

## Avaliação do óleo de crambe (*crambe abyssinica* hoechst) como fluido isolante em transformadores elétricos

### Evaluation of crambe oil (*crambe abyssinica* hoechst) as insulating fluid in electric transformers

DOI:10.34117/bjdv8n3-331

Recebimento dos originais: 14/02/2022

Aceitação para publicação: 25/03/2022

**Ana Claudia Cabral dos Santos Reis**

Doutoranda em Química Orgânica

Instituição: Universidade Estadual de Londrina (UEL)

Endereço: Rod. Celso Garcia Cid, Pr 445 Km 380 - Universitário, CEP: 86057-970

Londrina - PR

E-mail: anareis@uel.br

**Carmen Luisa Barbosa Guedes**

Doutora em Química Orgânica

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (IQ - UFRJ)

Endereço: Rod. Celso Garcia Cid, Pr 445 Km 380 - Universitário, CEP: 86057-970

Londrina - PR

E-mail: carmen@uel.br

#### RESUMO

Os transformadores são importantes equipamentos no setor elétrico e para sua eficiente operação utiliza um sistema de isolamento líquido, sendo o mais utilizado o óleo mineral, que é um derivado do petróleo e não é um recurso renovável, portanto, limitado. Nesse cenário destacam-se os óleos vegetais isolantes, que derivam de fontes renováveis e limpas. O crambe (*Crambe abyssinica* – Família: Cruciferae) é uma oleaginosa que enquanto matéria-prima para produção de óleo vegetal, pode fornecer até 33% de óleo bruto. Estudos preliminares indicam uma ótima estabilidade oxidativa, não é tóxico, nem bioacumulativo e é facilmente biodegradável, reduzindo riscos de contaminação do solo e água. O objetivo desse trabalho foi avaliar o uso do óleo de Crambe como fluido isolante em transformadores elétricos. Primeiro o óleo bruto foi submetido ao refino e após as etapas de filtração, centrifugação, degomagem, neutralização, secagem e aditivação, o óleo foi caracterizado segundo a Norma ABNT NBR 15422. Avaliou-se, também, a compatibilidade do óleo com os componentes internos do transformador (papel kraft, borracha nitrílica, tinta, aço silício e fio de cobre) segundo a Norma ABNT NBR 16431. O óleo de Crambe após as etapas de refino apresentou características físico-químicas e dielétricas adequadas para o uso como fluido isolante em transformadores e, no teste de compatibilidade apresentou alteração apenas em uma variável e mantendo suas características nas demais.

**Palavras-chave:** óleo vegetal isolante, compatibilidade, transformadores.

#### ABSTRACT

Transformers are important equipment in the electrical sector and for their efficient operation they use a liquid insulation system, the most used being mineral oil, which is a petroleum derivative and is not a renewable resource, therefore, limited. In this scenario, insulating vegetable oils, which derive from renewable and clean sources, stand out. Crambe (*Crambe*

abyssinica – Family: Cruciferae) is an oilseed that, as a raw material for the production of vegetable oil, can provide up to 33% of crude oil. Preliminary studies indicate excellent oxidative stability, it is not toxic or bioaccumulative and is easily biodegradable, reducing the risk of soil and water contamination. The objective of this work was to evaluate the use of Crambe oil as an insulating fluid in electrical transformers. First, the crude oil was submitted to refining and after the steps of filtration, centrifugation, degumming, neutralization, drying and additives, the oil was characterized according to the ABNT NBR 15422 Standard. The compatibility of the oil with the internal components was also evaluated. of the transformer (kraft paper, nitrile rubber, paint, silicon steel and copper wire) according to the ABNT NBR 16431 Standard. and, in the compatibility test, it showed change only in one variable, maintaining its characteristics in the others.

**Keywords:** insulating vegetable oil, compatibility, transformers.

## 1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são importantes equipamentos no setor elétrico e para sua eficiente operação utiliza um sistema de isolamento líquido. O isolamento líquido desses equipamentos é constituído por um fluído (óleo) e o mais utilizado é o óleo mineral.

O óleo mineral é um derivado do petróleo e, devido às questões ambientais relacionadas com o uso de fontes fósseis, bem como, o fato de não ser um recurso renovável, portanto, limitado, estudos buscam alternativas ao seu uso. Nesse cenário destacam-se os óleos vegetais isolantes, que derivam de fontes renováveis e limpas.

Os óleos vegetais são constituídos por moléculas de triacilglicerídeos, que são originados da reação entre o glicerol e ácidos graxos. Cada matriz vegetal constituirá de uma composição de ácidos graxos que diferem em seu tamanho de cadeia e presença de insaturações e, essa composição determina as características do óleo, podendo originar um óleo mais resistente à oxidação (em caso de cadeias com menor índice de insaturações) ou com maior viscosidade (em caso de cadeias saturadas e maiores).

Ao comparar o óleo mineral com o vegetal observa-se que o mesmo apresenta consideráveis vantagens, como, o fato de ser biodegradável, não tóxico, apresentar maior ponto de fulgor e combustão, que lhe conferem menor risco de incêndios quando em operação nos equipamentos e não apresentam teor de enxofre corrosivo que possa danificar os componentes do equipamento. Devido sua composição química ter um maior caráter polar, interage facilmente com a água, o que pode resultar em um aumento da vida útil do isolamento sólido (papel kraft) do transformador. Porém, uma desvantagem, apresenta menor estabilidade oxidativa que os óleos minerais, sendo, portanto, necessário a aditivação do óleo com antioxidantes que retardam esse processo indesejável.

Em relação ao óleo mineral, estudos demonstram que apresenta compostos de enxofre que são capazes de reagir com os metais do equipamento formando borras, que depositados na parte ativa dos trocadores de calor, dificulta a refrigeração do equipamento, acelerando a degradação do papel isolante, reduzindo a vida útil do equipamento e elevação dos custos operacionais. Ainda, por ser inflamável requer cuidados especiais nos procedimentos operacionais, além de se constituir num poluente perigoso e até caracterizar-se num passivo ambiental em potencial no caso de acidentes ou na sua deposição ao término de sua vida útil.

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. Diversos estudos destacam o uso de outras matérias vegetais para isolamento de sistemas elétricos, para diversificar a fonte de origem e, nesse cenário, se destaca o Crambe.

O crambe (*Crambe abyssinica* – Família: Cruciferae) é uma oleaginosa originária da região quente e seca da Etiópia, o qual foi domesticado na zona fria e seca do mediterrâneo, e devido às suas origens, tolera bem a seca e o frio sendo indicado para plantios de outono e inverno no Brasil. Enquanto matéria prima para produção de óleo vegetal, pode fornecer até 33% de óleo bruto, significativamente superior aos 18% de óleo que pode ser extraído da soja. Estudos preliminares do óleo vegetal isolante de crambe indicam uma ótima estabilidade oxidativa por apresentar ácidos graxos monoinsaturados. Alguns estudos correlacionam o teor de ácido erúico presente no crambe (que pode atingir até 55%) com a termoestabilidade e a estabilidade resistêcia à oxidação.

Do ponto de vista ambiental, não é tóxico, nem bioacumulativo e é facilmente biodegradável, reduzindo riscos de contaminação do solo e água. O farelo da semente (torta) subproduto da extração do óleo vegetal pode ser utilizado na alimentação de animais ruminantes, na proporção de até 5% na dieta total, eliminando a geração de passivos ambientais pela geração de resíduos sólidos. E, do ponto de vista da sustentabilidade socioeconômica, o domínio das tecnologias de produção e beneficiamento de óleos vegetais, favorece a utilização deste novo óleo no setor elétrico, visto que este produto não concorre com a produção de alimentos, em comparação aos demais OVIs existentes no mercado, bem como não fica na dependência do petróleo, um recurso natural não renovável e com obtenção ambientalmente perigosa.

Assim, esse trabalho visa avaliar o uso do óleo vegetal de Crambe como isolante em transformadores elétricos, avaliando sua compatibilidade com os componentes internos do transformador.

## 1.1 ÓLEO MINERAL ISOLANTE

O óleo mineral isolante (OMI) é até hoje o fluido isolante mais utilizado em transformadores devido 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 limitados (Fernandez et. al., 2013; Yang et al., 2011).

O óleo mineral é derivado do petróleo, uma fonte fóssil e, sua composição química estará diretamente relacionada com a composição química do petróleo que lhe deu origem, 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 esta determinado pelas diferentes proporções dos componentes de sua estrutura química. Para Gasser e colaboradores (2011), tipicamente, os óleos contendo menor composição de hidrocarbonetos parafínicos em sua estrutura são definidos como óleos minerais naftênicos, enquanto que um óleo parafínico esse teor excede os 56%.

Hidrocarbonetos parafínicos são hidrocarbonetos saturados de cadeia linear ou ramificada, os hidrocarbonetos naftênicos são hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo um ou mais anéis, que podem possuir uma ou mais cadeias laterais (Frienderbeg & Santana, 2014) e os hidrocarbonetos aromáticos apresentam anéis aromáticos em sua composição. O tipo mais utilizado mundialmente é o de base naftênicia (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).

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.

Os fluidos a base de óleo mineral são largamente utilizados no setor elétrico devido sua característica adequada para uso como isolante. Porém, por apresentar desvantagens, como, não ser biodegradável, apresentar baixo ponto de fulgor e combustão (acarretando em riscos de acidentes com incêndios) e por derivar de uma fonte fóssil, o Petróleo (sendo assim, não

renovável, portanto limitada e, relacionada às questões ambientais), se faz necessário sua substituição por outros fluídos menos agressivos ao meio ambiente e de base renovável. Nesse âmbito se destacam os fluídos isolantes de origem vegetal, que são considerados ambientalmente corretos e diversos estudos na literatura destacam que apresentam características físico-químicas e dielétricas adequadas para uso como isolantes no setor elétrico.

## 1.2 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, alimentação, produção de biocombustíveis (biodiesel) e, como proposta recente nas pesquisas, para produção de fluídos isolantes.

Os óleos vegetais isolantes (OVIs) são utilizados como fluídos isolantes e refrigerantes em transformadores como alternativa ao óleo mineral. São triglicérides normalmente obtidos a partir de uma planta (Rafiq et. al., 2015). Segundo Martins (2008) triglicérides são tri-ésteres de glicerol, isto é, o glicerol esterificado por três ácidos graxos.

Esses fluídos 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 triglicérides e no seu grau de insaturação (Singha 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, pois, os ácidos graxos com cadeias mais longas são mais suscetíveis a forças de atração intermoleculares (Bertrand et. al., 2013) o que acarreta em um aumento do ponto de fusão e da viscosidade.

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 a degradação oxidativa, assim, durante o armazenamento é mais vulnerável aos impactos ambientais como calor, ar, luz, água e metais (Fang et. al., 2016).

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. Essa maior interação com a água faz com que, na temperatura de 25 °C óleos de origem vegetal absorvem 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, uma vez que, no processo de hidrólise das moléculas de triglicerídeos, a água é consumida e, para manter o equilíbrio químico, o óleo desloca moléculas de água do papel, indiretamente realiza a secagem do papel kraft, aumentando sua vida útil (Wilhelm et. al., 2009).

Os óleos vegetais isolantes foram inseridos no mercado em meados dos anos 1900s e, desde então diversos estudos são realizados para demonstrar a eficácia, ressaltar os aspectos positivos da utilização desses fluídos em substituição aos óleos minerais e as diferentes matrizes vegetais que podem ser utilizadas. O mercado precisa de óleos vegetais que atendam as propriedades adequadas para aumentar a vida útil do equipamento bem como causar menos danos aos componentes internos do transformador e menos impacto ambiental com seu uso. O Crambe é uma oleaginosa alternativa as demais que estão sendo utilizadas e estudadas. Se destaca por diversas características que serão abordadas no próximo item e, sua cultura vem ganhando espaço na matriz brasileira.

### 1.3 ÓLEO DE CRAMBE COMO FLUIDO ISOLANTE PARA TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

O Crambe (*Crambe abyssinica Hochst*) é uma planta oleaginosa que pertence à família Brassicaceae. Tem origem na região mediterrânica, 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 Maracajú, 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 para 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 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. O óleo de Crambe apresenta em sua composição cerca de 50 a 60% de ácido erúico (Lara-Fioreze et. al., 2013; Bassegio et. al., 2016; Rogério et. al., 2013), este ácido contém 22 átomos e apenas uma ligação dupla. O ácido erúico (C22:1) apresenta diversas aplicabilidades na indústria química devido propriedades como, baixo ponto de inflamação baixo e boas qualidades de combustão e lubrificação (Bassegio et. al., 2016).

Devido à elevada concentração de ácido erúico 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 lipidose 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.

O óleo de Crambe apresenta elevada concentração de ácidos graxos monoinsaturado, o que lhe confere uma estabilidade oxidativa maior quando comparada à outros óleos. Nos estudos de Wazilewski e colaboradores (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.

Diversos estudos destacam a utilização dos óleos vegetais para produção do Biodiesel, incluindo o óleo de Crambe como uma espécie promissora devido suas propriedades químicas, porém, recentemente, surge no mercado uma nova aplicação para esses óleos, sua utilização como fluído isolante. Diversas matrizes vegetais podem ser utilizadas e, apresentam estudos na literatura. Nesse cenário essa pesquisa busca avaliar o uso do óleo de Crambe como fluído isolante em transformadores elétricos.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 REFINO DO ÓLEO DE CRAMBE**

O óleo de Crambe bruto foi obtido junto ao Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz. Uma amostra foi levada ao laboratório para realizar os testes de caracterização físico-química e dielétrica, conforme a Norma ABNT NBR 15422, para avaliar e comparar com os

valores obtidos após as etapas de refino, observando se houve melhora no óleo com todo o processo. O restante do óleo foi submetido ao processo de refino.

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, tais como, 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 que possam causar efeitos indesejáveis na utilização do óleo como fluido vegetal isolante.

O refino do óleo de Crambe consistiu nas etapas de filtração, degomagem, neutralização, branqueamento e aditivação. Todo o processo foi realizado no Laboratório de Oleoquímica do Centro Universitário FAG campus de Cascavel PR. Para realizar o refino do óleo bruto de crambe, foi utilizado uma unidade de refino adquirida da empresa ERCITEC, sendo composta por, um reator aberto, um reator fechado, dois filtros prensa, uma centrífuga de rotor, uma unidade de vácuo e diversas motobombas de engrenagem.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E DIELETRICA DO ÓLEO DE CRAMBE

Para ser utilizado como fluido isolante em transformadores, o óleo precisa atender uma série de características que visam a segurança e maior durabilidade do equipamento. Essas propriedades estão especificadas na norma ABNT NBR 15422 (Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos) que determina quais são as características do óleo que devem ser avaliadas, por quais metodologias e os valores de referência.

Foram realizadas as análises com uma amostra do óleo bruto e com uma amostra do óleo refinado para analisar como alterou as características do óleo com os processos envolvidos no seu refino.

## 2.3 AVALIAÇÃO DA 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 com fio de cobre. Os materiais testados foram fornecidos pelas empresas fabricantes dos equipamentos (TOSHIBA: regulador de tensão; CONTRAFO: transformadores de distribuição e potência).



Primeiramente os materiais foram secos em estufa a 105 °C durante 16 horas. Após, foram colocados em dessecadores por um período de 4 horas para resfriamento à temperatura ambiente. Os materiais secos foram imersos nos frascos contendo o óleo de Crambe e borbulhou-se gás nitrogênio grau super seco com pureza de 99,96% por 10 minutos em cada frasco, a uma vazão de 1L/min. Os frascos foram fechados e levados à estufa para envelhecimento a uma temperatura de 100 °C por 164 horas. Realizou-se os testes em duplicata. As proporções utilizadas encontram-se na Tabela 01 abaixo.

Tabela 01: Proporções utilizadas no teste de compatibilidade do óleo de Crambe

Componente Interno	Proporções utilizadas
Papel Kraft	52 cm <sup>2</sup> / 800 mL de óleo
Elastômero	658 cm <sup>2</sup> / 800 mL de óleo
Fio de Cobre	3 m x 1 mm de diâmetro / 800 mL de óleo
Aço Silício	6200 cm <sup>2</sup> / 800 mL de óleo
Tinta	1300 cm <sup>2</sup> / 800 mL de óleo

Fonte: Norma ABNT NBR 16431

Ao final do envelhecimento, foram realizados os 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. A partir dos resultados dos testes calculou-se a variação nas características do óleo para avaliar se houve alteração nas propriedades do óleo do contato com os materiais internos dos transformadores e nas condições de trabalho.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE CRAMBE ANTES E APÓS O REFINO

As amostras de óleo de Crambe bruto e refinado foram submetidas aos testes de caracterização e os dados obtidos encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Análise Físico-química do óleo vegetal de Crambe antes e após o Refino

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 Dilétrica	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			3,6 máx.	-	1,65
	100 °C			4,0 máx.	-	2,1
Enxofre Corrosivo	-	ABNT NBR 10505	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	-	< 2,0	

Fonte: Autor

Ao comparar os valores obtidos nos testes de caracterização do óleo bruto e refinado, é possível observar que o óleo bruto não apresenta boas condições para ser utilizado como fluido isolante. Logo após a extração, o óleo ainda apresenta muitos resíduos sólidos e uma maior viscosidade, o que pode acarretar em entupimentos dentro do equipamento.

O óleo bruto ainda apresenta elevada acidez e um elevado teor de água, duas características que podem acarretar na oxidação dos materiais internos do transformador e, ainda,

pode acelerar o processo de degradação do próprio óleo, fazendo com que este perca as suas propriedades de fluido isolante. Essas propriedades, observando-se a tabela acima, são melhoradas com as etapas de refino. É possível observar que o óleo refinado atende as especificações da norma e, isto foi possível com as etapas realizadas durante a etapa de refino.

O óleo de crambe bruto apresentou ponto de fulgor e combustão adequados segundo a norma, mas após as etapas de refino, esses valores foram aumentados. Ponto de fulgor e de combustão estão relacionados com a segurança do óleo, ou seja, sua capacidade em resistir a aumentos de temperatura sem vir a incendiar. Nesse caso, o óleo refinado apresentou valores maiores que o óleo bruto, indicando uma segurança maior com o seu uso.

O óleo bruto não atendeu os valores determinados pela norma, tanto na viscosidade quanto o ponto de fluidez. Essas duas propriedades estão relacionadas com a capacidade do óleo em manter sua fluidez com a variação de temperatura. Importante para que este continue circulando no equipamento e que não cause entupimentos.

Ao utilizar um fluido isolante dentro de um transformador, é esperado que esse atue isolando o equipamento da passagem de corrente. Para medir a eficiência de um isolante elétrico é determinada a medida da sua rigidez dielétrica, o valor obtido é o limite superior da intensidade de campo elétrico que o óleo, nesse caso, é capaz de suportar sem tornar-se condutor. Pelos valores obtidos, o óleo de crambe bruto não apresenta as características ideais, sendo que não atingiu os valores mínimos exigidos pela norma. Contudo, é possível observar que após o refino o óleo atendeu os valores especificados pela norma, indicando que conseguirá manter sua característica de isolante elétrico nas condições de trabalho do equipamento.

Outra variável em que os valores do óleo de crambe bruto não foram compatíveis com o uso como isolante foi o fator de perdas. Este teste é um indicativo de contaminação do óleo por água e contaminantes sólidos e solúveis ou a degradação do óleo em serviço. Um baixo fator de perdas dielétricas indica baixo nível de contaminantes solúveis, nesse teste, o óleo bruto apresentou valores acima dos permitidos pela norma, não atendendo as especificações. Essa, também, é uma das características que foi ajustada com as etapas de refino, ou seja, após passar por esse processo o óleo pode ter eliminado as impurezas que poderiam estar elevando seu fator de potência e, com isso, adequou-se aos valores exigidos.

De forma geral, o óleo de crambe bruto não apresenta as características ideais para uso como isolante elétrico, uma vez que, não atendeu a especificação de todos os valores estabelecidos pela Norma ABNT NBR 15422 (2015). Ainda é possível ressaltar que, o óleo refinado apresentou os valores adequados, indicando uma possibilidade de ser utilizado como fluido isolante, pois, os valores sugerem que o óleo conseguirá manter suas propriedades de

isolamento dentro das condições de operação de um transformador. Assim, foi possível analisar que as etapas de refino melhoraram as características do óleo, tornando-o mais resistente e menos propenso a sofrer degradação ou causar a degradação do equipamento.

### 3.2 TESTE DE COMPATIBILIDADE DO ÓLEO DE CRAMBE COM OS COMPONENTES INTERNOS DO TRANSFORMADORES

Segundo a Norma ABNT NBR 16431, os valores dos testes realizados com as amostras de óleo antes e após o teste de compatibilidade podem ter um valor máximo de variação para ser considerado compatível. As variações encontradas encontram-se na Tabela 3 abaixo. Um teste em branco também foi realizado a fim de ter um parâmetro de comparação. Cabe ressaltar que o teor de água não é um teste exigido pela Norma utilizada, contudo, realizou-se esse teste 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 3: Resultados testes de caracterização dos óleos submetidos ao teste de compatibilidade

Componente Interno	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%
Branco	Crambe	91	0	0	3,6	0	2,2
Papel Kraft	Crambe	123	0,2	0	4,3	0	4,3
Borracha Nitrílica	Crambe	131	0,7	0	56,23	0	2,2
Tinta	Crambe	106	0,4	0	30,4	0	8,7
Fio de Cobre	Crambe	118	0,4	0,03	4,6	0	0
Aço Silício	Crambe	113	0,2	0,01	1,9	0	8,7

Fonte: 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 potência. 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 teve alteração em todos os componentes internos, exceto no aço sílicio, podendo sugerir que houve alguma contaminação das amostras, o que acarretou nessa variação. É possível observar que, no teste que apresentou maior teor de água foi o mesmo em que o fator de potência esteve mais alterado, porém, deve-se ressaltar que o limite permitido de umidade no óleo isolante é de 200 ppm.

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 isolamento e processo de fabricação do material. As características desse sistema dependem da geometria do condutor, composição do dielétrico, gradientes 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.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O óleo 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. Este trabalho buscou avaliar o uso do óleo de Crambe como fluido vegetal isolante em transformadores e, pelos dados obtidos constatou-se que o óleo, após passar pelas etapas de refino, apresenta as características e propriedades físico-químicas e dielétricas para atuar como fluido isolante.

Também, apresentou bom desempenho nos testes de compatibilidade, porém apresentou variação do fator de potência acima do permitido pela norma. Esses dados podem sugerir uma baixa estabilidade quando em contato com esses componentes ou uma contaminação das

amostras durante os ensaios, porém, testes mais específicos são necessários para averiguar essas variações.

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



## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 15422. Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos. 2015.
- 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.
- BERTRAND, Yves; LAUZEVIS, Patrick. Low Viscosity Insulating Liquid based on Natural Esters for Distribution Transformers. In: **ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE**. 2013, Ottawa, Canada.
- BEZERRA, Claudia Maria Schiavon. 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.
- 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.
- 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.
- FRIEDENBERG, Luiz Eduardo; SANTANA, Ruth Marlene. 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.
- 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.
- 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 oil (*Crambe abyssinica* H.) under pressurized conditions. **Industrial Crops and Products**. v, 97, p. 110-119, 2017.

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.

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.

SILVEIRA, L. G.; SILVA, L. C. Da; JESUS, A. M. de; BATISTA, E. A.; **Transformadores de potência – ensaios e proteção**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.7, n.6, p.59954-59975. Junho, 2021.

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.

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.

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

WAZILEWSKI, Willian Tenfen; BARICCATTI, Reinaldo Aparecido; MARTINS, Gislaine Iastiaque; 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.; TULIO, L.; UHREN, W. **Produção e uso de óleos vegetais isolantes nos setor elétrico**. 2009. Disponível em: <[www.brasilengenharia.com.br](http://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.