, índice de acidez, teor de água, enxofre corrosivo e teor de PCBs (bifenilas policloradas). Estes testes determinam se o óleo estará adequado para enchimento do equipamento, com baixos riscos de acidentes, bem como permitindo que o equipamento funcione adequadamente.

Outro teste a ser realizado com o óleo isolante é o teste de compatibilidade com os componentes internos do transformador (papel kraft, borracha nitrílica, tintas de revestimento interno, aço silício e fio de cobre) segundo a Norma ABNT NBR 16431. Este teste consiste no envelhecimento acelerado do óleo na presença destes materiais com condições simuladas de operação de um transformador. A partir da análise dos resultados obtidos, é possível observar se o óleo é compatível com os materiais testados, importante para manter a vida útil e o adequado funcionamento do equipamento.

Os testes são importantes a fim de determinar se o óleo vegetal apresenta as características e propriedades adequadas para atuar como isolante elétrico e térmico num transformador elétrico.

Considerando o exposto, este projeto visa avaliar o uso do óleo vegetal de Crambe como fluido isolante em transformadores elétricos por meio dos testes de caracterização físico-química e dielétrica, conforme ABNT NBR 1542. E, avaliar a compatibilidade do óleo de Crambe com os componentes internos do transformador elétrico, conforme ABNT NBR 16431.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Transformadores Elétricos

A geração de energia elétrica envolve alta tecnologia, desde a sua geração propriamente dita, pelas turbinas, até a transmissão e a distribuição da eletricidade gerada nas usinas para os consumidores finais, industriais e residenciais (Stocco, 2009). O transporte de energia é feito por linhas de transmissão até as subestações e, por meio delas, a energia chega ao consumidor final, durante todo o seu trajeto, a energia varia em sua tensão com o objetivo de diminuir perdas durante o seu transporte. Esta variação é executada, de modo geral, por equipamentos denominados transformadores (Stocco, 2009).

Os transformadores formam uma parte importante da rede de transmissão de energia elétrica (Bashi, et al., 2006). Este equipamento é responsável por elevar ou diminuir a tensão elétrica das linhas de transmissão e redes de distribuição (Nogueira & Alves, 2009; Oliveira, 2009).

Com base na sua estrutura e onde será utilizado, os transformadores elétricos podem ser classificados em: transformadores de corrente elétrica, transformadores de potência, transformadores de distribuição e transformadores de força.

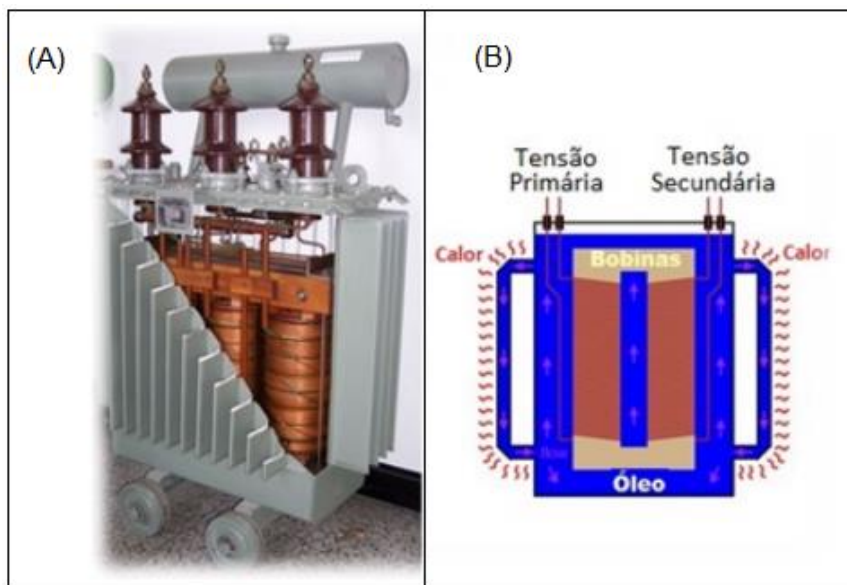
Os transformadores de corrente elétrica têm por finalidade abaixar a intensidade da corrente elétrica. Os de potência podem abaixar ou elevar o potencial elétrico de acordo com a necessidade e demanda do local a que a energia se destina. Os transformadores de força, são muito utilizados em locais que requerem uma potência ou corrente elétrica muito elevada, como em fornos industriais, por exemplo. Já os transformadores de distribuição fazem parte da última etapa para que a energia chegue até os consumidores finais, ou seja, chegue em nossas residências. Esses equipamentos têm como objetivo disponibilizar a energia elétrica em tensões de 110 e 220 V para o consumidor final (Gomes, 2006).

Segundo Simone (2017), o transformador é composto por um núcleo de material ferromagnético, geralmente de aço silício. Nos enrolamentos são utilizados alumínio ou cobre, calços são utilizados para a fixação da bobina, e para o isolamento das bobinas se utiliza papel, o mais utilizado é o papel Kraft.

Conforme destaca Almeida e Muniz (2020), a principal parte de um transformador elétrico é a sua parte ativa, constituída de núcleo e enrolamentos. Para evitar a passagem de corrente entre as espiras de uma mesma bobina, são utilizados papéis isolantes, como por exemplo o papel kraft. Durante a operação do transformador, a corrente que circula pelas espiras no núcleo faz com que haja aquecimento, devido à sua resistência e, o calor gerado pode causar degradação térmica do material isolante contido entre as espiras. Desse modo, é necessária a utilização de fluidos isolantes para a refrigeração das espiras de material condutor e para fazer o isolamento líquido do equipamento.

A Figura 1 representa um transformador elétrico de potência (Figura 2 A), demonstrando a circulação do óleo dentro do equipamento durante o seu funcionamento (Figura 2 B). O óleo isolante circula geralmente por convecção entre a parte ativa, contida no tanque principal, ganhando calor, e o radiador externo ao tanque, irradiando esse calor para o ambiente (Almeida & Muniz, 2020).

Figura 2: Transformador Elétrico de Potência



Fonte: Almeida & Muniz (2020)

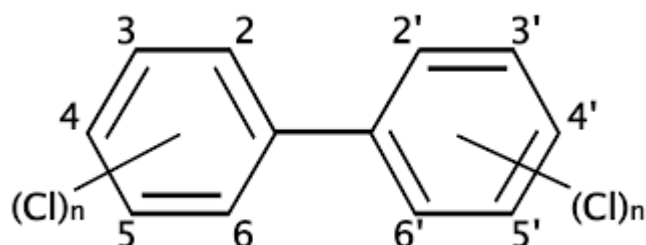
Também, fazem parte do núcleo do transformador, resinas e fibras, que são empregadas com a finalidade de fixar os componentes isolantes e magnéticos (Stocco, 2009). Materiais elastômeros e tintas compatíveis com óleo isolante são utilizados com a finalidade de promover a vedação e a proteção do equipamento

(Meyers, Kelly & Parrish, 1982). É importante ressaltar que todos os materiais citados acima, que fazem parte da composição interna de um transformador, estão todos em contato com o óleo.

Durante o funcionamento de um transformador elétrico é gerado calor que pode causar degradação térmica do material isolante contido entre as espiras. Desse modo, o calor gerado pelas perdas precisa ser absorvido pelo sistema de isolamento líquido, no qual todo o núcleo do transformador deve estar submerso (Caldas *et al.*, 2014). Cabe ressaltar aqui que, além do isolamento líquido, segundo Stocco (2009), o equipamento pode optar pelo isolamento gasoso (ar, hexafluoreto de enxofre ou vácuo).

Os primeiros transformadores foram construídos utilizando o Ascarel ® como fluido isolante líquido. O óleo ascarel é uma bifenila policlorada (PCB) (Figura 3), com alto teor de cloro em sua fórmula química - 54,4%. Seu uso extensivo foi motivado por características técnicas excepcionais - grande rigidez dielétrica, alta condutividade térmica, boa estabilidade química, não-inflamabilidade e capacidade de resistir a altas temperaturas (650° C) (Friendenberg & Santana, 2014).

Figura 3: Estrutura química do óleo ascarel (Bifenila policlorada - PCB)



Contudo, apesar das boas características citadas acima, o ascarel é tóxico, bioacumulativo e não biodegradável, quando lançado ao meio ambiente pode atingir o plâncton afetando peixes, pássaros e o homem através da cadeia alimentar. Produz efeitos teratogênicos e carcinogênicos, além de lesões dermatológicas e alterações morfológicas nos dentes fígado e rins, constituindo-se num poluente orgânico persistente (POP) (Friendenberg & Santana, 2014).

Segundo Friendenberg & Santana (2014), em 1976, após os primeiros registros de contaminação ambiental, os países produtores de ascarel foram gradativamente

interrompendo sua fabricação, comercialização e utilização. No Brasil a Portaria Interministerial (MIC/MI/MME) 0019 de 19/01/81, regula a utilização do ascarel, proibindo o uso dos PCBs e, determinando que equipamentos que estão em funcionamento utilizando o ascarel, pode continuar em funcionamento, mas quando for necessário seu esvaziamento, deve ser enchido com outro fluido que não contenham PCB e ainda regulamenta sobre o descarte deste produto.

Conforme Almeida e Muniz (2014), o transformador de potência isolado a OMI surgiu em 1882 com a ideia de que o uso do óleo mineral contribuiria na redução das dimensões do equipamento e na melhoria de sua eficiência, comparado com os primeiros transformadores a seco. Na atualidade, o OMI é o fluido dielétrico mundialmente mais utilizado no setor elétrico. Já, o transformador de potência isolado a OVI surgiu naquela mesma época, final do século XIX. Porém, estudos não demonstraram bom desempenho desse fluido, abrindo mais espaço para o crescimento de transformadores utilizado OMI.

Há de se considerar ainda que os transformadores podem ser construídos utilizando um isolamento gasoso como opção ao isolamento líquido em que são utilizados óleos minerais ou vegetais. De um ponto de vista ambiental, utilizar o ar atmosférico como isolante do equipamento seria o mais viável. Contudo, o óleo é um meio com melhor capacidade de resfriamento que o ar (Zanini, 2016).

Entretanto, conforme estudo realizado por Zanini (2016), os transformadores a óleo são maiores que os secos quando possuem a mesma potência nominal, isso faz com que a construção dos transformadores a óleo demande mais material. Apesar disso, como o óleo tem melhor capacidade de suportar o sobreaquecimento que acontece em função da sobrecarga de operação do equipamento (e esse é o principal fator que define a vida útil do transformador), o óleo é um melhor meio de isolamento e resfriamento com relação ao ar. Cabe ressaltar aqui que o OVI apresenta temperatura de combustão e fulgor maior que o OMI.

Assim, devido ao fato de suportar elevadas temperaturas, o óleo se torna um isolante melhor quando comparado ao ar atmosférico e, ainda, aumenta a vida útil do equipamento (Zanini, 2016).

No entanto, devido à crise do mercado de petróleo nos anos 1970, surgiu um novo estímulo: buscar fontes biodegradáveis alternativas para aplicação em

transformadores, com isso, por volta do ano de 1999 foram desenvolvidos OVIs apropriados para a aplicação em transformadores de potência (Almeida & Muniz, 2014).

Os próximos itens irão discorrer sobre os fluidos líquidos utilizados nos transformadores elétricos, destacando suas vantagens, desvantagens e características e propriedades físico-químicas e dielétricas.

2.2 Óleo Mineral Isolante

Como já mencionado, os transformadores precisam de um isolamento líquido e o principal material utilizado atualmente é o óleo mineral. O óleo mineral isolante (OMI) é até hoje o fluido isolante mais utilizado em transformadores por causa de seu custo físico e propriedades dielétricas (Yang et. al., 2011). Apesar das vantagens, o óleo mineral apresenta baixos pontos de fulgor e combustão, não é biodegradável e, além disso, as reservas de petróleo bruto naftênico, a partir da qual se obtém óleo mineral, são limitadas (Fernandez et. al., 2013; Yang et al., 2011).

O óleo mineral é derivado do petróleo que é considerado uma fonte fóssil de energia. A composição química desse óleo estará diretamente relacionada com a composição química do petróleo que lhe deu origem que, nesse caso, é constituído por compostos hidrocarbonetos formados por diferentes ligações químicas (Fernandez et. al., 2013; Eberhardt et. al., 2010; Pukel et. al., 2009). É obtido através da destilação fracionada do petróleo em uma fração adequada às propriedades necessárias para ser utilizado como isolante, sendo, portanto, a uma fração de 300 °C a 400 °C, constituindo-se por cadeias com 19 a 23 átomos de carbono (Thomaz et. al., 2005).

Existem diferentes tipos de óleos minerais, podendo ser, principalmente, parafínico, naftênico e aromático (Gasser et. al., 2011) e seu tipo está determinado pelas diferentes proporções dos componentes de sua estrutura química. A composição em porcentagem de hidrocarbonetos presentes nos diferentes tipos de óleos minerais está exposta na Tabela 1.

Tabela 1: Composição em porcentual de óleos parafínicos e naftênicos.

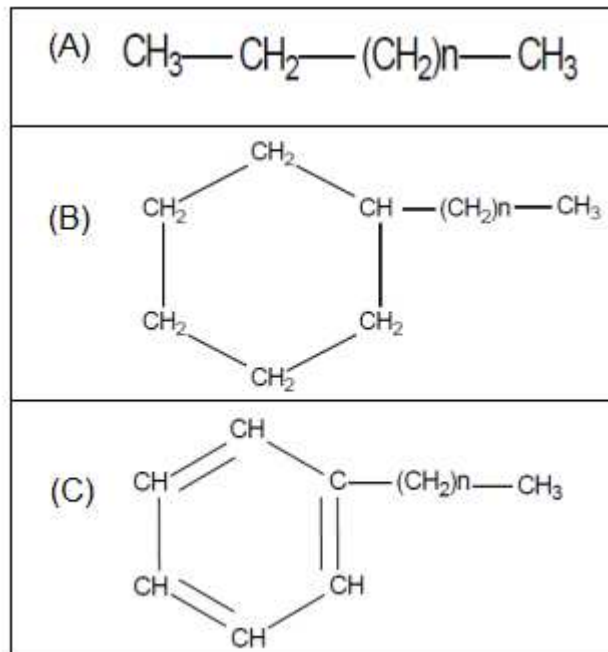
Tipo de Óleo Mineral	Quantidade de Compostos (%)		
	Parafínicos	Naftênicos	Aromáticos
Isolante			
Parafínico	63	29	8
Naftênico	42	47	11

Fonte: BEZERRA (2009)

Para Gasser e colaboradores (2011), tipicamente, os óleos contendo menor composição de hidrocarbonetos parafínicos em sua composição são definidos como óleos minerais naftênicos. Enquanto que em um óleo mineral do tipo parafínico, o teor de hidrocarbonetos parafínicos excede os 56%.

Hidrocarbonetos são compostos orgânicos constituídos apenas por átomos de carbonos e hidrogênios e podem ser classificados de acordo com o tipo de ligações entre esses átomos. Um hidrocarboneto do tipo parafínico apresenta estrutura saturada de cadeia linear ou ramificada (Figura 4 A). Os hidrocarbonetos naftênicos são hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo um ou mais anéis, que podem possuir uma ou mais cadeias laterais (Figura 4 B) (Frienderbeg & Santana, 2014). Já, os hidrocarbonetos aromáticos, conforme ilustrado na Figura 4 C, apresentam anéis aromáticos em sua composição. O tipo mais utilizado mundialmente é o de base naftênica (Bezerra, 2009) e os principais hidrocarbonetos que entram em sua composição apresentam-se na forma de anéis benzênicos combinados a anéis alifáticos (Frienderbeg & Santana, 2014).

Figura 4: Estrutura básica dos Hidrocarbonetos



(A) Hidrocarbonetos parafínicos. (B) Hidrocarbonetos naftênicos.

(C) Hidrocarbonetos aromáticos.

Fonte: FRIENDERBEG & SANTANA (2014)

As características do óleo mineral estão diretamente relacionadas com sua composição química, por exemplo, segundo Leopoldino (2011) os óleos minerais parafínicos são resistentes o que dificulta sua oxidação, apresentam menor densidade e menor variação de viscosidade, porém, em temperaturas mais baixas tendem a formar sedimentos. Ao relacionar essas propriedades com a estrutura química, percebe-se que são resistentes devido às fortes ligações saturadas que ligam os átomos de carbono às estruturas.

Os fluidos a base de óleo mineral são largamente utilizados no setor elétrico devido suas características adequadas para uso como isolante. Porém, apresenta desvantagens, como não ser biodegradável, apresentar baixo ponto de fulgor e combustão (acarretando em riscos de acidentes com incêndios) e deriva de uma fonte fóssil, o Petróleo. Com isso, se faz necessário sua substituição por outros fluidos menos agressivos ao meio ambiente e de base renovável.

Segundo Zirbes et. al., (2005), o isolamento líquido do transformador tem como

função primária minimizar o fluxo de corrente entre condutores submetidos a diferenciais de potencial elétrico, suportando o campo elétrico resultante. Deve, ainda, apresentar propriedades mecânicas, térmicas e químicas apropriadas ao cumprimento de sua função.

Com isso, é importante analisar e relacionar as estruturas químicas dos óleos utilizados para prever o seu comportamento e durabilidade no equipamento. No caso do óleo mineral isolante, por derivar do petróleo apresenta-se na forma de uma mistura de hidrocarbonetos. Essas moléculas apresentam forças de ligações mais elevadas entre seus átomos (Carbono e Hidrogênio), o que favorece uma elevada estabilidade à degradação oxidativa.

Contudo, alguns fatores podem favorecer a oxidação desse OMI. Os fatores que mais influenciam a sua degradação oxidativa são a presença de oxigênio, temperaturas relativamente elevadas e contato com substâncias quimicamente ativas de vários materiais que constituem o conjunto do isolamento ou equipamento (Zirbes et. al., 2005). Segundo os mesmos autores, a oxidação do óleo inicia-se com a formação de radicais livres, estruturas altamente reativas que levam, ao final do processo de oxidação do óleo, a formação de gases com potencial de combustão (Hidrogênio (H_2), Metano (CH_4), Acetileno (C_2H_2), Etileno (C_2H_4) e Etano (C_2H_6)).

Com isso, é importante ressaltar que o correto acompanhamento e a manutenção da qualidade do óleo isolante são etapas essenciais para assegurar uma operação confiável dos transformadores de potência (Caldas et. al., 2014). As características físico-químicas, os valores limites, assim como procedimentos e metodologias para sua medição são padronizados por entidades tais como ABNT, IEC e ASTM, entre uma série de outros órgãos oficiais normativos e apresentam diferenças entre si, não somente na variável monitorada, mas principalmente nos limites estabelecidos (Zirbes et. al., 2005).

Por fim, segundo Silva et. al., (2012), a popularidade do óleo mineral oriundo do petróleo se deve, nesta aplicação, à disponibilidade, ao baixo custo e às suas excelentes propriedades dielétricas e refrigerantes. Contudo, a partir do século 20 surgiram vários problemas de segurança ambiental com o uso dos OMIs, tornando

extremamente atrativo e importante o uso de produtos com alta biodegradabilidade.

Esses produtos, com alta biodegradabilidade e de origem renovável que visam substituir o OMI serão discutidos no próximo tópico.

2.3 Óleo Vegetal Isolante

As plantas oleaginosas contêm elevado teor de óleo em sua composição. Esse óleo pode ser extraído e aproveitado em diversos setores, como na produção de biocombustíveis (biodiesel) e, como proposta para produção de fluídos isolantes.

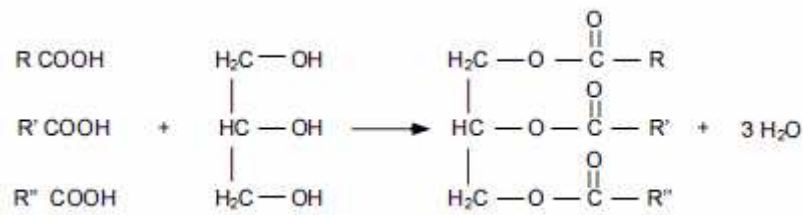
O primeiro produto comercial lançado no mercado foi o BIOTEMP®, cuja patente foi requerida nos Estados Unidos da América (EUA), em setembro de 1999, pela empresa ABB (Stocco, 2009). O fluido base usado foi o óleo de girassol obtido a partir de sementes geneticamente selecionadas, contendo um teor de ácido oleico superior a 80% (OOMMEN, 2002).

No mercado nacional, os primeiros produtos comerciais de OVIs foram o BIOTEMP® (importado da Suécia pela ABB Brasil) e o ENVIROTEMP® FR3TM (comercializado pela Cooper Power Systems, fabricado pela Cargill) (Stocco, 2009). Em 2007, foram lançados, no mercado nacional, os óleos BIOVOLT®, produzidos e comercializados a partir de uma tecnologia 100% nacional, pela empresa Mineraltec (Wilhelm, Granato & Tulio, 2007).

Os óleos vegetais isolantes (OVIs) são utilizados como fluidos isolantes e refrigerantes em transformadores como alternativa ao óleo mineral. São triglicerídeos normalmente obtidos a partir de uma planta (Rafiq et. al., 2015). Segundo Martins (2008) triglicerídeos são triésteres de glicerol, isto é, o glicerol esterificado por três ácidos graxos. A Figura 5 demonstra a formação das moléculas de triglicerídeos.

Esses fluidos podem ser extraídos de diferentes sementes vegetais, tais como soja, girassol, colza ou outros, mas suas características físicas e químicas, por exemplo, viscosidade ou estabilidade à oxidação, dependem da composição dos ácidos graxos nos triglicerídeos e no seu grau de insaturação (Singha et al., 2014).

Figura 5: Formação de uma molécula de triglicerídeo.



Fonte: TRNKA et. al., (2014)

Os ácidos graxos presentes na composição dos óleos vegetais variam no comprimento das cadeias de hidrocarbonetos e no grau de insaturação, e essas diferenças de composição podem levar a alterações significativas nas propriedades físico-químicas dos óleos (Martins, 2008). Por exemplo, óleos que apresentam em sua composição ácidos graxos com maior número de insaturações tendem a apresentar menor estabilidade oxidativa e os óleos com maior teor de ácidos graxos saturados apresentam elevada viscosidade.

O tamanho da cadeia carbônica dos ácidos graxos também pode interferir nas propriedades dos óleos, por exemplo, quanto menor for a cadeia carbônica, menor será seu ponto de fusão. Isso ocorre devido ao fato de os ácidos graxos com cadeias mais longas serem mais suscetíveis a forças de atração intermoleculares (Bertrand et. al., 2013) o que acarreta em um aumento do ponto de fusão e da viscosidade.

Cada planta oleaginosa fornecerá um óleo com composição química variável, assim, dependendo da origem deste óleo, suas características físico-químicas poderão ter variações (ser mais viscoso, ter maior estabilidade a oxidação, dentre outras). A composição de ácidos graxos de alguns óleos vegetais está disposta na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição de ácidos graxos em óleos vegetais

Ácidos Graxos	Óleo de Soja	Óleo de Girassol	Óleo de Palma	Óleo de Coco
C8:0 Ácido Caprílico	-	-	-	7,8
C10:0 Ácido Cáprico	-	-	-	7,6
C12:0 Ácido Láurico	-	-	-	44,8
C14:0 Ácido Mirístico	-	0,2	1,1	18,1
C16:0 Ácido Palmítico	6,7	7,1	44,4	9,5
C18:0 Ácido Esteárico	3,3	2,8	4,3	2,4
C18:1 Ácido Oleico	41,7	30,0	39,9	8,2
C18:2 Ácido Linoleico	41,3	59,5	9,4	1,5
C18:3 Ácido Linolênico	5,9	-	-	-
Outros	1,1	0,4	0,9	0,1

Fonte: Adaptada de KANOH et. al., (2008)

Os óleos vegetais, quando comparado ao óleo mineral, apresentam vantagens como ser ambientalmente correto, biodegradável, renovável, barato, altamente disponível, não tóxico e mais seguro (Fang *et. al.*, 2016; Rafiq *et. al.*, 2015). Contudo, devido sua composição química, são mais suscetíveis à degradação por meio de reações de oxidação. Com isso, durante o uso e armazenamento é mais vulnerável aos impactos ambientais como calor, ar, luz, água e metais (Fang *et. al.*, 2016).

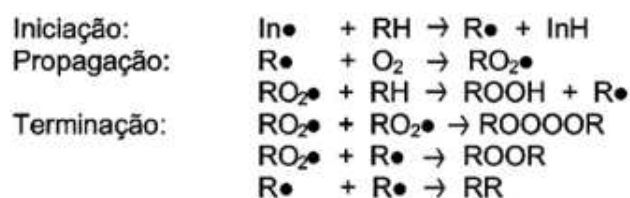
Para retardar essas reações de degradação do óleo se faz necessário a utilização de antioxidantes. Os antioxidantes são agentes que inibem ou retardam reações indesejáveis em óleos. Segundo Messias (2009), são um conjunto heterogêneo de substâncias formadas por vitaminas, minerais, pigmentos naturais e outros compostos vegetais e, ainda, enzimas, que bloqueiam o efeito danoso dos radicais livres.

As principais alterações químicas que ocorrem nos óleos vegetais são por processos químicos como a auto oxidação, a polimerização térmica ou a oxidação

térmica, que podem ser acelerados pelo calor, luz (foto-oxidação), ionização, traços de metais ou catalisadores (Mallegol, 2000, p. 108).

Segundo Fonseca e Yoshida (2009), a reação de oxidação inicia-se com a formação de radicais livres (R-), seguida da formação de hidroperóxidos. Estes compostos são instáveis e possibilitam a continuidade do processo com as reações de propagação por meio da fragmentação, rearranjo, transferência de átomos ou grupos e de processo de ciclização na matriz, depois, se decompõe por diferentes mecanismos produzindo compostos carbonílicos como cetonas, aldeídos, ácidos carboxílicos, além de álcoois, éter e outros compostos orgânicos. A Figura 6 representa as etapas das reações de oxidação dos óleos vegetais.

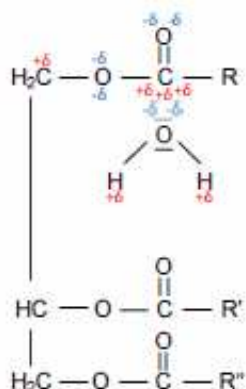
Figura 6: Esquema geral oxidação dos óleos vegetais



Fonte: Fonseca e Yoshida (2009)

Ao contrário dos óleos minerais, os óleos vegetais apresentam em sua composição moléculas polares, portanto apresentam maior interação com moléculas de água. Segundo Trnka et. al., (2014) essa interação ocorre pela interação entre o momento dipolar do grupamento éster das moléculas de triglicerídeos com as moléculas de água presente no meio, conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 7: Captação de moléculas de água pelos glicerídeos do óleo.



Fonte: TRNKA et. al., (2014)

Essa maior interação com a água faz com que, na temperatura de 25 °C, os óleos de origem vegetal absorvam aproximadamente 1000 ppm de água enquanto o óleo mineral absorve entre 55 e 60 ppm (Oommen & Claiborne, 1999). Portanto, conforme Wilhelm *et. al.*, (2009), a quantidade de água exigida para saturar o OVI à temperatura ambiente é aproximadamente 20 vezes a do OMI.

Essa característica do OVI contribui para um aumento na vida útil do isolamento sólido do transformador. No processo de hidrólise das moléculas dos triglicerídeos presente no óleo vegetal, a água do meio é consumida e para manter o equilíbrio químico, o óleo desloca moléculas de água do papel que faz parte do isolamento sólido do equipamento. Com isso, indiretamente realiza a secagem do papel kraft, aumentando a sua vida útil (Wilhelm *et. al.*, 2009).

Os óleos vegetais são produtos não tóxicos, ecológicos e biodegradáveis e, além das características já citadas, ainda pode-se ressaltar o fato de apresentarem cerca de duas vezes o ponto de incêndio do OMI, o que acaba mitigando o risco de incêndios e, assim, melhorando significativamente o desempenho de segurança do transformador. Também apresentam maior rigidez dielétrica quando comparado ao OMI, que permite uma distribuição do campo elétrico, limitando a ocorrência de descargas parciais (Shen, *et. al.*, 2021).

Os óleos vegetais isolantes foram inseridos no mercado em meados dos anos 1900 e, desde então, vem se demonstrando eficaz ao uso como fluido isolante. A

Tabela 3 traz algumas características publicadas sobre a utilização de fluídos isolantes de diferentes bases vegetais.

Tabela 3: Trabalhos publicados sobre a utilização de Fluídos Vegetais Isolantes

Fluído Isolante	Característica avaliada	Referência
Óleos comerciais de algodão, babaçu, girassol, milho e soja.	Densidade, viscosidade cinemática, acidez, corrosividade, teor de água, fator de perdas e rigidez dielétrica.	Silva, C. R. et. al., (2012)
Pinhão-manso (<i>Jatropha curcas</i>)	Teor de água, densidade relativa, viscosidade, acidez, Cor, número de iodo, corrosividade, ponto de inflamação, ponto de fluidez, propriedades elétricas e cromatografia gasosa.	Sitorus, H. B. H. et. al., (2016)
Óleo de Canola	Fator de dissipação, permissividade, resistividade e rigidez dielétrica.	Soucek, J. et. al., (2015)
Óleo vegetal Isolante Biovolt A	Estabilidade Oxidativa	Wilhelm, H. M. et. al., (2015)
Óleo de Palma e óleo de Coco	Propriedades dielétricas	Mohamad, N. A. et. al., (2014)
Óleo vegetal Isolante Biovolt A, Biovolt HW e Envirotemp FR3	Análise de gases dissolvidos	Gómez, N. A. et. al., (2014)
Azeite Amarelo, Oleína de Palma, Óleo de Sésamo, óleo de Canola e óleo de coco	Propriedades Isolantes	Kamal, M. S. A. et. al., (2013)
Óleo vegetal de Soja, Canola, Girassol e Crambe	Avaliação da biodegradabilidade e toxicidade	Módenes, A. P. et al., (2018)
Óleo de Pinhão-manso (<i>Jatropha curcas</i>)	Envelhecimento acelerado do óleo	Evangelista Jr, J. M. G., et. al., (2018)

Fonte: o próprio autor.

Como observado nos estudos expostos na Tabela 3, várias matrizes vegetais estão sendo avaliadas para uso como fluido isolante. O mercado precisa de óleos vegetais que atendam as propriedades adequadas para aumentar a vida útil do equipamento, como baixo índice de neutralização, baixa umidade, elevada resistência

elétrica, dentre outras. Bem como, o líquido isolante precisa causar menos danos aos componentes internos do transformador e menos impacto ambiental com seu uso.

O uso de produtos não tóxicos, ecológicos e biodegradáveis à base de plantas tem sido uma escolha natural para fluidos isolantes alternativos fluidos. A ampla área cultivada e o avanço das tecnologias da engenharia genética para colheitas, tem acarretado em oleaginosas baratas, de alto rendimento e qualidade, incentivando (Shen, et. al., 2021).

Neste cenário se destaca o Crambe, que é uma oleaginosa alternativa às demais que estão sendo utilizadas e comercializadas, como fluidos à base de soja. Se destaca por diversas características que permitem o seu uso como fluido vegetal isolante que serão abordadas no próximo item. A sua cultura vem ganhando espaço na matriz brasileira como demonstrado na Tabela 4 em que são destacadas pesquisas em que se utiliza o óleo de Crambe.

Tabela 4: Pesquisas referentes ao uso do Óleo de Crambe

Matriz vegetal	Estudo Realizado	Referência
Óleo de Crambe	Produção de Biodiesel	Basso, R. C., et. al., (2012)
Óleo de Crambe	Hidroesterificação do óleo de crambe (<i>Crambe abyssinica</i> H.) sob condições pressurizadas	Mello, B. T. F. de, et. al., (2017)
Óleo de Crambe	Caracterização cromatográfica do crambe (<i>Crambe abyssinica Hochst</i>) e modelagem de alguns parâmetros para sua conversão em biodiesel	Silveira, E. V. et. al., (2017)
Óleo de Crambe	Efeito da degomagem do óleo de <i>Crambe abyssinica</i> na concentração de fósforo do óleo refinado e do biodiesel derivado	Costa, E., et. al., (2018)
Óleo de Crambe	Extração supercrítica do óleo de crambe utilizando propano como solvente, análise da composição de ácidos graxos, determinação de	Santos, K. A., et. al., (2015)

	compostos de glicerol livre, composição de tocoferol e estabilidade a oxidação	
Sementes de Crambe	Envelhecimento acelerado como teste de vigor para sementes de crambe (<i>Crambe abyssinica</i>)	Leão, E. F. et. al., (2016)
Óleo de Crambe	Métodos Espectroscópicos na Avaliação de Modificações Óleos de base vegetal de <i>Crambe abyssinica</i>	Szmatola, M., et. al., (2018)

Fonte: o próprio autor.

Como observado nos estudos apontados na Tabela 4, o óleo de Crambe vem sendo utilizado como matéria-prima para produção de Biodiesel, alimentação animal e como adubação de outras culturas. Ainda, estudos como de Santos, et. al., (2015) trazem métodos de extração do óleo e demais características físico-químicas do óleo de crambe que contribuem com outras pesquisas e aplicações dessa matriz.

2.3.1 Óleo de Crambe

O Crambe (*Crambe abyssinica Hochst*) é uma planta oleaginosa que pertence à família Brassicaceae. Tem origem na região mediterrânea, mas há relatos de ocorrências de algumas espécies na Etiópia (Santos et. al., 2013). No Brasil, esta semente oleaginosa foi introduzida em 1995 pela Fundação MS em Maracaju, Estado do Mato Grosso do Sul, onde foi identificado como uma cultura promissora para a produção de biodiesel (Santos et. al., 2015) e, tem boa adaptabilidade a solos quentes e frios sendo resistente a pragas e doenças, com um teor de óleo de cerca de 35% (Rosa et. al., 2014).

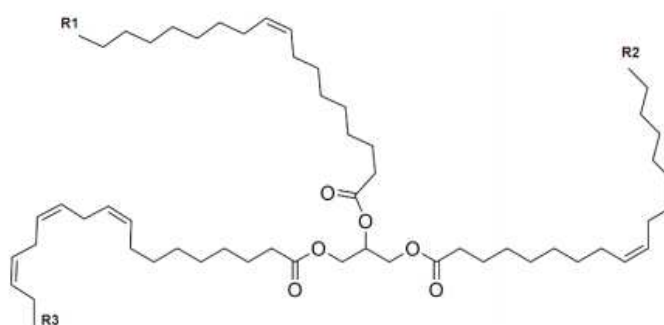
É considerada uma planta robusta, conseguindo se desenvolver em condições climáticas antagônicas, suportando desde geadas até climas quentes e secos, mostra-se ainda como uma boa alternativa para ser cultivada na safrinha no Centro-Oeste (Viecelli, et al., 2016). No Brasil, é semeado entre março a maio, podendo se estender a junho. Quando a semeadura ocorre neste último mês,

devido ao curto ciclo, o crambe pode aparecer como uma terceira safra (entre as safras de inverno e verão) (VIANA *et al.*, 2012).

O óleo extraído do Crambe pode ser aproveitado para diversos fins, como, produção de biodiesel (Bassegio *et. al.*, 2016; Wazilewski *et. al.*, 2013; Mello *et. al.*, 2017), lubrificante (Santos *et. al.*, 2015; Santos *et. al.*, 2013), inibidor (Santos *et. al.*, 2013), fabricação de borracha (Santos *et. al.*, 2013), na indústria de plástico e adesivos (Rogério *et. al.*, 2013; Santos *et. al.*, 2015) e como isolante elétrico (Rogério *et. al.*, 2013).

Como mencionado no item 2.3, o óleo de Crambe é constituído por moléculas de triglicerídeos. O que muda dele para os demais óleos é o tamanho da cadeia carbônica que compõe os ácidos graxos das suas moléculas e a presença ou não de insaturações. A Figura 8 representa a molécula básica da composição de óleos vegetais.

Figura 8: Estrutura geral de um Triglicerídeo.



Fonte: MELO (2010)

O óleo de Crambe apresenta em sua composição cerca de 50 a 60% de ácido erúxico (Lara-Fioreze *et. al.*, 2013; Bassegio *et. al.*, 2016; Rogério *et. al.*, 2013), este ácido contém 22 átomos e apenas uma ligação dupla (Figura 1). O ácido erúxico (C22:1) apresenta diversas aplicabilidades na indústria química devido propriedades como, ponto de inflamação baixo e boas qualidades de combustão e lubrificação (Bassegio *et. al.*, 2016).

Devido à elevada concentração de ácido erúxico em sua composição, o óleo de Crambe não é adequado para consumo humano. Esse ácido graxo é tóxico,

causando doença cardíaca através de níveis de colesterol aumentados e lipídose nos tecidos do coração (Mello et. al., 2017). Com isso, o óleo de Crambe deve ser utilizado apenas para fim das indústrias químicas e de energia. A Tabela 5 traz a composição de ácidos graxos presentes no óleo de Crambe.

Tabela 5: Composição de ácidos graxos na composição do óleo de Crambe.

Fonte	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	C22:1
Crambe	2,0	0,7	18,0	9,4	6,5	0,8	2,0	55,9

Fonte: OLIVEIRA et. al., (2015)

O óleo de Crambe apresenta elevada concentração de ácidos graxos monoinsaturados, o que lhe confere uma estabilidade oxidativa maior quando comparada a outros óleos. Nos estudos de Wazilewski *et.al.*, (2013), foram obtidos biodiesel de óleos de soja e crambe, sabe-se que o biodiesel apresentará as características do óleo vegetal de origem, assim, por apresentar uma composição de ácidos graxos com menor concentração de insaturação, o biodiesel derivado do óleo de Crambe apresentou estabilidade oxidativa maior em testes de oxidação acelerada utilizando o equipamento Rancimat®.

Estudos como de Bassegio et. al., 2016; Wazilewski et. al., 2013 e Mello et. al., 2017, destacam a utilização dos óleos vegetais para produção do Biodiesel, incluindo o óleo de Crambe, como uma espécie promissora devido às suas propriedades químicas.

Devido a sua composição química ter elevada concentração de ácido erúico, o óleo de Crambe apresenta uma alta estabilidade oxidativa, e compostos ativos, como tocoferóis e fitoesteróis (Trentini, et. al., 2020). Essas propriedades conferem ao óleo outras aplicações, sendo uma delas o seu uso como fluido isolante. Bassegio et. al., (2016) ressaltaram o uso do óleo de Crambe como fluido isolante, indo de encontro com o objetivo desta pesquisa que é avaliar o uso desse óleo como fluido isolante em transformadores elétricos.

2.4 Características físico-químicas e dielétricas dos óleos vegetais isolantes

O óleo mineral isolante é o fluido mais utilizado em sistemas de isolamento elétrico. Para que seja substituído, o novo óleo precisa demonstrar eficácia e, propriedades químicas, físicas e dielétricas adequadas para uso nos equipamentos elétricos.

Um fluido isolante precisa atender especificações técnicas que visam melhor desempenho do transformador e garanta a durabilidade do equipamento durante seu funcionamento. A Norma ABNT NBR 15422 “óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos”, publicada em 2006 e reformulada em 2015, trata das especificações físico-químicas e dielétricas para fluidos novos de origem vegetal. As propriedades e os valores limites encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de Referência para testes de caracterização físico-química para óleo vegetal isolante novo

Características	Unidade	Método do ensaio	Valor Referência	
Aspecto Visual	-	-	Claro, límpido e isento de materiais em suspensão.	
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máx	
Densidade relativa à 20 /4 °C	-	ABNT NBR 7148	0,96 máx	
Viscosidade Cinemática	cSt	ABNT NBR 10441	20 °C	150 máx
			40 °C	50 máx
			100 °C	15 máx
Ponto de Fulgor	°C	ABNT NBR 11341	275 mín	
Ponto de Combustão	°C	ABNT NBR 11341	300 mín	
Ponto de Fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 10 máx	
Rigidez dielétrica	kV	ABNT NBR 6869	30 mín	
		ABNT NBR IEC 60156	42 mín	
Rigidez dielétrica a impulso	kV	ASTM D 3300	130 mín	
Fator de perdas dielétricas	%	ABNT NBR 12133	25 °C	0,20 máx
			90 °C	3,6 máx
			100 °C	4,0 máx

Enxofre corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo
Índice de neutralização	mg KOH/ g óleo	ABNT NBR 14248	0,06 máx
Teor de água	mg/Kg	ABNT NBR 10710 B	200
Teor de PCB (bifenila policlorada)	mg/Kg	ABNT NBR 13882	Não detectável

Fonte: ABNT NBR 15422 (2015)

Esses testes conferem segurança quanto ao uso do óleo e são importantes para garantir o bom funcionamento dos equipamentos que estarão operando com um fluido vegetal isolante.

A Norma ABNT NBR 15422 determina que o óleo vegetal novo seja submetido aos testes de aspecto visual, cor, densidade, viscosidade, ponto de fulgor, ponto de combustão, ponto de fluidez, rigidez dielétrica, fator de perdas dielétricas, enxofre corrosivo, índice de neutralização, teor de água e teor de PCBs (Bifenilas policloradas).

A viscosidade cinemática do óleo refere-se à sua fluidez. Os fluidos destinados ao isolamento elétrico precisam ser capazes de fluir sob condições climáticas extremamente frias (Abdelmalik et. al., 2011). Um óleo que em baixas temperaturas se torna muito viscoso, poderá acarretar entupimento dos componentes do equipamento, podendo interferir na refrigeração do mesmo.

O teste de ponto de fluidez também está relacionado com a fluidez do líquido isolante. Neste teste é determinada a menor temperatura no qual o material pode ser resfriado sem limitar seriamente seu grau de circulação no equipamento (Stocco, 2009).

A inflamabilidade do óleo do transformador é uma grande preocupação, pois, houve muitos casos de explosões de transformadores resultando em incêndios extensos que são difíceis de extinguir (Rafiq et. al., 2015). Os testes de Ponto de Fulgor e Combustão estão relacionados com a segurança contra incêndio do fluido isolante durante a operação do equipamento. O Ponto de Fulgor é a temperatura em que o óleo desprende seus primeiros vapores, enquanto que o Ponto de Combustão é a temperatura em que inflama toda sua superfície por mais de cinco segundos.

Portanto, quanto mais elevada for a temperatura obtida para um fluido isolante nos testes de ponto de fulgor e ponto de combustão, menor será o risco de incêndio.

Determinar a rigidez dielétrica de óleos significa medir a qualidade de um material como isolante. Nesse teste, um campo elétrico é aplicado sobre a superfície do material analisado, analisando o valor em que os átomos deste material sofrem ionização deixando de atuar como isolante. Outra propriedade elétrica importante dos óleos vegetais é seu fator de potência (ou perdas), esse mede as perdas dielétricas no óleo. É determinado em porcentagem e, quanto menores as perdas melhores será o óleo. Comparando com o óleo mineral, os óleos vegetais apresentam, geralmente, o fator de potência mais elevado (Stocco, 2009).

A presença de impurezas no óleo pode danificar o equipamento elétrico diminuindo sua vida útil além de acelerar o processo de degradação do óleo, que poderá perder suas propriedades isolantes acarretando em danos ao equipamento. Os compostos contendo enxofre corrosivo estão presentes, naturalmente, na composição química dos óleos minerais e são responsáveis por várias falhas nos equipamentos, pois, reagem com o Cobre formando sulfato de cobre, substância oriunda da deterioração do elemento que é gerada nas falhas do equipamento (Tulio, 2008). Para quantificar esses compostos nos óleos vegetais é realizado o teste de enxofre corrosivo.

A presença de água no óleo vegetal isolante acarreta na sua degradação, onde poderá ocorrer a hidrólise dos triacilglicerídeos com produção de ácidos graxos livres (Tulio, 2008). Como já mencionado no item 2.3, devido a característica polar das estruturas que o constituem, o óleo vegetal tende a apresentar teor de água mais elevado que o óleo mineral. Esse maior teor de água poderá acelerar a degradação do óleo e, também, dos componentes internos do transformador.

As bifenilas policloradas são compostos que pertencem à classe dos organoclorados, estavam presentes nos óleos do tipo ascaréis, muito utilizados como isolantes em equipamentos, porém, são indesejáveis e proibido por leis devido aos possíveis riscos à saúde e à comprovada influência não sustentável ao meio ambiente (Leopoldino, 2011). Para quantificar o teor de PCB presente no óleo vegetal é realizado um teste específico e, para ser utilizado como fluido isolante, esses compostos devem estar em níveis não detectáveis.

Por fim, o teste de índice de neutralização determina a quantidade de compostos ácidos presentes no óleo. Esses compostos aceleram a degradação do óleo e, é desejável um baixo índice de acidez para diminuir a condução elétrica e a corrosão dos metais presentes no sistema que estará isolando (Stocco, 2009).

Os óleos vegetais isolantes precisam atender às especificações disponíveis na Tabela 6. Naturalmente, esses óleos não apresentam propriedades adequadas para utilização em transformadores, sendo necessários tratamentos físico-químicos para adequá-los, como, processos de refino (filtração, degomagem, neutralização, desumidificação e aditivação) ou serem submetidos a reações orgânicas de ácidos com álcoois (Rafiq et. al., 2015).

Os óleos vegetais isolantes ainda podem ser testados seguindo a metodologia da Norma ABNT NBR 16431, em que se determina a compatibilidade do óleo vegetal isolante com os componentes internos do transformador em que estará em contato durante o funcionamento do equipamento, como a borracha nitrílica, o papel kraft, o fio de cobre, a tinta de revestimento interno e o aço silício.

Segundo essa norma, após o envelhecimento acelerado do óleo na presença de amostras dos componentes internos do transformador, é possível observar se o óleo sofreu alguma degradação. O resultado do teste sugere se o óleo é compatível ou incompatível com os materiais internos do transformador e ajuda a prever se o óleo terá um bom desempenho durante sua atuação como isolante elétrico.

Os testes indicados pela ABNT nas NBR 15422 e 16431 foram realizados com o óleo de Crambe e materiais em contato com esse óleo vegetal nos transformadores elétricos. Estes testes foram realizados para avaliar se este apresenta características físico-químicas e dielétricas para atuar como fluido isolante.

3 METODOLOGIA: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção da matéria-prima

Os grãos de Crambe foram obtidos do plantio na Fazenda Escola do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz na Cidade de Cascavel/PR e levados até o Laboratório de Oleoquímica do Centro Universitário FAG para extração do óleo vegetal bruto e, posteriormente, ser submetido ao refino.

3.1.1 Extração do óleo de Crambe

Foi utilizado o processo de extração mecânica. Para realizar a extração do óleo vegetal do Crambe foi utilizado uma prensa com um sistema mecânico que segundo a Fundação MS (2010) fornece 25% de óleo bruto dos grãos do Crambe. Para essa etapa do projeto foi empregado um conjunto de equipamentos fornecido pela Empresa Granjatec, formado por uma extrusora modelo EXTRUDER TEC SLIM 2000 e uma prensa modelo SOFTPRESS TEC SLIM 2000, que realiza a extração de óleo no sistema contínuo a frio e a seco, ou seja, sem uso de vapor ou cozimento e sem uso de solventes. A capacidade de prensagem é de 2000 Kg/h.

A extrusão empregada nesta etapa do projeto é denominada de STHT (*Short Time High Temperature*). Para tal, os grãos de Crambe entram na extrusora através de uma caixa alimentadora que quando completamente cheia, e dada a partida dos motores e inicia o processo. O processo de extrusão consiste-se na passagem do grão por um conjunto de roscas helicoidais com uma série de restrições, o que proporciona um aumento de pressão e temperatura, ocorrendo a extrusão dos grãos e formando uma espécie de massa efervescente.

A Figura 9 mostra o conjunto de extrusora, rosca alimentadora e prensa utilizados na extração do óleo de Crambe. E a Figura 10 está demonstrando a massa efervescente formada pelos grãos que já passaram pelo processo de extrusão.

Figura 9: Conjunto de extrusora, rosca alimentadora e prensa utilizados na extração do óleo



Fonte: Próprio autor

Figura 10: Processo de extrusão do óleo de Crambe



Fonte: Próprio autor

Após o processo de extrusão, a massa de grãos efervescente é transportada para a prensa pela rosca alimentadora (Figura 11). Os grãos extrusados entram na prensa onde sofrem o processo de compressão (prensagem). O óleo obtido desse

processo flui para o decantador (Figura 12), a partir do qual é bombeado para tanques de armazenamento. Também, desse processo é obtido a torta que é recolhida (Figura 13) e utilizada para diversos fins, como exemplo, ração para determinados animais.

Figura 11: Rosca alimentadora



Fonte: Próprio autor

Figura 12: Decantador do óleo bruto de Crambe



Fonte: Próprio autor

Figura 13: Torta originada do processo de extração do óleo de Crambe



Fonte: Próprio autor

3.1.2 Caracterização Físico-Química e Dielétrica do óleo de Crambe

O óleo de Crambe foi caracterizado seguindo as especificações das normas ABNT NBR 15422 de 2016 (Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos) e ASTM D6871. Essas normas determinam quais os testes que devem ser realizados com o óleo para averiguar se o óleo apresenta as características para uso nos transformadores.

A fim de comparação, foram realizados os testes de caracterização do óleo de crambe com uma amostra do óleo bruto e com uma amostra do óleo refinado. Assim, foi possível analisar como alterou as características do óleo com os processos envolvidos nas etapas de refino. As análises físico-químicas e dielétricas do óleo após o refino são importantes para avaliar se o óleo atende as especificações determinadas pela norma ABNT NBR 15422 e ASTM D6871 para ser utilizado como fluido isolante em transformadores elétricos.

Os testes realizados para caracterizar o óleo bruto e refinado do crambe estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7: Características físico químicas do óleo vegetal isolante, de acordo com NBR 15422 e ASTM D6871.

ENSAIOS	UNIDADES	METODO	METODO	ASTM D6871/
		ASTM D6871	NBR 15422	NBR 15422
Aspecto visual		D1524	Visual	Límpido
Bifenilas Policloradas (PCB)	mg/kg	D4059	13882	Não detectável
Cor		D1500	14483	1,0 máximo
Densidade a 20/4 °C	g/cm ³	ISO3675	7148	0.96 máximo
Enxofre corrosivo		D1275	10505	Não corrosível
Fator de Potência a 25 °C	%	D924	12133	0,2 máximo
Fator de Potência a 100 °C	%	D924	12133	4,0 máximo
Índice de neutralização	mg KOH/g	D974	14248	0,06 máximo
Ponto de combustão	°C	D92	11341	300 mínimo
Ponto de fluidez/ nevoa	°C	D97	11349	-10 máximo
Ponto de Fulgor	°C	D92	11341	275 mínimo
Rigidez dielétrica (Calota)	Kv/2,5 mm	IEC60156	60156	42 mínimo
Rigidez dielétrica (Disco)	Kv/2,5 mm	D877	6869	30 mínimo
Teor de agua	ppm	D1533	10710-B	200 máximo
Viscosidade cinemática a 40 °C	cSt	D445	10441	50 máximo

Fonte: o próprio autor.

3.1.2.1 Aspecto visual

O aspecto visual é realizado pela observação visual do óleo em frasco transparente e limpo segundo a NBR 15422. Neste teste o óleo precisa estar límpido e isento de impurezas sólidas.

3.1.2.2 Cor

Para o teste de cor, a amostra de óleo foi colocada em equipamento colorímetro no recipiente de ensaio e usando uma fonte de luz padrão foi comparada com padrões coloridos que possuem cor na faixa de valores de 0,5 a 8,0. Essa metodologia segue

as normas NBR 14483 e ASTM D1500. Neste teste a cor máxima permitida para os óleos vegetais isolantes e de 1,0.

3.1.2.3 Densidade a 20/4 °C

A determinação da densidade se deu por prévio aquecimento da amostra até a temperatura de 20 °C, após transferiu-se a amostra para uma proveta e então mergulhou-se o densímetro, deixando-o flutuar, ambos em temperaturas similares à amostra. Após alcançar a temperatura de equilíbrio, anotou-se a densidade e a temperatura da amostra de óleo.

O teste de densidade segue o método descrito em ISO3675 e NBR 7148 e o valor máximo permitido para os óleos vegetais isolantes e de 0,96.

3.1.2.4 Viscosidade cinemática a 40 °C

O teste de viscosidade foi realizado conforme método descrito nas normas ASTM D445 E NBR 10441 e o valor máximo de referência e de no máximo 50 cSt. Para a viscosidade da amostra preparou-se banho com a temperatura de 40 °C. Com auxílio de um viscosímetro limpo e calibrado, o óleo foi transferido para a vidraria determinando a viscosidade cinemática do mesmo.

3.1.2.5 Ponto de fluidez / nevoa

O ponto de fluidez é a menor temperatura em que o óleo é capaz de manter as características de fluidez. Foi realizado segundo a Norma ABNT NBR 11349 e ASTM D97 e o valor referência e de -10 °C, no máximo.

Nessa análise, a amostra de óleo foi resfriada com o propósito de formar pequenos cristais de parafina. O teste começou quando atingiu a temperatura 0 °C. Então, inclinou-se o frasco para verificar o escoamento do líquido sob influência da gravidade. Se o conteúdo ficasse imóvel, o recipiente era deixado na posição

horizontal por, aproximadamente, 5 segundos. Não havendo escoamento, a temperatura é aumentada em mais 3 °C. Porém, se quando o frasco fosse inclinado e o óleo não escorreu sem dificuldades, a temperatura era diminuída em 3 °C. Esses procedimentos eram realizados até a determinação da menor temperatura que o óleo ainda era fluido.

3.1.2.6 Ponto de fulgor

Este teste foi realizado utilizando os métodos da NBR 11431 e da ASTM D92. E o óleo deve apresentar valor de referência de 275 °C, no mínimo.

O ponto de fulgor foi realizado utilizando o aparelho de Cleveland, onde foi preenchida a cuba do aparelho com a amostra. Passou-se então ao aquecimento do conjunto até acontecer o primeiro lampejo de uma chama na superfície da amostra. Anotando a temperatura nesse instante.

3.1.2.7 Ponto de combustão

O teste para determinar a temperatura de combustão segue a mesma metodologia do teste de ponto de fulgor. Para determinar o ponto de combustão, prossegue-se com o ensaio até que a aplicação da chama de ensaio provoque a ignição e sustentação da queima do óleo por no mínimo 5 segundos. Ou seja, a cuba do equipamento de Cleveland foi preenchida com óleo e o conjunto foi ao aquecimento até a ignição.

Neste teste, o valor de referência é de no mínimo 300 °C. Ressaltando que quanto maior a temperatura obtida neste teste, maior segurança o óleo apresentará durante a sua operação.

3.1.2.8 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica mede o quanto de campo elétrico que o óleo suporta antes de se tornar um condutor, ou seja, de perder suas propriedades de isolante elétrico. Assim, quanto maior for a rigidez dielétrica de um material, maior sua característica de isolante elétrico. O teste consiste em aplicar aos eletrodos (do tipo calota e disco) uma tensão crescente, sendo o aumento da tensão regular e automático, até o valor que produz o “*breakdown*” (tensão atingida em que ocorre o primeiro arco entre os eletrodos).

Este teste foi realizado conforme os métodos IEC60156 e NBR 60156, para a rigidez dielétrica de calota e ASTM D877 e NBR 6869 para a rigidez dielétrica de disco. Os valores de referência são 42 e 30 kv / 2,5 mm para calota e disco, respectivamente.

Neste teste, a amostra de óleo foi colocada entre os dois eletrodos padrão do equipamento e submetidos a incrementos constantes de tensão alternada até que ocorra a ruptura do meio isolante e a consequente descarga entre os eletrodos. Anotando o valor obtido.

3.1.2.9 Fator de perdas dielétricas a 25 e 100 °C

O teste de fator de potência foi realizado conforme métodos descrito na NBR 12133 e ASTM D924. Nas temperaturas de 25 e 100 °C. E os valores de referência são de 0,2, no máximo, para a temperatura de 25 °C e 4,0, no máximo, para a temperatura de 100 °C.

Para realizar o teste do fator de perdas dielétricas, o óleo é inserido na célula dentro do equipamento e é submetido a um campo elétrico em corrente alternada. A análise do fator de perdas dielétricas (ou fator de dissipação) é um instrumento útil no controle de qualidade do óleo, sendo indicativo de contaminação do óleo. O teste foi realizado nas temperaturas de 25 e 90 °C.

3.1.2.10 Índice de neutralização

O teste de índice de neutralização foi realizado conforme métodos descritos na NBR 14248 e na ASTM D974. O óleo analisado não pode exceder 0,06 mg KOH/ g de óleo.

O índice de neutralização foi realizado utilizando o equipamento de titulação automática da marca Metrohm® (Figura 9). Para realização do teste, 3g da amostra foi dissolvida em 80mL de solução de tolueno e álcool isopropílico (1:3) e após é titulada com solução padrão de KOH, conforme demonstrado na Figura 14.

O óleo bruto tem por característica ser ácido, a titulação com uma solução básica permite determinar a acidez do óleo através da reação de neutralização que ocorre entre o padrão e as substâncias ácidas do óleo.

Figura 14: Aparelho para determinar o índice de acidez



Fonte: o próprio autor

3.1.2.11 Teor de umidade

O teor de umidade é realizado conforme métodos descritos na NBR 10710-B e ASTM D1533 e pode apresentar um valor máximo de 200 ppm de umidade.

Para determinar o teor de água presente no óleo foi utilizado o titulador coulométrico de Karl Fischer da marca Metrohm® (Figura 15). Preencheu-se uma

seringa com a amostra de óleo e determinou-se a massa do conjunto. Então colocou a amostra no titulador Karl Fischer e determinou-se o teor de água.

A titulação Karl Fischer se baseia na redução do iodo pelo dióxido de enxofre, em presença de água. Em princípio, ocorre a seguinte reação química:

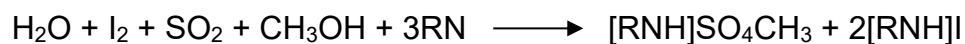


Figura 15: Equipamento Titulador Karl Fischer



Fonte: o próprio autor.

3.1.2.12 Enxofre corrosivo

Para o enxofre corrosivo a metodologia foi a Norma ABNT NBR 10505 e ASTM D1275. O óleo testado precisa ser não corrosivo. Para realizar o teste, preparou-se uma lâmina de cobre e colocou-a dentro de um frasco contendo 250 mL de óleo. Borbulhou-se gás N_2 e levou o frasco a aquecimento por 1 hora na temperatura de $140\text{ }^\circ\text{C}$. Após, retirou-se a lâmina e analisou a placa de cobre.

3.1.2.13 Teor de PCB

Para determinar o teor de PCB, a amostra de óleo isolante é tratada para eliminação de interferentes e analisada por cromatografia gasosa. O resultado é obtido pela comparação de áreas obtidas no cromatograma com a análise prévia de soluções-padrão em curvas de calibração, obtidas nas mesmas condições.

O teste é realizado conforme metodologia da NBR 13882 e ASTM D4059. No óleo vegetal isolante, o teor dessas substâncias deve ser não detectável.

3.1.3 Processo de Refino do óleo de Crambe

O refino de óleos vegetais consiste nas etapas de filtração, degomagem, neutralização, branqueamento e aditivação. Para realizar o refino do óleo bruto de crambe obtido na etapa anterior, foi utilizado uma unidade de refino adquirida pela empresa ERCITEC, sendo composta por um reator aberto, um reator fechado, dois filtros prensam, uma centrífuga de rotor, uma unidade de vácuo e diversas motobombas de engrenagem. Essa planta de refino de óleos para pesquisa está localizada no Laboratório de Oleoquímica do Centro Universitário FAG campus de Cascavel/PR. A Figura 16 demonstra a unidade de refino utilizada.

Figura 16: Unidade de refino utilizada para as etapas de refino do óleo de Crambe



Fonte: O próprio autor.

Primeiramente o óleo bruto de Crambe foi filtrado através do filtro prensa com vazão de aproximadamente 200 L/h para retiradas de impurezas sólidas e bombeado para o reator aberto onde foi realizada a degomagem. Dentro do reator aberto, o óleo foi aquecido até uma temperatura de 80 °C. Para aquecer o óleo utilizou-se o vapor proveniente de uma caldeira que circula na serpentina do reator. Ao atingir a temperatura de 80 °C, adicionou-se um volume de água de cerca de 2% do volume de óleo e agitou-se a mistura durante alguns minutos até a formação de uma “goma”. Para separar a goma formada do óleo utilizou-se uma centrífuga. Esse procedimento foi repetido quatro vezes para retirar o máximo de impurezas possível do óleo bruto.

Após a degomagem, o óleo foi então neutralizado. No laboratório uma amostra de cerca de 100mL do óleo degomado é neutralizado com diferentes concentrações de NaOH para determinar a melhor quantidade a ser adicionada no volume maior de óleo. Dentre as quantidades avaliadas, observou-se que uma quantidade de 3 a 4% de NaOH para neutralizar o óleo seria o ideal, contudo, para a neutralização total da amostra de óleo no reator, foi necessário dividir o processo em duas etapas e, em cada uma adicionou-se 2% de NaOH ao óleo pré-aquecido a 80 °C. Formou-se uma borra (com aspecto de sabão) que foi retirado por centrifugação. Após, o óleo é submetido a aquecimento superior a 100 °C no reator fechado. A umidade formada é retirada pela bomba de vácuo. O óleo neutralizado e desumidificado foi armazenado em reator fechado até iniciar a etapa de branqueamento.

O branqueamento do óleo de crambe foi realizado empregando uma percoladora preenchida com terra filler (ultra clear). O óleo foi aquecido a 50 °C e, então, passa pelo material adsorvente que é uma etapa que visa remover algumas impurezas solúveis do óleo, como, corantes, gomas residuais, sabões e fosfolípidos. Nessa etapa foi avaliado o fator de potência do óleo, quando não atingido o valor especificado na NBR 15422 (inferior a 3,6%), o material adsorvente era substituído e o óleo circulava novamente pela percoladora. Para retirada de água remanescente no óleo, este foi aquecido a 60 °C e circulado no termo vácuo até que o teor de água ficasse inferior a 200 ppm.

Para saber o teor de água do óleo nesta etapa do refino, uma alíquota do óleo de Crambe era retirada e levada ao laboratório para realizar o teste Karl Fisher. Após atendido esses parâmetros o óleo foi aditivado com TBHQ (tert-Butylhydroquinone)

para melhorar a sua estabilidade termo-oxidativa. Nesta etapa, o antioxidante era pesado em balança analítica e a quantidade referente a 3% do peso do óleo a ser aditivado, era adicionada ao óleo. Após era agitado para a mistura do antixiodante e, então, o óleo estava pronto.

Após as etapas de refino, foram realizadas análises físico-químicas e dielétricas em uma amostra do óleo de Crambe, a fim de determinar se este apresentava propriedades adequadas para atuar como fluido isolante em transformadores. Os testes foram realizados conforme a Norma ABNT NBR 15422 de 2015, conforme descrito no item anterior.

3.2 Testes de Compatibilidade com os componentes internos do Transformador

O teste de compatibilidade foi realizado conforme descrito na norma ABNT NBR 16431 (Equipamento Elétrico – Determinação da compatibilidade de materiais empregados com óleo vegetal isolante). Os componentes internos testados foram o papel kraft, a borracha nitrílica, o aço silício, a tinta de revestimento interno e fio de cobre. Os materiais testados foram fornecidos pelas empresas fabricantes dos equipamentos TOSHIBA: regulador de tensão e CONTRAFO: transformadores de distribuição e potência.

Primeiramente os materiais papel kraft, a borracha nitrílica, o aço silício, a tinta de revestimento interno e fio de cobre foram secos em estufa a 105 °C durante 16 horas. Após, foram retirados da estufa e colocados em dessecadores por um período de 4 horas para resfriamento à temperatura ambiente, conforme descrito na NBR 16431.

Os materiais secos, papel kraft, a borracha nitrílica, o aço silício, a tinta de revestimento interno e fio de cobre, foram imersos nos frascos âmbar contendo o óleo vegetal de Crambe atendendo os limites requeridos para óleos vegetais isolantes novos que estão especificados na NBR 15422 e demonstrados na Tabela 10.

Borbulhou-se gás nitrogênio grau super seco com pureza de 99,96% por 10 minutos em cada frasco, a uma vazão de 1L/min, conforme NBR 16431. Os frascos foram fechados e levados à estufa para envelhecimento que foi realizado a uma temperatura de 100 °C por 164 horas. Realizou-se os testes em duplicata e preparou-

se, também, uma prova em branco (sem os materiais internos), apenas com óleo. As proporções utilizadas encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8: Proporções utilizadas no teste de compatibilidade do óleo de Crambe

Material Utilizado	Proporção
Papel Kraft	52 cm ² e 800 mL do óleo
Borracha Nitrílica	65 cm ² e 800 mL do óleo
Tinta de revestimento interno	1300 cm ² de placas pintadas e 800 mL do óleo
Fio de Cobre	1300 cm ² e 800 mL do óleo
Aço-Silício	6200 cm ² e 800 mL do óleo

Fonte: ABNT NBR 16431

Ao final do envelhecimento, os frascos foram retirados da estufa, aguardou-se até atingir a temperatura ambiente e retirou, com auxílio de pinças, os materiais (papel kraft, borracha nitrílica, fio de cobre, tinta de revestimento interno e aço silício) de dentro dos frascos. Cada material ficou imerso em um frasco contendo o óleo.

As amostras de óleos foram submetidas aos testes de fator de perdas dielétricas a 90 °C, conforme norma ABNT NBR 12133, determinação do índice de neutralização, conforme ABNT NBR 14248, ensaio de viscosidade a 40 °C, conforme ABNT NBR 10441, ensaio de cor, conforme ABNT NBR 14483 e ensaio de rigidez dielétrica, conforme ABNT NBR IEC 60156.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Refino do Óleo de Crambe

Em cada etapa de refino foi possível utilizar uma amostra de 500 L de óleo. Após finalizada todas as etapas do refino (filtração, degomagem, neutralização, secagem, branqueamento e aditivação), uma amostra do óleo foi submetida aos testes de caracterização para averiguar se atingiu as propriedades e características determinadas pela Norma ABNT NBR 15422.

Segundo Mandarino (2001) a finalidade do processo de refino é proporcionar uma melhoria de características físico-químicas do óleo bruto, por meio da remoção de componentes indesejáveis que possam causar efeitos indesejáveis na utilização do óleo como fluido vegetal isolante. Esses componentes podem ser substâncias coloidais, proteínas, fosfatídeos, ácidos graxos livres e seus sais, ácido graxos oxidados, pigmentos (clorofila, xantofila, carotenoides), substâncias voláteis como hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas e ésteres de baixo peso molecular, entre outras substâncias inorgânicas.

4.2 Caracterização físico-química do Óleo de Crambe Refinado

A fim de determinar se o óleo de Crambe teve suas características e propriedades melhoradas para atuar como um isolante elétrico, realizou-se os testes de caracterização presentes na Norma ABNT NBR 15422 (2015) com uma amostra do óleo após as etapas de refino (filtração, degomagem, neutralização, secagem, branqueamento e aditivação) e com o óleo antes do refino (óleo bruto). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9: Análise Físico-química do óleo vegetal de Crambe conforme Norma ABNT NBR 15422

Características	Unidade	Método de Ensaio	Valor Referência	Resultado		
				Óleo Bruto	Óleo Refinado	
Aspecto visual	-	-	Claro, límpido e isento de materiais em suspensão	Apresenta tonalidade escura com materiais em suspensão	Apresenta tonalidade clara e sem materiais em suspensão	
Densidade Relativa a 20/4 °C	-	ABNT NBR 7148	0,96 máx.	0,9005	0,9190	
Viscosidade Cinemática	20 °C	ABNT NBR 10441	150 máx.	138,74	96,33	
	40 °C		50 máx.	57,28	41,68	
	100 °C		15 máx.	10,94	8,38	
Ponto de Fulgor	°C	ABNT NBR 11341	275 mín.	293	321	
Ponto de Combustão	°C	ABNT NBR 11341	300 mín.	328	354	
Ponto de Fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 10 máx.	3	-12	
Rigidez Dielétrica	Eletrodo de disco	kV	ABNT NBR 6869	30 mín.	26	48
	Eletrodo de calota		ABNT NBR IEC 60156	42 mín.	21	64
Fator de perdas dielétricas	25 °C	%	ABNT NBR 12133	0,2 máx.	2,71	0,09
	90 °C			-	-	1,65
	100 °C			-	-	2,1
Enxofre Corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo	Não corrosivo	Não corrosivo	
Índice de Neutralização	mg KOH/g óleo	ABNT NBR 14248	0,06 máx.	3,59	0,06	
Teor de água	mg/kg	ABNT NBR 10710 B	200 máx.	371	71	
Teor de PCB (Bifenila Policlorada)	mg/kg	ABNT NBR 13882	Não detectável	-	-	

Fonte: o próprio autor.

Após as etapas de refino o óleo de Crambe se apresentou mais límpido, mais translúcido e já não tinha mais a presença de impurezas sólidas. Tais melhorias podem ser observadas na Figura 17.

Figura 17: Comparação do aspecto físico entre o óleo de Crambe bruto e refinado.



Fonte: o próprio autor.

Os valores obtidos nos testes de densidade, enxofre corrosivo e teor de PCB foram mantidos no óleo bruto e após o refino. Considerando que o óleo vegetal isolante não pode conter enxofre corrosivo e, também, não pode conter quantidades detectáveis de PCB, observa-se que o óleo de crambe não apresenta tais substâncias, atendendo o estabelecido pela Norma ABNT NBR 15422. O valor da densidade, apesar de ter alterado de 0,9005 no óleo bruto para 0,9190 para o óleo após o refino, ainda assim, são valores próximos e ambos atendendo o valor de referência da NBR 15422 que é de 0,96 no máximo.

O óleo de Crambe também teve alteração na sua viscosidade após passar pelas etapas de refino. É possível observar que tanto para o óleo bruto quanto para o óleo refinado, os valores de viscosidade diminuem à medida que se aumenta a temperatura de ensaio. Após o refino os valores de viscosidade alteraram de 138,74 cSt para 96,33 cSt na temperatura de 20 °C. De 57,28 cSt para 41,68 cSt na temperatura de 40 °C e, de 10,94 cSt para 8,38 cSt na temperatura de 100 °C.

Se considerarmos que quanto maior a viscosidade de um líquido mais difícil o líquido flui, ou seja, mais viscoso ele será, observa-se que após o refino o óleo apresentou uma baixa nos valores de viscosidade, indicando que o processo

influenciou para que este óleo ficasse mais fluido e menos viscoso, diminuindo o risco de entupimento do equipamento elétrico. Pois, quanto menos viscoso for o óleo, maior será a sua fluidez e menor as chances de causar entupimentos ao equipamento ou de ter uma circulação mais lenta não conseguindo realizar as trocas de calor.

No ponto de fluidez foi possível observar que antes do refino o óleo não atendeu a especificação da NBR 15422, pois o valor máximo permitido é de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, o óleo ainda bruto apresentou um ponto de fluidez de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Após as etapas do processo de refino, observa-se que o óleo ficou mais fluido, pois, apresentou ponto de fluidez de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, atendendo ao valor de referência e sendo uma temperatura menor em que ainda se observa a fluidez do óleo. Esses dados sugerem que, o óleo de crambe refinado ainda mantém sua fluidez em temperaturas abaixo de zero enquanto que o óleo de crambe sem passar pelas etapas de refino perderá sua fluidez quando a temperatura baixar para $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A melhora também foi percebida nos testes de ponto de fulgor e ponto de combustão. Esses dois testes avaliam o desempenho do óleo frente ao aumento de temperatura, importante uma vez que o equipamento elétrico quando em funcionamento opera com temperaturas elevadas, necessitando que o óleo suporte tal elevação na temperatura.

Nesses testes, o óleo bruto já estava atendendo os valores de referência exigidos pela NBR 15422, pois apresentou ponto de fulgor de $293\text{ }^{\circ}\text{C}$ e ponto de combustão de $328\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo que os mínimos exigidos são 275 e $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Contudo, após o refino esses valores aumentaram. Observa-se que o ponto de fulgor do óleo refinado alterou para $321\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o ponto de combustão do óleo refinado alterou para $354\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Com isso, espera-se que aumente a segurança no uso do óleo, uma vez que, ao se aumentar a temperatura de combustão, entende-se que o óleo poderá aquecer até uma temperatura maior com riscos baixos de incendiar, apresentando uma maior resistência às variações de temperatura. Isso é um fator importante, pois, caso o

equipamento apresente uma falha e aqueça até uma temperatura acima do normal, o óleo conseguirá manter por um período maior a sua função de fluido e auxiliar na refrigeração desse sistema.

A rigidez dielétrica e o fator de perdas dielétricas se adequaram aos valores de referências da NBR 15422 após as etapas de refino. O óleo bruto apresentou uma rigidez dielétrica de 26 kV no eletrodo de disco e 21 kV no eletrodo de calota, enquanto que após o refino os valores de rigidez dielétrica encontrados foram de 48 kV para o eletrodo de disco e 64 kV com o eletrodo de calota. Ao compararmos com os valores de referência determinados pela NBR 15422, é possível observar que com o refino o óleo atendeu os valores mínimos necessários para aguentar a passagem de corrente elétrica pelo equipamento e ainda manter suas características de isolante elétrico.

Para o fator de perdas dielétricas, o óleo bruto apresentou valores de 2,71% na temperatura de 25 °C e, após o refino o óleo apresentou valores de 0,09, 1,65 e 2,1% nas temperaturas de 25, 90 e 100 °C, respectivamente. Para os valores de fator de perdas observa-se que o óleo bruto não apresenta o valor máximo determinado pela NBR 15422 que é de 0,2, máximo. Após o refino, o óleo testado se adequou ao valor máximo de 0,2%, com isso, sugerindo uma melhora da sua capacidade de resistir a passagem de corrente elétrica e garantindo o isolamento elétrico do equipamento.

A acidez e o teor de umidade são testes que determinam se o óleo poderá causar um dano ao equipamento e aos componentes internos deste equipamento, bem como, demonstrar se este poderá sofrer reações de degradação perdendo suas propriedades de isolamento. Os dois valores atenderam as especificações da norma apenas após o refino do óleo.

No início, o óleo se apresentava com maior teor de água que foi eliminado nas etapas de secagem durante seu processo de refino. O óleo bruto apresentava um teor de umidade de 371 ppm enquanto que após o refino o teor de água passou para 71 ppm. Uma das etapas do processo de refino é a secagem do óleo, com isso é possível

perceber que a etapa de secagem auxiliou no processo de remoção da água presente no óleo.

O óleo também apresentava substâncias que lhe concediam uma característica mais ácida, substâncias essas, que possivelmente foram neutralizadas na etapa de neutralização, uma vez que o óleo após as etapas de refino apresentou índice de acidez menor que o óleo bruto. O índice de acidez do óleo bruto era de 3,59 mg de KOH/ g de óleo, enquanto que do óleo após as etapas de refino passou para 0,06 mg de KOH/ g de óleo.

Atender todos os parâmetros determinados pela norma é de fundamental importância para que o óleo tenha as propriedades necessárias para atuar como um fluido isolante dos transformadores. Foi possível analisar que, as etapas de refino melhoraram as características do óleo, tornando-o mais resistente e menos propenso a degradação e a degradação do equipamento.

4.3 Determinação da compatibilidade de materiais empregados com óleo vegetal isolante

Os testes de compatibilidade com os componentes internos do transformador visam avaliar o comportamento do óleo quando em contato com os componentes de um equipamento, simulando as condições de funcionamento para prever se este causará algum dano ou degradação aos componentes e, se irá alterar alguma de suas características quando estiver sendo utilizado como fluido isolante.

Os óleos vegetais isolantes são compatíveis com a maioria dos materiais internos de um transformador (Franch, 2010) e, para averiguar a compatibilidade de óleos vegetais com os componentes internos do transformador, são necessários testes que avaliem os possíveis efeitos do óleo nesses materiais.

Nesta etapa da pesquisa o óleo de Crambe foi submetido aos testes de compatibilidade com os componentes internos do transformador. Esse é um teste muito importante a ser realizado, uma vez que, o óleo pode ter as características padronizadas dentro dos valores exigidos pela norma, porém, pode apresentar em sua composição substâncias que podem reagir e degradar os componentes do equipamento com os quais terá contato.

As amostras de óleo de Crambe foram coletadas do recipiente onde estavam armazenadas desde o processo de refino. E as amostras dos componentes internos foram obtidas com o fabricante do equipamento. Os componentes internos e as proporções utilizadas encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10: Quantidades e medidas dos componentes internos

Componentes Internos do Transformador	Quantidade/Medida do Componente Interno
Papel Kraft	1 placa 3,6 x 3,62 cm
Elastômero	1 placa 4,0 x 4,1 cm
Fio de Cobre	3 m x 1 mm de fio
Aço Silício	36 placas 1,3 x 10 cm cada
Tinta	2 placas 7,5 x 7,5 cm

Fonte: o próprio autor

Após submeter os óleos aos testes de envelhecimento durante 164h em estufa com os componentes internos do transformador, uma amostra de cada óleo foi retirada e, então, realizada as análises de cor, índice de neutralização, teor de umidade, viscosidade cinemática (40 °C), fator de perdas (90 °C) e rigidez dielétrica.

O teste de compatibilidade foi realizado por um período de 164 horas e, durante toda a realização do experimento foi controlado a temperatura da estufa. A Figura 13 mostra os componentes internos e a Figura 14 mostra os frascos acomodados na estufa para realização do teste de envelhecimento acelerado, já enchidos com o óleo e os componentes internos.

Figura 18: Componentes internos



Fonte: o próprio autor.

Figura 19: Frascos do experimento de compatibilidade



Fonte: o próprio autor.

Segundo a Norma ABNT NBR 16431, os valores dos testes realizados com as amostras de óleo antes de iniciar o aquecimento para o teste de contabilidade e os valores obtidos dos testes realizados após o aquecimento acelerado do teste de compatibilidade podem ter um valor máximo de variação (Tabela 11) para ser considerado compatível. As variações encontradas para as amostras de óleos testadas com os componentes internos do transformador encontram-se na Tabela 12. Um teste em branco também foi realizado a fim de ter um parâmetro de comparação. Cabe ressaltar que o índice de água não é um teste exigido pela Norma utilizada,

contudo, realizou-se o teste de umidade nas amostras para observar se houve em algum momento contaminação por água, o que pode acarretar numa degradação do óleo devido a umidade e não pela incompatibilidade com o componente testado.

Tabela 11: Variações máximas permitidas pela Norma ABNT NBR 16431

Testes	Teor de água	Viscosidade	Índice de Acidez	Fator de Perdas	Cor	Rigidez dielétrica
Variações permitidas	ppm	0,4 cSt	0,03 mg(KOH)/g	3%	0,5	10%

Fonte: o próprio autor.

Tabela 12: Variações obtidas nas amostras de óleos submetidos ao teste de compatibilidade quando comparadas ao teste em branco

Componentes Internos	Testes					
	Teor de água	Viscosidade	Índice de Acidez	Fator de Perdas	Cor	Rigidez dielétrica
Branco	91	0	0	3,5	0	2,2
Papel Kraft	123	0,2	0	4,3	0	4,3
Borracha Nitrílica	131	0,7	0	56,23	0	2,2
Tinta	106	0,4	0	30,4	0	8,7
Fio de Cobre	118	0,4	0,03	4,6	0	0
Aço Silício	113	0,2	0,01	1,9	0	8,7

Fonte: o próprio autor.

Pela análise dos resultados é possível perceber que o teste em branco apresentou variações dentro do determinado pela Norma, indicando que o teste realizado está de acordo com os padrões determinados.

Ao comparar os demais resultados com o resultado do branco, é possível observar que todas as variações estão de acordo com o permitido pela norma, exceto pelos valores obtidos nos testes de fator de perdas dielétricas do óleo com os componentes papel kraft, borracha nitrílica, tinta e fio de cobre. A viscosidade no teste do óleo com a borracha nitrílica também teve valor superior ao exigido pela norma.

Esse é um teste realizado para indicar possível contaminação do óleo por água ou outra impureza que possa acarretar em danos ao óleo e ao equipamento. O fator de perdas dielétricas teve alteração em todos os componentes internos, exceto no aço silício, podendo sugerir que houve alguma contaminação das amostras, o que acarretou nessa variação. É possível observar que no teste do óleo com a borracha nitrílica foi o que apresentou maior teor de água e, também, o que apresentou maior variação do fator de perdas dielétricas. É possível observar que foi nesse mesmo teste em que a viscosidade sofreu alteração acima do permitido pela norma. Porém, deve-se ressaltar que o limite permitido de umidade no óleo isolante é de 200 ppm. Assim, mesmo tendo sido o teste que mais aumentou o teor de umidade do óleo (131 ppm), ainda assim esteve abaixo do limite máximo exigido para o óleo isolante.

Segundo Moreira (2000), do ponto de vista químico, a corrente dissipada através do líquido, fornece indiretamente a porcentagem de produtos polares e de partículas metálicas e está, também, relacionada com a quantidade de energia dissipada pelo material sob a forma de calor. Um fator que pode influenciar na alteração do fator de perdas dielétricas de um isolante pode ser o teor de umidade presente no óleo ou no meio. A umidade, mesmo que em pequenas quantidades, pode prejudicar as características isolantes dos líquidos, diminuindo a sua rigidez dielétrica e aumentando o fator de perdas dielétricas (Moreira, 2000).

Mesmo tendo aquecido os componentes internos antes de realizar os testes de envelhecimento, pode ser que tenha permanecido resquícios de água na borracha nitrílica que em contato com o óleo pode ter acelerado a sua degradação alterando o fator de perdas dielétricas.

Contudo, é importante destacar que as demais propriedades do óleo (como o índice de neutralização, cor e rigidez dielétrica) se mantiveram dentro do esperado e permitido pela normativa utilizada, assim, o maior teor de água no teste com a borracha nitrílica pode ser uma possibilidade da elevação do fator de perdas dielétricas e da viscosidade do óleo, porém, pode não ter relação e, os resultados, indicar uma

incompatibilidade com o óleo testado, uma vez que a elevada umidade ao degradar o óleo era esperado que ocorresse variação nas demais variáveis testadas.

É importante que o óleo seja compatível com os componentes internos do transformador, pois estes estarão em contato direto quando o equipamento estiver em funcionamento. E, quando há incompatibilidade, o óleo começa a degradar perdendo suas propriedades de fluido isolante, bem como podem degradar os componentes internos causando danos ao equipamento.

Segundo Silveira *et. al.*, (2021), o tempo de vida de um transformador está relacionado com o seu sistema de isolamento, seu material de isolação e processo de fabricação do material. As características desse sistema dependem da geometria do condutor, composição do dielétrico, gradiente de temperatura e características de todos os materiais combinados. Esse sistema é impreciso, uma vez que a geometria do condutor varia, a temperatura de operação do material isolante é indeterminada e os esforços causados pelos transitórios de tensão também são indeterminados.

Por fim, testes de compatibilidade são importantes e auxiliam na previsão do comportamento desses óleos quando estiverem exercendo a função de isolante. É possível avaliar se este conseguirá manter suas propriedades isolantes e se não estará comprometendo o funcionamento adequado do equipamento ao reagir ou degradar algum dos componentes internos.

CONCLUSÃO

O óleo vegetal de crambe surge no cenário de energias renováveis como uma fonte alternativa e com aplicações para produção de biodiesel e, como fluido isolante para transformadores elétricos. Este trabalho buscou avaliar o uso do óleo de crambe como fluido vegetal isolante em transformadores elétricos e, pelos dados obtidos constatou-se que, após passar pelas etapas de refino, apresentou características físico-químicas, como índice de acidez, umidade, viscosidade, fluidez, ponto de fulgor e combustão; assim como, propriedades dielétricas, como rigidez e fator de perda compatíveis com óleo mineral isolante utilizado em transformadores, com a vantagem ambiental de não conter bifenilas policloradas.

Também, apresentou bom desempenho nos testes de acidez, em que os valores variaram de 0 a 0,03%, dentro do limite proposto pela NBR 16431, na rigidez dielétrica em que as variações se mantiveram abaixo do máximo permitido para a variação de 10%, viscosidade com variações 0 e 0,4 cSt para os testes com todos os componentes, exceto a borracha nitrílica e no teste de cor que não houve variação para nenhuma das amostras de óleo com os componentes internos testados, mesmo após ser submetido ao envelhecimento acelerado para teste de compatibilidade conforme NBR 16431 do óleo em contato com os materiais no interior do transformador (papel kraft, aço silício, fio de cobre, elastômero e tinta de revestimento interno).

Porém, apresentou variação do fator de potência de 4,3% com o papel kraft, 56,23% com a borracha nitrílica (elastômero), 30,4% com a tinta de revestimento interno e 4,6% com o fio de cobre, sendo que foram acima da variação máxima permitida pela norma ABNT NBR 16431. Conforme o disposto por essa norma, a variação máxima permitida é de 3% em comparação ao teste em branco.

Esses dados podem sugerir uma baixa estabilidade do óleo de Crambe, o que acarretou em variação no seu quando em contato com o papel kraft, a tinta, o elastômero e o fio de cobre, contudo, cabe ressaltar que no caso de uma baixa estabilidade térmica e oxidativa, os testes de acidez, rigidez, cor e viscosidade também teriam sido afetados. Ou, ainda, como o fator de perdas alterado sugere a presença de impurezas no óleo, as variações observadas nos valores de fator de

potência podem sugerir uma contaminação das amostras, como a presença de substâncias formadas durante o ensaio de compatibilidade ou pela presença de umidade e contato com o ar atmosférico durante os ensaios.

Por fim, o óleo de Crambe apresentou as propriedades de um isolante elétrico e poderia ser uma alternativa ao óleo mineral isolante.

REFERÊNCIAS

ABDELMALIK, A.A.; ABBOTT, A.P.; FOTHERGILL, J.C.; DODD, S.; HARRIS, R.C. Synthesis of a base-stock for electrical insulating fluid based on palm kernel oil. **Industrial Crops and Products**, v. 33, p. 532-536, Janeiro, 2011.

ALMEIDA, L. S.; MUNIZ, P. R.; Análise de desempenho do transformador de potência isolado a óleo vegetal em relação ao transformador de potência isolado a óleo mineral. **Revista Ifes Ciências**. v.6, n.2, p.28-41, 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 15422. Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos. 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 16431. Equipamento elétrico - Determinação da compatibilidade de materiais empregados com óleo vegetal isolante. 2016.

BASSEGIO, Douglas; ZANOTTO, Maurício Dutra; SANTOS, Reginaldo Ferreira; WERNCKE, Ivan; DIAS, Patrícia Pereira; OLIVO, Mateus. Oilseed crop crambe as a source of renewable energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 311-321, Agosto, 2016.

BASSO, R. C.; MEIRELLES, A. J. A.; BATISTA, E. A. C.; Liquid-liquid equilibrium of pseudoternary systems containing glycerol + ethanol + ethylic biodiesel from crambe oil (*Crambe abyssinica*) at T/K= (298.2, 318.2, 338.2) and thermodynamic modeling. **Fluid Phase Equilibria**, v.333, p.55-62, 2012.

BASHI, S. M. ABDULLAHI, U. U. YUNUS, R. NORDIN, A. Use of natural vegetable oils as alternative dielectric transformer coolants. **The Institution of Engineers**. Malasya, 2006.

BERTRAND, Yves; LAUZEVIS, Patrick. Low Viscosity Insulating Liquid based on Natural Esters for Distribution Transformers. In: **ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE**. 2013, Ottawa, Canada.

BEZERRA, C. M. S.; Estimativa de custo para o tratamento de óleo mineral isolante em transformadores de energia: estudo de caso da copel. 2009. 74 folhas. **Dissertação - Programa de pós graduação em tecnologia do PRODETEC (IEP-LACTEC)**. Curitiba, 2009.

CALDAS, L. F. S.; PAULA, C. E. R.; BRUM, D. M.; LEPRI, F. G.; CASSELA, R. J.; Avaliação de diferentes métodos para a determinação de cobre em óleo mineral isolante por espectrometria de absorção atômica com forno de grafite. **Química Nova**, v.37, n.5, p.776-782, 2014.

COSTA, E.; ALMEIDA, M. F.; FERRAZ, M. C. A.; DIAS, J. M.; Effect of Crambe abyssinica oil degumming in phosphorus concentration of refined oil and derived biodiesel. **Renewable Energy**, v.124, p.27-33, 2018.

EBERHARDT, R.; MUHR, H.M.; LICK, W.; WIESER, B.; SCHWARZ, R.; PUKEL, G. Partial discharge behaviour of an alternative insulating liquid compared to mineral oil. In: **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, 2010, p. 1–4.

EVANGELISTA, J. M. G.; ARAUJO, E.; COELHO, F. E. B.; FERRAZ, V.; Estudo do envelhecimento acelerado de um novo óleo vegetal isolante, à base de pinhão-mansão, para uso em transformadores elétricos. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.7, n.4, p. 359- 382, 2018.

FRANCH, V. S. **Avaliação da compatibilidade de óleos vegetais isolantes com materiais internos do transformador.** Curitiba, 2010. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

FANG, Yuan; LUO, Yunbai; YU, Ping. Determination of antioxidants in vegetable insulating oils by HPLC. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, Melville, NY, v. 8, p. 01-10, Junho 2016.

FERNÁNDEZ, Inmaculada; ORTIZ, Alfredo; DELGADO, Fernando; RENEDO, Carlos; PÉREZ, Severiano. Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers. **Electric Power Systems Research**, v. 98, p. 58-69, Fevereiro 2013.

FONSECA, M. M.; YOSHIDA, M. I.; Análise térmica do óleo de linhaça natural e oxidado. **Vértices**, v.11, n.1/3, p.61-75, 2009.

FRIEDENBERG, L. E.; SANTANA, R. M.; Propriedades de óleos isolantes de transformadores e a proteção do meio ambiente. In: **IX SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL**, 2014, Porto Alegre – RS.

GASSER, Hans Peter; WEIDMANN, Christoph Krause; LASBROOK, Mark; MARTIN, Russel. Aging of Pressboard in Different Insulating Liquids. In: **IEEE 17th International Conference on Dielectric Liquids**, 2011, Norway.

GARCIA, B.; ORTIZ, A.; RENEDO, C.; GARCIA, D. F.; MONTERO, A.; Use Performance and Management of Biodegradable Fluids as Transformer Insulation. **Energies**. v.14. p.1-18, 2021.

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

GÓMEZ, N. A.; WILHELM, H. M.; SANTOS, C. C.; STOCCO, B. Dissolved Gas Analysis (DGA) of Natural Ester Insulating Fluids with Different Chemical Compositions. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 21, p. 1071-1078, Junho, 2014.

KAMAL, M. S. Ahmad; BASHIR, N.; MUHAMAD, N. A. Insulating Properties of Vegetable Oils and Their Blends. In: **IEEE 7th Internacional Power Engineering and optimization conference**. Malasya, Junho, 2013.

KANO, Takaaki; IWABUCHI, Hiroyuki; HOSHIDA, Yoshiyuki; YAMADA, Junichi; HIKOSAKA, Tomoyuki; YAMAZAKI, Akina; HATTA, Yasunori; KOIDE, Hidenobu. Analyses of Electro-Chemical Characteristics of Palm Fatty Acid Esters as Insulating Oil. 2008.

LARA-FIOREZE, A.C.C.; TOMAZ, C.A.; FIOREZE, S.L.; PILON, C.; ZANOTTO, M.D. Genetic diversity among progenies of *Crambe abyssinica* Hochst for seed traits. **Industrial Crops and Products**, v. 50, p. 771-775, Julho, 2013.

LEÃO, F. E.; SANTOS, J. F.; BARBOSA, R. M.; VIEIRA, R. D.; Accelerated ageing as a vigour test for *Crambe abyssinica* seeds. **AJCS**, v.10, n.5, p.660-665, 2016.

LEOPOLDINO, Reginaldo. Estudo sobre gases dissolvidos em óleos vegetais isolantes – influência de arco elétrico e superaquecimento. 2011. 87 folhas. **Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**. São Carlos, 2011.

MALLÉGOL, J.; LEMAIRE, J.; GARDETTE, J. L. Drier Influence in the curing of linseed oil. **Progress in Organic Coatings**, London, v. 39, n. 2, p. 107 – 113, 2000.

MANDARINO, J. M. G.; Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos / José Marcos Gontijo Mandarino, Antônio Carlos Roessing. - Londrina: **Embrapa Soja**, 2001 40p.

MARTINS, M. Augusta G. Será o óleo vegetal um possível substituto do óleo mineral para transformadores? Comparação da degradação térmica do sistema óleo vegetal /papel kraft com a do óleo mineral/ papel kraft. **Ciência & tecnologia dos materiais**, v. 20, p. 15-20, 2008.

MELLO, Bruna Tais Ferreira de; GONÇALVES, Jose Eduardo; RODRIGUES, Giovana de Menezes; CARDOZO-FILHO, Lucio; SILVA, Camila da. Hydroesterification of *Crambe abyssinica* H. under pressurized conditions. **Industrial Crops and Products**. v, 97, p. 110-119, 2017.

MELO, Maria Andrea Mendes Formiga. *Avaliação das Propriedades de Óleos Vegetais visando a Produção de Biodiesel*. 2010. 114 folhas. **Dissertação – Universidade Federal da Paraíba**. João Pessoa, Outubro 2010.

MESSIAS, Karina L. da Silva. Dôssie Antioxidantes. **Food e ingredientes do brasil**. n. 6, p. 16-30, 2009.

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

MÓDENES, A. N.; SANDERSON, K.; TRIGUEROS, D. E. G.; SCHUELTER, A. R.; QUINONES, F. R. E.; NEVES, C. V.; ZANÃO, L. A. Jr.; KROUMOV, A. D.; Insights on the criteria of selection of vegetable and mineral dielectric fluids used in power transformers on the basis of their biodegradability and toxicity assessments. **Chemosphere**, v.199, p.312-319, 2018.

MOHAMAD, N. A.; AZIS, N.; JASNI, J.; AB KADIR, M. Z. A.; YUNUS, R.; ISHAK, M. T.; Z. YAAKUB, Z. A Study on the Dielectric Properties of Palm Oil and Coconut Oil. In: **IEEE International conference Power & Energy**. 2014.

OLIVEIRA, R. C. de; REIS, A. C. C. S.; AGUIAR, C. G.; VIECELLI, C. A.; PRIMIERI, C.; TOMASI, G. A.; BLEIL Jr, H. G.; ANDRADE, M. A. A.; VIANA, O. H. **Boletim Técnico: Agroindustrialização do Crambe**. 2ª Ed. Cascavel: Gráfica Assoeste e Editora Ltda. 2015.

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.

PUKEL, G.J.; EBERHARDT, R.; MUHR, H.M.; BAUMANN, F.; LICK, W. Large power transformers for alternative insulating fluids. In: **Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering**, 2009, p. 1–4.

RAFIQ, M.; LV, Y. Z.; ZHOU, Y.; MA, K. B.; WANG, W.; LI, C. R.; WANG, Q. Use of vegetable oils as transformer oils – a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 52, p. 308-324, Agosto, 2015.

RAO, M. U.; FOFANA, I.; JAYA, T.; CELIS, E. M. R.; JALBERT, J.; PICHER, P.; Alternative Dielectric Fluids for Transformer Insulation System: Progress, Challenges, and Future Prospects. **IEEE Access**. v.7, p.184552-184571, 2019.

ROGÉRIO, Flávia; SILVA, Tiago Roque Benetoli da; SANTOS, Juciléia Irian dos; POLETINE, Juliana Parisotto. Phosphorus fertilization influences grain yield and oil content in crambe. **Industrial Crops and Products**, v. 41, p. 266-268, 2013.

ROSA, Helton Aparecido; WAZILEWSKI, Willian Tenfen; SECCO, Deonir; CHAVES, Luiz Inácio; VELOSO, Gustavo; SOUZA, Samuel Nelson Melegari de; SILVA, Marcelo José da; SANTOS, Reginaldo Ferreira. Biodiesel produced from crambe oil in Brazil - A study of performance and emissions in a diesel cycle engine generator. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v, 38, p. 651-655, Julho, 2014.

SANTOS, Katia Andressa; BARICCATTI, Reinaldo Aparecido; CARDOZO-FILHO, Lucio; SCHNEIDER, Ricardo; PALU, Fernando; SILVA, Camila da; SILVA, Edson Antonio da. Extraction of crambe seed oil using subcritical propane: Kinetics, characterization and modeling. **The Journal of Supercritical Fluids**. v, 104, p. 54-61, Junho, 2015.

SANTOS, Juciléia Irian dos; SILVA, Tiago Roque Benetoli da; ROGÉRIO, Flávia; SANTOS, Reginaldo Ferreira; SECCO, Deonir. Yield response in crambe to potassium fertilizer. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 297-300, 2013.

SHEN, Z.; WANG, F.; WANG, Z.; LI, J.; A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.141, p.1-19, 2021.

SILVA, Claudia R.; CARVALHO, Maria W. N. C.; CONRADO, Líbia de S.; FOOKS, Marcus V. L.; LEITE, Krsthianna P. dos S. Caracterização físico-química e dielétrica de óleos biodegradáveis para transformadores elétricos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 229-234, Campo Grande, 2012.

SILVEIRA, E. V.; VILELA, L. S.; CASTRO, C. F. S.; LIÃO, L. M.; NETO, F. F. G.; OLIVEIRA, P. S. M.; Chromatographic characterization of the crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) oil and modeling of some parameters for its conversion in Biodiesel. **Industrial Crops and Products**, v.97, p.545–551, 2017.

SIMONE, G.; **O uso de óleo vegetal em transformadores de distribuição de energia elétrica**. 2017. 40f. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá – SC, 2017.

SINGHA, Santanu; ASANO, Roberto Jr.; FRIMPONG, George; CLAIBORNE, C. Clair; CHERRY, Don. Comparative Aging Characteristics between a High Oleic Natural Ester Dielectric Liquid and Mineral Oil. **IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation**, v. 21, p. 149-158, Fevereiro, 2014.

SITORUS, Henry B.H.; SETIABUDY, Rudy; BISMO, Setijo; BEROUAL, Abderrahmane. Jatropha Curcas Methyl Ester Oil Obtaining as Vegetable Insulating Oil. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. v, 23, p.2021-2028, Agosto, 2016.

SZMATOŁA, M.; CHROBAK, J.; GRABOWSKI, R.; ILOWSKA, J.; WOCH, J.; SZWACH, I.; SEMENIUK, I.; DRABIK, J.; WRONA, M.; KOZDRASH, R.; ORLINSKA, B.; GRYMEL, M.; Spectroscopic Methods in the Evaluation of Modified Vegetable Base Oils from *Crambe abyssinica*. **Molecules**, v.23, p.1-18, 2018.

SOUČEK, Jakub; HORNÁK, Jaroslav; SVOBODA, Michal; GUTTEN, Miroslav; KOLTUNOWICZ, Tomasz. Comparison of the Electrical Properties of Canola Oil with Commercially Available Mineral Oil. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 2015.

STOCCO, M. B. C. Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluido isolantes em transformadores de distribuição de rede elétrica. 2009. 129 folhas. **Dissertação (Mestrado em engenharia e ciência dos materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 2009.**

THOMAZ, Marcos Surian; LIMA, Isaura Alberton; ROMANO, Cezar Augusto; OLIVEIRA, Ivanir Luis de; STADLER, Carlos Cezar; GUEIBER, Daniel. Aspectos

sobre responsabilidade ambiental e tratamento de resíduos de óleo isolante mineral em uma empresa de energia elétrica do sul do Brasil: um estudo de caso. In: **IX SIMPÓSIO INTERNACIONAL PROCESSO CIVILIZADOR**, 2005, Ponta Grossa – PR.

TRENTINI, C. P.; POSTAUE, N.; FILHO, L. C.; SILVA, C.; Waste oil/crambe oil blends for ethyl ester production under supercritical conditions. **Journal of Supercritical Fluids**, v.163, p.1-8, 2020.

TRNKA, Pavel; MENTLIK, Vaclav; HORNAK, Jaroslav; CEJKOVÁ, Anna; TOTZAUER, Pavel. Natural Esters as Insulating Fluids – Some Other Features. **IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation**, p. 641-644, 2016.

TULIO, L. Estudo do envelhecimento acelerado de óleo vegetal isolante em escala laboratorial. 2008. 123 folhas. **Dissertação – Instituto de tecnologia para o desenvolvimento (LACTEC)**, Curitiba, PR. 2008.

VIANA, O. C.; **Cultivo de Crambe na região oeste do Paraná**. Dissertação (Mestrado). 2012. 62 f. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2012.

VIECELLI, C. A.; TOMASI, G. F.; SANTOS, A. C. C.; AGUIAR, C.; PRIMIERI, C.; BLEIL, H. G.; ANDRADE, M. A.; VIANA, O. H.; Produtividade do Crambe em diferentes adubações, época de semeadura e densidade de plantas. **Revista Varia Scientia Agrárias**. v.5, n.2, p.69-78, 2017.

WAZILEWSKI, Willian Tenfen; BARICCATTI, Reinaldo Aparecido; MARTINS, Gislaine lastiaque; SECCO, Deonir; SOUZA, Samuel Nelson Melegari; ROSA, Helton Aparecido; CHAVES, Luiz Inácio. Study of the methyl crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) and soybean biodiesel oxidative stability. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 207-212, 2013.

WILHELM, H. M.; FEITOSA, L.; SILVA, L. L.; CABRINO, A.; RAMOS, L. P. Evaluation of In-service Oxidative Stability and Antioxidant Additive Consumption in Corn Oil Based Natural Ester Insulating Fluid. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 22, p. 864-869, Abril, 2015.

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

WILHELM, H. M.; TULIO, L.; UHREN, W. **Produção e uso de óleos vegetais isolantes nos etor elétrico**. 2009. Disponível em: <www.brasilengenharia.com.br> Acesso em: 09 Mar 2017.

YANG, Lijun; LIAO, Ruijin; CAIXIN, Sun; ZHU, Mengzhao. Influence of Vegetable Oil on the Thermal Aging of Transformer Paper and its Mechanism. **IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation**, v. 18, p. 692-700, Julho 2011.

ZANINI, B. K.; **Análise comparativa entre o uso de transformadores a seco e a óleo em subestações de média tensão.** Monografia (Graduação). 2016. 67 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2016.

ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZURN, H. H.; **Metodologias para avaliação e diagnóstico do estado de isolamentos de papel impregnado com óleo mineral.** Sistemas de Potência: Sba Controle & Automação. v.16, n.3, 2005.