

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VALDEIR RIBEIRO SOARES

**REQUISITOS E RESTRIÇÕES DO USO DO ÓLEO VEGETAL DE  
TUNGUE COMO LÍQUIDO ISOLANTE PARA TRANSFORMADORES  
ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO**

DISSERTAÇÃO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2015

VALDEIR RIBEIRO SOARES

**REQUISITOS E RESTRIÇÕES DO USO DO ÓLEO VEGETAL DE  
TUNGUE COMO LÍQUIDO ISOLANTE PARA TRANSFORMADORES  
ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica”.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2015

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

- S676 Soares, Valdeir Ribeiro  
Requisitos e restrições do uso do óleo vegetal de tungue como líquido isolante para transformadores elétricos de distribuição de média tensão / Valdeir Ribeiro Soares. – 2015.  
90 f. : il. ; 30 cm
- Orientador: Carlos Elias da Silva Júnior.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Cornélio Procópio, 2015.  
Referências: p. 82 - 87.
1. Transformadores elétricos. 2. Óleos vegetais. 4. Engenharia elétrica - Dissertações. I. Silva Junior, Carlos Elias da, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3



**Título da Dissertação Nº 27:**

**“Requisitos e restrições do uso do óleo vegetal de Tungue como líquido isolante para transformadores elétricos de distribuição de média tensão”.**

por

**Valdeir Ribeiro Soares**

Orientador: **Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA – Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos Industriais, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica–PPGEE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às **10 horas** do dia **29 de outubro de 2015**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

---

Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior  
(Presidente)

---

Prof. Dr. José Alfredo Covolan Ulson  
(UNESP)

---

Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami  
(UTFPR-CP)

---

Prof. Dr. Paulo Rogério Scalassara  
(UTFPR-CP)

Visto da coordenação:

---

**Paulo Rogério Scalassara**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pelo seu filho Jesus estar sempre ao meu lado guiando meus passos e conduzindo o encontro com pessoas fantásticas que me apoiaram e me ensinaram no PPGEE\_CP.

Ao Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior, meu orientador neste trabalho, que sempre me deu apoio e força para continuar e perseverar. Bem como, conselhos pontuais para o bom andamento do trabalho.

À Profa. Dra. Janaína Fracaro de Souza, pelas valiosas orientações para o desenvolvimento deste trabalho e por sua participação na banca do exame de qualificação.

Ao Prof. Dr. Marcelo Favoreto Castoldi, por ter aceitado o convite para compor a banca do exame de qualificação.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Cornélio Procópio, pelo auxílio prestado no custeio da aquisição do óleo vegetal de tungue, especialmente ao apoio prestado pelo Prof. Dr. Paulo Rogério Scalassara, Coordenador do PPGEE-CP.

Ao Prof. Dr. José Alfredo Covolan Ulson, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), câmpus de Bauru (SP) e ao Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Cornélio Procópio, pelo aceite na participação da banca do exame de mestrado.

À empresa Ecirtec LTDA. representada pelo Sr. Adilson Manzano que contribuiu para o tratamento e refino industrial do óleo vegetal de tungue.

Ao Sr. Silas Gomes por todo conhecimento compartilhado ao longo dessa pesquisa.

As colegas do laboratório de química da UTFPR-CP, MScs. Mary de Conti e Camila, pelo apoio fantástico durante os procedimentos experimentais executados no laboratório do câmpus.

Aos colegas da Comtrafo S/A, Alberto Valério, Cristiano Minato, Luiz Minato, Tânia Menezes, Wilson Jacobsen, Ronaldo Pio, pelo apoio pontual para execução dos ensaios físico-químicos realizados na empresa e também na construção do transformador protótipo.

Em especial, agradeço a minha família por sempre estar presente ao meu lado em todos os momentos e por toda compreensão, ao meu Pai (Elias), a minha mãe (Elza) e aos meus irmãos (Sidnei e Claudinei) e também à minha esposa Brenda.

## RESUMO

SOARES, Valdeir R. **Requisitos e restrições do uso do óleo vegetal de tungue como líquido isolante para transformadores elétricos de distribuição de média tensão.** 2015. 90f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Devido à necessidade de se desenvolver um líquido isolante renovável em alternativa ao uso de óleo mineral em transformadores, a comunidade científica e empresas do segmento de energia buscam desenvolver óleos vegetais para essa aplicação. Sendo que, atualmente os óleos vegetais utilizados de forma comercial em transformadores possuem base vegetal que competem com a indústria alimentícia. Dessa forma o presente trabalho tem como objetivo verificar a possibilidade do óleo de tungue ser utilizado em transformadores de distribuição, face sua alta capacidade produtiva e o mesmo não competir com a alimentação humana. Para isso, foi utilizado como referência, as características físico-químicas da norma NBR 15422 – Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos, que é a norma responsável para uso também em transformadores. Visando reduzir a acidez do óleo de tungue para níveis normatizados, foi realizado processo de adsorção dos componentes polares através de Terra Fuller. O tratamento com Terra Fuller se mostrou ineficaz para o óleo de Tungue bruto, sendo assim, foi realizado um processo industrializado para refino do óleo para reduzir sua acidez. Para verificação das características do óleo de Tungue, foi construído um protótipo de transformador e realizado os ensaios dielétricos de rotina conforme norma NBR 5356, sendo que não foram detectadas falhas elétricas e ainda, foram obtidos níveis de resistência de isolamento próximos aos obtidos em transformadores que utilizam óleos isolantes mineral e vegetal comercializados para equipamentos elétricos.

**Palavras-chave:** Transformador elétrico. Óleo Vegetal. Tungue.

## ABSTRACT

SOARES, Valdeir R. **Requirements and restrictions of vegetable tung oil as an insulating liquid for electrical distribution transformers of medium voltage.** 2015. 90f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Due to the need to develop a renewable insulating liquid alternative to mineral oil used in transformers, the scientific community and energy sector companies look for to develop vegetable oils for this application. Whereas, now the vegetable oils used in transformers in a commercial way have vegetable based competing with human food. Thus, the present work aims to verify the possibility of tung oil be used in distribution transformers, given its high production capacity and it does not compete with human food. For this, was used as a reference, the physicochemical characteristics of the NBR 15422 - vegetable insulating oil for electrical equipment, which is the standard responsible for use also in transformers. Aiming to reduce the acidity of tung oil at standardized levels was performed adsorption process of polar components through Fuller Earth. Treatment with Fuller Earth was ineffective for raw tung oil, therefore, an industrial process for oil refining was carried out to reduce its acidity. For verification of tung oil characteristics, a transformer prototype has been built and performed routine dielectric tests according to NBR 5356, with electrical faults were not detected and also were obtained resistance of isolation levels close to those obtained in transformers use vegetable and mineral insulating oils marketed for electrical equipments.

**Keywords:** Electrical transformer. Vegetable Oil. Tung.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Empilhamento de chapas de aço silício.....	17
FIGURA 2 – Núcleo trifásico do tipo envolvido.....	17
FIGURA 3 – Detalhe do enrolamento tipo “camada”com fio retangular. ....	18
FIGURA 4 – Circulação do óleo isolante no transformador por efeito termo-sifão ....	21
FIGURA 5 – Destilação fracionada do petróleo.....	23
FIGURA 6 – Transformador com óleo vegetal em 420 kV. ....	33
FIGURA 7 – Transformador com classe 420kV e óleo vegetal em operação. ....	33
FIGURA 8 – Transformador verde da CEMIG.....	35
FIGURA 9 – Árvore do Tungue. ....	39
FIGURA 10 – Folha de Tungue.....	40
FIGURA 11 – Fruto do Tungue. ....	40
FIGURA 12 – Equipamento para ensaio do fator de potência (Marca: Type M-Oil Test Set, Fabricante: Doble Engineering). ....	45
FIGURA 13 – Equipamentos para ensaio do índice de neutralização.....	46
FIGURA 14 – Equipamento para ensaio de rigidez dielétrica (Modelo: Baur Oil Tester DTA, Fabricante: Baur). ....	47
FIGURA 15 – Equipamento para ensaio do teor de água (Modelo: Aquatest 2010, Fabricante: Photovolt). ....	49
FIGURA 16 – Terra Fuller utilizada. ....	51
FIGURA 17 – Terra Fuller junto ao óleo de tungue.....	51
FIGURA 18 – Processo de filtragem do óleo de tungue com Terra Fuller. ....	52
FIGURA 19 – Processo de refino do óleo vegetal.....	53
FIGURA 20 – Representação esquemática do processo de degomagem do óleo vegetal.....	55
FIGURA 21 – Fluxograma do processo de branqueamento do óleo vegetal. ....	56
FIGURA 22 – Núcleo monofásico montado.....	58
FIGURA 23 – Detalhe da parte superior do núcleo.....	59
FIGURA 24 – Manufatura da bobina de baixa tensão.....	60
FIGURA 25 – Manufatura da segunda camada da bobina de baixa tensão. ....	60
FIGURA 26 – Bobina de alta tensão finalizada. ....	61
FIGURA 27 – Bobinas de baixa e de alta tensão montadas. ....	62
FIGURA 28 – Parte interna do tanque. ....	63
FIGURA 29 – Tanque do protótipo de transformador.....	63
FIGURA 30 – Parte ativa aguardando montagem.....	64
FIGURA 31 – Lçamento da parte ativa. ....	65
FIGURA 32 – Montagem da parte ativa no tanque. ....	65
FIGURA 33 – Medição da resistência elétrica dos enrolamentos. ....	67
FIGURA 34 – Circuito para ensaios dielétricos. ....	69
FIGURA 35 – Evolução do Fator de Potência após tratamento e refino do óleo de tungue bruto. ....	78
FIGURA 36 – Evolução do índice de neutralização após tratamento e refino do óleo de tungue bruto. ....	78
FIGURA 37 – Comportamento da tensão interfacial após tratamento e refino do óleo de tungue bruto. ....	79

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Propriedades físico-químicas do OVI novo.....	31
TABELA 2 – Empresas brasileiras que fornecem óleo vegetal.....	32
TABELA 3 – Características das principais culturas para uso energético.....	38
TABELA 4 – Níveis de tensão para ensaio de tensão aplicada .....	68
TABELA 5 – Resultados para o óleo de tungue bruto.....	70
TABELA 6 – Resultados para o óleo de tungue tratado.....	71
TABELA 7 – Resultados obtidos após o processo de refino industrial do óleo de Tungue bruto	73
TABELA 8 – Dados de rendimento dos transformadores.....	74
TABELA 9 – Dados físico-químicos dos óleos isolantes .....	74
TABELA 10 – Resistência ôhmica dos enrolamentos .....	75
TABELA 11 – Resistência de isolamento.....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AT	Alta Tensão
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
BT	Baixa Tensão
CEMIG	Companhia de Energia Elétrica de Minas Gerais
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FAG	Faculdade Assis Gurgacz
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OMI	Óleo Mineral Isolante
OVI	Óleo Vegetal Isolante
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS GERAIS	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3	JUSTIFICATIVA	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
2.1	TRANSFORMADOR ELÉTRICO DE POTÊNCIA IMERSO EM ÓLEO	15
2.1.1	Materiais utilizados para a construção de transformadores	16
2.1.1.1	Núcleo	16
2.1.1.2	Bobinas	18
2.1.1.3	Tanque	19
2.1.1.4	Radiadores	19
2.1.1.5	Materiais do Isolamento Sólido	20
2.2	ÓLEO ISOLANTE	20
2.2.1	Óleo Mineral Isolante (OMI)	22
2.2.2	Óleo Vegetal Isolante (OVI)	24
2.2.3	Pesquisas sobre o óleo vegetal utilizado como isolante elétrico	27
2.3	O TUNGUE	36
2.3.1	Origem e locais de cultivo	37
2.3.2	Características do Tungue	37
2.3.3	Produtividade do Tungue	40
2.3.4	Outros óleos vegetais comerciais	41
2.3.5	Pesquisas com o Tungue	42
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>43</b>
3.1	MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA NO EXPERIMENTO	43
3.2	ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS	44
3.2.1	Lista de equipamentos para os ensaios físico-químicos	44
3.2.2	Fator de potência (Fator de Perdas Dielétricas)	45
3.2.3	Ensaio de Índice de neutralização do óleo	46
3.2.4	Rigidez dielétrica do óleo isolante	47
3.2.5	Tensão Interfacial do óleo isolante	48
3.2.6	Teor de água do óleo isolante	48
3.3	TRATAMENTO COM ADSORVENTES	49
3.3.1	Terra Füller ( <i>Atapulgita</i> )	49
3.3.2	Tratamento de adsorção por meio da adição de Terra Fuller	50
3.4	REFINO DO ÓLEO DE TUNGUE	52
3.4.1	Processo de refino do óleo vegetal bruto	53
3.4.2	Degomagem (Hidratação) do óleo de Tungue bruto	54
3.4.3	Neutralização da amostra utilizada no experimento	55
3.4.4	Branqueamento do óleo de Tungue	55
3.4.5	Desodorização do óleo de Tungue	56

3.4.6	Aditivação do óleo utilizado no experimento .....	57
3.5	MANUFATURA DO PROTÓTIPO DE TRANSFORMADOR.....	57
3.5.1	Núcleo de aço silício do protótipo .....	57
3.5.2	Enrolamentos de cobre do transformador construído .....	59
3.5.3	Tanque de aço-carbono do protótipo .....	62
3.5.4	Montagem do protótipo de transformador .....	64
3.6	AVALIAÇÃO DIELÉTRICA DO PROTÓTIPO DE TRANSFORMADOR.....	66
3.6.1	Lista de Equipamentos.....	66
3.6.2	Medição da Resistência elétrica dos enrolamentos .....	66
3.6.3	Medição da Resistência de Isolamento.....	67
3.6.4	Ensaio de Tensão Aplicada.....	68
3.6.5	Ensaio de Tensão Induzida.....	69
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>70</b>
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ÓLEO DE TUNGUE BRUTO.....	70
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ÓLEO TRATADO .....	71
4.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O ÓLEO REFINADO.....	72
4.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS DIELÉTRICOS NO PROTÓTIPO .....	73
4.4.1	Dados dos projetos .....	73
4.4.2	Ensaio de resistência ôhmica nos enrolamentos .....	75
4.4.3	Ensaio de resistência de isolamento .....	76
4.4.4	Ensaio de tensão induzida .....	77
4.4.5	Ensaio de tensão aplicada .....	77
4.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	77
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	81
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>
	APÊNDICE A.....	88
	ANEXO A .....	90

# 1 INTRODUÇÃO

As exigências técnicas e econômicas atuais dos setores produtivos demandam um grande consumo de energia elétrica para fins industriais e comerciais, além do crescente consumo residencial. Isso resulta na necessidade de construção de usinas geradoras de energia elétrica em suas diversas possibilidades, tais como geração eólica, geração hidráulica, geração por vapor, entre outras.

O sistema de energia elétrica mundial é formado basicamente por grandes usinas, que são responsáveis pela geração da energia elétrica que é transmitida por meio de linhas de transmissão em alta tensão, as quais por sua vez são interconectadas às linhas de distribuição em média e baixa tensão.

De acordo com Leão (2009), o objetivo de um sistema elétrico de potência (SEP) é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica atendendo a certos padrões de confiabilidade, qualidade e custos. Visto que o sistema trifásico de distribuição ser tecnicamente mais confiável e ter maior versatilidade do que qualquer outro sistema isolado pode-se obter uma maior estabilidade e balanceamento na rede elétrica. Sendo que, é possível ainda a aplicação de transformadores monofásicos, como ocorre na distribuição de energia em redes rurais.

Em meio a esse sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, um dos equipamentos indispensáveis é o transformador elétrico de potência trifásico. Este equipamento está presente em todos os níveis de um sistema elétrico de potência, desde a geração da energia elétrica, elevando a tensão de geração a valores que permitam a sua transmissão econômica, até chegar às subestações abaixadoras que alimentam os grandes centros urbanos em média tensão e os consumidores residenciais em baixa tensão.

O transformador elétrico de potência é composto por um núcleo de material ferromagnético que possui alta permeabilidade magnética, a qual é muito maior do que a permeabilidade do ar (KOSOW, 1972). O núcleo tem área com seção uniforme formada por um empilhamento de chapas de aço silício de grãos cristalinos orientados, ou então montados com metal amorfo. O núcleo é excitado por uma bobina com  $n$  espiras que conduz uma corrente  $I$  (A), então o enrolamento produzirá um campo magnético, conforme exposto por Chapman (2012).

As bobinas podem ser feitas com fios de cobre ou alumínio, de seção retangular ou circular, isolados com esmalte ou papel presspahn. Os enrolamentos de baixa tensão (BT) e alta tensão (AT) normalmente são concêntricos, sendo que a BT ocupa a parte interna e a AT, a parte externa (RIES, 2007). O conjunto formado pelo núcleo, bobinas, ferragens de aço-carbono e calços feitos de madeira para fixação do núcleo formam a chamada parte ativa do transformador.

Um dos tipos construtivos de transformador amplamente utilizado a nível mundial consiste no modelo com sistema de refrigeração através da circulação de óleo. A função do óleo é promover o isolamento dielétrico entre os componentes internos do transformador quando em operação e também proporcionar a refrigeração do transformador por meio da troca de calor.

Nesse contexto, quando o transformador entra em operação sem conexão a cargas, é intrínseco o aquecimento no seu núcleo devido à excitação, o que implica nas chamadas perdas em vazio; quando são impostas cargas para alimentação, ocorrem as perdas em carga, ou seja, decorrentes do aquecimento nos condutores e demais componentes mecânicos internos. Dessa forma, em um transformador, a transmissão de calor das diversas fontes se realiza por condução, convecção e radiação (RIES, 2007).

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

Atualmente, o óleo mineral é o fluido mais utilizado em escala industrial para aplicação em transformadores, tendo como características o bom desempenho devido ao seu custo e propriedades físico-químicas, além da compatibilidade com outros materiais do transformador (ABB, 2007). Contudo, como este óleo é derivado do petróleo, trata-se de uma fonte escassa e não renovável. Nesse contexto, indústrias que atuam no segmento de componentes de transformadores vêm buscando desenvolver óleos de base vegetal como alternativa ao uso do óleo mineral.

Óleos de base vegetal para uso em transformadores elétricos são encontrados em âmbito comercial. Contudo, esses óleos competem com a indústria alimentícia e uma vez que o preço de aquisição do óleo vegetal é superior ao do óleo mineral, seu uso é adotado apenas em situações específicas por empresas que investem em sustentabilidade ou em instalações que necessitam cumprir com algum requisito de segurança, como biodegradabilidade ou alto ponto de combustão. Neste contexto, o presente trabalho visa estudar uma oleaginosa alternativa para uso como líquido isolante em transformadores elétricos.

Para esse trabalho foi escolhido o óleo de tungue. A escolha do mesmo se deve principalmente pelo fato desse óleo não competir com a indústria alimentícia ou animal e o custo de produção por hectare ser inferior ao da soja, uma vez que, atualmente, o óleo de soja é o mais utilizado para a aplicação sugerida. E ainda, por tal óleo apresentar bons resultados em outras áreas de pesquisa abordadas, como na produção de lubrificantes para usinagem e também para a produção de biodiesel.

## 1.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação dos requisitos e restrições para o emprego de uma oleaginosa alternativa como líquido isolante de transformadores elétricos, bem como, que não compita com a alimentação humana.

Nesse contexto, foi escolhido o óleo de tungue para realização dessa análise.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Constituem objetivos específicos do presente trabalho:

- Avaliação das propriedades físico-químicas do óleo de tungue;
- Análise comparativa entre o óleo de tungue e dados de óleos comerciais para uso em transformadores elétricos.



### 1.3 JUSTIFICATIVA

O transformador elétrico de potência imerso em óleo isolante é um equipamento fundamental para o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Atualmente a maioria dos transformadores em operação é preenchida com óleo mineral, derivado do petróleo. Contudo, nos últimos anos a comunidade científica busca uma solução alternativa à fonte esgotável que é o petróleo para uso em equipamentos elétricos.

Dessa forma, óleos de base vegetal têm sido estudados para aplicações como fluidos isolantes e refrigerantes. Atualmente os óleos de base vegetal desenvolvidos competem com a indústria alimentícia, uma vez que são derivados principalmente da soja e do girassol. Com isso, a presente pesquisa se torna relevante considerando que o óleo extraído do Tungue não compete com a alimentação humana, bem como, toda a árvore e o fruto da mesma.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão detalhados as características e procedimentos necessários que são aplicados na construção de transformadores elétricos de distribuição que empregam óleo como fluido isolante. Sendo assim, serão abordados os principais aspectos que afetam diretamente o seu desempenho durante o tempo de operação.

Além disso, será abordada uma revisão bibliográfica sobre óleos isolantes e também os aspectos relacionados ao cultivo e produção do tungue, em seguida, serão comentados como se dá o processo de extração do óleo e as características técnicas do óleo de tungue bruto.

### 2.1 TRANSFORMADOR ELÉTRICO DE POTÊNCIA IMERSO EM ÓLEO

Na construção de transformadores elétricos de potência, os materiais essenciais empregados são o aço silício para montagem do núcleo, o alumínio (ou cobre) para montagem dos enrolamentos, calços de madeira para fixação das bobinas e papel para isolação dos condutores. Cabe ressaltar que os materiais citados permanecem constantemente em contato com o óleo.

Como o objetivo do trabalho é avaliar um óleo de base vegetal alternativo para ser utilizado no segmento de transformadores, torna-se necessário a observação das normas regulamentadoras em vigência para definição das características físico-químicas do óleo.

Dessa forma, a norma da ABNT NBR 15422 é a que padroniza as características do óleo vegetal isolante novo para equipamentos elétricos. Cabe salientar que não existe uma norma específica para avaliação da compatibilidade dos materiais internos do transformador com o óleo vegetal. Sendo assim, quando se deseja verificar a variação das propriedades do óleo devido ao contato com os materiais utilizados na construção dos transformadores, cabe o uso das normas ASTM D3455 “*Compatibility of Construction Material with Electrical Insulating Oil of*

*Petroleum Origin*” ou da norma nacional ABNT NBR 14274 “Determinação da compatibilidade de materiais empregados com óleo mineral isolante”.

### 2.1.1 Materiais utilizados para a construção de transformadores

A seguir será exposto detalhadamente o processo para construção e montagem dos componentes internos de transformadores.

#### 2.1.1.1 Núcleo

O núcleo é composto por material ferromagnético, que possui uma permeabilidade elétrica maior que a do ar. Tal material possui momentos de magnetização na ausência de um campo externo, e manifestam magnetizações altas e permanentes (CALLISTER, 1997). Nesse contexto, para a aplicação em transformadores é utilizado o aço silício, devido à sua eficiência enquanto condutor magnético e devido à relação custo x benefício.

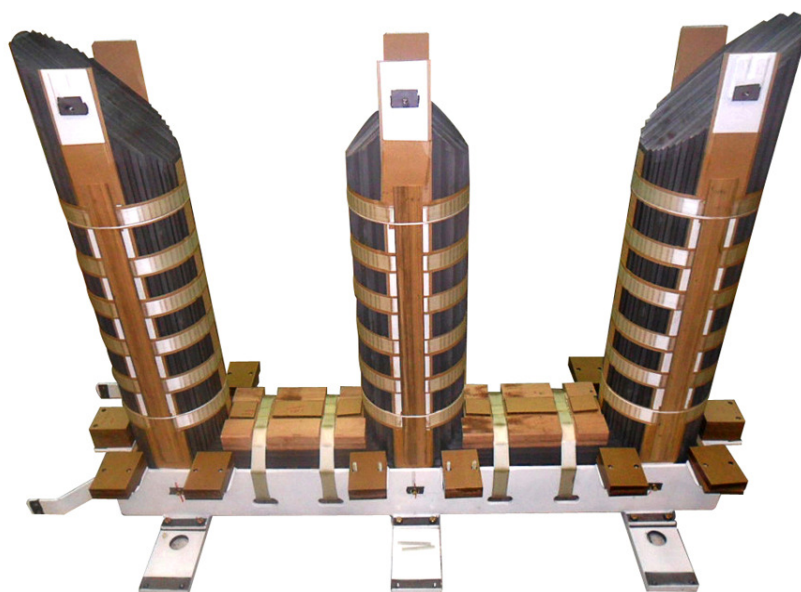
A montagem do núcleo é realizada de forma a contribuir com a melhoria do rendimento do transformador, sendo então composto por chapas de aço de espessura muito fina, empilhadas e separadas por um material isolante inorgânico conhecido como carlite. A Figura 1 mostra o detalhe de um empilhamento de chapas de aço silício.

Na maioria dos transformadores de distribuição, usualmente utiliza-se o núcleo do tipo envolvido, no qual as bobinas envolvem as colunas do núcleo. Atualmente, a tecnologia envolvendo metal amorfo que vem sendo praticado ao redor do mundo devido a requisitos de eficiências. E assim, dando maior vazão a outro segmento de projeto e construção de núcleos.



**Figura 1 – Empilhamento de chapas de aço silício.**  
Fonte: <http://www.digimotor.com.br>  
(Acesso em 22/04/15).

A Figura 2 mostra o núcleo trifásico de tipo envolvido.



**Figura 2 – Núcleo trifásico do tipo envolvido.**  
Fonte: <http://cnscores.com/> (Acesso em 22/04/15).

Os transformadores de potência possuem, em geral, núcleos com seções transversais aproximadamente circulares, tendo como objetivo ocupar a maior área

da seção circular. Dessa forma, é possível maximizar a seção magnética de forma não comprometer o processo fabril.

#### 2.1.1.2 Bobinas

Os enrolamentos possuem disposição concêntrica, na qual o enrolamento de baixa tensão é montado na parte interior da fase e o enrolamento de alta tensão é montado na parte exterior. Para tal construção, podem ser utilizados fios de cobre ou alumínio, de seção circular ou retangular, ou então, para as bobinas de baixa tensão, podem ser adotados enrolamentos feitos de lâminas de cobre ou alumínio.

Na Figura 3 pode ser visto o detalhe de um enrolamento do tipo “camada”.



**Figura 3 – Detalhe do enrolamento tipo “camada” com fio retangular.**

**Fonte: <http://electrical-engineering-portal.com/> (Acesso em 22/04/15).**

Os enrolamentos do tipo lâmina são utilizados para bobinas que possuem um nível de tensão menor que 4,16 kV. Tais condutores estão disponíveis no mercado para correntes elétricas acima de 400 A para fabricação de bobinas de transformadores.

Os enrolamentos constituem a parte mais significativa do custo do transformador, tornando-se assim fundamental a utilização de componentes isolantes de boa qualidade para não causar prejuízo ao equipamento quando em operação. Para cada tipo de condutor se utiliza diferentes tipos de materiais isolantes, porém, todos eles possuem como base a celulose.

#### 2.1.1.3 Tanque

Os transformadores elétricos de distribuição imersos em óleo normalmente são instalados em postes (que constituem uma rede aérea de distribuição de energia elétrica) e possuem o tanque em formato oval, de forma a obter um melhor aproveitamento da área interna do tanque, uma vez que as bobinas possuem um formato cilíndrico.

A principal função do tanque é propiciar um abrigo físico para a parte ativa do transformador, a qual ficará imersa em óleo quando o equipamento estiver totalmente montado. Além disso, o dimensionamento do tanque tem como objetivo propiciar uma dissipação de calor adequada junto aos radiadores.

O material utilizado na fabricação dos tanques é o aço-carbono, amplamente utilizado pelos fabricantes, tendo a espessura das chapas definidas em função da distribuição do peso da parte ativa do transformador.

#### 2.1.1.4 Radiadores

Os radiadores em um transformador elétrico a óleo são responsáveis por dissipar o calor gerado pela parte ativa do transformador quando energizado. Cabe ressaltar que mesmo com o transformador desconectado a uma carga, é gerado calor devido à excitação do núcleo e também devido ao fluxo magnético, gerando as chamadas perdas em vazio.

Importante lembrar que, devido às características físicas do óleo vegetal ser distintas do óleo mineral, o projeto dos radiadores para emprego em

transformadores que empregam óleo vegetal também deve ser alterado. Caso permaneça o mesmo projeto, deve-se analisar o ciclo de carga para que não sejam excedidos os limites de temperatura de operação (NBR 5356, 2007).

#### 2.1.1.5 Materiais do Isolamento Sólido

Nos transformadores imersos em líquido isolante são utilizados os materiais que possuem base de celulose como papel Kraft de alta resistência mecânica, papel crepado, estruturas com papel laminado como o papelão presspahn e madeira tratada. Estes materiais são higroscópicos, ou seja, nas condições ambientais normais eles absorvem umidade e são excessivamente porosos.

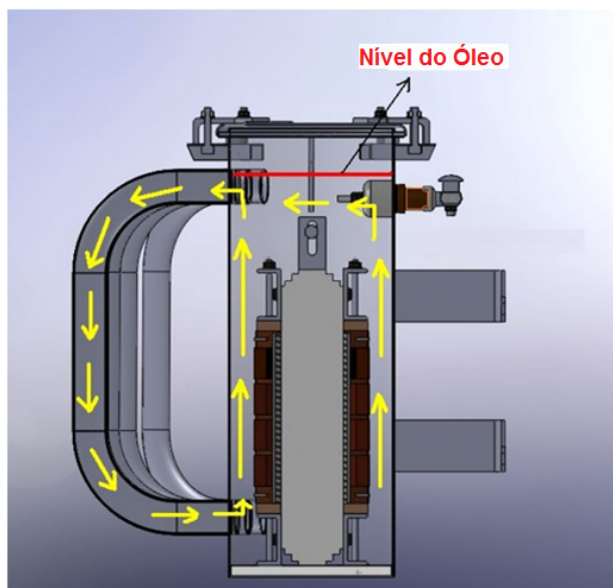
A degeneração do material de isolamento consiste na degradação do grau de polimerização produzindo essencialmente CO (monóxido de carbono) e CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono ou gás carbônico) e deixando o isolamento em forma de camadas cristalizadas e quebradiças. Um dos fatores que mais aceleram a degradação da celulose é a temperatura, sendo que, quanto maior for a temperatura de operação do transformador, mais rápida será a degradação do material de isolamento. A base da celulose tem o seu tempo de vida reduzido à metade para cada 8 °C a 10 °C de acréscimo da temperatura de operação (RIES, 2007).

## 2.2 ÓLEO ISOLANTE

O óleo isolante tem importância fundamental no transformador devido ao aspecto relacionado à isolação dielétrica e também devido às características de transmissão de calor que influenciam no projeto térmico do equipamento.

Quando a parte ativa de um transformador imerso em um líquido isolante é aquecida, o fluxo interno de óleo se dá por meio de um efeito termo-sifão, no qual o óleo tende a se deslocar para a parte superior do tanque. Dessa forma, o óleo fluirá pelos radiadores, que trocarão calor com o ar externo, refrigerando o óleo isolante. Tal processo ocorre em cada momento que o equipamento entrar em

operação e o óleo isolante seja aquecido (RIES, 2007). A Figura 4 mostra o esquema do sentido de circulação do óleo.



**Figura 4 – Circulação do óleo isolante no transformador por efeito termo-sifão.**

Fonte: [www.sigmatransformadores.com.br](http://www.sigmatransformadores.com.br)

A função do fluido como isolante é de fundamental importância também para a refrigeração das espiras (bobinas) de material condutor. Além disso, observa-se que quanto melhores forem as características isolantes do fluido mais econômico será o projeto, permitindo a redução da quantidade do isolante sólido e a diminuição das distâncias entre espiras, entre bobinas, o núcleo e entre as partes aterradas (MARTIGNONE, 1971).

O líquido isolante, ao cumprir funções de refrigeração e isolamento, sofre um processo de oxidação em razão do contato direto com altas temperaturas e altos campos elétricos. Os seguintes requisitos físico-químicos são exigidos para o líquido isolante (LUPI FILHO, 2012):

- Rigidez dielétrica suficiente para suportar as tensões elétricas normais e especificadas;
- Viscosidade que garanta a circulação e a transferência de calor;
- Suportabilidade às condições climáticas do local onde o equipamento será instalado;



- Oxidação reduzida que assegure vida útil total.

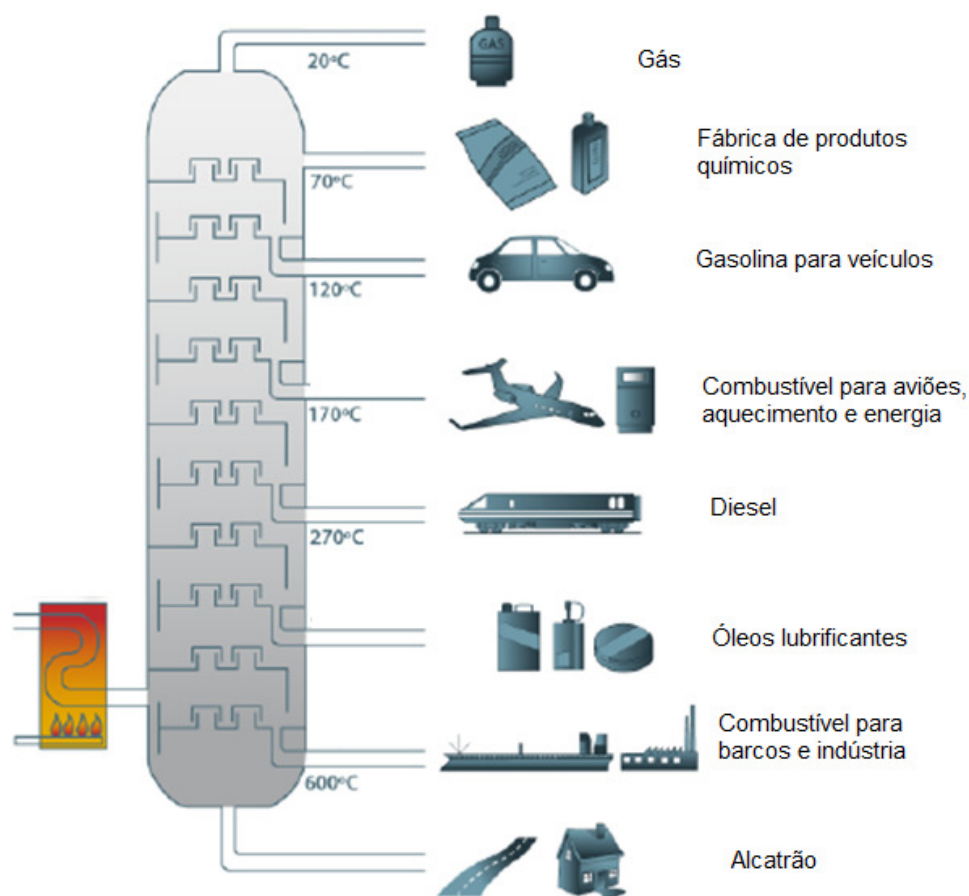
Dessa forma, a vida útil dos transformadores, consiste basicamente em proteger o papel isolante do ataque da água e dos compostos ácidos, que são gerados em consequência da degradação decorrente da alteração das propriedades do óleo isolante após um determinado tempo de operação.

Nesse contexto, os óleos isolantes utilizados atualmente podem ser de base mineral ou base vegetal, conforme exposição nas seções a seguir.

### 2.2.1 Óleo Mineral Isolante (OMI)

O óleo mineral isolante (OMI) tem sido utilizado desde 1892 como meio isolante e refrigerante, principalmente em transformadores elétricos (GOMES, 2010). Além disso, ao redor do planeta, outros muitos bilhões de litros de OMI estão em uso em equipamentos elétricos nas diversas possibilidades em que se faz necessário o uso de um óleo isolante. A popularidade do OMI se deve a sua disponibilidade e seu baixo custo, adicionalmente é um excelente meio isolante e de resfriamento (CLAIBORNE E CHERRY, 2006).

Atualmente o OMI é utilizado na maioria dos equipamentos elétricos e é obtido por meio da destilação do petróleo em pressão atmosférica, entre as frações de 300°C a 400°C (STOCCO, 2009). Este destilado pode ser de origem parafínica ou naftênica (LIPSTEIN, 1970). A Figura 5 apresenta o processo de destilação fracionada do petróleo empregando uma torre de arrefecimento.



**Figura 5 – Destilação fracionada do petróleo.**  
**Fonte: Adaptado de Stocco (2009).**

Sua classificação é definida conforme os métodos de refino aos quais foi submetido, que podem ser purificação ácido/alcalina, extração seletiva de solventes, desparafinação, purificação por contato com adsorventes e hidrogenação sob pressão (LIPSTEIN, 1970). Trata-se de uma mistura de compostos na qual a maioria das moléculas é constituída por carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) e, em pequenas quantidades, por compostos que apresentam nitrogênio e oxigênio em sua estrutura (WILSON, 1980).

A caracterização do OMI como parafínico ou naftênico, é, normalmente, realizada segundo os critérios da norma ASTM D 2140, por meio de medidas de viscosidade, densidade, índice de refração e pela correlação entre estes resultados em um diagrama ternário (STOCCO, 2009). Alternativamente, a classificação do OMI pode ser realizada com a utilização da técnica de espectroscopia na região infravermelho, pela determinação do seu conteúdo parafínico (Cp). Óleos com Cp

inferiores a 50% são considerados naftênicos enquanto que aqueles com  $C_p$  iguais ou superiores à 56% são classificados como parafínicos. Os óleos com valores de  $C_p$  entre 50% e 56% são classificados, em geral, como óleos intermediários (NYNAS, 2004).

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) estabelece as especificações desses dois tipos de óleos minerais isolantes para utilização em transformadores, desde a sua produção até a sua comercialização. Para transformadores em operação, os valores limites de características do óleo isolante são modificados devido ao envelhecimento natural deste em contato com materiais isolantes, ambiente físico e eletromagnético existente (LUPI FILHO, 2012).

Durante a operação do transformador o óleo passa por um processo de envelhecimento, resultante da elevação de sua temperatura, da ação do oxigênio sobre o mesmo e do seu contato com metais presentes na construção do transformador, como cobre e ferro. Como consequência, ocorre à deterioração das propriedades isolantes do óleo. Além disso, os subprodutos oriundos da degradação do OMI promovem a aceleração do processo degradativo do isolamento sólido e a formação de borra (UHREN, 2007).

No momento em que as propriedades físico-químicas do OMI não mais satisfizerem as condições dielétricas necessárias para o funcionamento do equipamento elétrico, ou seja, quando o fluido apresentar um alto grau de deterioração oxidativa e térmica, o óleo isolante deverá ser tratado ou então substituído. Tal prática de substituição ou regeneração é necessária para evitar danos ao isolamento sólido do transformador, o que provocaria redução da sua vida útil ou até mesmo provocar alguma falha elétrica.

### 2.2.2 Óleo Vegetal Isolante (OVI)

Com as dificuldades dos fornecedores de OMI pelo mundo, aliada à necessidade de emprego de fluidos biodegradáveis e com elevado ponto de combustão, fontes alternativas ao OMI têm sido pesquisadas e ofertadas. Fluidos sintéticos de hidrocarbono, silicone e éster sintético foram introduzidos na segunda metade do século 20, mas seu uso ficou limitado aos transformadores elétricos de

distribuição. Os ésteres sintéticos, além da característica biodegradável, porém não renovável, não tiveram seu uso consolidado no setor elétrico brasileiro devido ao seu elevado custo (UHREN, 2007).

Segundo Bashi et al. (2006), existem duas razões principais para se pesquisar fontes naturais alternativas para fluidos isolantes que devem ser consideradas:

- O óleo mineral do transformador é pouco biodegradável, sendo passível de contaminar o solo e os recursos hídricos se ocorrerem derramamentos graves. Agências reguladoras governamentais já estão olhando para esse problema e aplicando sanções mais severas para tais acidentes. Muitos milhares de transformadores estão localizados em áreas povoadas, centros comerciais e perto de cursos de água.
- Os produtos petrolíferos (combustíveis fósseis) eventualmente podem ser super utilizados, podendo haver uma grave escassez até mesmo pela metade deste primeiro século. Conservar as reservas de petróleo e reciclagem são vitais para os produtos à base de petróleo como plásticos, produtos farmacêuticos, produtos químicos orgânicos, e assim por diante. Até o desenvolvimento de fontes alternativas de energia economicamente viáveis, não há substituto fácil para a gasolina, combustível de aviação e óleos de aquecimento.

Além dos aspectos acima mencionados devido à necessidade de um meio ambiente menos poluído. O óleo vegetal isolante apresenta uma afinidade para a umidade maior do que o óleo mineral isolante e um limite de saturação mais elevado, o que permitirá manter o papel de isolamento mais seco, permitindo assim prolongar a vida útil do transformador.

A tendência é que óleos vegetais ganhem cada vez mais incentivos governamentais para sua produção visando a aplicação em máquinas elétricas. Cabe salientar que o uso de óleos vegetais possui enormes vantagens técnicas e também econômicas em longo prazo, conforme mencionado anteriormente. Segundo a empresa Bain & Company em seu estudo publicado em 2014 ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), os Estados Unidos já utilizam óleos vegetais em 20% de seus transformadores em operação, enquanto no Brasil, esta utilização ainda é de apenas 3%. Além disso, atualmente o custo para aquisição do óleo vegetal tem sido cerca de 70% superior ao óleo mineral, contudo,

durante o tempo de operação essa diferença é reduzida devido a vários aspectos técnicos que serão vistos posteriormente nesse trabalho.

O óleo vegetal consiste basicamente de triglicerídeos sintetizados naturalmente por esterificação do tri-álcool, chamado de glicerol, com três ácidos graxos. Os ácidos graxos são compostos por cadeias de hidrocarbonetos lineares terminados por função acarboxílica. Estas moléculas têm um número par de átomos de carbono (tipicamente de 8 a 22 triglicerídeos) e a cadeia pode ser saturada ou principalmente mono-, di- e tri-insaturados. O ácido esteárico é um exemplo de ácido graxo saturado. A sua fórmula bruta é  $\text{HOOC} - (\text{CH}_2)_{16} - \text{CH}_3$  e que é simbolizado pela expressão C18:0, onde os dois números correspondem, respectivamente, aos números de átomos de carbono e de átomos ligados de forma insaturada(s) na molécula. A natureza dos componentes de ácidos graxos de triglicerídeos desempenha um papel importante na determinação das propriedades físico-químicas do bio-óleo (OBANDE & AGBER, 2014).

Os óleos vegetais são sempre obtidos a partir de grãos, por processos de descortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente (STOCCO, 2009). Ao final deste processo, tem-se o óleo bruto. Este óleo passa então pelos processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização, obtendo-se o óleo refinado que é comercializado (MORETTO & FETT, 1998).

### 2.2.3 Pesquisas sobre o óleo vegetal utilizado como isolante elétrico

Segundo Vasconcellos, Mak e Franchini (2008) existem muitas instituições envolvidas na pesquisa de fluidos isolantes de transformadores elétricos à base de óleo vegetal, sendo que, dentre as mesmas estão:

- Central Power Research Inst., Bangalores, Índia;
- ABB Power T&D Co Inc, Raleigh, NC, EEUU;
- ABB Secheron Sa, Genebra, Suíça;
- Laboratoire D'Electrstatique et de Materiaux Diélectriques, França, Universidade de El Salvador;
- Institute of Electrical Enery Systems, Technical University, Berlim, Alemanha;
- Institute of Materials for Electrical and Electronics Engineering, University of Karlsruhe, Alemanha;
- Cooper Power Systems, EUA.

Além das instituições citadas, que englobam universidades e empresas privadas, a comunidade acadêmica também busca oleaginosas alternativas para produção de fluidos vegetais aplicados como dielétricos em transformadores. Dentre as pesquisas podem ser encontrados vegetais que competem com a indústria alimentícia e também pesquisas que priorizam vegetais que não compitam com a alimentação do homem, tais como:

- Óleo de palma – *Palm oil* (Bashi et al., 2006);
- Soja, Girassol, Arroz e Mamona (Stocco, 2009);
- Crambe (Gomes, 2010);
- Babaçu (Melo et al., 2011);
- Soja, Milho, Girassol, Babaçu e Algodão (Silva et al., 2012);
- Babaçu (Santiago et al., 2013);
- Girassol, Soja, Colza e Canola (Fernández et al., 2013);
- Andiroba (Pinto et al., 2013);
- Óleo de dendê (Obande & Agber, 2014).

Bashi et al. (2006), após realizarem a filtração e tratamento visando remover todos contaminantes ácidos do óleo de palma (azeite de dendê) bruto,

observaram que o mesmo possuía características dielétricas superiores ao estipulado pelas normas vigentes, estando adequado para uso comercial em equipamentos elétricos. Obande & Agber (2014) após uso do azeite de dendê apontaram o mesmo como uma excelente alternativa para substituição do óleo mineral em transformadores de distribuição devido aos resultados comparativos obtidos com o óleo mineral Shell Diala D, onde o óleo vegetal demonstrou um desempenho satisfatoriamente superior.

Stocco (2009) concluiu que o óleo de girassol e o óleo de arroz não são indicados para uso como fluido isolante para equipamentos elétricos porque suas características não atenderam as exigências elétricas solicitadas durante os ensaios de laboratórios devido a falhas no isolamento. Dessa forma, para que esses óleos possam ser utilizados como fluido isolante, devem ser processados adequadamente com o objetivo de ajustar suas características às exigências dos equipamentos elétricos. Ainda, o óleo de mamona não chegou a ser ensaiado em laboratório pois os parâmetros físico-químicos estavam demasiadamente fora do estabelecido pelas normas aplicáveis, principalmente quanto a sua viscosidade. Dessa forma, somente o óleo de soja foi aprovado nos ensaios elétricos realizados em protótipos, contudo não atendeu a todos os parâmetros da norma NBR 15422, especificamente quanto aos valores de teor de água e de índice de neutralização, os quais podem ser corrigidos por meio da retirada de umidade do óleo (no caso do ensaio do teor de água) e por meio do refino do óleo, para redução da sua acidez e compatibilidade com os índices de neutralização definidos pela citada norma.

Gomes (2010) pesquisou sobre a cultura do crambe, concluindo que tal oleaginosa não compete com terras agriculturáveis utilizadas para geração de produtos alimentícios. Além disso, devido ao refino realizado e com os procedimentos de aditivação adequados, o óleo vegetal de crambe apresentou propriedades físico-químico superiores aos óleos comercializados como fluidos isolantes para máquinas elétricas. Contudo, o fator crítico para o progresso na pesquisa para a aplicação em larga escala se deve ao fato da baixa produtividade do crambe que é cerca de metade quando comparado a soja. O óleo utilizado na pesquisa encontra-se em operação no transformador que tem sido acompanhado pelo autor como continuidade da pesquisa.

Melo et al. (2011) ensaiaram um transformador de 75 kVA preenchido com óleo vegetal de babaçu, obtendo excelentes resultados quando a isolação

ômica na parte ativa do transformador com o valor de 50.000 MΩ e passando por todos ensaios de rotina conforme NBR 5356 (Transformadores a óleo), o transformador citado está instalado na rede de distribuição de energia elétrica no Piauí e sob acompanhamento para estudos dos pesquisadores quanto a durabilidade do óleo de babaçu e também quanto a perda de isolamento com o tempo de operação. Para o mesmo trabalho, Santiago et al. (2013) investigaram a formação de gases incipientes presentes no equipamento após 2 anos em operação e não detectaram nenhuma anomalia, ou seja, o transformador estava operando em perfeitas condições.

Silva et al. (2012) após experimentos observaram que óleos extraídos do algodão, do girassol, do milho e da soja possuem viscosidade e densidade adequadas para uso como fluidos isolantes em transformadores; já o óleo de babaçu não possui fluidodinâmica adequada a 20 °C. Os óleos estudados não apresentaram comportamento corrosivo detectável, o que indica uma baixa acidez. Cabe ressaltar que os óleos sem passar por procedimento químico de neutralização apresentaram rigidez dielétrica inferior à especificada na norma NBR 15422. E ainda, o processo de neutralização favoreceu a diminuição das perdas dielétricas (fator de potência) e aumentou a rigidez dielétrica, sendo que, dentre os óleos neutralizados, o óleo de milho foi o único que apresentou rigidez dielétrica superior ao mínimo recomendado pela norma citada para fluidos dielétricos, ou seja, os demais não atenderam ao mínimo requisitado.

Pinto et al. (2013) pesquisaram o óleo de andiroba e verificaram que o óleo bruto possuía Índice de neutralização com valor de 1,46 mg KOH/g e, após o processo de neutralização e filtragem, foi alcançado o valor de 0,04 mg KOH/g, o qual é inferior ao estipulado pela norma NBR 15422, que é de 0,06 mg KOH/g. Os autores enfatizaram que para o uso em transformadores, é imprescindível que o óleo de andiroba seja submetido a procedimentos químicos adequados para atendimento dos parâmetros das normas aplicáveis. Além disso, afirmaram que o mesmo se mostra um forte candidato como fluido vegetal isolante para uso em transformadores.

Fernández et al. (2013) elaboraram diversas pesquisas para verificar o estado da arte na pesquisa de óleos vegetais para equipamentos elétricos e também sobre as leis e incentivos ambientais para óleos vegetais nesse mesmo segmento. Os autores citaram que dentre os óleos vegetais já estudados, os que possuem



melhores propriedades para produção são os óleos de girassol, de soja, de colza e de canola. Além disso, os autores observaram que o fluido de silicone e os óleos vegetais citados possuem alto ponto de combustão, o que os caracterizam como fluidos de segurança. Cabe salientar que todos os fluidos isolantes citados possuem viscosidade maior que a do óleo mineral, ou seja, deve-se tomar cuidados adicionais para o projeto e dimensionamento do sistema de refrigeração do transformador.

Em novembro de 2006 foi publicada a norma ABNT NBR 15422 que trata da “Especificação de óleo vegetal isolante novo”. Esta norma foi elaborada com base no estudo realizado pela força tarefa FT-02 do grupo GT D1.01 do CIGRÉ-Brasil (Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica), responsável pela definição dos ensaios de aceitação deste novo fluido e também na norma ASTM D6871-03 - *Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus*.

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

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do OVI novo.

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

Fonte: NBR 15422 (2006).

Os primeiros óleos vegetais isolantes lançados no mercado nacional foram o BIOTEMP<sup>®</sup>, importado da Suécia pela ABB Brasil e o ENVIROTEMP FR3<sup>®</sup>, comercializado pela Cooper Power Systems e fabricado pela empresa Cargill. Em 2007 foram lançados no mercado nacional os óleos produzidos e comercializados a partir de uma tecnologia 100% nacional pela empresa Mineraltec (WILHELM,

GRANATO & TULLIO, 2007). A Tabela 2 apresenta os óleos vegetais comumente comercializados no segmento de equipamentos elétricos no Brasil.

**Tabela 2 – Empresas brasileiras que fornecem óleo vegetal.**

<b>Fabricante</b>	<b>Nome</b>	<b>Base Vegetal</b>	<b>Transformadores em operação (mundo)</b>	<b>Máxima Classe de tensão</b>
ABB	Biotemp™	Soja, Canola ou Girassol	Não divulgado	Até 242 kV
Cargill / Cooper	Envirotemp FR3™	Soja	600.000	Até 630 kV
Mineraltec	Biovolt™	Milho e Soja	Não divulgado	Até 36 kV

**Fonte: Autoria própria.**

Em 2014, a Siemens entregou o primeiro transformador de potência refrigerado e isolado a óleo vegetal com classe tensão de 630 kV. Esse equipamento possui alta tensão em 420 kV nominal e uma baixa tensão de 110 KV, e foi instalado e opera na Alemanha, país que possui normas rigorosas com relação à conservação ambiental.

Tal equipamento tem potência nominal de 300 MVA e em condições de sobrecarga pode atingir a potência de 400 MVA. O transformador protótipo produzido pela Siemens em conjunto com seu cliente final, possui aproximadamente 95 toneladas de óleo vegetal, o que equivale a aproximadamente 104 mil litros de óleo. O fabricante e o cliente em comum acordo irão monitorar o equipamento mensalmente através dos meses e anos e os resultados serão utilizados para aumentar o conhecimento a respeito do comportamento de óleos vegetais para transformadores com extra alta tensão, visto que, atualmente as pesquisas tem se estendido para transformadores de média e baixa tensão devido ao elevado custo de fabricação de transformadores de alta potência.

A Figura 6 mostra o transformador na unidade de ensaios da Siemens em Nuremberg (Alemanha).



**Figura 6 – Transformador com óleo vegetal em 420 kV.  
Fonte: Siemens AG (2014).**

Na Figura 7 a seguir pode ser visto o transformador instalado na subestação de Bruchsal, Alemanha.



**Figura 7 – Transformador com classe 420kV e óleo vegetal em operação.  
Fonte: Siemens (2014).**

A utilização de OVIs iniciou-se com a substituição do OMI (retrofilling ou reenchimento) em transformadores em operação. O primeiro teste, sob este enfoque, foi realizado em dois transformadores de 225kVA, tipo pad-mounted, alimentando fornos, instalados no início de 1970, sujeitos a um carregamento contínuo com 80% da corrente elétrica nominal (MCSHANE, LUKSICH, RAAP, 2003).

Em outubro de 2001 a empresa Alliant Energy fez o reenchimento do primeiro transformador de potência (fabricante: Pennsylvania; dados de placa do equipamento: trifásico, 50MVA, 69kV, NBI 350kV, 26.500 litros de óleo, fabricado em 1957) com óleo vegetal isolante (MCSHANE, LUKSICH, RAAP, 2003). Até maio de 2007, encontravam-se em operação, na América do Sul, cerca de 410 transformadores isolados com Envirotemp® FR3™, nas tensões primárias de 0,44 a 230 kV e de potência nominal entre 10 a 40 000 kVA (UHREN, 2007).

No Brasil, duas concessionárias de energia elétrica estão realizando testes utilizando o OVI em equipamentos elétricos de potência. A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) colocou em operação, em agosto de 2006, na subestação de Contagem, na Região Metropolitana de Belo Horizonte, o primeiro transformador do mundo que funciona totalmente a OVI. O transformador, que foi desenvolvido em parceria com o fabricante do equipamento, utiliza OVI também nas buchas de alta tensão. O mesmo OVI é utilizado na chave comutadora, responsável pela regulação dos níveis de tensão entregue pelo equipamento aos consumidores. Segundo a CEMIG, a combinação do OVI com a avançada tecnologia de materiais isolantes possibilitou que esse transformador, que inicialmente foi projetado para 25 MVA em 138 kV, seja sobrecarregado até 43 MVA, durante quatro horas consecutivas, sem perda de sua vida útil (WILHELM, TULIO & UHREN, 2009).

Na Figura 8 pode ser visto o transformador fabricado entre a parceria da concessionária de energia CEMIG e da empresa fabricante de transformadores ABB.



**Figura 8 – Transformador verde da CEMIG.**  
**Fonte: CEMIG (2006).**

As Centrais Elétricas do Norte (ELETRONORTE) e a filial brasileira da estatal francesa Areva desenvolveram em conjunto o primeiro reator de 242 kV do mundo à base de OVI. Em obtendo êxito, a Eletronorte tem interesse em colocar mais equipamentos desse porte nas linhas que atendem a região Amazônica (WILHELM, TULLIO & UHREN, 2009).

A Companhia Paranaense de Energia (COPEL) também colocou em operação esta nova tecnologia. O projeto da rede subterrânea de distribuição de eletricidade na Avenida Brasil, em Foz do Iguaçu (PR), incorpora algumas inovações técnicas que estão sendo introduzidas pela Copel de forma pioneira no sistema elétrico brasileiro. Inaugurada em junho de 2006, uma delas é a adoção de transformadores que usam óleo vegetal como isolante elétrico em lugar do óleo mineral (COPEL, 2006). A rede subterrânea da Avenida Brasil tem 18 transformadores desse tipo, com potência individual de 500 kVA e operando confinados em câmaras especiais na tensão de 13,8 kV e com saídas de 220/127 V. A rede elétrica

subterrânea atenderá cerca de 650 consumidores, como grandes edifícios e galerias, hotéis, bancos e lojas (WILHELM, TULLIO & UHREN, 2009).

### 2.3 O TUNGUE

Tungue é o nome comum de duas espécies de árvores de pequeno porte da família Euphorbiaceae cujo os nomes científicos são *Aleurites fordii* Hemsl. e *A. montana* (Lour.) Wils respectivamente. Tais espécies são cultivadas com o objetivo de produzir sementes das quais se extrai, por prensagem e com o uso de solventes, um óleo denominado "óleo de tungue", internacionalmente conhecido como "*Tung oil*" ou "*Wood oil*" (óleo de madeira), (GRUSZYNSKI, 2002).

Devido ao seu poder secativo, esse produto possui muitas aplicações industriais, tais como: na manufatura dos vernizes, das resinas, do couro artificial, sendo aplicado nas pinturas artísticas, nas tintas industriais, na proteção da madeira, usado também para revestir recipientes para alimentos, bebidas, fios elétricos e outras superfícies metálicas (GOLFETTO et al, 2011).

Normalmente, é possível encontrar o óleo de tungue na indústria de tintas e resinas, sendo utilizado no revestimento de madeiras para proteção contra umidade e intempéries, além de proporcionar acabamento à madeira. A principal característica do óleo de tungue é sua rápida secagem quando em contato com a madeira, o que proporciona maior durabilidade a mesma.

Com o intuito de buscar uma oleaginosa alternativa para a produção de líquido isolante para uso em transformadores, que possua base vegetal, que não compita com a indústria alimentícia e que ainda possua boa produtividade, optou-se pelos estudos sobre o óleo de tungue. Dessa forma, nos próximos sub-capítulos serão abordados os aspectos produtivos desse vegetal, como, por exemplo, informações sobre o cultivo e produção do tungue, bem como as suas características intrínsecas.

### 2.3.1 Origem e locais de cultivo

O tungue é nativo da Ásia, onde é cultivado predominantemente na China. É plantado comercialmente também na América do Sul, nos Estados Unidos e na África. "*Tung*" significa na língua chinesa "coração", nome inspirado no formato das folhas dessa planta (CHANG, 1983).

A Argentina, um dos principais produtores da América do Sul, iniciou o seu cultivo por volta de 1928 (MUNARINI *et al.*, 2009). No Paraguai, a espécie *A. montana* se adaptou às regiões do Itapua e Alto Paraná, as quais possuem solos mais férteis, porém, muito frágeis. No Brasil é encontrado no Estado do RS, destacando-se em municípios da Serra Gaúcha, como Fagundes Varela e Veranópolis (IBGE, 2010).

### 2.3.2 Características do Tungue

A cultura do tungue caracteriza-se por ser pouco exigente em condições de fertilidade do solo; sendo assim, desenvolve-se melhor em solos com pH (índice de acidez) entre 6,0 e 6,5, mas tolera solos de pH entre 5,4 e 7,1 (MUNARINI *et al.*, 2009). O tungue é uma espécie de clima temperado da família *Euphorbiaceae*, caducifólia que necessita de 350 a 400 horas de frio (temperatura abaixo de 7,2 °C) para a diferenciação do florescimento e frutificação (DUKE, 1983).

A planta é cultivada com o objetivo de produzir óleo, que é extraído das sementes (ÁVILA, 2010). De acordo com Duke (1983), o teor de óleo da amêndoa pode chegar a 63% de seu peso, sendo que tal característica é variável em função de vários parâmetros durante o processo de plantio e cultivo. De acordo com Silva *et al.* (2011), o óleo de tungue logo após ser submetido a extração da planta cultivada em solo nacional, mais precisamente no Rio Grande do Sul, possuía índice de acidez de 0,75 a 1,28 mg KOH/g, ou seja, para posterior refino tal parâmetro é o adequado para atingir os índices estabelecidos pelas normas vigentes.

A Tabela 3 apresenta alguns dados quanto a produção dos óleos mais difundidos comercialmente para aplicações industriais. Nesta tabela a unidade



“kg/ha” aponta qual o peso de óleo produzido por hectare de área plantada e a unidade “% óleo” indica a porcentagem de óleo obtida em cada semente.

Cabe salientar que para diferentes plantações e regiões os dados podem sofrer alterações devido às sazonalidades climáticas. Sendo que, na bibliografia encontram-se muitos autores obtendo diferentes resultados quanto a produtividade, contudo, sempre mantendo uma coerência quanto à diferença de produtividade em relação aos demais vegetais.

**Tabela 3 – Características das principais culturas para uso energético.**

<b>Planta</b>	<b>Kg/ha</b>	<b>% óleo</b>	<b>Mercado</b>	<b>Cultivo</b>
Tungue	1240	40	Mercado mundial restrito	Incipiente no Brasil
Pinhão Manso	700	35	Sem mercado mundial	Incipiente no Brasil
Girassol	550	44	Commodity mundial	Intensivo no mundo
Soja	450	20	Commodity mundial	Intensivo no mundo
Mamona	450	48	Mercado mundial restrito	Restrita no Brasil
Algodão	315	15	Mercado mundial restrito	Intensivo no mundo

**Fonte: Adaptado de Cortês, 2011.**

A espécie cultivada na Serra do Nordeste do Rio Grande do Sul, é a *A. fordii*, de porte um pouco menor que *A. montana* e também mais rústica e adaptada ao clima frio. As sementes de *A. fordii* possuem em torno de 33% de óleo. Esse óleo contém uma alta porcentagem de ácido oleosteárico, sendo o único óleo vegetal produzido comercialmente que possui esse componente, ao qual é atribuído a alta qualidade do tungue como óleo de secagem rápida. Os teores de óleo na semente podem variar entre 30% e 40%, sendo esse composto por 75% - 80% de óleo alfa-esteárico, 15% oléico, 4% palmítico e 1% ácido esteárico. Taninos, fitoesteróis e saponina também são encontrados (NIEDESBERG, 2012).

O óleo também pode ser utilizado como matéria-prima para o biodiesel, que, dentre outras vantagens, proporciona redução na emissão de gases tóxicos à atmosfera, comparado com o combustível de origem petroquímica (SAVY FILHO, 2005). Devido suas características para florescimento, o tungue é caracterizado como uma espécie de clima temperado, caducifólia, de 3 a 9 metros de altura (podendo atingir 12 metros), com ramos robustos, folhados, com superfície

lenticelada e folhas glabras, ovadas ou cordadas de 7 a 12 cm de comprimento, tendo uma madeira de casca lisa e macia (REITZ, 1988), (LANGELAND & BURKZ, 1998). A Figura 9 mostra uma árvore de tungue adulta.



**Figura 9 – Árvore do Tungue.**  
**Fonte: Scipioni, M.C. (2006).**

As folhas possuem coloração verde escura e apresentam duas glândulas vermelhas no ápice dos pecíolos (ÁVILA, 2010). Na Figura 10 podem ser observados detalhes da folha da árvore de tungue, sendo que a figura A mostra a folha e a figura B o detalhe das glândulas vermelhas existentes na mesma (dentro do círculo tracejado).

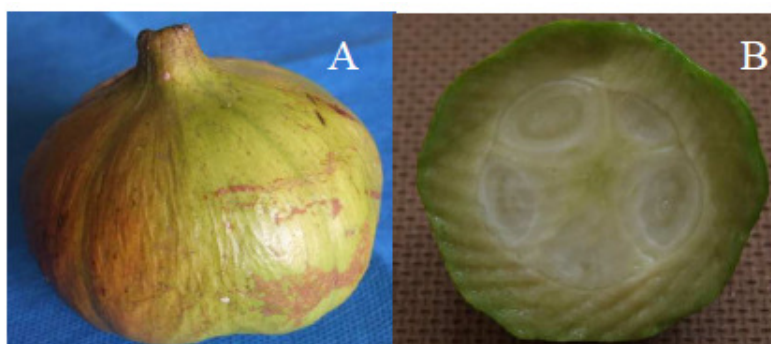
De acordo com Duke (1983), as plantas de tungue geralmente iniciam a produção no terceiro ano após o plantio, entrando na produção comercial no quarto ou quinto ano, alcançando sua máxima produção em 10 a 12 anos.

Os frutos são esféricos em forma de pêra, de coloração variando do verde ao roxo, quando maduros e contendo de 4 a 5 sementes. As sementes (ou amêndoas) tem entre 14 mm a 35 mm de comprimento e entre 15 mm a 30 mm de diâmetro. Na sua seção transversal, o formato do fruto é próximo ao triangular, com superfície convexa. A casca é espessa, medindo cerca de 1 a 5 mm de espessura e a parte interna possui cor creme (LANGELAND E BURKS, 1998).



**Figura 10 – Folha de Tungue.**  
Fonte: Ávila (2010).

Na Figura 11 pode ser visto o fruto do tungue, sendo do lado A observa-se o fruto inteiro e do lado B observa-se o fruto cortado transversalmente.



**Figura 11 – Fruto do Tungue.**  
Fonte: Ávila (2010).

### 2.3.3 Produtividade do Tungue

O sistema de cultivo do tungue no Rio Grande do Sul é extensivo. As plantas são distribuídas em meio a pastagens, aproveitando áreas impróprias para culturas anuais. A colheita é realizada à medida que os frutos caem no chão. Em geral, são necessárias duas ou mais operações de colheita, pois a maturação do tungue não é uniforme. Antes da comercialização, o material é colocado em sacos e deixado para secar em galpões, até alcançar umidade abaixo de 30%. Esse

processo leva duas ou mais semanas e é realizado pelo produtor (NIEDESBERG, 2012).

A produtividade alcançada nos cultivos norte americanos é de 4.500 kg a 5.000 kg de frutos por hectare (GRUSZYNSKI, 2002). Em termos de produção nacional a área cultivada no Rio Grande do Sul no ano de 2008 foi de 163 hectares, com um rendimento médio alcançado de 2.472 kg de frutos por hectare. No Brasil o cultivo é realizado predominantemente em pequenas propriedades, com economia baseada no emprego de mão-de-obra familiar (NIEDESBERG, 2012).

#### 2.3.4 Outros óleos vegetais comerciais

De acordo com Gomes (2010), atualmente são encontrados alguns tipos de óleo vegetal isolante (OVI) no mercado, sendo que o mais utilizado é o fluido isolante derivado da soja . Como visto anteriormente, tal fato se deve principalmente à disponibilidade de matéria-prima e ao custo propriamente dito.

No Brasil, os isolantes com base em ésteres naturais mais difundidos são: Envirotemp FR3<sup>®</sup> produzido pela Cargill e comercializado pela *Cooper Power Systems*; Biovolt<sup>®</sup> produzido pela ABB (*Asea Brown Boveri*) da Suécia e comercializado pela ABB Brasil e o AGBioelectric<sup>®</sup> produzido pela FAG, todos eles possuindo como base a soja.

De acordo com Lewand (2001) no mercado internacional são encontrados ainda outros cinco tipos de fluidos isolantes à base de ésteres naturais, os quais são: Biotrans<sup>®</sup>, cuja pesquisa para obtenção do óleo vegetal isolante foi conduzida pela *Waverly Light & Power* e pela *University of Northern Iowa* e Biotemp<sup>®</sup>, produzido pela ABB.

Da soja produzida no Brasil, 40% são exportados em grãos, principalmente para a Europa e a China. Os outros 60% são esmagados; destes, cerca de 20% é transformado em óleo, 77% em farelo e o restante entra em outras formas de alimentação. Aproximadamente 80% do óleo de soja produzido no Brasil são destinados ao mercado interno (SCHLESINGER, 2004).

### 2.3.5 Pesquisas com o Tungue

Zornitta (2014) pesquisou sobre o uso do tungue como fonte de biodiesel, sendo que, uma das maiores vantagens do tungue em relação a outras oleaginosas está na produtividade e também no rendimento do mesmo devido ao seu poder calorífico. Zornitta afirmou que a facilidade de cultivo, a diversidade de aplicações e o grande potencial energético e econômico tornam a árvore do tungue promissora no sentido de ampliar os estudos a fim de otimizar as suas aplicações.

Samadzadeh et al. (2011) abordaram o estudo do óleo tungue como um agente reparador autônomo para auto regeneração de revestimentos em epóxi, sendo que, na área da peça que foi encapsulada com óleo de tungue ocorreu uma polimerização que auxiliou na reparação, obtendo assim resultados animadores quanto a capacidade secativa do óleo de tungue.

Casado et al. (2009) realizaram estudos sobre a alta resistência do composto de poliuretano baseado no óleo de tungue misturado a pó de madeira da mesma árvore.

Na bibliografia ainda existem poucos resultados quanto ao uso do óleo de tungue para diversas aplicações, sendo que muitos trabalhos estão em processos de solicitações de patentes, o que ainda impede os autores de divulgar os resultados.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo, serão expostos os procedimentos experimentais adotados para análise do óleo de tungue adquirido.

Os ensaios físico-químicos foram realizados em uma empresa privada local, sendo que os ensaios descritos são necessários para avaliação preliminar da viabilidade do óleo.

Devido à acidez elevada do óleo de tungue bruto, analisada após os ensaios físico-químicos iniciais, foi necessário realizar o tratamento de adsorção por adição de Terra Fuller com o objetivo de reduzir tal característica e, posteriormente, realizar também o refino industrial do mesmo, processo que também será descrito neste capítulo.

Para análise dielétrica do óleo de tungue, foi construído um transformador protótipo para verificar a eficiência técnica deste fluido.

Pretende-se avaliar o desempenho do óleo de tungue ensaiado no protótipo de transformador e, posteriormente, compará-lo ao desempenho obtido por dois outros óleos comerciais, um mineral e outro vegetal, ensaiados em dois outros transformadores elétricos, de características construtivas iguais ao do protótipo construído.

#### 3.1 MATÉRIA-PRIMA UTILIZADA NO EXPERIMENTO

O óleo de tungue utilizado nos ensaios foi adquirido no comércio, sendo que, inicialmente os ensaios para avaliação da amostra foram realizados no óleo no estado conforme recebido, ou seja, inicialmente o óleo não foi submetido a nenhum tratamento químico.

O óleo foi adquirido da empresa Madelâminas, situada na cidade de São Paulo, no estado de São Paulo. O óleo comercializado foi cultivado no estado do Rio Grande do Sul.

## 3.2 ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS

A principal finalidade dos ensaios físico-químicos é avaliar o comportamento do óleo isolante em serviço, sendo que os ensaios mais aplicados são: fator de potência, índice de neutralização, tensão interfacial, rigidez dielétrica e teor de água.

Estes ensaios traduzem as condições imediatas do óleo em uso, sendo complementados com outras análises realizadas apenas nos casos de obtenção de valores fora dos limites de utilização, ou casos particulares de estudos específicos, ou ainda nos processos de recepção de óleos novos (GOMES, 2010).

### 3.2.1 Lista de equipamentos para os ensaios físico-químicos

A seguir serão listados os equipamentos utilizados para os ensaios físico-químicos no óleo de tungue.

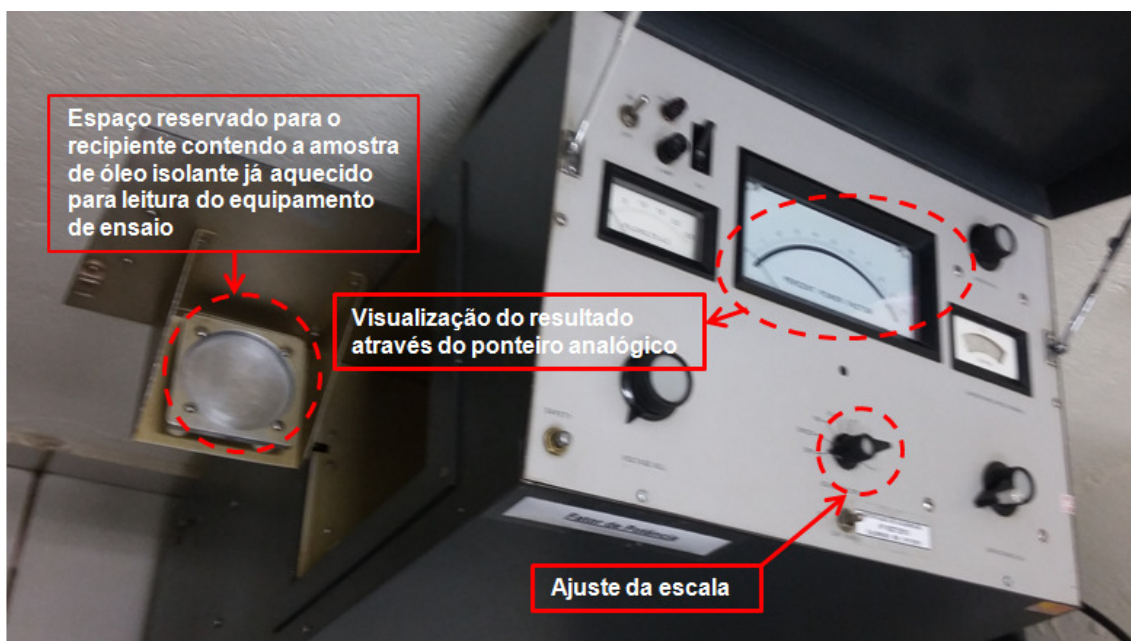
- Ponte de medição: Ponte tipo M-OIL, marca Doble, Capacitiva;
- Câmara de ensaio Doble: Estufa com controle de temperatura e circulação do ar;
- Tensiômetro;
- Anel de fio de platina, Krüss;
- Agitador magnético;
- Oil test unit, Baur – DTA 100C;
- Medidor de Fator de Potência, Marca: Nansen, Modelo: MP 12 HD;
- Photo Volt – Aquatest;
- Estufa.

### 3.2.2 Fator de potência (Fator de Perdas Dielétricas)

Este ensaio consiste na determinação da tangente ou seno do ângulo de fase entre tensão e corrente quando se aplica uma tensão a 60Hz no óleo isolante. A amostra é colocada entre os dois eletrodos de um capacitor e, em seguida é aplicada uma tensão constante a uma temperatura fixa. A leitura obtida para os parâmetros acima é denominada como o Fator de Perdas Dielétricas ou Fator de potência.

Um fator de potência elevado indica a presença de alto grau de contaminantes solúveis, tais como: umidade, carbono, matéria condutora, sabões e produtos oxidados. Contudo, salienta-se que os óleos vegetais normalmente têm fatores de perdas dielétricas mais elevados do que os óleos minerais, especialmente em temperaturas elevadas (STOCCO, 2010).

Na Figura 12 mostra o equipamento utilizado para determinar o fator de potência do óleo de Tungue utilizado nesse experimento.



**Figura 12 – Equipamento para ensaio do fator de potência (Modelo: Type M-Oil Test Set, Fabricante: Doble Engineering).  
Fonte: Autoria própria.**

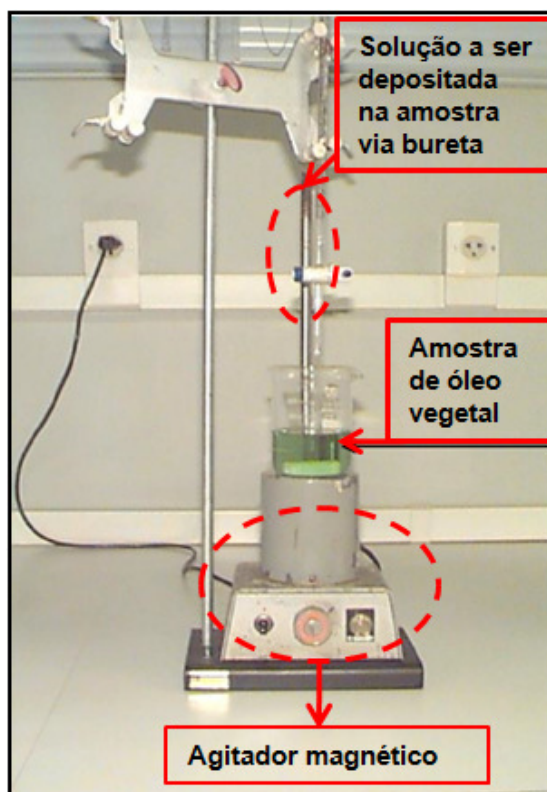


### 3.2.3 Ensaio de Índice de neutralização do óleo

Representa a medida da quantidade de materiais ácidos presentes na amostra. Quando os óleos envelhecem devido ao aquecimento que ocorre durante a operação, a acidez do óleo aumenta e conseqüentemente o número de neutralização aumenta. Para essa variável, um valor reduzido de teor de acidez, implica na minimização da condução elétrica e da corrosão metálica, aumentando assim a vida do sistema isolante.

Segundo Wilhelm et al. (2006), os índices de neutralização típicos dos Óleos Vegetais Isolantes (OVI) são normalmente mais altos do que os Óleos Minerais Isolantes (OMI) porque os OVI's oxidados tendem a formar longas cadeias de ácidos graxos enquanto que o OMI's tendem a formar ácidos orgânicos de cadeia curta, sendo estes muito mais agressivos em comparação aos primeiros.

Na Figura 13 mostra os equipamentos utilizados para o ensaio de acidez.



**Figura 13 – Equipamentos para ensaio do Índice de neutralização.**  
**Fonte: Aatoria própria.**

### 3.2.4 Rigidez dielétrica do óleo isolante

Consiste em analisar por meio de tensão alternada a ruptura do meio isolante, ou seja, ocorrem incrementos de tensão entre os dois eletrodos do equipamento de ensaio até que ocorra a descarga entre os eletrodos.

Os hidrocarbonetos que compõem o óleo isolante possuem polaridade elétrica muito baixa, isso implica em rigidez elétrica elevada. Sendo que, essa resistência dielétrica é sensivelmente diminuída pela presença de impurezas polares. A rigidez dielétrica pode ser reduzida caso o teor de água do óleo esteja excessivamente elevado, caso possua oxigenados no óleo, materiais sólidos, partículas microscópicas, etc. Podendo ocasionar falhas na isolação e danos ao transformador.

A Figura 14 apresenta o equipamento utilizado para determinar a rigidez dielétrica do óleo.



**Figura 14 – Equipamento para ensaio de rigidez dielétrica (Modelo: Baur Oil Tester DTA, Fabricante: Baur).  
Fonte: Autoria própria.**

### 3.2.5 Tensão Interfacial do óleo isolante

Este ensaio é feito colocando-se uma camada de óleo isolante sobre uma camada de água e, em seguida, fazendo-se um anel de platina imerso na água passar para a camada de óleo. A força necessária para fazer com que o anel rompa a superfície da água é tomada como a Tensão Interfacial Óleo/Água.

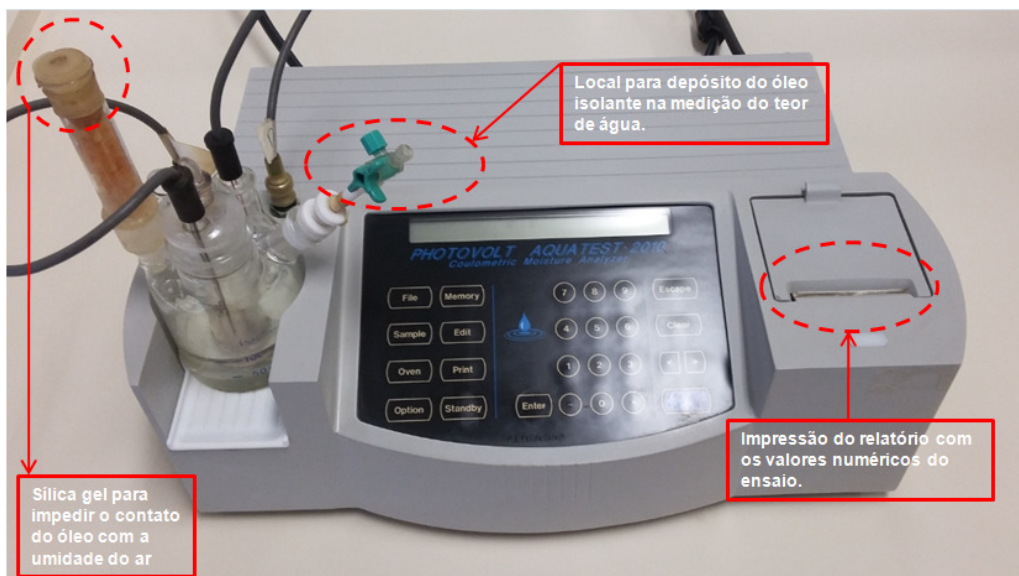
A água é o óxido de hidrogênio, portanto, um material altamente oxigenado e de elevada polaridade molecular. Os hidrocarbonetos, por outro lado, são substâncias de muito baixa polaridade em sua molécula e não oxigenadas. Assim, quanto mais puro for o óleo, menor será sua interação com a camada de água e mais alta será o valor obtido para o ensaio. Um valor mínimo garante baixos teores de substâncias oxigenadas e polares no produto.

Os valores sugeridos pela norma NBR 15422 para tensão interfacial estão entre 26 mN/m a 30 mN/m. Contudo, os critérios de desempenho ainda estão em análise e os requisitos não foram estabelecidos.

### 3.2.6 Teor de água do óleo isolante

Visa verificar a quantidade de água presente na amostra de óleo por meio de reações químicas. O óleo vegetal, por sua composição natural, possui maior teor de água do que o óleo mineral, contudo, tal característica pode ser alterada misturando sílica gel ao óleo, ou através da secagem em estufa até alcançar os níveis aceitáveis.

A Figura 15 mostra o equipamento utilizado para determinar o teor de água da amostra de óleo.



**Figura 15 – Equipamento para ensaio do teor de água (Modelo: Aquatest 2010, Fabricante: Photovolt).  
Fonte: Autoria própria.**

### 3.3 TRATAMENTO COM ADSORVENTES

Os ensaios preliminares obtidos mostraram a necessidade do tratamento do óleo bruto de Tungue com adsorventes.

O tratamento com adsorventes ocorre quando o óleo é colocado em contato com materiais com características adsorventes adequadas, em temperatura ótima. Este processo visa remover componentes minoritários específicos e não voláteis, tais como: clorofilas e carotenóides que afetam a coloração, íons metálicos (ferro e cobre) que podem catalisar a oxidação do óleo, cálcio, magnésio, fósforo, sódio e sabões (RITTNER, 2001).

#### 3.3.1 Terra Fuller (*Atapulgita*)

Terra Fuller é o nome comercial da atapulgita, um argilo-mineral motmorilonítico de estrutura 2:1, composto basicamente por silicato hidratado de alumínio ou magnésio (BREDARIOL et al., 2011).

Os argilominerais são classificados de acordo com suas composições químicas e estruturas cristalinas (ARAÚJO, 2009). Com base na estrutura cristalina, podem ser divididos em dois grupos (BREDARIOL et al, 2011):

- Estrutura 1:1 – que são os grupos da caulinita, serpentinas e dos argilominerais ferríferos;
- Estrutura 2:1 – Estão os grupos do talco, que incluem a pirofilita, micas, esmectitas, vermiculitas, cloritas, poligorsquita ou atapulgita e sepiolita.

A atapulgita consiste em um silicato de magnésio constituído por cristais alongados. Foi Lapparent que nomeou uma Terra Fuller descoberta no ano de 1935 em Attapulcus, Geórgia (EUA) e em Mormoiron (França) de Atapulgitita (BREDARIOL et al, 2011).

A Terra Fuller é composta por quase 70% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), entre 10% a 15% de óxido de alumínio ou alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), entre 10% e 13% de óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), entre 2% e 4% óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), entre 4% e 7% de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e outras substâncias em menor quantidade. Trata-se de uma argila expandida que possui a característica de atrair eletricamente as moléculas polares (THOMAZ et al., 2005).

Considerando as aplicações da Terra Fuller, vale ressaltar que a mesma vem sendo estudada em diversos campos visando sua reutilização. Conforme exposto por Gomes (2010), por meio da lavagem com água da terra após a mesma entrar em contato com óleo mineral isolante, a terra obtém novamente 92% de pureza, significando um alto rendimento para reutilização.

### 3.3.2 Tratamento de adsorção por meio da adição de Terra Fuller

Visando reduzir os componentes polares do óleo de tungue bruto foi realizado o processo de adsorção do óleo de tungue por meio de Terra Fuller conforme descrito a seguir.

A terra utilizada possuía grãos com formas irregulares e diferentes dimensões conforme mostra a Figura 16.

Para a definição da quantidade de terra a ser depositada no óleo, foi utilizado como referência a metodologia adotada nos processos de adsorção

realizados por Gomes (2010), onde foi citada a proporção de 90 kg de terra para 3000 L de óleo, correspondendo a 3% do volume total. Sendo assim, foram realizados os processos contemplando duas proporções para a mistura óleo e Terra Fuller: de 3% e de 6%, visando analisar os efeitos das mesmas sobre as propriedades físico-químicas resultantes do óleo de tungue.



**Figura 16 – Terra Fuller utilizada.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 17 mostra a terra misturada à quantidade de óleo aplicada.



**Figura 17 – Terra Fuller junto ao óleo de tungue.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Após adicionadas as proporções em peso na ordem de 3% e de 6% de Terra Fuller, a mistura foi aquecida até a temperatura de 75°C. Após atingir a temperatura adotada, em seguida a mistura foi agitada magneticamente por 5 minutos conforme Bredariol (2011). A seguir, a mistura foi filtrada com papel filtro quantitativo auxiliado por uma bomba de vácuo visando agilizar o processo, visto que o derramamento por gravidade demandaria várias horas.

Na Figura 18 vê-se a imagem do processo de filtração do óleo misturado à Terra Fuller.



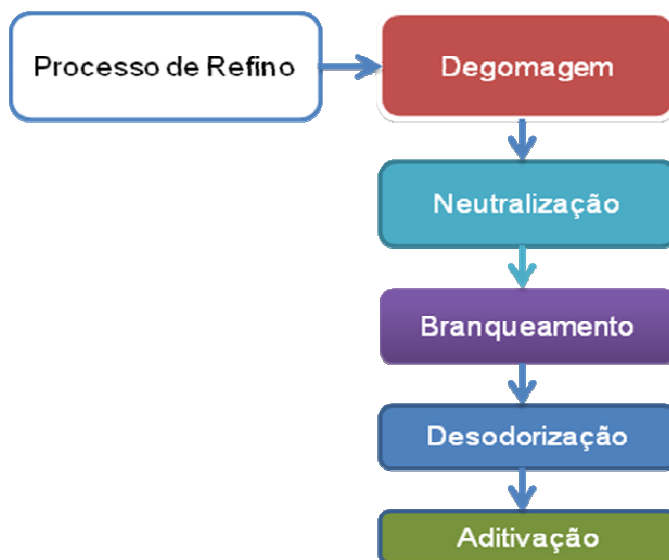
**Figura 18 – Processo de filtração do óleo de tungue com Terra Fuller.**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.4 REFINO DO ÓLEO DE TUNGUE

Uma vez que o procedimento adotado para redução da acidez do óleo de tungue não foi satisfatório, houve a necessidade de se realizar o refino deste óleo por processos químicos mais intensos. O processo de refino do óleo vegetal (que envolve as etapas de degomagem, neutralização, branqueamento e secagem) utilizado neste estudo foi realizado pela empresa ECIRTEC<sup>®</sup> localizada em Bauru, estado de São Paulo. Para tanto, uma amostra do óleo foi enviada para redução da

acidez e também para tratamento das demais características químicas do mesmo, visando atingir os parâmetros citados na norma NBR 15422.

A seguir, serão descritos os procedimentos utilizados neste refino do óleo de Tungue, os quais estão representados esquematicamente na Figura 19.



**Figura 19 – Representação esquemática do processo de refino do óleo vegetal.**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 3.4.1 Processo de refino do óleo vegetal bruto

O processo de refino de óleo vegetal pode ser definido como um conjunto de processos que visam transformar os óleos brutos (ou crus) em óleos adequados para cada aplicação, seja ela a alimentação, no caso de consumo humano ou a lubrificação, a refrigeração e a isolação, para aplicações industriais.

Segundo GOMES (2010), a finalidade do processo de refino é proporcionar uma melhoria de aparência, odor e sabor do óleo bruto, por meio da remoção de compostos indesejáveis, tais como:

- Substâncias coloidais, proteínas, fosfatéidos e produtos de sua decomposição;



- Ácidos graxos livres e seus sais, ácidos graxos oxidados, lactona, acetais e polímeros;
- Substâncias coloridas como clorofila, xantofila, carotenóides, incluindo-se neste caso o caroteno ou pró-vitamina A;
- Substâncias voláteis como hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas e ésteres de baixo peso molecular;
- Substâncias inorgânicas como os sais de cálcio e de outros metais, silicatos, fosfatos, dentre outros minerais; e
- Umidade.

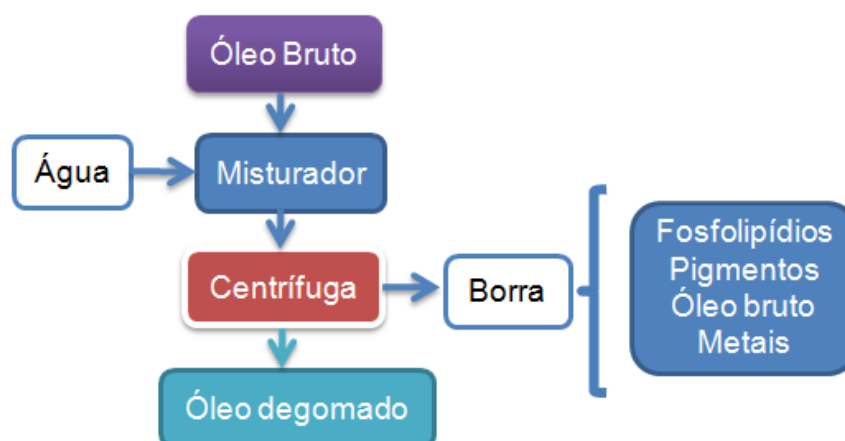
As principais etapas do processo de refino que envolve o óleo vegetal bruto estão descritas na sequência.

#### 3.4.2 Degomagem (Hidratação) do óleo de Tungue bruto

Conforme Gomes (2010), o processo de degomagem tem a finalidade de remover do óleo bruto os fosfatídeos e substâncias coloidais, que são conhecidas como “gomas”. A degomagem reduz a quantidade de álcalis a ser utilizado durante a subsequente etapa de neutralização.

O método de degomagem utilizado nesse trabalho consiste na adição de água ao óleo bruto aquecido entre 60 °C e 70 °C, sob agitação constante, durante 20 a 30 minutos. Os compostos gerados são removidos do óleo por meio de centrífuga em rotações que variam de 5000 a 6000 rpm. Tal processo remove cerca de 70 % a 80% dos fosfatídeos presentes no óleo bruto.

A representação esquemática do processo de degomagem é apresentada na Figura 20.



**Figura 20 – Representação esquemática do processo de degomagem do óleo vegetal.**

**Fonte: Adaptado de Gomes, 2010.**

### 3.4.3 Neutralização da amostra utilizada no experimento

Na etapa subsequente, o óleo é depositado em um recipiente onde uma solução de hidróxido de sódio é adicionada ao óleo após seu aquecimento em temperaturas entre 65°C a 90°C. O óleo neutralizado é separado da “borra” por centrifugação (GOMES, 2010).

O óleo neutralizado é submetido a uma ou duas lavagens com porções entre 10 % a 20 % de água aquecida em temperaturas que variam entre 80 °C a 90 °C e em seguida o óleo vegetal é agitado novamente para remoção de qualquer “borra” residual que possa permanecer.

### 3.4.4 Branqueamento do óleo de Tungue

De acordo com a NBR 15422, o óleo vegetal isolante novo deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão. Dessa forma, para se obter o efeito de clareamento do óleo isolante é feito o procedimento de branqueamento.

Após a neutralização do óleo, o mesmo é secado em estufa e em seguida é iniciado o procedimento de branqueamento, que é feito por meio da mistura de

terras ativadas e naturais, tais como carvão ativado, em proporções que variam de 2 % a 3%. Essas terras são quimicamente preparadas a partir de silicato de alumínio e são misturadas ao óleo isolante por meio de agitação constante em temperaturas entre 80 °C a 95 °C durante 20 a 30 minutos. Subseqüentemente, o óleo é resfriado a 60 °C e filtrado com papel filtro ou tecido por meio de pressão.

Na Figura 21 vê-se o fluxograma do processo de branqueamento do óleo vegetal.



**Figura 21 – Fluxograma do processo de branqueamento do óleo vegetal.**  
**Fonte: Adaptado de Gomes, 2010.**

#### 3.4.5 Desodorização do óleo de Tungue

Esta etapa visa a remoção de compostos desenvolvidos na armazenagem e processamento do próprio óleo como, por exemplo, hidrocarbonetos insaturados, ácidos graxos de cadeia curta e média, ácidos graxos livres e peróxidos.

### 3.4.6 Aditivação do óleo utilizado no experimento

A fim de estender a vida útil dos óleos e gorduras podem ser adicionados aos mesmos inibidores de oxidação, comumente chamados de aditivos antioxidantes. Este produto reage preferencialmente com os produtos de oxidação oriundos da degradação dos óleos, formando produtos mais estáveis e interrompendo a reação em cadeia (GOMES, 2010).

Como ainda não existe normatização para a aditivação do óleo vegetal isolante, a concentração máxima utilizada baseou-se na resolução nº 36 de 05 / 12 / 2008 da ANP que estabelece 3000 ppm (0,30% m/m) como a concentração máxima para o aditivo inibidor utilizado em Óleo Mineral Isolante (OMI).

Dessa forma, foi utilizada a concentração de 0,30% do aditivo antioxidante sintético conhecido como DBPC – Di-terc-butil-p-cresol.

## 3.5 MANUFATURA DO PROTÓTIPO DE TRANSFORMADOR

A seguir será detalhado o processo de manufatura do protótipo de transformador, apresentando cada etapa do seu processo de fabricação.

### 3.5.1 Núcleo de aço silício do protótipo

Para construção do núcleo do protótipo foi utilizado um núcleo reconicionado de chapas de aço silício de grãos cristalinos orientados com alta permeabilidade magnética. Para sua montagem foi utilizado o corte do tipo flecha, comumente utilizado para transformadores similares que se encontram em operação em redes aéreas.

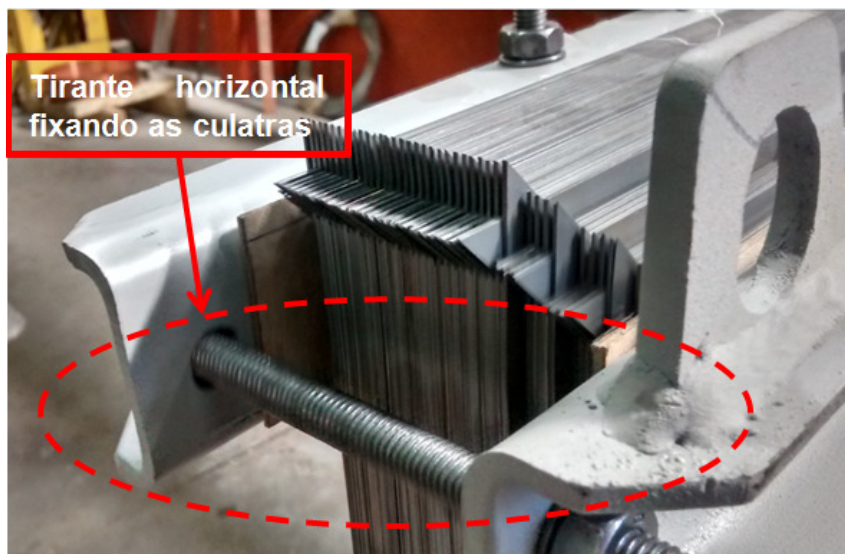
A Figura 22 mostra uma fotografia obtida na etapa de montagem do núcleo do protótipo de transformador. A imagem mostra o núcleo montado e as

ferragens de sustentação fixadas junto a um tirante vertical que une as ferragens das culatras superior e inferior.



**Figura 22 – Núcleo monofásico montado.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 23 vê-se um outro detalhe da montagem do núcleo do protótipo de transformador, o qual mostra as chapas de aço silício empilhadas e fixadas por meio de ferragens de sustentação. O tirante horizontal é aplicado para promover uma maior rigidez mecânica no núcleo.

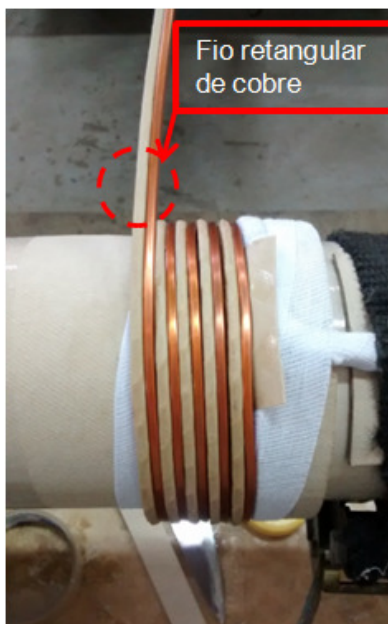


**Figura 23 – Detalhe da parte superior do núcleo.  
Fonte: Autoria própria.**

### 3.5.2 Enrolamentos de cobre do transformador construído

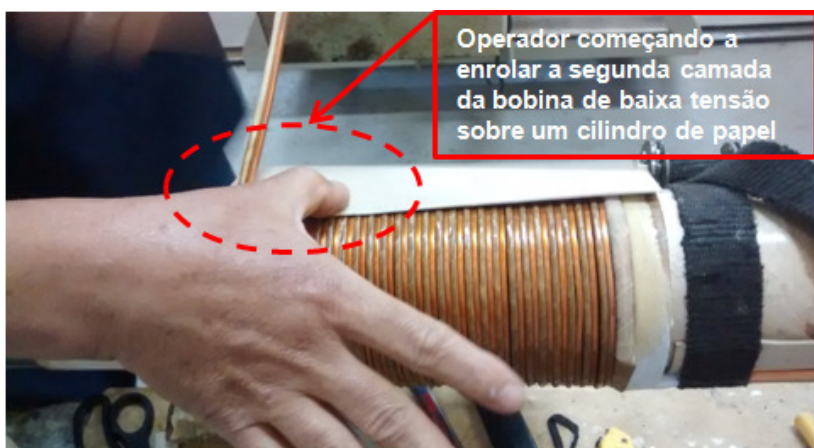
Os enrolamentos foram feitos empregando fio de cobre esmaltado para a bobina de alta tensão (AT) e fio de cobre retangular isolado para a bobina de baixa tensão (BT), pois é uma prática de projeto comum para transformadores dessa faixa de potência. O principal motivo para o uso de enrolamentos em cobre é a possibilidade de reduzir as dimensões da parte ativa e assim conseguir reduzir as dimensões finais do transformador.

A Figura 24 mostra a etapa de enrolamento da bobina de baixa tensão do transformador. A bobina de BT é colocada sobre um molde de papelão que possui algodão em suas extremidades para ajudar na fixação no início do processo.



**Figura 24 – Manufatura da bobina de baixa tensão.**  
**Fonte: Aatoria própria.**

Na Figura 25 vê-se o operador realizando a bobinagem da segunda camada da bobina de BT. Nesse momento a primeira camada já foi finalizada e isolada com verniz inorgânico para ajudar na fixação do cobre junto ao material isolante depositado entre as espiras; ainda compondo o material isolante, foi acrescentada uma capa de papelão Kraft entre as camadas com o objetivo de manter a integridade do transformador quando este estiver em operação com tensão nominal ou em transitórios.



**Figura 25 – Manufatura da segunda camada da bobina de baixa tensão.**  
**Fonte: Aatoria própria.**

A bobina de alta tensão foi fabricada com fio de cobre redondo e esmaltado em 14 camadas, totalizando 2730 espiras. Para auxiliar na fixação das espiras comumente é aplicado algodão e nas extremidades é aplicado fita adesiva.

A Figura 26 mostra a bobina de alta tensão finalizada.



**Figura 26 – Bobina de alta tensão finalizada.**  
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 27 vê-se as bobinas de baixa e alta tensão já montadas e prontas para serem inseridas no núcleo do transformador.





**Figura 27 – Bobinas de baixa e de alta tensão montadas.**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.5.3 Tanque de aço-carbono do protótipo

O tanque é fabricado em aço-carbono SAE 1020 revestido na parte interna com pintura de base epóxi, devido a mesma não agredir o óleo isolante e na parte externa é revestido com tinta de base acrílica hidrossolúvel, a qual não agride o meio ambiente.

A Figura 28 mostra a parte interna do tanque devidamente tratada e pintada.



**Figura 28 – Parte interna do tanque.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 29 pode-se ver duas imagens, obtidas de dois ângulos diferentes, do tanque fabricado e pintado, aguardando a inserção da parte ativa.



**Figura 29 – Tanque do protótipo de transformador.**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.5.4 Montagem do protótipo de transformador

Após a parte ativa ficar submetida a secagem em estufa com temperatura controlada por 6 horas, a mesma deve ser inserida no tanque. Na seqüência, deve-se realizar o preenchimento do tanque com o fluido isolante, que neste trabalho, trata-se do óleo vegetal de tungue.

A Figura 30 mostra a parte ativa aguardando a montagem no tanque.



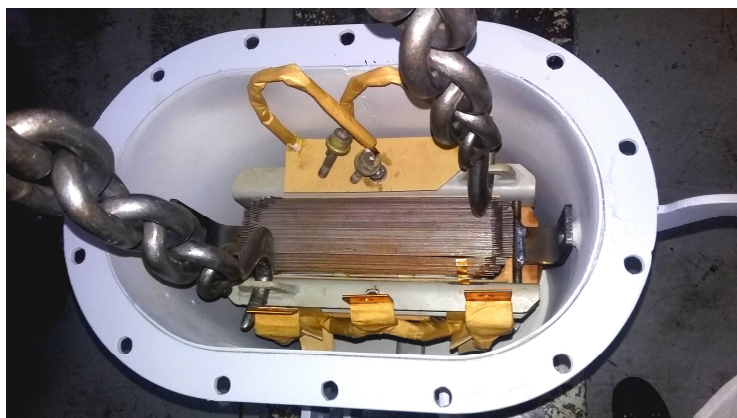
**Figura 30 – Parte ativa aguardando montagem.  
Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 31 é mostrada a inserção da parte ativa no tanque do protótipo de transformador.



**Figura 31 – içamento da parte ativa.  
Fonte: Autoria própria.**

A Figura 32 mostra a etapa final da inserção da parte ativa dentro do tanque do transformador. Após a retirada das correntes (e dos ganchos) de içamento, o tanque está pronto para o fechamento e posterior enchimento de óleo.



**Figura 32 – Montagem da parte ativa no tanque.  
Fonte: Autoria própria.**

Algumas informações adicionais relativas ao projeto do protótipo de transformador podem ser encontradas no Apêndice A. O desenho deste protótipo encontra-se no Anexo A.

### 3.6 AVALIAÇÃO DIELÉTRICA DO PROTÓTIPO DE TRANSFORMADOR

Para avaliar a capacidade térmica e dielétrica do protótipo de transformador empregando óleo isolante de tungue, foram realizados alguns ensaios, os quais estão descritos a seguir.

#### 3.6.1 Lista de Equipamentos

Para a realização dos ensaios dielétricos no transformador protótipo foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Medidor de Fator de Potência de Isolamento – marca Nansen, modelo MP 12 HD;
- Termovisor T125 Versão 9Hz T125;
- Inversor 300 kVA 45-135Hz, 0-380 V;
- TP de Aplicada 0 – 127V / 15 kV e 70 kV;
- Megôhmetro Eletrônico
- Analisador Digital Trifásico de Grandezas Elétricas, marca Jman.

#### 3.6.2 Medição da Resistência elétrica dos enrolamentos

A medição da resistência elétrica dos enrolamentos tem como objetivo verificar se não há irregularidades nos enrolamentos, nos contatos ou nos pontos de

solda, entre outras possíveis falhas durante a produção dos enrolamentos. E também, verificar se a montagem da parte ativa foi feita de forma correta, ou seja, se as distâncias internas entre os terminais e fases foram corretamente mantidas.

Na Figura 33 pode-se ver os cabos conectados entre o megôhmetro e o transformador para medição da resistência elétrica dos enrolamentos.



**Figura 33 – Medição da resistência elétrica dos enrolamentos.**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.6.3 Medição da Resistência de Isolamento

Este experimento tem como objetivo verificar a isolação entre os enrolamentos e terra para atestar a secagem da parte ativa. Além disso, também é medida a isolação ôhmica dos enrolamentos para comprovar a rigidez dielétrica do óleo isolante. A medição é feita de acordo com a norma ABNT NBR 5356 – Transformadores de Potência (2007), partes 1 e 3, a qual diz respeito especificamente a ensaios dielétricos.

### 3.6.4 Ensaio de Tensão Aplicada

O ensaio de tensão aplicada tem como finalidade verificar se as isolações entre os enrolamentos e terra suportam as tensões de teste especificadas nas normas aplicáveis de acordo com o nível de isolamento dos enrolamentos. Na Tabela 4 podem-se ver os valores destacados em vermelho utilizados nos ensaios conforme a classe de tensão do transformador, ou seja, para baixa tensão foi utilizado a tensão de 4 kV e para alta tensão foi utilizado a tensão de 34 kV.

**Tabela 4 – Níveis de tensão para ensaio de tensão aplicada.**

<b>Tensão máxima do transformador (kV)</b>	<b>Tensão suportável nominal à frequência industrial durante 1 minuto (kV)</b>
<b>0,6</b>	<b>4</b>
1,2	10
7,2	20
<b>15,0</b>	<b>34</b>
24,2	50
36,2	70

**Fonte: Adaptado de NBR 5356-3 (2007).**

Para este caso, no enrolamento de tensão superior, foram aplicados 34 kV nos terminais, estando os mesmos curto-circuitados e aterrados junto ao tanque, sob frequência nominal de 60 Hz, durante 1 minuto. Já para o ensaio do enrolamento de tensão inferior utilizou-se o mesmo procedimento, contudo a tensão foi de 4 kV durante 1 minuto conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 5356 Transformadores de Potência (2007) – parte 3.

### 3.6.5 Ensaio de Tensão Induzida

O ensaio de tensão induzida visa a verificação da isolação entre as espiras do próprio enrolamento, isolação e distâncias elétricas entre as bobinas de alta e baixa tensão contra as parte metálicas condutoras (tanque, viga, tirantes, etc.). Dessa forma é possível verificar se houve alguma falha na manufatura dos enrolamentos ou se existe alguma não conformidade na capacidade dielétrica do óleo isolante.

Realizou-se o ensaio aplicando uma tensão de 508 V, correspondente ao dobro da tensão nominal entre fases na baixa tensão, com uma fonte de alimentação operando a uma freqüência de 120 Hz durante 60 segundos, conforme NBR 5356 (2007) – parte 3.

A Figura 34 apresenta o circuito montado para os ensaios dielétricos de tensão induzida e de tensão aplicada no protótipo de transformador.



**Figura 34 – Circuito para ensaios dielétricos.**  
Fonte: Autoria própria.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados iniciais dos ensaios físico-químicos no óleo de tungue bruto e também do óleo de tungue tratado pelo processo de adsorção por meio de Terra Fuller. Posteriormente, serão apresentados os resultados obtidos após o processo de refino industrial do óleo de tungue bruto.

### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ÓLEO DE TUNGUE BRUTO

Os ensaios foram realizados conforme a norma NBR 15422 – Óleo Vegetal Isolante para Equipamentos Elétricos. Dessa forma, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5, sendo que foram realizadas 3 análises para validação dos ensaios. Nesta mesma tabela pode-se observar os parâmetros sugeridos pela citada norma NBR de referência.

**Tabela 5 – Resultados obtidos para o óleo de tungue bruto.**

Ensaio	Unidade	NBR 15422	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão
Fator de Potência	%	≤ 4,0	47	46	50	47,7	1,7
Índice de neutralização	mg KOH/g	≤ 0,06	12	13	12	12,3	0,3
Tensão Interfacial	Mn/m	26 a 30	26	24	25	25,0	0,5
Rigidez Dielétrica	kV	≥ 30	69	65	70	68,0	1,7
Teor de água	mg/kg	≤ 200	500	520	530	516,7	10,5

**Fonte: Autoria própria.**

Após análise dos resultados, observou-se que o fator de potência e o índice de neutralização possuíam valores elevados para a aplicação em equipamentos elétricos, especificamente em transformadores.

O ensaio de rigidez dielétrica foi satisfatório, superando os limites expostos pela norma sugerida. Já o ensaio de tensão interfacial permaneceu no limite para a aplicação sugerida. Para o ensaio de fator de potência o resultado foi cerca de 10 vezes superior ao solicitado pela norma e o ensaio de índice de neutralização resultou cerca de 200 vezes superior. O valor do teor de água também ficou acima do estipulado, no entanto, segundo Stocco (2010), este parâmetro pode ser ajustado a partir da adoção de um procedimento adequado de secagem. Com isso, verificou-se a necessidade de realizar o tratamento no óleo de tungue visando reduzir a acidez do mesmo.

#### 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ÓLEO TRATADO

Foram realizados novamente com o óleo tratado os ensaios de fator de potência, índice de neutralização e tensão interfacial, as variáveis em que buscou-se aperfeiçoar por meio do processo de adsorção.

As amostras A11, A12 e A13 referem-se aos processos realizados com uma mistura de óleo e Terra Fuller na proporção de 3%, enquanto que as amostras A21, A22 e A23 referem-se aos processos executados com a mistura de óleo e Terra Fuller na proporção de 6%. A Tabela 6 apresenta os resultados das análises.

**Tabela 6 – Resultados obtidos para o óleo de tungue tratado.**

<b>Ensaio</b>	<b>Unidade</b>	<b>NBR 15422</b>	<b>A11</b>	<b>A12</b>	<b>A13</b>	<b>A21</b>	<b>A22</b>	<b>A23</b>
Fator de Potência	%	≤ 4,0	<b>46</b>	<b>46</b>	<b>50</b>	<b>47</b>	<b>47</b>	<b>47</b>
Índice de neutralização	mg KOH/g	≤ 0,06	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
Tensão Interfacial	Mn/m	26 a 30	<b>22</b>	28	<b>25</b>	28	30	<b>31</b>

**Fonte: Autoria própria.**

Após as análises no óleo tratado com uma proporção de 6% de Terra Fuller, observou-se uma melhora na tensão interfacial, elevando o seu valor para os limites sugeridos pela norma NBR 15422. Contudo, o fator de potência e o índice de neutralização não sofreram alterações após o processo de adsorção nas proporções de 3% e 6%.

#### 4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM O ÓLEO REFINADO

Uma vez que o tratamento com Terra Fuller não foi capaz de retirar os componentes polares e reduzir a acidez do óleo de tungue bruto, foi necessário realizar um processo de refino industrial no óleo proposto.

Após a realização do processo de refino, o índice de neutralização e o fator de potência do óleo isolante reduziram-se de forma significativa, sendo que, para o fator de potência, o valor obtido ficou dentro dos limites normativos; já o índice de neutralização ficou acima do desejado, contudo é possível atender aos limites da norma por meio de reprocessamento do óleo.

Vale ressaltar que a empresa teve que refazer o processo de refino 4 vezes até encontrar os níveis ideais de neutralização do óleo de tungue. Comparativamente ao óleo de tungue bruto, após o refino do óleo, a rigidez dielétrica teve um aumento de 7,4 % e uma redução de acidez de aproximadamente 95,9 %, o que indica o uso do mesmo como isolante devido sua elevada resistência elétrica.

Os resultados obtidos após o refino industrial do óleo estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Resultados obtidos após o processo de refino industrial do óleo de tungue bruto.**

Ensaio	Unidade	NBR 15422	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão
Fator de Potência	%	≤ 4,0	3,81	3,92	3,85	3,9	0,03
Índice de neutralização	mg KOH/g	≤ 0,06	<b>0,43</b>	<b>0,48</b>	<b>0,46</b>	0,5	0,01
Tensão Interfacial	Mn/m	26 a 30	27	<b>25</b>	26	26,0	0,47
Rigidez Dielétrica	kV	≥ 30	72	74	73	73,0	0,47
Teor de água	mg/kg	≤ 200	<b>530</b>	<b>450</b>	<b>500</b>	493,3	19,4

Fonte: A autoria própria.

#### 4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DIELÉTRICOS NO PROTÓTIPO

Foram realizados os ensaios dielétricos de rotina no protótipo de transformador para verificar as solicitações dielétricas no equipamento e a capacidade dielétrica do óleo de tungue.

##### 4.4.1 Dados dos projetos

Para análise da capacidade dielétrica do óleo de tungue, os resultados obtidos nos ensaios foram comparados com os dados obtidos em outros ensaios realizados em dois outros transformadores, de mesmas características construtivas ao protótipo utilizado (e que foi preenchido com óleo de tungue), diferenciando-se no tipo de fluido isolante utilizado nos mesmos. Um dos transformadores foi preenchido com óleo mineral tipo A, de origem naftênica e o outro equipamento foi preenchido com óleo vegetal do tipo Envirotemp FR3. Tais dados foram cedidos pela empresa Contrafo Indústria de Transformadores Elétricos S/A.

A Tabela 8 apresenta os dados de rendimento dos transformadores que expressam as características do projeto dos equipamentos utilizados na análise comparativa com o protótipo de transformador ensaiado com óleo de Tungue.

**Tabela 8 – Dados de rendimento dos transformadores**

	Óleo Mineral	Óleo Vegetal	Óleo de Tungue
Perdas a vazio	70 W	68 W	62 W
Perdas em carga	287 W	273 W	249 W
Impedância	2,56 %	2,58 %	2,6 %
Corrente de excitação	2,37 %	2,35 %	2,32 %

**Fonte: Autoria própria.**

Na Tabela 9 são apresentados os dados físico-químicos de alguns óleos isolantes utilizados em transformadores.

**Tabela 9 – Dados físico-químicos dos óleos isolantes.**

	Unidade	Óleo Mineral Comercial	Óleo Vegetal Comercial	Óleo de Tungue do experimento
Fator de Potência	%	0,1	1,5	3,86
Índice de neutralização	mg KOH/g	0,01	0,01	0,45
Tensão Interfacial	Mn/m	47	-	26
Rigidez Dielétrica	kV	63,20	87	73
Teor de água	ppm	9,3	19	500
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	0,89	0,92	0,94
Aspecto visual	-	Límpido	Límpido	Límpido
Ponto de Fulgor	°C	140	320	290

**Fonte: Autoria própria.**

A norma da ANP de número 36 cita que o limite máximo do teor de água em óleo mineral isolante é de 35 ppm; já a norma NBR 15422 cita que o limite máximo do teor de água para o óleo isolante novo é de 200 ppm devido sua elevada afinidade com a água e por sua característica intrínseca de absorver a água da parte ativa do transformador, o que eleva consideravelmente a vida útil do equipamento.

O nível do teor de água do óleo de tungue não é indicado para o uso contínuo, contudo, para os ensaios laboratoriais tal característica não interferirá no resultado quanto às propriedades dielétricas do óleo; além disso, este parâmetro também pode ser corrigido por meio da secagem do óleo. Já para o índice de neutralização, o mesmo deve ser corrigido por meio do processo de refino descrito anteriormente visando remover as componentes polares e gomas presentes no mesmo.

#### 4.4.2 Ensaio de resistência ôhmica nos enrolamentos

Os resultados do ensaio de resistência ôhmica nos enrolamentos estão expostos na Tabela 10.

**Tabela 10 – Resistência ôhmica nos enrolamentos**

<b>Terminais</b>	<b>Óleo Mineral</b>	<b>Óleo Vegetal</b>	<b>Óleo de Tungue</b>
X1 / X2 (Ω)	17,45	14,75	11,71
X1 / X3 (Ω)	34,88	28,65	23,27
X2 / X3 (Ω)	17,43	14,73	11,72
H1 / H2 (Ω)	95,11	93,45	90,63

**Fonte: Autoria própria.**

Comparativamente, os valores de resistência ôhmica dos enrolamentos obtidos ficaram abaixo dos níveis fornecidos pelo transformador operando com óleo

mineral e também pelo equipamento à óleo vegetal. Contudo, os resultados foram considerados satisfatórios devido a elevada resistência ôhmica encontrada.

#### 4.4.3 Ensaio de resistência de isolamento

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de resistência de isolamento.

**Tabela 11 – Resistência de isolamento.**

<b>Leitura</b>	<b>Óleo Mineral</b>	<b>Óleo Vegetal</b>	<b>Óleo de Tungue</b>
AT / BT (MΩ)	9500	9500	9500
AT / MASSA (MΩ)	8000	8000	8000
BT / MASSA (MΩ)	6000	6000	6500

**Fonte: Autoria própria.**

Os dados obtidos no ensaio de resistência de isolamento com o protótipo de transformador foram equivalentes aos obtidos tanto pelo transformador preenchido com óleo mineral quanto pelo transformador preenchido com óleo vegetal. Dessa forma, os dados extraídos por meio dos ensaios de resistência de isolamento podem ser classificados como satisfatórios. Cabe salientar que os valores de resistência de isolamento não são normatizados; dessa forma, os resultados são considerados satisfatórios se estiverem de acordo com as práticas de engenharia de cada empresa ou então, se estiver em conformidade com a especificação do cliente para seu produto.

#### 4.4.4 Ensaio de tensão induzida

Não foi detectado nenhum tipo de falha ou anomalia durante o ensaio de tensão induzida. Dessa forma, o resultado obtido pode ser classificado como satisfatório.

#### 4.4.5 Ensaio de tensão aplicada

Não houve a ocorrência de nenhum tipo de não conformidade durante o ensaio de tensão aplicada, indicando que o resultado pode ser classificado como satisfatório.

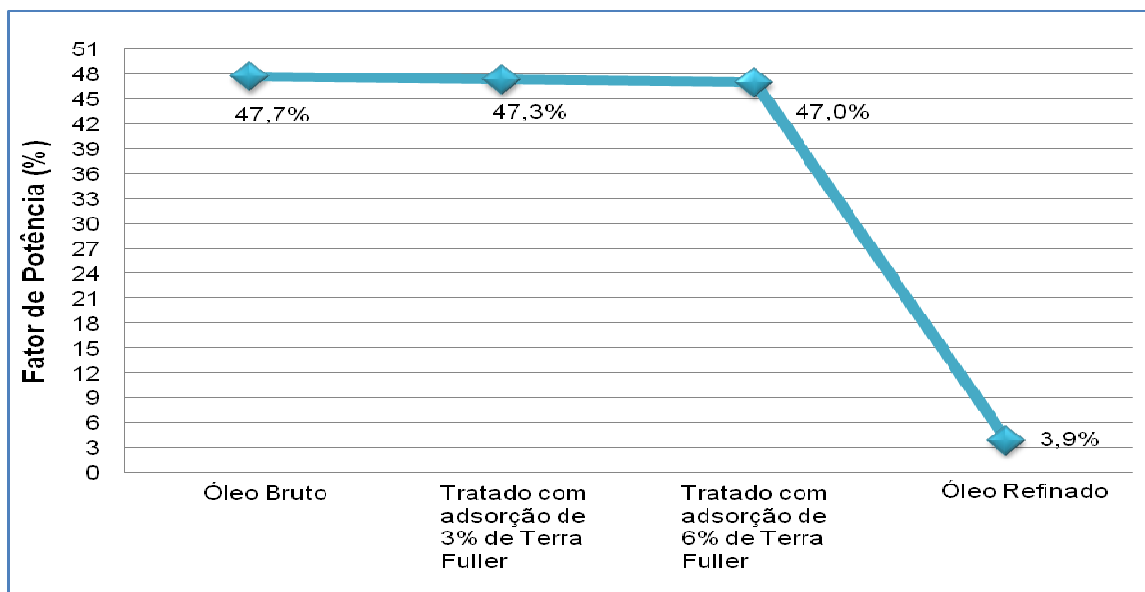
### 4.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Considerando os valores médios dos resultados obtidos para as propriedades físico-químicas avaliadas, foram construídos gráficos evolutivos para melhor visualizar o desempenho do óleo vegetal de Tungue, considerado nas condições de óleo bruto, óleo tratado com adsorvente (Terra Fuller, nas proporções de 3% e 6% na mistura) e óleo refinado.

A Figura 35 mostra a evolução do fator de potência dos óleos considerados. Verifica-se que, para o óleo bruto o resultado obtido foi de 47,7%; após o processo de adsorção com 3% de Terra Fuller, obteve-se uma redução de 0,4 pontos percentuais neste parâmetro e uma redução de 0,7 pontos percentuais quando foi utilizado uma proporção de 6% de Terra Fuller. Nota-se que para este parâmetro o processo de adsorção do óleo foi ineficaz.

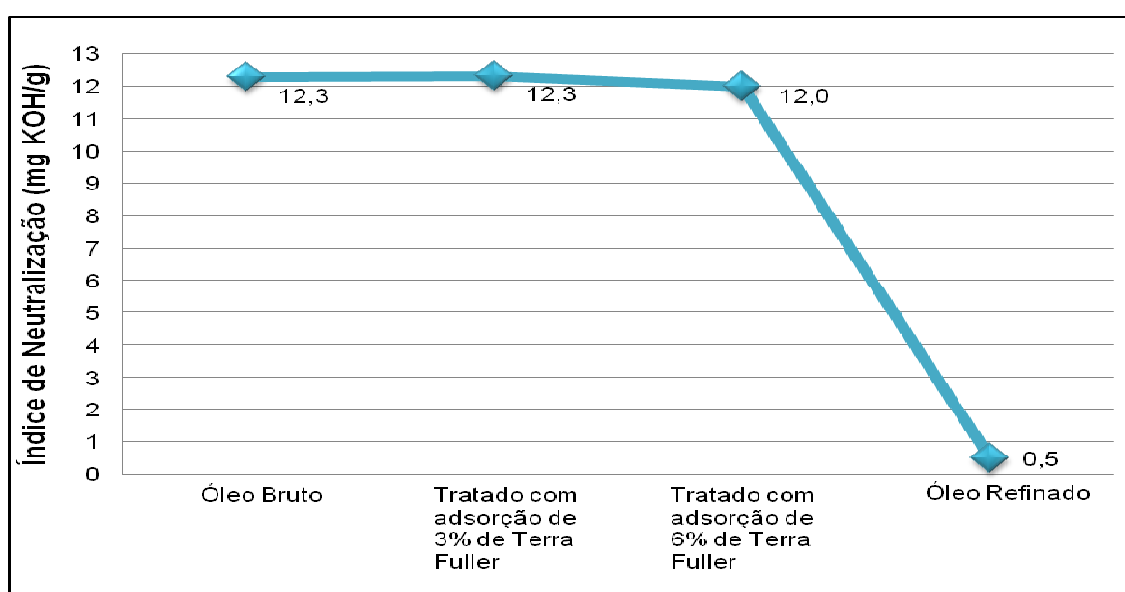
Após o processo de refino do óleo bruto, o fator de potência teve um valor médio de 3,9%, o qual representa uma redução de 11 vezes em relação ao valor obtido inicialmente para o óleo de tungue bruto, ficando dentro dos níveis indicados para este parâmetro pela norma NBR 15422.





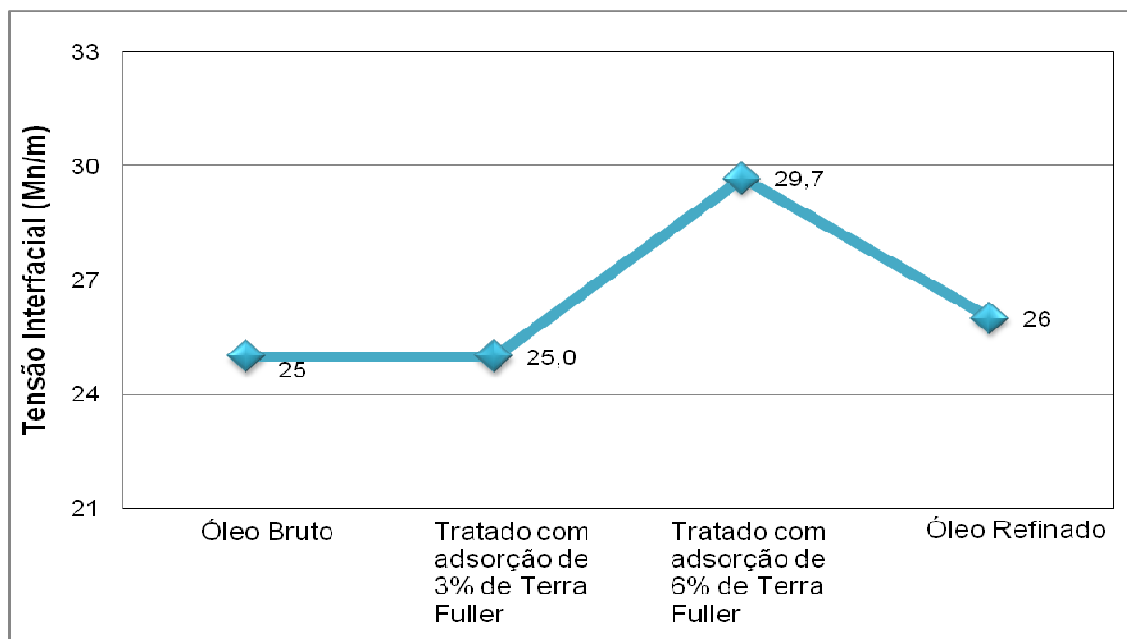
**Figura 35 – Evolução do Fator de Potência após tratamento e refino do óleo de tungue bruto.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 36 mostra a evolução do índice de neutralização dos óleos considerados. O processo de refino fez com que o óleo obtivesse uma redução considerável de mais de 23 vezes na sua acidez. Novamente o processo de adsorção por meio de Terra Fuller também não foi eficiente para melhorar essa propriedade do óleo isolante.



**Figura 36 – Evolução do índice de neutralização após tratamento e refino do óleo de tungue bruto.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 37 pode ser visto o comportamento da tensão interfacial dos óleos considerados. Embora os critérios para tensão interfacial ainda não estejam muito bem definidos para o óleo vegetal conforme cita a norma NBR 15422, tal parâmetro indica o nível de compatibilidade do óleo com a água, representando um indicador para mensurar a vida dos componentes isolantes do transformador. O processo de adsorção por meio de Terra Fuller com mistura de 3% não alterou a tensão interfacial do óleo; comparativamente, a adsorção com 6% de Terra Fuller proporcionou um aumento de 18,8% neste parâmetro. Após o refino do óleo a tensão interfacial reduziu 12,5 % em relação ao valor anterior, porém ainda permanecendo com valores satisfatórios conforme a norma NBR 15422.



**Figura 37 – Comportamento da tensão interfacial após tratamento e refino do óleo de tungue bruto.**

**Fonte: Autoria própria.**

A rigidez dielétrica não foi medida após o processo de adsorção do óleo por meio de Terra Fuller devido o objetivo do trabalho para tal etapa ser exatamente a redução da acidez. Dessa forma, essa propriedade somente foi medida após o refino do óleo de tungue bruto, obtendo-se um aumento de 7,4% neste parâmetro.

O teor de água não foi abordado devido à indisponibilidade dos equipamentos necessários para este ensaio. Contudo, tal parâmetro pode ser corrigido facilmente para adequação conforme as orientações normatizadas.

Após os ensaios realizados pode-se observar que o protótipo de transformador operou de forma satisfatória com óleo de Tungue bruto refinado, apresentando uma resposta dielétrica adequada e sem a ocorrência de falhas. Vale ressaltar que a investigação científica realizada com base no emprego de um fluido obtido à partir de uma nova base vegetal, ainda não investigada, gera novas oportunidades para o desenvolvimento de estudos e pesquisas relacionados ao tema, que a aplicação proposta e avaliada neste trabalho obteve, de maneira geral, resultados positivos.

## 5 CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, é possível retirar as seguintes conclusões:

- Os resultados de caracterização do óleo vegetal de tungue baseados na norma NBR 15422 mostraram que trata-se de um excelente fluido dielétrico, uma vez que forneceu resultados superiores aos recomendados pela norma em quase todos os parâmetros analisados e equivalentes também aos fornecidos pelo óleo comercial ENVIROTEMP FR3<sup>®</sup>, comercializado pela Cooper Power Systems.
- Para o óleo de tungue bruto, não se recomenda o uso de Terra Fuller para tratamento inicial devido a sua elevada acidez. O procedimento mais adequado é medir a acidez do óleo logo após a sua extração e a seguir neutralizar o mesmo;
- O óleo vegetal de tungue é um fluido promissor para uso em transformadores e demais equipamentos elétricos de média e alta tensão.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à escassez de resultados experimentais disponíveis relacionados ao uso do óleo de tungue em transformadores elétricos, sugere-se como temas para trabalhos futuros:

- Avaliar os efeitos da introdução de diferentes antioxidantes naturais e sintéticos, em diferentes proporções, para verificar a extensão da vida útil do óleo de tungue em transformadores;
- Avaliar a viscosidade cinemática do óleo de tungue, simulando o carregamento de transformadores elétricos durante a operação;
- Avaliar a geração de gases incipientes no óleo, comparando-os com os dados disponíveis de óleos comerciais usados em transformadores elétricos;
- Realizar alguns ensaios adicionais como, por exemplo, ensaios elétricos de Impulso atmosférico e de Medição de descargas parciais para melhor comprovar a aplicabilidade do óleo de tungue como fluido isolante.

## REFERÊNCIAS

ABB. **Transformers Handbook**. Suíça: ABB Co, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356**: Transformadores de Potência – Parte 1: Generalidades. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15422**: Óleo Vegetal Isolante para Equipamentos Elétricos. Rio de Janeiro, 2006.

ÁVILA, D. T. **A cultura do tungue (Aleurites fordii) no Rio Grande do Sul**: Caracterização de populações, propagação e desempenho agrônomo. 88 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010.

BAIN & COMPANY. **Potencial de diversificação da indústria química Brasileira – Relatório 3 – Oleoquímicos**. Rio de Janeiro, 2014.

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.

BREDARIOL, C. S. et al. **Terra Fuller**: Resíduo descartável ou reciclável após seu uso na indústria do sebo? III Encontro científico e simpósio de educação Unisalesiano. Lins, 2011.

CASADO, U. MARCOVICH, N. E. ARANGUREN, M. I. MOSIEWICKI, M. A. **High-Strength composites based on Tung oil polyurethane and wood flour: Effect of the filler concentration on the mechanical properties**. Institute of Materials Science and Technology (INTEMA). Research Council of Argentine (CONICET). Mar del Plata, 2009.

CEMIG – Centrais Elétricas de Minas Gerais. Disponível em <http://www.cemig.com.br/noticias/index481.asp> e acessada em 03/05/2015.

CEMIG – Centrais Elétricas de Minas Gerais. Cemig desenvolve transformador verde. Disponível em: “[http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/cemig\\_desenvolve\\_transformador\\_verde.aspx](http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/cemig_desenvolve_transformador_verde.aspx)” e acessada em 11 de setembro de 2015.

CHANG, C. **In search of China`s future**. San Francisco: I.B.C., 1983.

CHAPMAN, Stephen J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5ed. New York: McGraw-Hill Co, 2012.

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

CONTI, Mary Carmen Maté Durek de. **Perfil sensorial, químico e físico de cafés exóticos e convencionais**. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2011.

CORTÊS, Nelson. **Movimentando o Brasil a biodiesel**. Disponível em: <http://www.cdes.gov.br/documento/936112/movimentando-o-brasil-a-biodiesel-conselheiro-nelson-cortes-.html>. Acesso em: 05 de setembro de 2015.

DUKE, J. A. **Handbook of energy crops**. Purdue: Purdue University, EUA, 1983.

EMBRAPA. Empresa brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Complexo Soja**. Disponível em: <[www.cnpso.embrapa.br/index.php?op\\_page=22&cod\\_pai=16](http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=22&cod_pai=16)>. Acesso em: 14 de outubro de 2014.

FERNÁNDEZ, I. ORTIZ, A. DELGADO, F. RENEDO, C. PÉREZ, S. **Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers**. Elsevier – Electric Power Systems Research. Santander, Spain, 2013.

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

FRITSCHÉ, R. RIMMELE, U. TRAUTMANN, F. SCHÄFER, M. **Prototype 420 kV power transformer using natural ester dielectric fluid**. Siemens AG – TR Nuremberg (Germany). Nuremberg, 2014.

GOLFETTO, D. C. et al. **Estudo e aplicação da amêndoa do Tungue (Aleurites fordii) na produção do biodiesel**. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente. v. 2. p. 55-68. nov-abr. 2011.

GOMES, S. B. J. **Avaliação técnica e econômica da aplicação de óleo vegetal de crambe como isolante elétrico em comparação com óleo de soja.** 138 f. Dissertação (Mestrado Profissional) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Curitiba, 2010.

GRUSZYNSKI, C. **Resíduo agro-industrial “casca de tungue” como componente de substrato para plantas.** 99 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

JOKSIMOVIC, G., PENMAN, J. **The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 47, n. 5, p. 1078–1084, 2000.

KOSOW, Irving L. **Electric Machines and Power Transformers.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, Inc., 1972. v 1.

LANGELAND, K.A e BURKS K. C. **Identification and Biology of Non-Native Plants in Florida's Natural Areas.** 165 f. IFAS Publication SP 257. University of Florida, Gainesville, 1998.

LEÃO, Ruth. GTD: **Geração, Transmissão e distribuição de Energia Elétrica.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2009.

LEWAND, L. R. **Laboratory Evaluation of Several Synthetic And Agricultural Based Dielectric Liquids.** 68th Annual International Doble Client Conference. 2001.

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

LUPI FILHO, G. **Comparação entre os critérios de diagnósticos por análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante de transformador de potência.** 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, - USP – Universidade de São Paulo, 2012.

MARTIGNONE, A. **Transformadores.** 1 ed. Porto Alegre: Globo, 1971.

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

MELO, S. M, LEAL, J. S. FIGUEIREDO, F. C. SANTOS, J. R. S. **Estudo da aplicação de óleo vegetal como óleo isolante em transformador elétrico**. SBQ – Sociedade Brasileira de Química. Florianópolis, 2011.

MORAES, M. T. CHERUBIN, M. R. ZWIRTES, A .L. SCHWERTZ, L. **Fontes agro energéticas: a cultura do tungue (Aleurites spp.)**. Cultivando o Saber. v. 5, n.3, P 108-122, 2012.

MUNARINI, A.; BOURSCHEID, A.; FLORES, A.; REIS, B.; COSTA, J. B.; LEAL, M.; OLIVEIRA, M. J.; GORGEN, S. A.; SACON, V. **Informações técnicas sobre os cultivos de oleaginosas perenes e florestais**. In: INSTITUTO CULTURAL PADRE JOSIMO. **Agricultura camponesa e as energias renováveis: Um guia técnico**. 1ed. Porto Alegre: Padre Josimo, p.106-138, 2009.

NIEDERSBERG, C. **Ensaio de adsorção com carvão ativado produzido a partir da casca do tungue (Aleurites fordii), resíduo do processo de produção de óleo**. 65 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, Santa Cruz do Sul, 2012.

OBANDE, J. O. AGBER, J. U. **Palm oil as an alternative dielectric transformer coolant**. IJRES – International Journal of Reserach in Enginerring and Science. India, 2014.

PINTO, V. B. et al. **Aplicação de óleo vegetal de andiroba (Carapaguianensis) como fluido dielétrico em transformadores de potência**. ALTAE – Congresso Internacional en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico. Cuba, 2013.

REITZ, R. **Euforbiáceas**. In: Flora Ilustrada Catarinense (R. Reitz, ed.). Herbário Barbosa Rodrigues, Itajaí. 1988.

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

RITTNER, Herman. **Tecnologias das Matérias Graxas: Purificação e Refinação de Óleos Volume 2**. 1a Edicao. Sao Paulo-SP: Ed. Triangulo, 2001.

SAMADZADEH, M. HATAMI BOURA, S. PEIKARI, M. ASHRAFI, A. KASIRIHA, M. **Tung oil: An autonomous repairing agent for self-healing epoxy coatings**. Progress in Organic Coating – Elsevier. Iran, 2011.



SAVY FILHO, A. **Mamona: tecnologia agrícola**. Campinas: Emopi, 105p. 2005.

SCHLESINGER, S. **A Soja no Brasil Sustentável e Democrático**. 2004. Disponível em: <[www.uma.terra.free.fr/2agrobusiness/soja-brasil.rtf](http://www.uma.terra.free.fr/2agrobusiness/soja-brasil.rtf)>. Acesso em: 14 de outubro de 2014.

SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (SIEMENS AG). Disponível em : “<http://www.siemens.com/press/en/feature/2014/energy/2014-02-transformator.php>” e acessada em 11 de Setembro de 2015.

SILVA, C. R. CARVALHO, M. W. CORADO, L. FOOK, M. V. L. LEITE, K. **Caracterização físico-química e dielétrica de óleos biodegradáveis para transformadores elétricos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v. 16, n.2, p. 229-234. Campina Grande, 2011.

SILVA, L. T. S. SZARBLEWSKI, M. S. NUNES, M. R. L. SCHNEIDER, R. SCHIAVON, M. S.. **Caracterização DO ÓLEO EXTRAÍDO DE SEMESNTES D ETUNGUE DA REGIÃO CENTRO ORIENTAL DO Rio Grande do Sul**. Sociedade Brasileira de Química. Santa Cruz, 2011.

STOCCO, M. B. **Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica**. 128f. (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2009.

THOMAZ, M. S. et al. **Aspectos sobre responsabilidade ambiental e tratamento de resíduo de óleo isolante mineral em uma empresa de energia elétrica do sul do Brasil: Um estudo de caso**. IX Simpósio Internacional Processo Civilizador. UTFPR – Ponta Grossa, 2003.

UHREN, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao óleo mineral**. 142f. (Mestrado Profissional) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Curitiba, 2007.

VASCONCELLOS, V. MAK, J. FRANCHINI, L. R. **Desenvolvimento de transformador de distribuição de maior vida útil e menor agressividade ambiental**. Mar del Plata: CLADE – Congreso Latino Americano de Distribución Eléctrica, 2008.

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.** Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2007.

WILHELM, H. M. TULLIO, L. UHREN, W. **Produção e uso de óleos vegetais isolantes no setor elétrico.** Revista Brasil Engenharia, 2009.

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

YI-HUNG, C. JHIH-HONG, C. CHING-YUAN, C. CHIA-CHI, C. **Biodiesel production from tung (*Vernicia montana*) oil and its blending properties in different fatty acid compositions.** Elsevier – Bioresource Technology. Taiwan, 2010.

ZORNITTA, N. **Tung (*Aleurites fordii*) – Avaliação do potencial energético do fruto e do biodiesel.** 50f. (Mestrado Acadêmico) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel, 2014.

## APÊNDICE A

### A1.1 Protótipo de Transformador

Para realização dos ensaios elétricos foi construído um protótipo de transformador com potência de 15 kVA, alta tensão em 13,2 kV e baixa tensão em 254 / 127 Volts. Tal equipamento foi doado por uma empresa do segmento de máquinas elétricas para avaliação do desempenho do óleo de tungue como fluido isolante deste transformador.

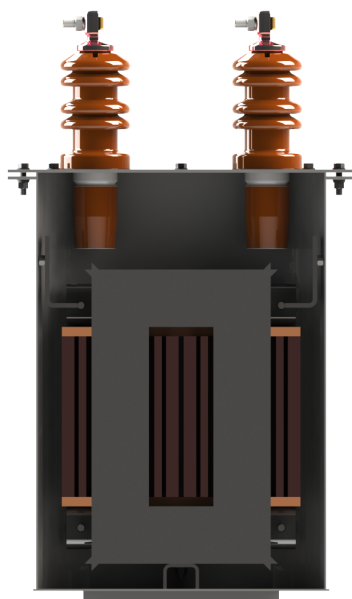
### A1.2 Projeto elétrico e mecânico do protótipo de transformador

O projeto do protótipo de transformador foi elaborado utilizando os softwares DraftSight® e SolidWorks®, ambos desenvolvidos e comercializados pela empresa francesa Dassault Systèmes S. A. que é especialista no desenvolvimento de ferramentas para projetos em 2D e 3D.

#### A1.2.1 Modelagem 3D do projeto elétrico mecânico

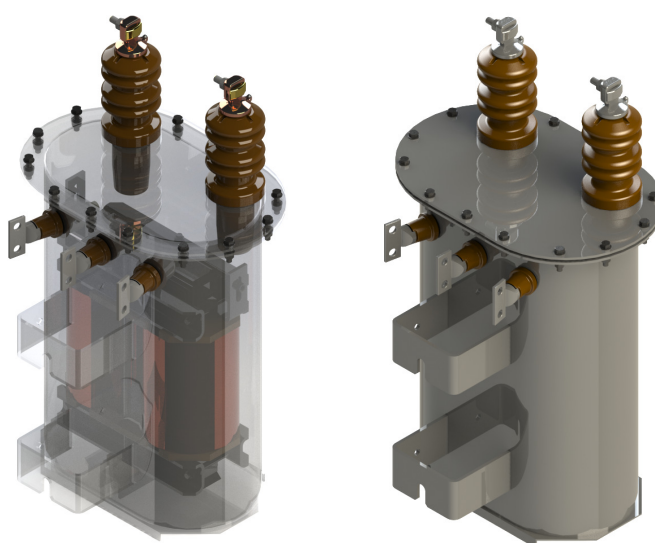
Inicialmente foi projetado a parte ativa em função do cálculo elétrico elaborado para o protótipo. Em seguida, foi dimensionado o tanque e aplicado todos componentes de fixação necessários de acordo com as práticas de engenharia.

A Figura A.1 mostra a imagem frontal do protótipo de transformador com um corte central na parte ativa para mostrar a disposição do núcleo de silício e os enrolamentos dentro do tanque do transformador.



**Figura A.1 – Protótipo de transformador com corte central na parte ativa.  
Fonte: Autoria própria.**

Na Figura A.2 pode-se ver a representação do tanque do transformador, com aspecto transparente, contendo a parte ativa no seu interior.



**Figura A.2 – Vista externa do protótipo de transformador.  
Fonte: Autoria própria.**

## ANEXO A – Desenho do protótipo de transformador

