

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
FACULDADE DE TECNOLOGIA - FT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS- PPGCEM

Rafaela Ferreira Oliveira

**CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE BURITI (*Mauritia flexuosa*) COMO MATERIAL
DIELÉTRICO EM TRANSFORMADORES PARA ENERGIA ELÉTRICA**

MANAUS - AM

2019

RAFAELA FERREIRA OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE BURITI (*Mauritia flexuosa*) COMO MATERIAL
DIELÉTRICO EM TRANSFORMADORES PARA ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Amazonas, para obtenção de título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Marques da Silva Paula
Co-orientador: Prof. Dr. Leandro Aparecido Pocrifka

MANAUS - AM

2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Oliveira, Rafaela Ferreira
O48c Caracterização do óleo de buriti (*auritia flexuosa*) como material dielétrico em transformadores para energia elétrica / Rafaela Ferreira Oliveira. 2019
66 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Marcos Marques da Silva Paula
Coorientadora: Leandro Aparecido Pocrifka
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Transformador. 2. Óleo Vegetal. 3. Buriti (*auritia flexuosa*). 4. Energia elétrica. I. Paula, Marcos Marques da Silva II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

DEDICATÓRIA

Dedico ao meu porto seguro, a âncora que me mantém sã, lúcida e convicta dos meus objetivos, minha linda filha Raissa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pelas bênçãos que vêm a mim concedendo.

Agradeço minha filha que mesmo sem saber o porquê da minha ausência me apoiou incondicionalmente, onde muitas vezes é mais adulta do que sua própria mãe.

Agradeço aos orientadores que tive nessa etapa tão importante da vida acadêmica que muitas vezes me orientou não só tecnicamente e sim nas tomadas de decisões no decorrer dessa caminhada.

Agradeço aos colegas que fiz nesse período de pós-graduação e aos que sempre me incentivaram a não desistir.

Agradeço aos amigos de anos que vêm me acompanhando e sempre estão presentes nos momentos mais importante.

Agradeço aos amigos que encontram-se distante em outro estado até mesmo país que conseguem me incentivar.

Agradeço a perspectiva dos meus familiares que foi atribuído a mim.

Devo também agradecer a empresa que viabilizou esse projeto, dispondo de equipamentos, arquivos e produto intelectual dos renomados profissionais que compõe o quadro de funcionários

Ao pessoal do laboratório físico-químico da empresa ITAM que sempre esteve disposto a me ajudar nas análises, pensar e compartilhar ideias para que o trabalho fosse realizado com sucesso.

RESUMO

Neste trabalho foi caracterizado um óleo vegetal nativo na região amazônica, óleo de buriti, com intuito de verificar sua aplicação como um fluido dielétrico. Os óleos isolantes já comercializados, em sua maioria na produção de transformadores, são provenientes do petróleo, uma fonte não renovável e poluente. Neste contexto, a utilização de óleo vegetal como um fluido dielétrico é vantajosa devido ser biodegradável e sustentável. Para essa aplicação, o óleo é responsável por evitar curto entre bobinas primária/secundária e resfriamento (dissipação de calor para o meio) do equipamento. Atualmente, existem normas estabelecidas para avaliar os parâmetros para análise de óleos isolantes tanto mineral quanto de base vegetal. O óleo do fruto do buriti foi submetido aos ensaios físico-químicos e elétrico para verificar suas possibilidades na aplicação como isolante elétrico em transformadores para distribuição de energia. Foram realizados tratamentos físico-químicos no óleo bruto para melhorar suas propriedades. Com base nos valores mínimos e máximos exigidos na norma NBR15422, o óleo de buriti demonstrou nos ensaios do ponto de fulgor equivalente a temperatura de 325°C, para o teor de água foi feita a leitura de 83,3 ppm após tratamento, na rigidez dielétrica o óleo suportou uma tensão de 52,5 Kv e a densidade do óleo de buriti é de 0,911 g.cm⁻³ com esses valores obtidos o óleo de buriti está apto para ser colocado dentro de um transformador para análises em campo. Com esses ensaios, foi possível observar que o óleo de buriti comporta-se melhor que óleos isolantes vegetais comercializados para as indústrias de transformadores, porém nas análises de cor e acidez, o óleo apresentou características fora das normas, mas nos parâmetros que o óleo de buriti não demonstrou boas características, é possível realizar tratamentos para uma melhor parametrização e atingir o valor preconizado em norma.

Palavras Chaves: Transformadores, óleo vegetal, energia elétrica, óleo de buriti

ABSTRACT

In this work, a native vegetable oil was characterized in the Amazon region, buriti oil, in order to verify its application as a dielectric fluid. Insulating oils already marketed, mostly in the production of transformers, are derived from oil, a non-renewable source and pollutant. In this context, the use of vegetable oil as a dielectric fluid is advantageous due to being biodegradable and sustainable. For this application, the oil should be responsible for avoiding short between primary/secondary coils and cooling (heat dissipation to the medium). Currently, there are standards established to evaluate the parameters for analysis of insulating oils both mineral and vegetable-based. Buriti fruit oil was submitted to physical-chemical and electrical tests to verify its possibilities in the application as electrical insulator of energy distribution transformers. Physical-chemical treatments were performed in crude oil to improve their properties. based on the minimum and maximum values required by the NBR15422 standard, buriti oil demonstrated in the flash point tests equivalent to a temperature of 325 ° C, for the water content was read 83.3 ppm after treatment in the rigidity. dielectric the oil withstands a voltage of 52.5 Kv and the buriti oil density is 0.911 g.cm⁻³ with these values obtained the buriti oil is fit to be placed inside a transformer for field analysis. With these tests, it was possible to observe that the buriti oil behaves better than vegetable insulating oils sold to the transformer industries. However, in the color and acidity analyzes, the oil presented non-standard characteristics, but in the parameters that Buriti did not show good characteristics, it is possible to perform treatments for better parameterization and reach the value recommended in the norm.

Key Words: Transformers, Vegetable Oil, Electric Energy, Buriti Oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração mundial de energia elétrica no período de 2006 a 2030	16
Figura 2 - Produção de energia por fonte no Brasil em 2018 base 2017	16
Figura 3 - Lei de variação da corrente com a tensão nos dielétricos sólidos.	20
Figura 4 - Circuito equivalente de um dielétrico com perdas de energia e correntes de fuga.	21
Figura 5 - Representação de um transformador monofásico ideal, com permeabilidade do núcleo infinita.	23
Figura 6 - Transformador de distribuição "explodido"	25
Figura 7 - Estrutura dos hidrocarbonetos constituintes do OM: (A) parafínico, (B) naftênico, (C) aromático.	27
Figura 8 - Representação estrutural: 1) glicerol, 2) ácido graxo, 3) triacilglicerídeo, em que R, R1, R2 e R3 são hidrocarbonetos diferentes ou iguais.....	31
Figura 9 - Ilustração dos constituintes da palmeira e fruto do buriti: a) árvore de um buritizeiro, b) inflorescência em planta masculina, c) flores masculinas, d) folha jovem tipo costapalmada, e) fruto maduro inteiro e seccionado com suas partes.	35
Figura 10 - Filtro feito com sílica perolizada.....	41
Figura 11 - Coluna para filtragem contendo sílica e filtro de 1 micra.....	41
Figura 12 - Equipamento vaso Cleveland, utilizando para determinar ponto de fulgor.	43
Figura 13 - Equipamento BAUR AGUAMETER KFM3000, utilizado para determinar teor de água.....	44
Figura 14 - Equipamento de determinação da rigidez dielétrica.....	45
Figura 15 - Equipamento colorímetro GERIN modelo PSB-97, determinação da cor.	45
Figura 16 - Espectros de infravermelho dos óleos de buriti e soja —óleo comercial, — óleo de buriti bruto e — óleo de buriti tratado com terra Fuller e sílica.	52
Figura 17 - Análises da cor do óleo.....	56
Figura 18 - A) ENVIROTEM, B) BIOTEM e C) óleo de buriti.	57
Figura 19 - Resultado da filtragem: (A) óleo de buriti bruto, (B) óleo de buriti filtrado.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de óleo vegetal no Brasil ton./dia.	30
Tabela 2 - Porcentagem de ácidos graxos presente em alguns óleos vegetais.	32
Tabela 3 - Composição em ácidos graxos do óleo de buriti (em porcentagem).	36
Tabela 4 - Quantitativo em massa do rendimento de óleo de buriti nos três modos de extração.	37
Tabela 5 - Valores de densidade relativa para alguns óleos vegetais e mineral.....	47
Tabela 6 - Acidez do óleo de buriti e comparação com outros óleos vegetais	48
Tabela 7 - Teor de água encontrado em diversos óleos vegetais e mineral.....	50
Tabela 8 - Resultado obtido após o processo de secagem com terra fuller.	51
Tabela 9 - Valores obtidos após a passagem pela terra Fuller e sílica em gel.	51
Tabela 10 - Valores da rigidez dielétrica do óleo de buriti com tratamento.....	55
Tabela 11 - Rigidez do óleo após processo de filtragem com sílica e filtro de 1 micra.	55

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1** - Característica para um OM novo parafínico e naftênico..... 28
- Quadro 2** - Demonstrativo de oleaginosas da Amazônia e seus ácidos constituintes em % 33

LISTA DE ABREVIACOES E SIMBOLOS

ASTM – American Society for Testing and Materials

A.C. – Antes de Cristo

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BEN – Balanço Energético Nacional

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz

°C – Graus Celsius

Cst – Centistokes

FTIR - Análise de Infravermelho com Transformada de Fourier

GWH – Giga Watt Hora

ITAM – Industria de Transformadores Amazonas

Kg – Quilograma

kV – Quilovolt

KOH – Hidróxido de potássio

Máx – Máximo

Mín – Mínimo

Mg – Miligrama

mN – MiliNewton

m – Metro

NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras

OV – leo Vegetal

OM – leo Mineral

ppm – Parte por milhão

ton – Tonelada

χ – susceptibilidade

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Consumo e produção de energia elétrica	15
2.2	Materiais isolantes dielétricos	17
2.3	Comportamento dos dielétricos em serviço.....	19
2.4	Transformadores elétricos	23
2.5	Óleos como isolantes líquidos	26
2.5.1	Óleo mineral.....	26
2.5.2	Óleo vegetal	29
2.5.3	Óleos vegetais da Amazônia	33
2.5.4	Óleo de buriti (<i>Mauritia flexuosa</i>).....	34
2.5.5	Óleo vegetal como fluido dielétrico	37
3	OBJETIVOS:	39
4	METODOLOGIA.....	40
4.1	Obtenção do óleo:.....	40
4.2	Tratamento do óleo bruto	40
4.2.1	Tratamento do óleo bruto com terra Fuller e filtro de 1 micra.....	40
4.2.2	Tratamento do óleo de buriti com sílica perolizada	40
4.2.3	Filtragem do óleo de buriti com sílica e filtro de lã 1 micra.....	41
4.3	Caracterização do material dielétrico:.....	42
4.3.1	Determinação da massa específica, densidade relativa e API° - Método do densímetro	42
4.3.2	Determinação do índice de acidez e de basicidade - Método indicador.....	42
4.3.3	Determinação do ponto de fulgor em vaso aberto Cleveland.	42
4.3.4	Determinação do teor de água	43
4.3.5	Análise de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	44
4.3.6	Determinação da rigidez dielétrica (eletrodo de disco).....	44
4.3.7	Determinação da cor - método do colorímetro	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Determinação da massa específica	46
5.2	Análise do índice de acidez do óleo	47

5.3	Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.....	49
5.4	Determinação do teor de água.....	49
5.5	Espectroscopia de Infravermelho do Transformada de Fourier (FTIR).52	
5.6	Análise da rigidez dielétrica (eletrodo de disco).	54
5.7	Análise da cor do óleo.....	56
6	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Da geração até o fornecimento de energia elétrica, os transformadores são equipamentos essenciais nos sistemas elétricos, principalmente no sistema trifásico uma vez que permitem que a tensão seja reduzida ou elevada conforme o necessário ao longo da geração ou distribuição (SILVA et al, 2011; SOARES, 2015). Dentre os tipos de transformadores, um dos mais comumente utilizado é com sistema de refrigeração através da circulação de óleo. O fluido utilizado é responsável pelo isolamento elétrico e refrigeração do transformador por meio da dissipação de calor (ARANTES, 2005).

Atualmente, tem-se disponível no mercado nacional e internacional algumas alternativas para isolamento elétrico de um transformador de energia. Dentre essas alternativas, encontra-se os óleos isolantes podendo ser de origem mineral, base vegetal ou resinas epóxi, que desempenham a mesma função, porém com tecnologia diferente.

Os sistemas de isolamento e de refrigeração em que se emprega o óleo mineral isolante elétrico (OMIE) são reconhecidos como sendo altamente vantajosos tecnicamente e economicamente. No entanto, no que se refere à questão ambiental, o uso do óleo mineral apresenta aspectos negativos, uma vez que o produto é derivado de um recurso não renovável e que é capaz de causar impactos significativos ao meio ambiente (STOCCO, 2009. SOARES, 2015).

Uma das preocupações da indústria com relação ao óleo que compõe a estrutura dos transformadores é o seu descarte. Nesse contexto, é de interesse das empresas que estão dentro deste segmento que se desenvolvam soluções alternativas para o uso dos óleos minerais que não podem ser depositado nos equipamentos elétricos. Muitas iniciativas têm como proposta o desenvolvimento de óleos de base vegetal. (SILVA et al, 2011; VASCONCELLOS, 2016).

Existe a disponibilidade comercial de óleos vegetais para uso em transformadores, mas, até o momento, a solicitação é feita por empresas com ações de sustentabilidade ou instalações a cumprir requisitos de segurança. Isso se deve a questões da competição com a indústria alimentícia, farmacêutica, dentre outros, e ainda não há um direcionamento de pesquisas que vise diminuir o preço elevado do emprego dessa matéria prima (STOCCO, 2009; SOUZA, 2015). Por conta disso, o preço de custo por litro do óleo vegetal isolante pode ser 60% mais alto que do óleo

mineral (VASCONCELLOS, 2016).

Mediante algumas considerações comparativas da efetividade das alternativas supracitadas foi possível diagnosticar a necessidade do estudo de um óleo natural que disponha de características dielétricas correlacionadas às normas que parametrizam e validam um fluido dielétrico. Por isso, a pesquisa em questão apresenta o estudo do óleo de buriti, extraído do fruto do buritizeiro nativo da região amazônica, para aplicação como fluido dielétrico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Consumo e produção de energia elétrica

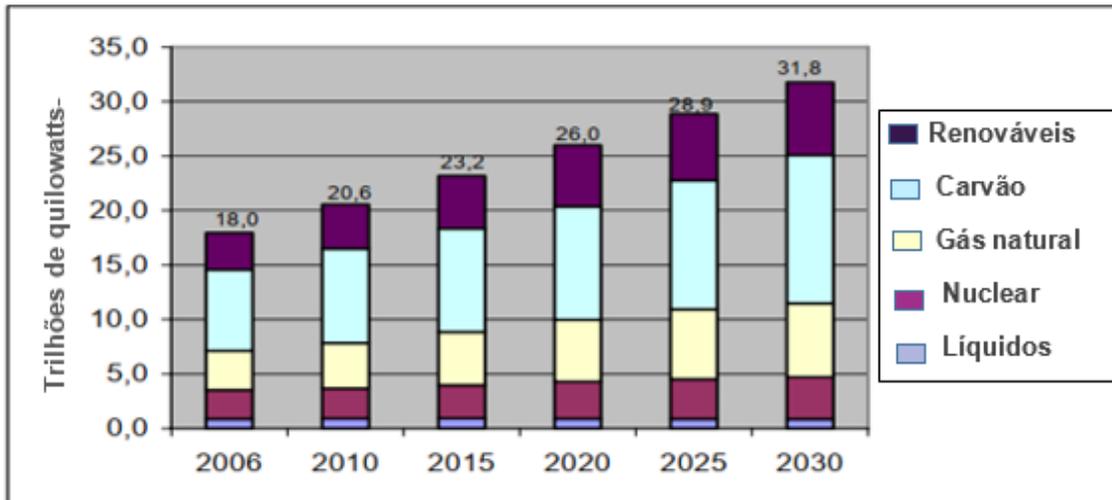
Em 1872, o físico Maxwell propôs uma definição para energia: “energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança”. Sendo assim mudanças nas condições implica na alteração do sistema e inclui causas importantes: a resistência implica em modificações do estado sendo assim a própria energia permite obter modificações de estado.

A energia tem diversas formas de se apresentar que se convertem dentre elas. É importante observar ainda que apenas nos processos de conversão se identifica a existência de energia, que surge na fronteira do sistema como forma de calor ou trabalho.

A eletricidade é uma das mais nobres formas de energia secundária. A sua facilidade de geração, transporte, distribuição e utilização, atribui a ela uma característica de universalização, disseminando o seu uso pela humanidade. No mundo de hoje tornou-se um direito humano básico assim como alimentação e moradia. Temos assim a dominante forma de energia moderna para telecomunicações, tecnologia da informação, produção de bens, serviços e etc. sendo então aliada ao desenvolvimento tecnológico e social.

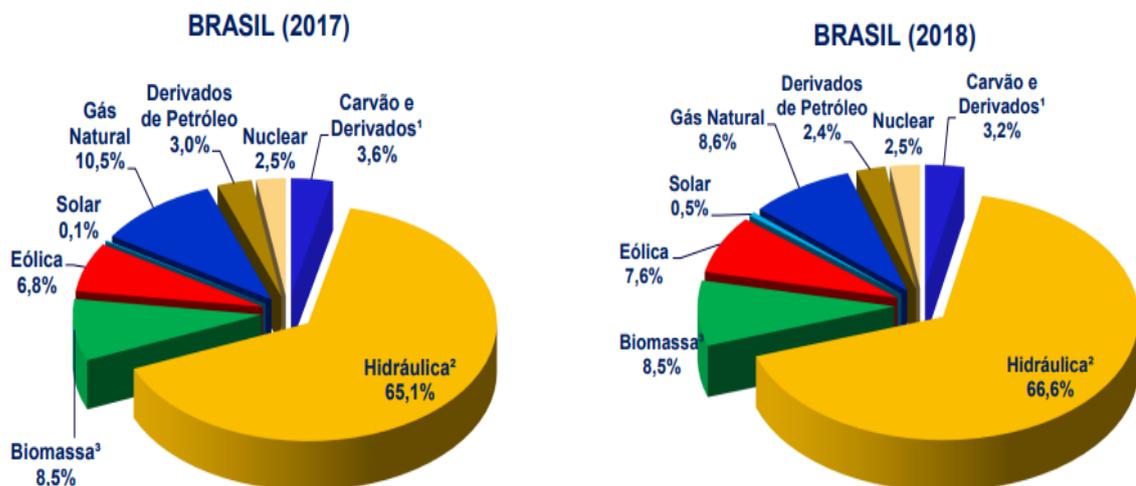
O crescimento da população mundial e da economia nos países em desenvolvimento implicam, necessariamente, no aumento do consumo de energia, porém a produção deve seguir os conceitos de desenvolvimento sustentável e de responsabilidade ambiental. A Figura 1 apresenta a perspectiva da geração mundial de energia elétrica por algumas fontes, sendo estimado para os próximos 20 anos um crescimento superior a 50% na produção mundial de eletricidade. As fontes de energia continuarão diversificadas e ajudarão a suprir a necessidade de energia elétrica.

Vale destacar que apesar da perspectiva do aumento na utilização de energia elétrica renovável, o mundo ainda dependerá de fontes poluentes para atender a demanda energética. Por isso, há grande necessidade de soluções para minimizar a dependência de tais fontes.

Figura 1 – Perspectiva da geração mundial de energia elétrica no período de 2006 a 2030

Fonte: www.eia.gov/outlooks/ieo/ acessado em 16/10/2018

Os sistemas elétricos são tipicamente divididos em segmentos como: geração, transmissão, distribuição, comercialização e utilização. A oferta da energia elétrica aos seus usuários é realizada através da prestação de serviço público concedido para exploração à entidade privada ou governamental. As empresas que prestam serviço público de energia elétrica o fazem por meio da concessão ou permissão concedidos pelo poder público. No Brasil, por sua grande diversidade e potencial de suas regiões, as formas de produção de energia elétrica são diversificadas, como mostrada na Figura 2.

Figura 2 - Produção de energia por fonte no Brasil em 2018 base 2017

Fonte: Balanço Energético Nacional – BEN 2019.

No Brasil, a produção de energia elétrica é proveniente, em sua maioria, da conversão de energia potencial dos rios em energia elétrica. Onde o acesso de energia hídrica é inviável, outras alternativas são utilizadas, como a eólica em alguns estados do Nordeste. A biomassa, em 2018, já igualou-se ao gás natural na produção de eletricidade, muito por conta da rica biodiversidade do país que possibilitou a exploração sustentável. O destaque para estas formas de geração de energia se dar por ser menos poluente que a fonte hídrica, pois estas não prejudicam a qualidade dos rios e as formas de vidas que abrigam.

2.2 Materiais isolantes dielétricos

A maioria dos dielétricos se caracterizam por um deslocamento elétrico das cargas como uma função linear do campo elétrico que se cria no material. Todo dielétrico inserido em um circuito elétrico pode ser considerado como um capacitor. A carga em um capacitor qualquer é dada por:

$$Q = C \cdot U \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

Q = Quantidade de carga (Coulomb)

C = Capacitância (Faraday)

U = Diferença de potencial (Volts)

Conforme sua aplicação, alguns isolantes apresentam nítida superioridade sobre outros quanto a suas propriedades dielétricas. Mas, o fato de um material dielétrico apresentar propriedades elétricas muito superiores a outros (como alta rigidez dielétrica e alta resistividade) não é suficiente para garantir o seu emprego, se as características mencionadas não forem acompanhadas de boa estabilidade física e química durante o uso. Assim, as boas propriedades elétricas estudadas nos materiais dielétricos podem corresponder a uma redução do quantitativo de material isolante que deve ser empregado nos transformadores. Essas análises são feitas com base na tensão de classe do equipamento e é necessário que o material seja forte o suficiente para resistir aos esforços mecânicos durante a construção e o funcionamento.

As propriedades elétricas de um material dielétrico têm relação direta com o fenômeno da polarização. A distinção dos tipos fundamentais de polarização é mostrada abaixo:

- *Polarizações eletrônica e iônica:* ocorrem de um modo praticamente instantâneo sob a ação de um campo elétrico e sem dissipação de energia, caracterizando-se por um deslocamento elástico de íons ou elétrons ligados ao núcleo de um átomo. A polarização eletrônica diminui com o aumento da temperatura, devido à dilatação do dielétrico e conseqüente diminuição do número de partículas por unidade de volume. Em contrapartida, a polarização iônica é intensificada com o aumento da temperatura, uma vez que se debilitam as forças elásticas interiônicas quando aumentam as distâncias entre os íons quando o corpo se eleva; (SCHOLZ R.C, 2013).
- *Polarização dipolar:* Difere da eletrônica e da iônica com relação ao movimento térmico das partículas. As moléculas dipolares, que se encontram em movimento térmico caótico, se orientam parcialmente pela ação do campo, o qual é a causa da polarização. A polarização dipolar é possível se as forças moleculares não impedirem os dipolos de se orientarem de acordo com o campo. Ao aumentar a temperatura se enfraquecem as forças moleculares e diminui a viscosidade da substância, de forma que se intensifica a polarização dipolar. No entanto, ao mesmo tempo aumenta a energia dos movimentos térmicos das moléculas, o que faz que diminua a influência orientadora do campo. Inicialmente, a polarização dipolar aumenta com elevação da temperatura, enquanto o enfraquecimento das forças moleculares influencia mais com a intensificação do movimento térmico caótico. Depois, quando esta última se intensifica, a polarização dipolar cai à medida que aumenta a temperatura; (SCHOLZ R.C, 2013).
- *Polarização estrutural:* Aparece apenas em corpos amorfos e em sólidos cristalinos polares como no caso do vidro, onde um corpo amorfo é parcialmente constituído de partículas de íons. A polarização estrutural tem a orientação de estruturas complexas do material perante a ação de um campo externo, ela surge devido a um deslocamento de íons e dipolos na presença de aquecimento devido a perdas por efeito Joule. Quanto a sua dependência com a temperatura, tem comportamento semelhante à polarização dipolar. (SCHOLZ R.C, 2013).

O papel dos dielétricos na eletrotécnica é muito importante e tem dois aspectos:

1 - Realizam o isolamento entre os condutores, entre estes e a massa ou a terra, ou, ainda, entre eles e qualquer outra massa metálica existente na sua vizinhança;

2 - Modifica, em proporções importantes, o valor do campo elétrico existente em determinado local.

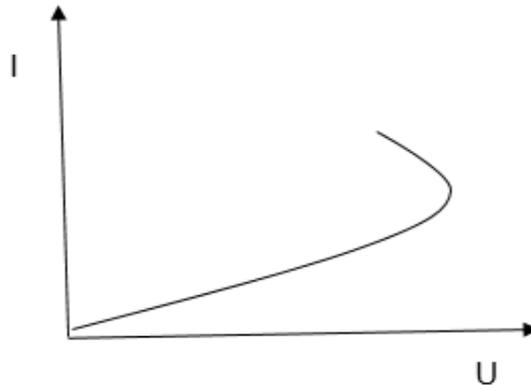
2.3 Comportamento dos dielétricos em serviço

O comportamento de um dielétrico é dado pela parte resistiva do material, a propriedade é influenciada por vários fatores. Um deles é a temperatura, que afeta sensivelmente seu valor, com uma alta temperatura ocorre o decréscimo da resistividade dos materiais isolantes.

Os materiais têm propriedades elétricas que são analisadas quando necessitamos empregá-los como dielétrico. A escolha é feita levando em consideração a solicitação de isolamento e de trabalho de cada equipamento ou sistema. Os dielétricos trabalham em concordância com as resistências:

Resistência de isolamento - O dielétrico impede a passagem da corrente elétrica enquanto o campo elétrico não ultrapassa um determinado valor que depende da natureza do dielétrico e das suas condições físicas. Este impedimento, porém, não é total se uma determinada porção do isolante estiver submetida a uma tensão U , ela será atravessada por uma corrente I , sendo o quociente entre U e I designado por resistência de isolamento. A resistência de isolamento não é constante, isto é, os isolantes não obedecem de uma forma geral à lei de Ohm. No caso do comportamento dos gases, somente para valores baixos de tensão estes obedecem a lei de Ohm. No caso dos dielétricos sólidos, a curva de variação da corrente com a tensão já tem um aspecto diferente, sendo de uma forma geral do tipo apresentada na Figura 3. A primeira parte da curva corresponde aproximadamente a uma proporcionalidade entre a intensidade de corrente e a tensão, a partir de um determinado valor de tensão, o crescimento de corrente acentua-se e ao atingir-se um valor U da tensão, a corrente cresce rapidamente mesmo que se faça descer o valor de tensão.

Figura 3 - Lei de variação da corrente com a tensão nos dielétricos sólidos.

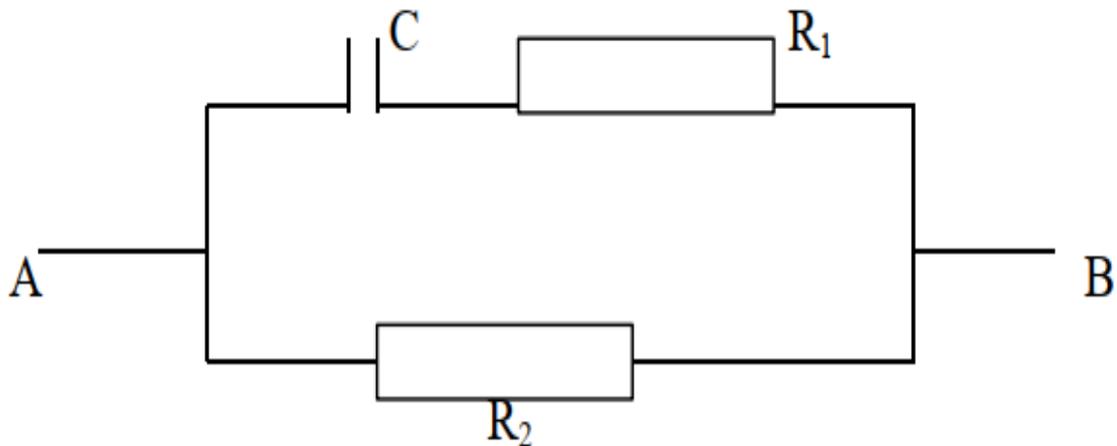


Fonte: disponível: <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downcompendio/compendio1.pdf>, acesso 05/10/19.

A última parte da curva que corresponde ao gráfico da Figura 3 corresponde à perfuração do isolamento ou, pelo menos, antecede-a de um pequeno intervalo de tempo, pois a liberação de calor engrandecida pelo aumento da corrente vai rapidamente provocar a perfuração.

Resistência superficial - No caso dos isolantes sólidos de elevada resistividade, a resistência através da sua massa é também elevada, sendo muito pequena a corrente que os atravessa. Ora, acontece que pela acumulação de poeira e umidade na superfície das peças isolantes, se forma um novo caminho para a passagem da corrente elétrica, o qual se diz ser superficial. Isto acontece especialmente nas peças isoladoras expostas ao tempo, como por exemplo, os isoladores de linhas de transmissão aéreas. A resistência do novo circuito é dado o nome de resistência superficial e, neste caso, a resistência de isolamento é dos dois circuitos em paralelo, superficial e de massa (Figura 4). O aumento da temperatura faz atenuar a importância da resistência superficial.

Figura 4 - Circuito equivalente de um dielétrico com perdas de energia e correntes de fuga.



Fonte: disponível: http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/cap4_new.pdf, acesso 05/10/2019

Onde:

C = Capacitância

R_1, R_2 = Resistências

A = ponto inicial

B = ponto final.

Rigidez Dielétrica - Para poder exprimir numericamente a capacidade de um determinado material isolante suportar tensões elevadas, define-se a grandeza rigidez dielétrica como sendo o valor do campo elétrico para o qual se dá a ruptura do isolante.

Essa grandeza está longe de ser constante para cada material, pois depende de muitos fatores, tais como a espessura do isolante, as dimensões e forma dos eletrodos utilizados para a aplicação da tensão, a frequência da tensão aplicada, o número de aplicações de tensão na unidade do tempo (fadiga do material), a temperatura, grau de umidade, entre outros. Como é difícil conhecer o valor do campo no momento da ruptura, visto ele não ser normalmente uniforme, é costume definir-se a rigidez dielétrica simplesmente pelo quociente da tensão aplicada no momento da ruptura pela espessura do isolamento. E como a rigidez dielétrica varia com a espessura do isolante é costume variar conforme solicitação elétrica. (ASHBY, M. et al, 2012).

Rigidez dielétrica superficial - No caso dos isolantes sólidos, pode acontecer que o arco disruptivo, em vez de atravessar a sua massa, salte pela sua superfície. Ao

quociente da tensão pela distância entre os condutores é dado o nome de rigidez dielétrica superficial. Esta depende, evidentemente, da forma do isolante e do estado da sua superfície. (ASHBY, M. et al, 2012).

Perdas nos dielétricos - Os dielétricos estão sujeitos a uma tensão contínua, também ocorrendo perdas por efeito Joule. A corrente de perdas, mesmo sendo limitada, dá lugar a um certo aquecimento. Estas perdas são desprezíveis, exceto se originar um aquecimento. Uma consequência é o aumento na corrente e nas perdas nos dielétricos sujeitos a uma tensão alternada. Estas perdas dão-se da mesma forma que a perda por efeito Joule, mas surge um outro fenômeno que origina perdas, chamada de histerese dielétrica. Neste fenômeno, a energia perdida é também transformada em calor e tem o nome de histereses dielétrica dado pela analogia existente com a histerese magnética. E sua explicação física é dada por consideração da falta de homogeneidade do dielétrico. (ASHBY, M. et al, 2012).

Ruptura dos Dielétricos - Quando o campo elétrico a que um dado dielétrico está sujeito ultrapassa um determinado valor se dá a ruptura do dielétrico. A maneira como se produz e as suas consequências são diferentes para cada tipo de dielétrico. Na ruptura de um dielétrico fluido, a matéria atingida pela descarga é logo substituída por outra e, se o fenômeno não repetir, a sua única consequência é o aparecimento de partículas carbonizadas no seio do fluido. Já nos dielétricos sólidos, a descarga implica a sua destruição no ponto em que a ruptura se verifica. (ASHBY, M. et al, 2012).

Efeito Corona - Se, entre dois condutores, existir uma grande diferença de potencial, junto às suas superfícies poderá surgir um campo elétrico de valor tal que o gás ou o ar seja ionizado. Se isto acontecer, o efeito obtido é equivalente ao aumento das dimensões dos condutores, visto o gás ou o ar ionizado se tornar condutor também. Nessas condições, dá-se como uma aproximação dos condutores e um aumento da sua superfície. Estes dois fatores que se verificam tendem a modificar o campo nos dois sentidos, prevalecendo um ou outro conforme as circunstâncias. (ASHBY, M. et al, 2012).

De uma maneira geral, pode-se dizer que se os condutores forem de pequena seção e estiverem bastante afastados, o efeito da ionização traduz-se por uma diminuição do campo na zona circunvizinha. Desta forma, ionizada a primeira camada que envolve os condutores, a ionização não prossegue nas camadas seguintes e o fenômeno não progride. A ionização limita-se no contorno dos condutores, visível

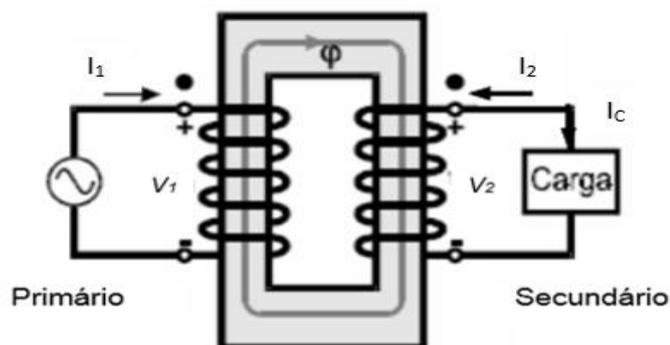
sob o aspecto de uma luz azulada e sensível pelo cheiro a ozônio. E isto é o efeito coroa ou corona.

2.4 Transformadores elétricos

Os transformadores são peças indispensáveis dentro do campo do aproveitamento de energia elétrica, pois o fato de elevar e reduzir tensões com simplicidade e elevado rendimento, tornou-se economicamente possível o uso da energia elétrica. Como o transformador não possui peças rotativas, este equipamento requer poucos cuidados e a despesa de sua manutenção é baixa.

Um transformador é um dispositivo destinado a transformar tensões, correntes e impedâncias. Trata-se de um dispositivo de corrente alternada que opera baseados nos princípios da lei de Faraday. Aspectos construtivos de um transformador consiste em duas ou mais bobinas e um "caminho" ou circuito magnético que "acopla" essas bobinas, conforme esquematizado na Figura 5. Nessa figura, o transformador possui apenas duas bobinas ou enrolamentos, e o núcleo não possui entreferros, correspondendo a um circuito magnético fechado. O enrolamento i_1 é denominado, por convenção, de *enrolamento primário* e o enrolamento i_2 é denominado de *enrolamento secundário*. Os enrolamentos são constituídos de fios de cobre ou alumínio, isolados com esmalte ou papel isolante, de seção retangular ou circular.

Figura 5 - Representação de um transformador monofásico ideal, com permeabilidade do núcleo infinita.



Fonte: VASCONCELLOS, J.C, 2013.

Transformadores de potência são destinados primariamente à transformação de tensão e operam com correntes relativamente altas. Geralmente, o núcleo de aço dos transformadores é laminado para reduzir a indução de correntes no próprio núcleo, já

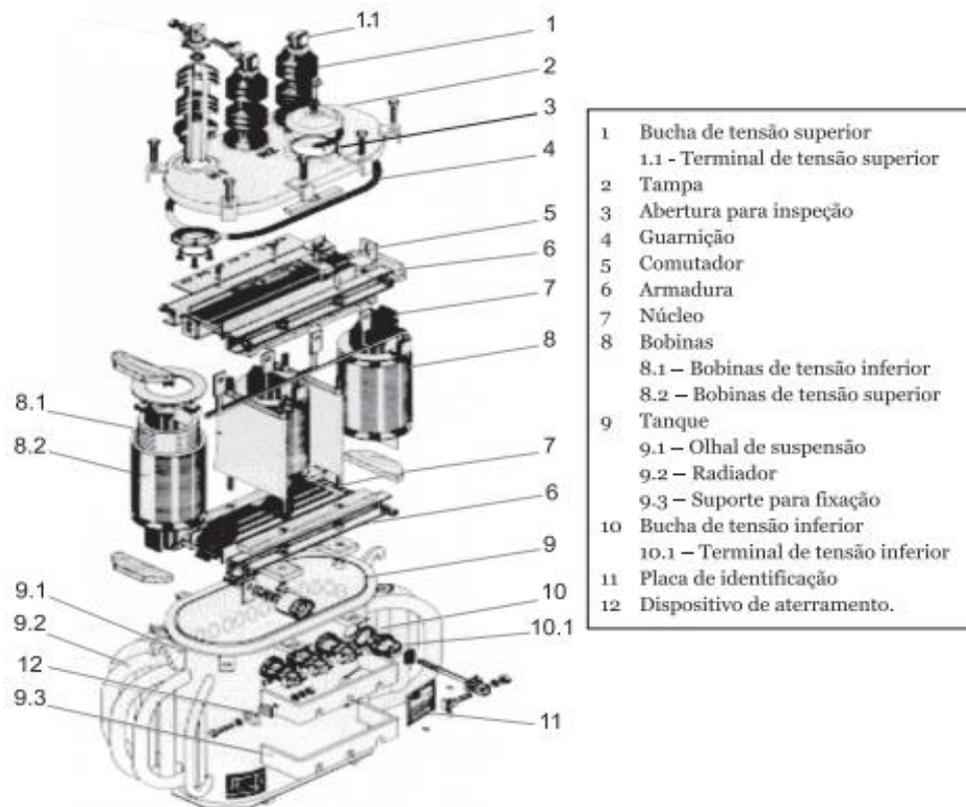
que essas correntes contribuem para o surgimento de perdas por efeito Joule. Em geral, se utiliza aço-silício com o intuito de aumentar a resistividade e diminuir ainda mais essas correntes parasitas. Existem outros tipos de transformadores, alguns possuindo núcleo ferromagnético, outros sem núcleo, chamados de transformadores com núcleo de ar, e ainda aqueles com núcleo de ferrite. O conjunto formado pelos enrolamentos e pelo núcleo é denominado de parte ativa do transformador.

O tanque do transformador é destinado a servir de invólucro da parte ativa e de recipiente para o óleo isolante. O óleo isolante tem a finalidade de propiciar isolamento elétrico entre os componentes do equipamento e dissipar para o exterior o calor gerado nos enrolamentos e no núcleo. O tanque é basicamente a parte mais importante no qual viabiliza o uso do óleo para isolação elétrica, sendo ele de qualquer base, os isolantes líquidos além de ter a capacidade dielétrica também têm o grande desafio de realizar o resfriamento internamente, uma vez que ocorre liberação de calor por diversos fatores, sendo eles perdas parasitas, condução elétrica e histerese. Este óleo pode ser mineral (parafínico ou naftênico), fluidos isolantes a base de silicone ou natural. Antigamente, eram usados askarel e piranol que hoje estão proibidos por serem nocivos à saúde.

Transformadores de pequena potência podem ter sua parte ativa envolta pelo ar ambiente, que são denominados transformadores a seco. Mas, os transformadores mais vendidos e em funcionamento são isolados eletricamente com algum tipo de óleo com propriedades dielétricas e térmicas adequadas.

Na Figura 6 é possível verificar um transformador com todas suas partes principais que o constitui, neste caso, trata-se de um transformador de distribuição trifásico.

Figura 6 - Transformador de distribuição "explodido"



Fonte: MOITO, 2005

Os transformadores podem ser classificados em duas categorias: transformadores de distribuição e transformadores de potência. Os primeiros são aqueles que rebaixam a tensão para o nível de utilização dos usuários, ou seja, são aqueles localizados no final da cadeia do sistema. Devido a sua vasta utilização há uma enorme variedade desse tipo de equipamento, cada qual com suas peculiaridades, dependendo da aplicação e instalação (SILVA, C. R., 2009).

Atualmente, um dos grandes esforços por parte das indústrias de transformadores e pesquisas voltadas para o meio energético está relacionando a um substituinte do óleo mineral. E muito se deve ao fato de que o funcionamento adequado dos transformadores depende de um eficiente sistema de isolamento e refrigeração, os quais são realizados por fluidos com propriedades tais como alta constante dielétrica e elevada estabilidade térmica (SILVA, C. R., 2009).

2.5 Óleos como isolantes líquidos

Os isolantes líquidos atuam geralmente em duas funções: na refrigeração e na isolação. Seu efeito refrigerante é o de retirar o calor gerado internamente pelo sistema elétrico, transferindo-o aos radiadores de calor, mantendo, assim, dentro de níveis admissíveis o aquecimento do equipamento. Dentre os isolantes líquidos destacam-se a utilização de óleo mineral e óleo de base vegetal.

2.5.1 Óleo mineral

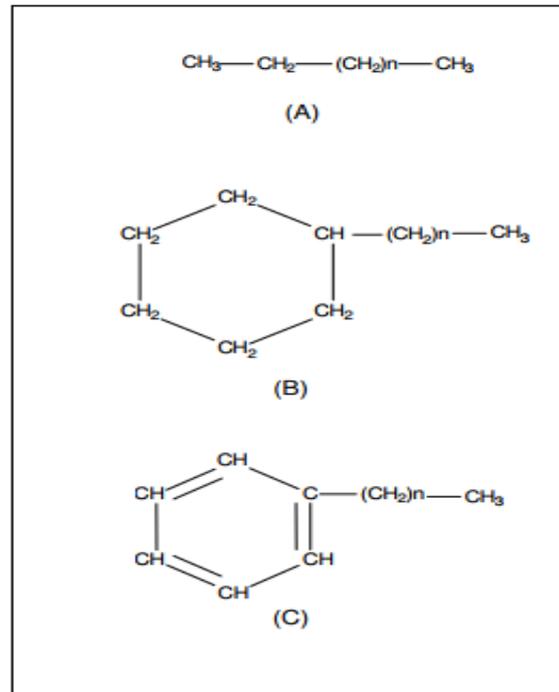
O óleo mineral (OM) foi desenvolvido devido a necessidade de um isolante para os sistemas elétricos de energia, uma vez que o produto que outrora encontrava-se em circulação, teve sua comercialização proibida em função da toxicidade.

O OM utilizado em equipamentos elétricos é obtido pela destilação do petróleo e corresponde à fração obtida entre 300 e 400 °C. Trata-se de uma mistura de compostos na qual a maioria das moléculas compostas por hidrocarbonetos é uma pequena minoria de compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio em sua estrutura (WILSON A. C. M., 1980).

Os óleos isolantes são fluidos orgânicos com baixa viscosidade e que podem ser de dois tipos: sintéticos e minerais. O isolante deve possuir propriedades que confirmam um bom isolamento, mas, também, deve atender a outros requisitos dependendo de sua aplicação. Os óleos utilizados nos transformadores representam a maior parte dos óleos isolantes consumido nas produções, a sua utilização varia de alguns litros até mais de 40m³. A função essencial do óleo é remover o calor gerado no interior do equipamento (transformador) quando está em funcionamento. (SILVA, A.C.M. 2006)

Os hidrocarbonetos que compõem os óleos minerais possuem entre 19 a 23 átomos de carbono. Eles podem ser divididos em três grupos: parafinas ou alcanos, naftenos ou cicloalcanos e aromáticos (Figura 7). Os grupos de hidrocarbonetos presentes no óleo influenciam em suas propriedades físico-químicas.

Figura 7 - Estrutura dos hidrocarbonetos constituintes do OM: (A) parafínico, (B) naftênico, (C) aromático.



Fonte: SOLOMONS, 2002.

Os óleos de estruturas parafínicos ou naftênicos são os mais utilizados no funcionamento dos transformadores. Porém, diferem no desempenho dependendo das condições climáticas em que está exposto o transformador.

A avaliação dos óleos tanto parafínico como naftênico são regulamentadas por algumas NBRs, que estabelecem parâmetros obrigatórios para esses óleos quando aplicados como dielétricos. Alguns estão presentes no Quadro 1, em que é possível observar que ambos devem seguir os mesmos valores e características obrigatórias, exceto para fluidez e massa específica (NBR 7148 e 11349), e isto se deve as suas particularidades estruturais.

Quadro 1 - Característica para um OM novo parafínico e naftênico.

Características	Unidade	Método de ensaio	Especificações	
			Naftênico	Parafínico
Aspecto visual	-	Visual	Isento de materiais, claro e límpido	
Cor	-	NBR 14483	1,0 máx.	
Massa específica 20°C	Kg. m ⁻³	NBR 7148	861 – 900	860 máx.
Viscosidade cinemática	20°C	CSt	NBR 10441	25 máx.
	40°C			12 máx.
	100°C			3 máx.
Ponto de fulgor	°C	NBR 11 341	140 min.	
Ponto de fluidez	°C	NBR 11349	-38 máx.	-12 máx.
Rigidez dielétrica	Eletrodo de disco	KV	NBR 6869	30 min.
	Eletrodo de calota			42 min.
Fator de perdas dielétrica	25°C	%	NBR 12133	0,05 máx.
	90°C			0,40 máx.
	100°C			0,50 máx.
Enxofre corrosivo	-	NBR 10505	Não corrosivo	
Índice de neutralização	mg.KOH. g ⁻¹ óleo	NBR 14248	0,03 máx.	
Teor de água	mg. Kg ⁻¹	NBR 10710	35	
Bifenila policlorada	mg. Kg ⁻¹	NBR 13882	Não detectável	
Cloretos e sulfatos	-	NBR 5779	Ausentes	
Tensão interfacial a 25°C	mN.m ⁻¹	NBR 6234	40 min.	
Rigidez dielétrica a impulso	KV	ASTM D 3300	145 min.	

Fonte: Autor – auxiliada pelas NBRs.

A classificação do OM em parafínico ou naftênico é normalmente, definida segundo a norma ASTM D 2140, por meio de medidas de viscosidade, densidade, índice de refração e pela correlação entre estes resultados em um diagrama ternário.

Durante a operação do transformador, o óleo tende a envelhecer e mudanças consideráveis podem ocorrer nas suas propriedades físicas, químicas e elétricas. Logo, ocorre o surgimento de problemas no transformador, sendo iniciada pela deterioração das propriedades isolantes do óleo, aceleração do processo de degradação da celulose (parte sólida do transformador) e formação de borra (material que se deposita na parte ativa dos transformadores, dificultando a transferência de calor).

Os OMs assim como óleo vegetal apresentam reação de oxidação durante sua operação normal em transformadores. Essas reações ocorrem por via radicalar e geram, inicialmente, hidroperóxidos e peróxidos que dão origem a álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, ácidos, água e borra (substância resinosa resultante da polimerização a partir de ácidos e outros compostos polares). Uma das formas de minimizar o envelhecimento do óleo é adição de substâncias inibidoras a oxidação, ajudando a manter o bom funcionamento do transformador (LUZ JÚNIOR, GUIMARÃES NETO, MOITA NETO, 2005).

O óleo mineral por ser proveniente de uma fonte não renovável e seu processo de industrialização ser tão agressivo para diversos meios, despertou o olhar para busca de um substituinte, por isso os óleos vegetais são candidatos para estudos e desenvolvimento, pois os mesmos tem como características a biodegradabilidade, são de fontes renováveis, pouco poluentes e sua extração é uma fonte de renda pra comunidades dentre outras qualidades.

2.5.2 Óleo vegetal

O Brasil ocupa uma posição privilegiada tanto em termos de biodiversidade quanto em capacidade de gerar recursos renováveis em grande escala. Ele é o país de maior biodiversidade mundial, e nele encontra-se uma abundância de espécies oleaginosas, sendo a soja a principal de interesse comercial. Mas, já há espaço no comércio brasileiro para produção de outras espécies, sendo diversificadas pelas diferentes regiões do país, que ocasiona que a maioria de seus estados tenham espaço no mercado, inclusive no estado do Amazonas, como se verifica na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção de óleo vegetal no Brasil ton./dia.

Estados	2012	2013	2014	2015	2016	Var. 15/16
Mato Grosso	35.486	38.76	40.410	41.210	41.259	0,1 %
Paraná	35.745	35.745	35.745	35.745	35.839	0,3 %
Rio Grande do Sul	30.560	31.360	29.190	29.190	30.190	3,4 %
Goiás	21.285	21.485	23.585	26.785	27.211	1,6 %
São Paulo	13.950	14.173	14.773	14.773	14.773	0,0 %
Mato Grosso do Sul	10.790	10.590	10.590	10.590	11.790	11,3 %
Minas Gerais	9.100	9.100	9.100	9.100	9.128	0,3 %
Bahia	6.600	6.491	6.691	6.691	6.920	3,4 %
Santa Catarina	2.750	3.200	3.200	3.200	3.200	0,0 %
Tocantins	-	-	-	3.020	3.020	0,0 %
Piauí	2.800	2.800	2.800	2.800	2.800	0,0 %
Amazonas	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	0,0 %
Maranhão	1.525	1.500	1.500	1.500	1.500	0,0 %
Pernambuco	400	400	400	400	400	0,0 %
Rondônia	350	300	300	300	300	0,0 %
Ceará	100	100	100	0	0	0,0 %
Total	173.441	177.980	180.384	187. 304	190.330	1,6 %

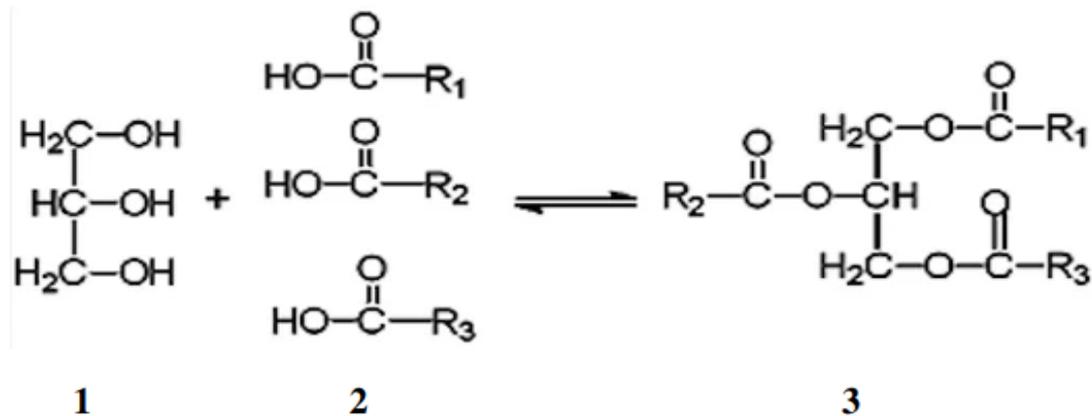
Fonte/elaboração: disponível <http://abiove.org.br/estatisticas/>, acesso em 15/02/19

Os óleos vegetais podem ser obtidos a partir das diversas partes das espécies oleaginosas como frutos, cascas e sementes. O método de obtenção é simples, passando por processos de descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente. 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 (MORETTO, FETT,1998).

Quimicamente, o óleo vegetal é formado por moléculas de acilgliceróis, mostrado na Figura 8, que são originárias da condensação entre ácidos graxos e glicerol formando os ésteres de ácidos graxos. Esses compostos são classificados de acordo

com o número de moléculas de ácidos graxos presentes, podendo variar em mono, di ou triacilgliceróis. É importante ressaltar que os triacilgliceróis podem ser formados por ácidos graxos iguais ou diferentes entre si, e, dependendo da origem da matéria prima, podem ser saturados ou insaturados (UHREN, 2007).

Figura 8 - Representação estrutural: 1) glicerol, 2) ácido graxo, 3) triacilglicerídeo, em que R, R1, R2 e R3 são hidrocarbonetos diferentes ou iguais.



Fonte: Adaptação de SILVA, C.R, 2009

Os ácidos graxos, constituintes dos triacilglicerídeos mais comuns contém de 12 a 18 átomos de carbono, embora ácidos com menor ou maior número de átomos de carbono possam ser encontrados. Na Tabela 2, observa-se a porcentagem de ácido graxo na composição de óleos vegetais (GARCIA, CAMILA, 2006). O número de insaturações pode variar de 1 a 6, sendo que três insaturações são comuns, com um predomínio de isômeros *cis*, especialmente nos óleos e gorduras naturais. A configuração *cis* da ligação dupla de um ácido graxo impõe uma curva rígida à cadeia carbônica que causa redução da atração de van der Waals entre as moléculas. Como consequência, ácidos graxos insaturados possuem pontos de fusão mais baixos (SOLOMONS, 2002).

Tabela 2 - Porcentagem de ácidos graxos presente em alguns óleos vegetais.

Ácidos graxos	Quantitativo em cada óleo (%)				
	Soja	Milho	Girassol	Babaçu	Algodão
C<14	-	-	-	72	1
Mirístico C14:0	11	13	11	9	29
Palmítico C16:0	4	4	6	3	4
Palmitoléico C16:1	-	-	-	-	2
Oleico C18:1	25	29	29	13	24
Linoleico C18:2	51	64	52	3	40
Linolênico C18:3	9	-	-	-	-

Fonte: Moreto & Alves (1980)

Apesar de ser uma tecnologia relativamente recente, o óleo vegetal mostra-se como uma alternativa viável na substituição do óleo mineral para aplicações em equipamentos elétricos. As principais vantagens para essa substituição é a maior segurança ambiental, excelente resistência ao fogo e ser um produto renovável (ROCHA FILHO, 2006). Assim, a utilização deles contribui para a qualidade do meio ambiente.

Segundo a CPFL Energia (Companhia Paulista de Força e Luz) o óleo vegetal permite ampliar a potência do transformador, que passa a comportar mais kVA por quilo e ajuda a diminuir as falhas técnicas, além de ser decomposto no meio ambiente em apenas 45 dias, enquanto o mineral leva 15 anos para ser totalmente degradado. Outra vantagem está no melhoramento do rendimento dos transformadores porque o líquido isolante leva a celulose se deteriorar mais lentamente. O óleo vegetal é mais higroscópico que o mineral à base de petróleo. Os fluidos vegetais apresentam solubilidade em água a 25°C de aproximadamente 1000 ppm, enquanto o óleo mineral 55-60 ppm.

Os estudos que analisam a eficiência dos isolantes vegetais são baseados em parâmetros comparativos em relação aos óleos minerais já comercializados. As propriedades essenciais do óleo vegetal isolante usado em equipamentos elétricos deve ser mantido dentro dos valores recomendados para que este possa executar suas várias funções como isolante elétrico e refrigerante. Os óleos devem apresentar rigidez dielétrica adequada para suportar as solicitações elétricas impostas em

serviços, bem o baixo teor de água, limpidez, para que sua capacidade de isolamento elétrica seja eficiente para um determinado equipamento. O óleo deve ter ponto de fulgor e combustão suficientemente altos para atender aos requisitos de segurança.

2.5.3 Óleos vegetais da Amazônia

A região amazônica possui diversas espécies oleaginosas, várias dessas são palmeiras nativas, como por exemplos o babaçu (*Orbignya phalerata*), açaí (*Euterpe oleracea*), buriti (*Mauritia flexuosa*) entre outros. A composição de oleaginosas provenientes da região amazônica estão presentes no Quadro 2.

Quadro 2 - Demonstrativo de oleaginosas da Amazônia e seus ácidos constituintes em %

Fonte	Ácidos %
Cumaru	Palmítico (5 – 7), esteárico (3 – 5), oleico (45 – 50), linoleico (19 – 24), linolênico (< 5), araquidônico (< 6), beénico (< 4), lignocérico (< 4);
Tucumã	Palmítico (23 – 28), esteárico (2 – 3), oleico (60 – 68), linoleico (1 – 3), linolênico (2 – 4);
Andiroba	Palmítico (25 – 32); esteárico (6-13); oleico (45-58); linoleico (6-14);
Babaçu	Caprílico (4 – 6), cáprico (6 – 8), láurico (43 – 47), mirístico (15 – 19), palmítico (5 – 9), esteárico (2 – 5), oleico (12 – 16), linoleico (1 – 3);
Açaí	Palmítico (17,0 – 28,0), palmitoleico (2,0 – 6,0), esteárico (1,5 – 6,0), oleico (40,0 – 60,0), linoleico (10,0 – 22,0);
Pracaxi	Mirístico (1 – 2), palmítico (1 – 3), esteárico (1 – 3), oleico (40 – 50), linoleico (1 – 3), linolênico (2 – 4), beénico (18 – 21), lignocérico (13 – 16)
C.do para	Palmítico (16,0 – 20,0); esteárico (12,0 – 15,0); oleico (45,0 – 55,0); linoleico (13,0 – 18,0);
Patauá	Palmítico (6 – 15), palmitoleico (< 2), esteárico (2 – 9,5), oleico (68 – 83);
Bacaba	Palmítico (13 – 15), palmitoleico (3 – 5), esteárico (4 – 7), oleico (50 – 65), linoleico (7 – 16), beénico (6 – 10);
Buriti	Palmítico (14 – 19); esteárico (1 – 6); oleico (55 – 75); linoleico (10 – 15); linolênico (< 1,5);

Fonte: Adaptação SILVA, 2009

Algumas espécies de oleaginosas permitem bom aproveitamento de material, sendo possível obter matéria-prima de diversas partes da planta, como caule, folhas, frutos e sementes. Diversos estudos analisam a potencialidade de espécies da flora

amazônica no contexto de produção energética, se destacando a produção de biodiesel (MIRANDA, I.P.A. 2001), mas poucos ainda direcionam para a produção dos óleos dielétricos.

Uma das espécies que pode ser destacada como tendo potencial para produção de óleo é o buriti (*Mauritia flexuosa*), possuindo alto teor de ácido oleico, superior a 70%, como é possível observar na Tabela 3. O buriti é utilizado como alimento, sendo cultivado em baixa escala e com processamento comercial limitado. Seu óleo possui alto custo de produção, e poucas tecnologias de processo e produção desenvolvidas, no entanto, já surgiram diversas produções buscando melhor manejo e aproveitamento da matéria-prima. (BOVI, G.G., 2015).

2.5.4 Óleo de buriti (*Mauritia flexuosa*)

O buriti (*Mauritia flexuosa*) é a palmeira mais abundante no território brasileiro. Está distribuído por toda a América do Sul e tem um importante papel social para a população, principalmente para as comunidades extrativistas, como fonte de renda e de emprego. A palmeira *Mauritia flexuosa* está associada a um ambiente pantanoso na floresta Amazônica e áreas de cerrado, cujo bioma é marcada pela sazonalidade. Ela é muito conhecida nestas regiões devido a sua importância regional, pois dela se aproveita desde os frutos até as raízes, sendo apelidada pelos nativos de “árvore da vida”. Na Figura 9 a palmeira e seu fruto estão com seus constituintes identificados. (RIBEIRO et al., 2014).

Figura 9 - Ilustração dos constituintes da palmeira e fruto do buriti: a) árvore de um buritizeiro, b) inflorescência em planta masculina, c) flores masculinas, d) folha jovem tipo costapalmada, e) fruto maduro inteiro e seccionado com suas partes.



Fonte: CARVALO, C.O. 2011

O óleo extraído da polpa do fruto de buriti é de grande interesse comercial, devido suas propriedades físicas, químicas e sua pela alta concentração de ácido monoinsaturado que minimiza a oxidação do óleo, tendo sua coloração alaranjada atribuída pela grande presença do pigmento natural β -caroteno (DURÃES *et al.*, 2006)

A composição química do óleo do buriti é marcada pelo componente majoritário do ácido oleico, estando na maioria das vezes sob a forma de triglicerídeos, que contém apenas uma insaturação. Em média, ácidos graxos apresentam mais de uma insaturação em menos de 3% de sua composição. Uma possível estabilidade no óleo se deve à ausência de ácidos graxos com muitas insaturações. A composição completa do óleo de buriti é vista na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição em ácidos graxos do óleo de buriti (em porcentagem).

Ácidos Graxos	PIMENTEL et al., 2005	CERIANI et al., 2008	RODRIGUES et al., 2010	AQUINO et al., 2012
Palmítico (16:0)	15,59	18,00	18,75	19,40
Palmitoleico (16:1)	0,50	0,45	0,25	-
Estearico (18:0)	1,30	1,18	1,35	3,90
Oleico (18:1)	79,40	77,34	75,50	72,20
Linoleico (18:2)	1,50	1,39	2,15	2,30
Linolênico (18:3)	0,80	1,25	0,10	1,50
Araquídico (20:0)	0,10	0,08	1,65	-
Gadoléico (20:1)	0,30	0,21	-	-

Fonte: et.al

O óleo produzido pelas comunidades extrativistas é, em sua maioria, por meio da extração artesanal, mas CARVALHO, C. O. (2011) observou o baixo rendimento na obtenção do óleo. Muito por conta do baixo incentivo de extração mais eficiente, para que os dependentes desse manejo sejam melhor retribuídos, no resultado da pesquisa, a extração do óleo de buriti foi submetido a três técnicas e apresentou os seguintes resultados conforme mostrado na Tabela 4. Pode-se verificar o aumento significativo quando se utiliza prensa ou solvente na extração, sendo o primeiro mais rápido e com resultados parecidos com os obtidos via extração por solvente.

Tabela 4 - Quantitativo em massa do rendimento de óleo de buriti nos três modos de extração.

Métodos de extração	Polpa seca (g)	Torta (g)	Rendimento de óleo (g)	Rendimento de óleo (%)
Artesanal	572	526,88	45,13	4,01
Prensagem	572	329,895	242,05	21,50
Solvente	572	306,805	265,20	23,55

Fonte: Adaptação de CARVALHO, C. O. 2011.

Esta espécie apesar de já ter uma importância econômica local, ainda pode ter ser potencial ainda mais difundido. Por isso, é de grande importância a investigação de usos alternativos, uma vez que é impulsionada a produção de conhecimento e ampliando o cultivo e uso de um produto nativo. Muito se dar, pelo conhecimento que os OV's possuem muitos benefícios e o óleo de buriti pode ter alto potencial para várias aplicações tecnológicas.

Ao estudar o óleo de um único fruto da Amazônia estamos sujeitos a uma vasta oportunidade de caracterizar óleos e desenvolver um substituinte dielétrico com características térmicas condizentes com a necessidade da produção de um item essencial para o desenvolvimento da humanidade, sendo também um produto que venha impactar economicamente no extrativismo familiar e na conservação da natureza além do reconhecimento em pesquisa territorial.

2.5.5 Óleo vegetal como fluido dielétrico

Os óleos vegetais isolantes são utilizados em equipamentos elétricos empregados na geração, transmissão e distribuição da energia elétrica.

Ensaio realizados com fluidos dielétricos comerciais demonstraram que os isolantes de origem vegetal atingem ponto de combustão aos 360°C e são 97% biodegradáveis em 21 dias. Destaca-se ainda que durante a combustão esses óleos somente emitem dióxido de carbono e água, sem derivados poliaromáticos ou silicatos prejudiciais quando queimados. Em contrapartida, a queima do óleo mineral se dá a 160°C (STOCCO, 2009) e causa grandes impactos ao meio ambiente. Por isso, o óleo

vegetal já é regularizado por NBRs e várias delas trazem conceitos importantes para um óleo vegetal atuar como isolante.

O óleo vegetal, segundo NBR 15422:2015 e NBR 16518:2017, é constituído por moléculas de triacilgliceróis (triglicerídeos), caracterizadas pela ligação éster. É formulado a partir de óleo extraído de fontes renováveis, como sementes/grãos e aditivos para melhoria de desempenho. Aditivo de melhoria de desempenho, segundo NBR 15422:2015 são substâncias químicas apropriadas que são deliberadamente adicionadas ao óleo vegetal isolante para melhorar certas características, como por exemplo, ponto de fluidez, viscosidade e estabilidade à oxidação.

Outro ponto importante é sua qualificação como fluido de alto ponto de combustão (classe K), segundo NBR16518:2017 e NBR15422:2015: Fluidos que apresentam ponto de combustão mínimo de 300°C quando ensaiados conforme a NBR 11341.

Este estudo propõe avaliar um óleo isolante regional que contemple todas as características físico-químicas e elétricas conforme ABNT NBR 15422 e tenha capacidade de comportar-se como um fluido dielétrico em transformadores de energia. O conhecimento dessas propriedades é fundamental na garantia da eficiência do sistema de isolamento e na refrigeração dos transformadores.

O potencial de produção e aplicação de óleos produzidos a partir de frutas amazônicas é enorme. No entanto, as pesquisas relacionadas na área de produção energética são poucas, principalmente, se comparado àqueles que estudam propriedades nutricionais ou medicinais. A presente pesquisa propõe estudar um óleo isolante dielétrico vegetal, apresentando alternativas tecnológicas para o óleo extraído do fruto do buriti (*Mauritia flexuosa*). A produção a partir desse fruto apresenta vantagens, no que tange ao aspectos econômicos e de sustentabilidade: produção de um óleo mais barato, havendo agregação de valor econômico a um produto relevante para a economia local, bem como, redução de impactos ambientais negativos na produção de energia elétrica, em função da biodegradabilidade superior que apresentam os isolantes vegetais comparados àqueles comumente empregados no processo atual.

3 OBJETIVOS:

Geral:

Estudar as características do óleo extraído da polpa do fruto de buriti e avaliar sua compatibilidade como fluido dielétrico em transformadores de energia elétrica.

Específicos:

- Realizar testes físico-químicos e elétricos para análises das propriedades do óleo em questão;
- Verificar a compatibilidade do óleo de buriti (*Mauritia flexuosa*) em comparação aos óleos vegetais e minerais utilizados atualmente;
- Obter um fluido isolante compatível com a norma ABNT NBR 15422;
- Obter um fluido isolante eficaz no que diz respeito a sua regidez dielétrica;
- Disponibilizar alternativa para produção de energia limpa;
- Agregar valor aos óleos produzidos na região amazônica.

4 METODOLOGIA

4.1 Obtenção do óleo:

O óleo do fruto do buriti utilizado neste trabalho foi disponibilizado pelo professor Dr. José Correa de Castro, que já desenvolve projetos energéticos com este óleo em comunidades extrativistas no município de Eirunepé, estado do Amazonas.

A parte experimental foi realizada na Indústria de Transformadores Amazonas (ITAM), que se encontra em Manaus-AM. Esta empresa trabalha na fabricação de transformadores até 10 MVA/36Kv e manutenção de transformadores até 100 MVA/69Kv. Os equipamentos produzindo são isolados eletricamente em resina, ar, óleo mineral ou óleo vegetal. As caracterizações físico-químicas do óleo de buriti foram realizadas na ITAM conforme as NBRs correspondentes.

4.2 Tratamento do óleo bruto

4.2.1 Tratamento do óleo bruto com terra Fuller e filtro de 1 micra

Foi realizado o tratamento do óleo bruto com dois tipos de terra Fuller, que é uma argila expandida capaz de atrair eletricamente moléculas polares (SILVA, C.R. 2009). Para tanto, duas amostras foram colocadas em estufa a 120°C durante 14 horas. Destas, uma continha a terra Fuller, usada conforme recebida do fornecedor, que denominou-se de terra Fuller não lavada e outra contendo terra Fuller lavada (terra Fuller lavada com água corrente e seca a 120°C por 12 horas).

4.2.2 Tratamento do óleo de buriti com sílica perolizada

Ao caracterizar a rigidez dielétrica do óleo de buriti, notou-se a necessidade de diminuir o teor de água do material. Na tentativa em diminuir o teor de água, foi utilizada sílica perolizada branca (2,5- 6,0mm). Quando o óleo está em processo de envase nos transformadores, ele passa por filtros desidratadores que contêm sílica gel que reduz o teor de água do líquido isolante. Foi improvisado um filtro conforme Figura 10, adicionou-se a sílica montando uma coluna e o óleo foi filtrado.

Figura 10 - Filtro feito com sílica perolizada.



Fonte: Autor.

4.2.3 Filtragem do óleo de buriti com sílica e filtro de lã 1 micra

Para um melhor resultado da rigidez dielétrica do óleo de buriti, foi montado uma coluna aberta de filtragem contendo filtro de 1 micra e sílica gel perolizada branca, conforme Figura 11, para obtenção do fluido com baixo teor de água e isento de impurezas.

Figura 11 - Coluna para filtragem contendo sílica e filtro de 1 micra.



Fonte: Autor.

4.3 Caracterização do material dielétrico:

Para caracterização do óleo de buriti foram utilizados alguns ensaios especificados na NBR 15422, relativos a estudos para óleos vegetais empregados em transformadores de energia. Os ensaios principais são descritos nos próximos itens:

4.3.1 Determinação da massa específica, densidade relativa e API° - Método do densímetro

A densidade foi analisada conforme preconizada na NBR 7148 e solicitada na NBR 15422. Após alcançar a temperatura de equilíbrio, foi realizada a leitura da escala e anotado a temperatura da amostra. Não foi preciso corrigir a densidade pela tabela da ASTM D 1250.

4.3.2 Determinação do índice de acidez e de basicidade - Método indicador

O índice de acidez do óleo de buriti foi determinado conforme preconizado na NBR 14248. Para determinação do índice de acidez, 2,0 g amostra foi dissolvida em uma mistura de tolueno e álcool isopropílico (1/1) contendo uma pequena quantidade de água. A solução foi titulada em temperatura ambiente com uma solução-padrão alcoólica de hidróxido de sódio 0,1 N até o ponto final indicado pela mudança de cor da solução utilizando o indicador p-naftolbenzeína. O teste foi realizado em triplicata.

4.3.3 Determinação do ponto de fulgor em vaso aberto Cleveland.

O ponto de fulgor é a menor temperatura no líquido na qual a aplicação da chama de ensaio causa a ignição dos vapores da amostra que se encontram acima da superfície.

Para análise do ponto de fulgor do óleo de buriti foi utilizado um vaso Cleveland, marca: PETRODIDATICA, modelo: PD520 (Figura 12), seguindo as normas da NBR11341.

Figura 12 - Equipamento vaso Cleveland, utilizando para determinar ponto de fulgor.



Fonte: Autor.

4.3.4 Determinação do teor de água

Este método é titulométrico e foi realizado de acordo com as instruções do fabricante do equipamento AGUAMETER, marca: BAUR, modelo: KFM3000 (Figura 13). A análise foi realizada conforme preconizada na NBR 10710 solicitada na NBR 15422.

Figura 13 - Equipamento BAUR AGUAMETER KFM3000, utilizado para determinar teor de água.



Fonte: Autor.

O teste conforme metodologia descrita acima foi realizado no óleo bruto, pós tratamento com terra Fuller lavada, terra Fuller não lavada, após passar pelo tratamento com sílica e com sílica e filtro.

4.3.5 Análise de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Foram realizadas análises nos óleos comerciais, óleo bruto e tratados utilizando espectrofotômetro de FTIR da marca Shimadzu modelo IRTracer-100 localizado no Laboratório de Eletroquímica e Energia (LEEN)/ICE/UFAM, usando o módulo ATR-8200HA com placa de seleneto de zinco (ZnSe). Foram realizadas medidas na faixa de 500 a 4000 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} à temperatura ambiente, com média de 45 varreduras.

4.3.6 Determinação da rigidez dielétrica (eletrodo de disco)

A amostra do líquido foi ensaiada no equipamento de rigidez dielétrica da marca BAUR, modelo: DTA 100 C (Figura 14), em uma tensão elétrica com as condições prescritas na NBR 6869. Foi determinada a rigidez dielétrica como a tensão em que há uma descarga de corrente entre os dois eletrodos através da amostra. Essa análise foi repetida após realizar a secagem do óleo com sílica e anotado valores correspondentes.

Figura 14 - Equipamento de determinação da rigidez dielétrica.



Fonte: Autor.

4.3.7 Determinação da cor - método do colorímetro

Foi usado a iluminação padrão do ambiente composta com lâmpadas fluorescentes para leitura da coloração da amostra. Uma amostra líquida foi colocada no recipiente do colorímetro GERIN modelo PSB-97 (figura 15) e comparado com os padrões coloridos que possuem cor na faixa de valores de 0,5 a 8,0 conforme NBR 14483.

Figura 15 - Equipamento colorímetro GERIN modelo PSB-97, determinação da cor.



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O óleo isolante é um constituinte fundamental do transformador, pois auxilia em vários processos internos, principalmente, os físico-químicos e elétricos. Como alternativa ao óleo petroquímico, estudou-se aqui o óleo de buriti. Ele foi submetido a ensaios que o caracteriza como isolante dielétrico e alguns tratamentos para melhorar suas propriedades. No óleo bruto foi realizado as análises de massa específica, índice de acidez e ponto de fulgor; no óleo tratado com terra Fuller foram realizadas as análises de teor de água, FTIR, determinação de cor e rigidez elétrica.

5.1 Determinação da massa específica

A massa específica a 25 °C do óleo bruto foi de 0,911 g/cm³. O limite máximo estabelecido pela NBR7148 para usos em transformadores elétricos é de até 0,96 g/cm³, logo o óleo está dentro dos limites legais. Este parâmetro é muito importante para o emprego do óleo no transformador elétrico devido à necessidade de resfriamento, uma vez que uma baixa densidade no óleo ajudará na circulação do óleo pelo sistema influenciando diretamente na dissipação de calor.

Os óleos vegetais têm viscosidades semelhantes à do óleo de silicone e muito inferior ao do fluido *HMWH* (*High Molecular Weight Hydrocarbons*). Os valores obtidos para a viscosidade do óleo de buriti e de outros óleos vegetais empregados para a mesma finalidade são apresentados na Tabela 5, sendo os óleos de soja e girassol já comercializados. Nota-se que ele apresenta um valor inferior aos demais óleos. Isso pode ser justificado, possivelmente, pela maior interação intermolecular das moléculas de triglicerídeos no óleo de buriti do que nas cadeias presentes nos outros óleos vegetais.

Tabela 5 - Valores de densidade relativa para alguns óleos vegetais e mineral.

Tipo de óleo	Densidade relativa (g.cm⁻³)
Valor limite NBR7148	0,96
Buriti	0,911 ^a
Algodão	0,920 ^b
Girassol	0,924 ^b
Milho	0,922 ^b
Soja	0,920 ^b
Mineral	0,879 ^b

Adaptação: (a) Autor, (b) STOCCO, 2009

Vale ressaltar que a viscosidade do óleo é uma propriedade que está intimamente ligada com a densidade do fluido. E conforme já comentado, o líquido isolante, sendo ele refrigerante do equipamento elétrico, é de extrema importância que seu escoamento ocorra o mais fácil possível para que possa desenvolver sua finalidade com eficiência. A alta viscosidade do óleo vegetal pode ser uma questão crítica para o funcionamento seguro de transformadores, especialmente em regiões de clima frio.

5.2 Análise do índice de acidez do óleo

Segundo STOCCO (2009) é necessário um baixo teor de acidez total do fluido isolante a base de óleo vegetal para minimizar a condução elétrica, corrosão metálica e aumentar a vida do sistema isolante. A acidez no óleo é dada pela quantidade de grandes cadeias de ácidos graxos em sua composição, por outro lado o óleo mineral detém um índice de acidez mais baixo pois suas cadeias de ácidos orgânicos são curtas.

O índice de acidez encontrado para o óleo de buriti foi equivalente a 1,12 mg KOH.g⁻¹ de óleo. Esse valor está acima do estabelecido na norma NBR 15422 para transformadores elétricos, uma vez que é solicitado um índice inferior a 0,06 mg KOH.g⁻¹ de óleo.

Segundo WILHELM e colaboradores, os índices de neutralização típicos dos OVs são normalmente mais altos do que os do OMs devido os OVs oxidados tendem a formar longas cadeias de ácidos graxos enquanto que o OM tende a

formar ácidos orgânicos de cadeia curta, sendo estes muito mais agressivos em comparação aos primeiros (WILHELM, GRANATO, TULIO, *et al.*, 2006).

Na Tabela 6 encontra-se os valores de acidez do óleo de buriti e outros óleos vegetais, e nota-se à similaridade desses óleos vegetais brutos referente a um elevado nível de acidez. Vários fatores podem ser justificados para um índice de acidez alto de óleos vegetais, como por exemplo, métodos de extração, sazonalidade, impurezas, entre outros. Por isso, no uso comercial, o óleo vegetal precisa passar por um processo de desacidificação.

RAFAELA, ARRUMA ESSA E AS DEMAIS TABELAS ABAIXO COMO FIZ COM AS ANTERIORES. Tira aqueles sombreados. Veja as anteriores e siga o padrão

Tabela 6 - Acidez do óleo de buriti e comparação com outros óleos vegetais

Óleos	Índice de neutralização (mg KOH.g⁻¹ de óleos)
Valor limite NBR 15422	0,06
Óleo de buriti	1,12 ^a
Óleo de babaçu	1,94 ^b
Óleo de inajá	1,98 ^b
Óleo de maracujá	2,21 ^b

Fonte: (a) Autor, (b) SILVA, S.M. 2009

SILVA, S.M. (2009) demonstrou mediante a pesquisa desenvolvida para desacidificação do óleo de buriti, que é possível com um equipamento construído especificamente para tal finalidade obter um óleo com 0,3% de acidez. Com o equipamento foi possível obter um óleo com 0,3% de acidez, apesar de ocorrer a degradação do caroteno, que além de conferir a intensa coloração ao óleo, ajuda na atividade anti-oxidativo. Mas, existem antioxidantes eficientes disponíveis no mercado que podem minimizar uma eventual perda de estabilidade química.

O processo de desacidificação dos óleos vegetais é um parâmetro delicado quando se refere a óleos vegetais, pois sua constituição não favorece a neutralização. O alto índice de acidez reflete diretamente no processo auto oxidação que acaba interferindo na tensão superficial. Este índice não influencia diretamente para caracterizar o óleo como um fluido dielétrico, mas compromete a vida útil do produto.

5.3 Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland.

Este parâmetro está relacionado com os riscos contra incêndios no transformador. A norma específica de um fluido classe K (ponto de combustão > 300°C), um líquido seguro para utilização em transformadores, deve apresentar um ponto de fulgor acima de 275°C. Mediante essa informação o procedimento foi realizado conforme solicita a norma NBR 11341, e o óleo de bruto apresentou-se dentro dos limites mínimos estabelecidos, com patamar em 325°C.

Conforme resolução 36 da ANP, os óleos minerais devem ter no mínimo 140°C como ponto de fulgor para que ele possa ser comercializado no Brasil.

A temperatura de fulgor é determinada para avaliar a decomposição do óleo, no qual se inicia a formação de compostos voláteis que ajuda em possíveis explosões no interior de um transformador. Ele é referente quando os gases que ficam na superfície no óleo em processo de decomposição entram em combustão por curtos períodos (segundos).

É importante ressaltar que a capacidade de um óleo ter seu ponto de fulgor tão alto reflete na vida útil das demais matérias constituintes do transformador, porém os demais isolantes sólidos têm a sua temperatura de degradação bem abaixo do ponto de fulgor do óleo vegetal.

Logo, o óleo bruto de buriti já se encontra para suportar temperaturas reais em uso no transformador, dando tranquilidade em relação a acidentes em uma futura aplicação.

5.4 Determinação do teor de água

Os óleos extraídos de vegetais têm em comum uma grande quantidade de água em sua composição, fato constatado na amostra de óleo bruto analisada (708,9 ±0,4 ppm de água). A Tabela 7 mostra a quantidade de água (em ppm) encontrada em óleos vegetais com composição similar ao óleo em estudo. Percebe-se que é comum o óleo bruto apresentar elevados teores de água, que é um grande problema para aplicação aqui estudada. O óleo bruto de buriti esteve abaixo dos níveis de outros óleos vegetais encontrados na literatura.

Tabela 7 - Teor de água encontrado em diversos óleos vegetais e mineral.

Óleos	Teor de água (ppm)
Valor limite NBR 15422	200
Algodão	843 ±8
Babaçu	961 ±3
Girassol	856 ±6
Milho	864 ±2
Soja	849 ±2
Mineral	50 ±3

Autor: Adaptação de SILVA, C.R. 2009

A NBR 15422 define 200 ppm como a quantidade máxima de água para que os óleos vegetais podem ser aplicados como fluido dielétrico em transformadores. É importante lembrar que a água pode estar no óleo de duas formas: solvatada (em solução) e não solvatada (livre).

A quantidade de água influencia diretamente na rigidez dielétrica (que será explanada no item 5.6), característica importante para a determinação da tensão que o óleo é capaz de isolar. Sabendo desta necessidade, foi analisado o óleo conforme a metodologia expressa na NBR 6869.

Devido ao alto valor de teor de água, o óleo passou por tratamento com terra Fuller (terra Fuller é composta por quase 70% de sílica (SiO_2), entre 10% a 15% de óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3), entre 10% e 13% de óxido de magnésio (MgO), entre 2% e 4% óxido de ferro (Fe_2O_3), entre 4% e 7% de óxido de cálcio (CaO) e outras substâncias em menor quantidade). Trata-se de uma argila expandida que possui a característica de atrair eletricamente as moléculas polares (SILVA, C.R. 2009). Foi analisado a terra Fuller após passagem de água corrente que denominou-se terra Fuller lavada. Além de ajudar no índice de teor de água melhora os níveis de rigidez elétrica (item 4.2.1).

Na Tabela 8 estão dispostos os valores obtidos com óleo bruto, tratado com terra Fuller não lavada e após lavagem.

Tabela 8 - Resultado obtido após o processo de secagem com terra fuller.

Tratamento	Teor de água (ppm)
Valor limite NBR 15422	200
Óleo bruto	708,9 ±0,4
Tratada com terra Fuller	531,2 ±0,6
Tratada com terra Fuller lavada	580,6 ±0,7

Fonte: Autor

Com o tratamento do óleo bruto de buriti através da terra Fuller obteve-se uma diminuição de 25% de teor de água em relação ao óleo bruto. Não houve melhora em relação a terra Fuller lavada e não lavada. Mas, mesmo com diminuição no índice de teor de água, ainda está fora dos padrões exigidos.

Com base na melhor resposta em relação ao tratamento com terra Fuller sem lavagem, foi realizado um segundo tratamento visando a secagem do material. Este tratamento é referente a passagem do óleo tratado por filtros desidratadores contendo sílica em gel perolizada branca (2,5 - 6,0mm).

Após a primeira passagem completa do óleo bruto foi medido o teor de água e repetido por mais duas vezes. Os valores obtidos após essas etapas encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores obtidos após a passagem pela terra Fuller e sílica em gel.

Óleos	Teor de água (ppm)
Valor limite NBR 15422	200
Óleo bruto	708,9 ±0,4
Óleo de buriti com terra Fuller	531,2 ±0,6
1° vez pela sílica	154,3 ±0,6
2° vez pela sílica	98,7 ±0,5
3° vez pela sílica	83,3 ±0,6

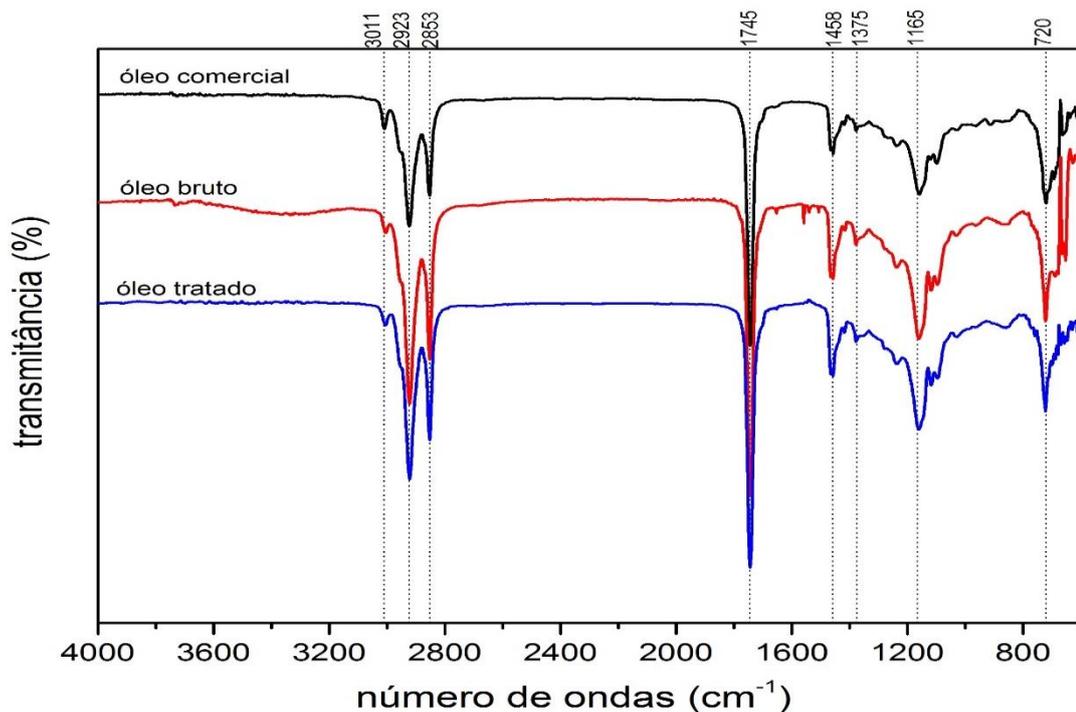
Fonte: Autor

Com os tratamentos realizados obteve-se uma redução de 708,9 ±0,4 a 83,3 ±0,6 ppm de água no óleo de buriti. Uma diminuição significativa no teor de água que enquadrou o óleo de buriti na norma NBR 15422. Vale ressaltar que os métodos utilizados são de baixos custos e simples.

5.5 Espectroscopia de Infravermelho do Transformada de Fourier (FTIR)

A caracterização espectroscópica por infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi realizada em óleo de soja comercial, óleo de buriti bruto e após tratamento com terra Fuller e sílica gel. Os espectros são apresentados na Figura 16. A partir dos espectros de infravermelho é possível verificar possíveis mudanças estruturais ou não no óleo de buriti após tratamento. Também é possível comparar com o espectro do óleo de soja comercial utilizado como óleo dielétrico, proveniente, uma vez que seus ácidos graxos são similares.

Figura 16 - Espectros de infravermelho dos óleos de buriti e soja —óleo comercial, — óleo de buriti bruto e — óleo de buriti tratado com terra Fuller e sílica.



Fonte: Autor

A banda larga entre 3550 a 3175 cm^{-1} , presente apenas no óleo bruto, refere-se ao estiramento da ligação O-H, possivelmente da água presente no óleo. Os demais picos são comuns nos 3 óleos. O pico que corresponde absorção em 3011 cm^{-1} compreende ao estiramento sp^2 , =C-H presentes nas insaturações de ácidos graxos. As vibrações em 2923 e 2853 cm^{-1} são referentes ao estiramento de sp^3 de -C-H presentes nos grupos de olefinas. O pico intenso em 1745 cm^{-1} é devido ao

estiramento de -C=O . O pico em 1458 cm^{-1} refere-se à vibração do grupo metileno com deformação angular simétrica. A absorção fraca em 1375 cm^{-1} é proveniente da deformação angular de C-H do grupo metila. Em 1165 cm^{-1} ocorre o estiramento de -C=O ou C-O. Já em 720 cm^{-1} a deformação fora do plano do grupo CH_2 .

Com a análise FTIR percebeu-se a semelhança estrutural do óleo de buruti com o óleo de soja comercial. Com isso, não foram verificadas vibrações diferentes de um óleo comercial, um indicativo de não haver impurezas no óleo de buriti analisado.

No espectro do óleo de buriti após o tratamento com terra Fuller e sílica em gel é possível verificar o desaparecimento da banda de O-H, possivelmente, pela diminuição da porcentagem de água contida nas amostras em estudo obtendo um espectro semelhante ao óleo de soja comercial, onde esta banda não foi observada.

É importante lembrar que o conteúdo de água dentro do líquido isolante influencia diretamente na ruptura de tensão e frequência de alimentação. Isso quer dizer que quando existe água no meio do óleo ocorre diminuição do potencial de isolamento do material, sendo necessário uma menor quantidade de energia para que o potencial de isolamento seja transcendido.

Os óleos vegetais têm como característica uma estrutura mais higroscópica que o óleo mineral, da mesma forma que tem o diferencial em ser um líquido com uma parte polar que corresponde a regiões eletronicamente mais densas, isso configura maior momento de dipolo e maior constante dielétrica, enquanto o mineral é um líquido apolar.

Um líquido polar como fluido elétrico reflete diretamente na vida útil de um transformador que é composto entre 15 a 30% de papel celulósico dependendo da classe de tensão. Esse reflexo é dado graças à característica higroscópica do óleo vegetal, que retém a água em sua composição reduzindo a umidade e concentração de água no papel isolante (MCSHANE et al., 2001)

A água do óleo vegetal segundo RAPP é consumida no processo de hidrólises do triacilglicerol gerando ácidos graxos livres de cadeia longa, e é possível dizer que esse mecanismo pode estar fazendo o trabalho de secagem no papel, fazendo com que a vida útil dos transformadores seja prolongada (RAPP et al., 2001; RAPP et al., 2002 e RAPP et al., 2005).

As moléculas de água podem dissociar-se acelerando o processo de degradação da isolação. Devido ao processo de hidrólise, tem-se a quebra da cadeia da celulose, resultando em partes menores (L. E. Lundgaard et. Al, 2004, SCHOLS,

R.C. 2013). Por isso, sempre se deve garantir um baixo teor de água no óleo isolante, que foi observado no óleo de buriti após tratamento com terra Fuller e sílica em gel, confirmada pela interpretação dos espectros de FTIR.

5.6 Análise da rigidez dielétrica (eletrodo de disco).

Uma das características mais importantes de um material isolante é a sua resistência à passagem de corrente elétrica. A característica dessa resistividade, entretanto, tem o seu limite prático, e pode chegar a um nível crítico quando a tensão é ultrapassada. Esse valor de tensão é conhecido como rigidez dielétrica (SCMIDTH, 2002).

A rigidez dielétrica de um material consiste na análise por meio de tensão alternada na ruptura do meio isolante, ou seja, ocorrem descarga de tensão entre os dois eletrodos do equipamento até que ocorra a descarga entre os eletrodos ocasionada pela a ruptura do material isolante em análises.

Como já ressaltado, a rigidez dielétrica de um material é o fator determinante para identificar qual tensão o equipamento suporta. Para um isolante dielétrico líquido, existem normas diferentes tratando sobre o limite mínimo de rigidez dielétrica (30 KV) as NBRs 5440 e 15422, respectivamente, ao óleo mineral e vegetal. Tendo como fator importante na caracterização de um fluído dielétrico, o óleo de buriti foi disposto ao ensaio de rigidez dielétrico conforme a metodologia (item 4.3.6).

A rigidez dielétrica do óleo bruto esteve no nível $21,6 \pm 5,6$ KV, este valor é numericamente inferior ao estabelecido pela norma vigente. Este resultado não desqualifica o óleo de buriti devido não haver nenhum tipo de tratamento. Se comparado com os óleos estudados por SILVA, C.R. (2009), o resultado encontrado é numericamente superior à de outros óleos vegetais.

Como já mencionado, a melhora no índice de teor de água provoca maiores patamares de rigidez dielétrica. Por isso, o tratamento para diminuição do teor de água realizado é útil para este parâmetro também. Após tratamento com terra Fuller e sílica em perolizada (equivalente a teor de água de $83,3 \pm 0,6$), o valor da rigidez dielétrica do óleo de buriti aproxima-se ao mínimo estabelecido pela NBR 15422, atingindo o valor de $29,8 \pm 3,9$, conforme tabela 10. No entanto, ele fica num valor que pode ser abaixo pelo desvio padrão da análise, por isso, devido à importância deste parâmetro para emprego como óleo isolante fez-se novos tratamentos.

Tabela 10 - Valores da rigidez dielétrica do óleo de buriti com tratamento.

Óleo	Teor de água (ppm)	Rigidez dielétrico (KV)
	Valor limite NBR 15422	30 KV mín
Óleo bruto	708,9	21,6 ±5,6
Óleo tratado	83,3	29,8 ±3,9

Fonte: Autor

Em virtude da rigidez dielétrica poder ser reduzida caso o teor de água do óleo esteja excessivamente elevado, também como materiais sólidos, partículas microscópicas, entre outras, e haver possibilidades de falhas na isolação e danos ao transformador, foi feito tratamento para diminuição de material particulado.

Para confirmar a influência das partículas no material em estudo, foi montado uma coluna de filtragem contendo filtro de 1 micra e sílica gel perolizada branca, o processo também foi realizando valendo-se da gravidade para obtenção do fluido.

O óleo filtrado pela terceira vez esteve dentro do limite do desvio padrão acima do valor exigido pela norma vigente. A quarta passagem atendeu a NBR 15422, mas dentro do desvio não difere muito da terceira passagem. Na Tabela 11 encontram-se os valores de rigidez dielétrica após os tratamentos.

Tabela 11 - Rigidez do óleo após processo de filtragem com sílica e filtro de 1 micra.

Óleos	Teor de água (ppm)	Rigidez dielétrica (KV)
Valor limite NBR 15422	200	30 KV mín
Bruto	708,9	21,6 ±5,6
1° Vez pela coluna	569,8	21,6 ±5,6
2° Vez pela coluna	372,6	37,6±7,1
3° Vez pela coluna	274,8	48,3±8,2
4° Vez pela coluna	196,2	52,5±11,2

Fonte: Autor

Os valores após terceira e quarta passagem pela coluna, ficaram numericamente acima do limite mínimo estabelecido pela norma NBR 15422. Mediante os valores observados, pode-se inferir que o óleo de buriti é um líquido isolante dielétrico e esteve dentro da norma vigente, pela simples remoção de material particulado e remoção de água

Com relação ao óleo mineral, a rigidez dielétrica começa a diminuir quando a saturação relativa de água no óleo atinge aproximadamente 50%. Para o óleo vegetal, 50% da saturação, a temperatura ambiente, corresponde ao intervalo de 500 a 600 mg/kg de água, ou seja, a quantidade de água exigida para saturar o óleo vegetal a temperatura ambiente é 20 vezes a do óleo mineral (IEEE, 2008).

5.7 Análise da cor do óleo.

A cor do óleo de buriti é característica de sua composição química. Além dos ácidos graxos, em sua composição temos o beta caroteno como um dos seus constituintes que confere resultados satisfatório para um óleo isolante elétrico. Por esse motivo é possível constatar na Figura 17 que a cor do óleo de buriti bruto não está de acordo com o parâmetro especificado na norma vigente que preconizar um óleo límpido e isento de partículas suspensas.

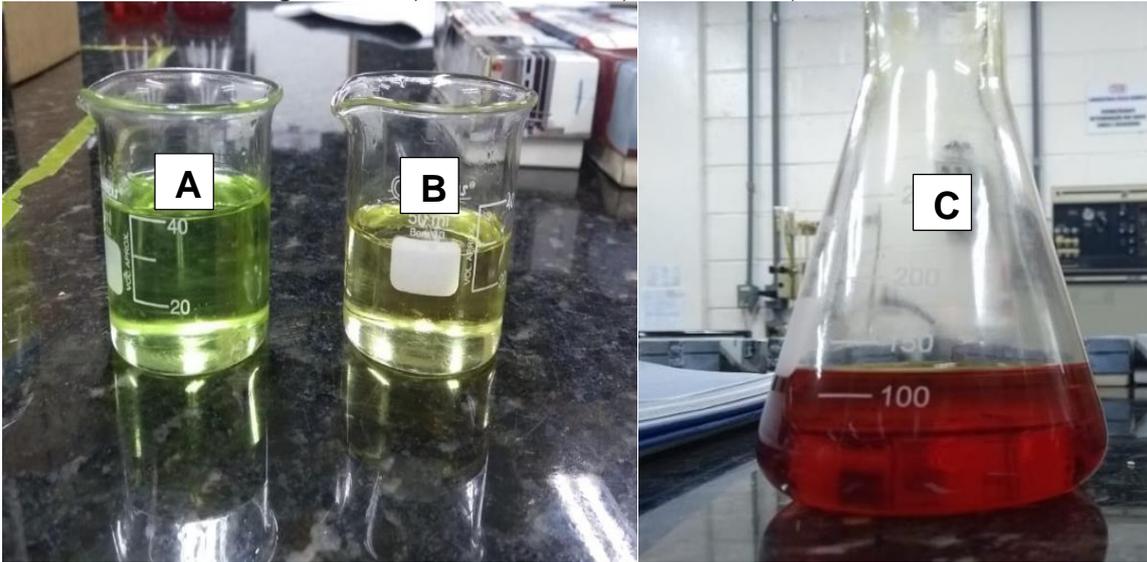
Figura 17 - Análises da cor do óleo.



Fonte: Autor

Na Figura 18, é possível analisar a diferença de cor entre óleos vegetais disponível na ITAM para envasamento em transformadores. Para comparações, os óleos da Figura 18A e 18B estão de acordo com a norma NBR 15422. E a cor do óleo bruto de buriti (Figura 18C) é intensa e por isso não atende a norma especificada, estando na escala 8 de cor

Figura 18 - A) ENVIROTEM, B) BIOTEM e C) óleo de buriti.



Fonte: Autor

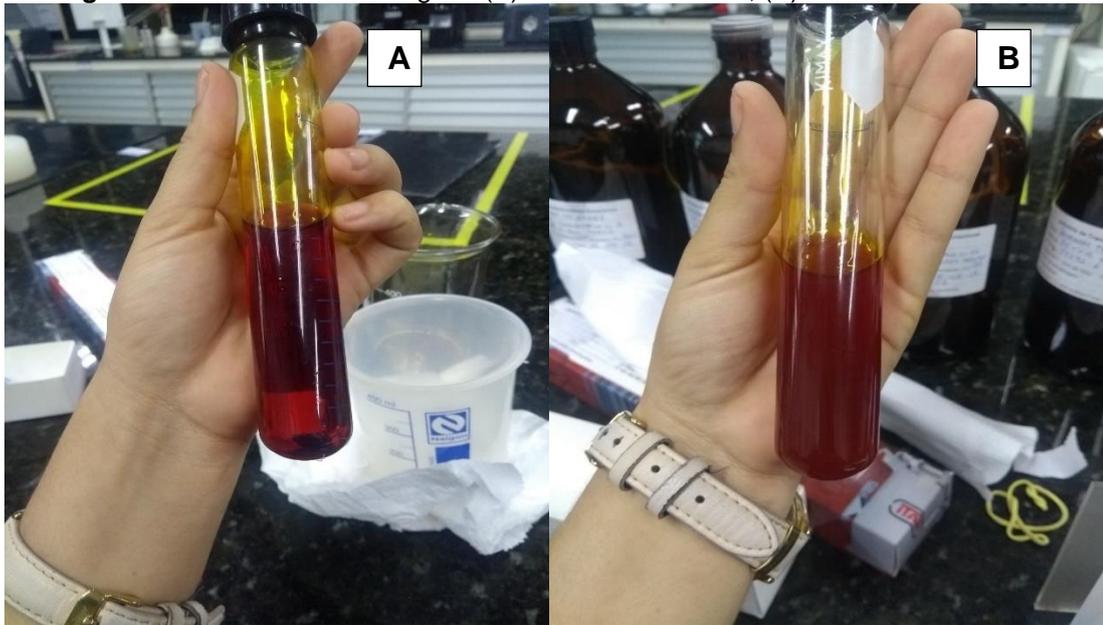
A cor do óleo de buriti é atribuída ao pigmento natural beta caroteno. A maioria dos óleos vegetais possuem algum tipo de pigmento natural presente no óleo, que conferem coloração forte.

Foi realizado o processo de filtragem por terra Fuller. Esse procedimento foi adotado seguindo a mesma composição das colunas de regeneração presentes na máquina de regenerar óleos isolantes, desenvolvida e fabricada pela ITAM.

Após filtragem com terra Fuller foi feita a análise de coloração novamente. Na Figura 19 é possível visualizar que houve uma pequena mudança de coloração. E após o teste, ainda esteve fora da norma vigente, sendo 6 na escala de cor.

É válido observar que as normas que parametrizam os óleos vegetais são as mesmas que são utilizadas nos óleos minerais e a composição química de oleaginosas contém, em sua maioria, pigmentos naturais, o que não acontece nos óleos minerais.

Figura 19 - Resultado da filtragem: (A) óleo de buriti bruto, (B) óleo de buriti filtrado.



Fonte: Autor

Na composição dos óleos vegetais, estão presentes ácidos graxos que contêm insaturações que propiciam o processo oxidativo e aplicado em transformadores suas perdas é intensificada pela alta temperatura. Esses fatores implicam diretamente na degradação termooxidativa do óleo isolante do transformador, conseqüentemente, compromete a vida útil do equipamento.

Para minimizar essas reações oxidativas são adicionados antioxidantes. Porém, no óleo de buriti temos o beta caroteno que é caracterizado como um antioxidante natural, através de um ou mais mecanismos, tais como inibição de radicais livres e complexação de metais.

FOOTE & DENNY (1968), atribuíram ao beta caroteno a capacidade de reprimir a formação de oxigênio singlete. O beta caroteno mostrou ação supressora dos radicais ativos pelo bloqueio do oxigênio singlete, quando adicionado em sistema contendo óleo de soja, reduzindo assim o nível da oxidação (LEE, E.C. 1988, WARNER, K. & FRANKEL, E.N. 1987).

Levando em consideração as pesquisas sobre o beta caroteno sugere-se um estudo que avalie a influência do beta caroteno como antioxidante natural e sua influência na vida útil de um transformador de energia elétrica.

6 CONCLUSÃO

- Óleo vegetal extraído do fruto do buriti (*Mauritia flexuosa*) é compatível como um fluido dielétrico.
- O teor de água que compõe o óleo de buriti sem tratamento é mais alto que o solicitado e essa quantidade de água influencia diretamente na rigidez dielétrica do fluido.
- A água do óleo de buriti foi removida com facilidade e foi possível verificar o aumento da rigidez dielétrica.
- Foi possível constatar também que não somente a água influencia no parâmetro de rigidez dielétrica, mas também particulados que possam estar dispersos no óleo.
- Com uma filtragem simples e o teor de água no limite do recomendado, o material apresentou uma rigidez excelente, melhor que alguns óleos utilizados em processos nas indústrias.
- O ponto de fulgor do óleo de buriti comporta-se como um fluido de segurança classe K, pois sua temperatura de fulgor ultrapassa os 325°C.
- A acidez é um fator que precisa ser corrigido no óleo de buriti assim como em todos os óleos vegetais, pois esse parâmetro influencia diretamente na oxidação do produto.
- Já a densidade está dentro dos parâmetros para um fluido dielétrico.
- O óleo de buriti é classificado como um isolante dielétrico mediante as informações obtidas nos ensaios.
- Algumas análises com mais embasamentos devem ser feitas após os transformadores estarem em operação, assim será possível avaliar o desempenho do equipamento ao longo da sua vida útil utilizando o óleo proveniente do buriti.

TRABALHOS FUTUROS

- Análises da vida útil das partes sólidas de um transformador de energia isolado com óleo de buriti;
- Determinação da influência de carotenoides como antioxidante para o óleo de buriti utilizado em transformadores;
- Estudo dos gases que podem ser produzidos em um transformador isolado eletricamente com óleo de buriti e seus riscos de explosões em trabalho.
- Óleo de buriti como fluido dielétrico em outros equipamentos elétrico: Disjuntores, chaves seccionadoras.
- Blendas de óleos vegetais com características físico-química similares ao do óleo de buriti para ser usado em transformadores de energia elétrica

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 11341. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. 2004.
- ABNT NBR 11349. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Produto de petróleo - Determinação do ponto de fluidez. 2005.
- ABNT NBR 14248. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Produtos de petróleo - Determinação do número de acidez e de basicidade - Método do indicador. 2004.
- ABNT NBR 14483. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Produtos de petróleo - Determinação da cor - Método do Colorímetro ASTM. 2005.
- ABNT NBR 6234. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Óleo-água - Determinação de tensão interfacial. 1965.
- ABNT NBR 7148. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Petróleo e produtos de petróleo - Determinação da massa específica, densidade relativa e °API - Método do densímetro. 2001.
- AQUINO, J. de S.; PESSOA, D. C. N. de P.; ARAÚJO, K. de L. G. V.; EPAMINONDAS, P. S.; SCHULER, A. R. P.; SOUZA, A. G. de; STAMFORD, T. L. M. **Refining of Buriti Oil (Mauritia flexuosa) Originated from the Brazilian Cerrado: Physicochemical, ThermalOxidative and Nutritional Implications.** *Journal Brazilian Chemistry*. v. 23, 2012.
- AMANULLAH, M.D.; ISLAM, S. M.; CHAMI, S.; IENCO G. **Analyses of Physical Characteristics of Vegetable oils as an Alternative Source to Mineral Oil-based Dielectric Fluid, In: International Conference on Web Services.** 07, 2005. Orlando – Florida. Anais...IEEE.
- AMARAL, Nádia Bentz de Souza. **Estudo sobre critérios para a especificação de transformadores elevadores de estações geradoras (generation step-up transformers).** Dissertação apresentada a escola politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de mestre em engenharia. São Paulo, 2007.
- ARANTES, J. G. **Diagnóstico de falhas em transformadores de potência pela análise de gases dissolvidos e óleo isolante através de redes neurais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajuba. Itajubá, 2005.

Ashby, M. F. **Materiais: engenharia, ciência, processamento e projeto** / Michael Ashby, Hugh Shercliff, David Cebon, Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ABNT NBR IEC 60156. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NOMRAS TÉCNICAS:** Líquidos isolantes - Determinação da rigidez dielétrica à frequência industrial - Método de ensaio. 2004.

ABNT NBR 10441. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Produtos de petróleo - Líquidos transparentes e opacos - Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica: Rio de Janeiro, 2007.

ABNT NBR 10505. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Óleo mineral isolante - determinação de enxofre corrosivo: Rio de Janeiro, 2006.

ABNT NBR 10710. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Determinação de água em líquidos isolantes (Método KARL-FISCHER): Rio de Janeiro, 2006.

ABNT NBR 12133. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Líquidos isolantes elétricos - Determinação do fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica): Rio de Janeiro, 1991.

ABNT NBR 15422. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos: São Paulo, 2006.

ABNT NBR 6869. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** Determinação de rigidez dielétrica de óleos isolantes (Eletrodos de disco): Rio de Janeiro, 1980.

BOVI, G.G., **Óleo de buriti (*Mauriti Flexuosa*) nanoemulsionado: produção por método de baixa energia, caracterização físico-química das dispersões e incorporação em bebida isotônica.** Dissertação do curso de Zootecnia e Engenharia de alimentos da USP, 2015.

CARVALHO C.O. et al, **Características físicas, químicas e rendimento do óleo de buriti (*Maurita flexuosa* L.F. *Arecaceae*), In: Santos-selva, E.N. et al (Orgs). **Biotupé: Meio físico, diversidade biológica e sociocultural do baixo rio negro.** Manaus. Amazonas central. v.3., 2011.**

CARVALHO, C. O., **Comparação entre métodos de extração do óleo de *Mauritia flexuosa* L.F. (*Arecaceae* - buriti) para o uso sustentável na reserva de desenvolvimento Tupé: Rendimento e atividade antimicrobiana,** Dissertação do curso de biotecnologia e recursos naturais, Universidade Estadual do Amazonas, Manaus, 2011.

- CALLISTER J.R. William D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CERIANI, R. et al. **Densities and viscosities of vegetable oils of nutritional value**. Journal of Chemical and Engineering Data, Washington, v. 53, 2008.
- CLARK, F. M. **Insulating materials for design and engineering practice**. New York: John Wiley and Sons, 1962.
- DURÃES, J. A.; DRUMMOND, A. L.; PIMENTEL, T. A. P. F.; MURTA, M. M.; BICALHO, F.S.; MOREIRA, S. G. C.; SALES, M. J. A. **Absorption and photoluminescence of Buriti oil/polystyrene and Buriti oil/poly(methyl methacrylate) blends**. European Polymer Journal. V. 42, 2006.
- D. Martin, N. Lelekakis, W. Guo, Y. Odarenko, IEEE Electr. Insul. Mag. 27, 2011.
Disponível: http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/cap4_new.pdf, acesso em 27/08/2019
- Disponível: <https://escolakids.uol.com.br/ciencias/separacao-dos-componentes-petroleo.htm>, acesso 14/09/2018.
- Disponível: <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downcompendio/compendiov1.pdf>, acesso 05/10/19.
- Disponível: <http://abiove.org.br/estatisticas/>, acesso 15/02/2019
- FERREIRA JUNIOR, Wilson. P&D: a CPFL cumpre seu papel, **P&D**, n. 1, (2006).
- FOOTE, C.S. & DENNY, R.W. **Chemistry of singlet oxygen quenching by-carotene**. J. Am. Chem. Soc., Washington, 1968.
- GARCIA. A. Spim, J. A. Santos, C. A. **Ensaio de Materiais**. 1 edição. Rio de Janeiro, Ed: LTC, 2000.
- GARCIA, Camila Martins. **Transesterificação de óleos vegetais**. Dissertação apresentada a Universidade estadual de Campinas - Instituto de Química, Campinas, 2006.
- K. Rapp, C. Mcshane, J. Luksich, **Proceedings of the IEEE International Conference on Dielectric Liquids**, Coimbra, Portugal, (2005).
- KAREL, M. **Kinetics of lipid oxidation in Physical Chemistry of Foods**. Schwartzberg & Hartel, Eds., IFT. Basic Symposium Ser., Marcel Decker, 1992.
- IEEE C57.147. **IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers**. New York, USA, 2008.
- IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. C57.147™. **Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluids in transformers**. 2008.

- LEÃO, Ruth. GTD – **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Apostila (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Ceará. 2008
- LEE, E.C. & MIN, D.B. **Quenching mechanism of β -carotene on the chlorophyll sensitized photooxidation of soybean oil**. J. Food Sci., Chicago, 1988.
- LIPSHTEIN, R. A.; SHAKHNOVICH, M. I. **Transformer oil**. 2. ed. Jerusalem, Israel: 1970.
- L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T. J. Painter: **“Aging of oilimpregnated paper in power transformers”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 19 Jan. 2004.
- LUZ JÚNIOR, G. E. da; GUIMARÃES NETO, J. M.; MOITA NETO, J. M. **Ação adsorvente da bauxita sobre óleo isolante novo**. Química Nova, vol. 28, n. 3, 2005.
- McSHANE, C. P. **Vegetable-oil-based dielectric coolants**. IEEE Applications Magazine, 2002.
- 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, 2003.
- MIRANDA, I.P.A.; Rabelo, A.; Bueno, C.R.; Barbosa, E.M.; RIBEIRO, M.N.S. **Frutos de palmeiras da Amazônia**. 1ed. Manaus: MCT INPA, 2001.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Matriz energética nacional 2030**. Disponível em [http:// www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br) e acessado em 10 de outubro de 2018.
- MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos**. 1 ed. São Paulo: Livraria Varela. 1998.
- M. Koch, S. Tenbohlen: **“The Breakdown Voltage of Insulation Oil under the Influence of Humidity, Acidity, Particles and Pressure”**, International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials APTADM, 2007.
- PEREIRA, S. S.; CURI, R.S.; **Environment, sustainable development and environmental impact: theoretical conceptualizations about the awakening of environmental consciousness**, REUNIR, V. 2, N° 4, 2012.
- PIMENTEL, S. A. et al. **Composição de ácidos graxos e tocoferóis em óleos especiais**. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL. Anais, Varginha, 2005.
- RAAP, J. L. K., McSHANE, C. P., CORKRAN, J. L., GAUGER, G. A., LUKSICH, J. **Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid**. Proceedings of 14th

- Estudo do envelhecimento acelerado de óleo vegetal isolante em escala laboratorial.** International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Austria, jul, 2002.
- RAAP, J. L. K., McSHANE, C. P., LUKSICH, J. **Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper.** 15th International conference on dielectric liquids, Coimbra, Portugal, 2005.
- RAAP, J. L. K, McSHANE, C. P., CORKRAN, J. L., GAUGER, G.A., LUKSICH, J. **Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid.** IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. Atlanta, nov, 2001.
- RIBEIRO, B. D. **Aplicação de tecnologia enzimática na obtenção de β -caroteno a partir de óleo de buriti (*Mauritia vinifera*).** Dissertação de Mestrado do Curso de Tecnologia de processos químicos e bioquímicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- ROCHA, R. M.; Moura E. A. B.; Bressiani J. C.; Bressiani A. H. A.; **“Effect of electron beam radiation dose on the foam formation in pre-ceramic polymer”** Radiation Physics and Chemistry, 2010.
- ROCHA FILHO, Gerardo Narciso. **Estabilidade de óleos vegetais.** Palestra conferida no III Workshop de Química e Meio Ambiente, Belém-PA, 2006.
- C.P.McShane, K.J.Rapp, J.L.Corkran .G.A.Gauger,and J.Luksich, **“Ägingof Paper Insulationin Natural Ester Dielectric Fluid”** *IEEE/PES Transmission & DistributionConf, Atlanta, USA, 2001.*
- RIBEIRO, M. O. A.; CAVALCANTE JR., C. L.; AZEVEDO, D. S. C. **Estudos de oxidação em compostos parafínicos e avaliação do desempenho de aditivos.** In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Campinas - SP. Anais. Campinas, 2005.
- RODRIGUES, A. M. C.; DARNET, S.; MELLER DA SILVA, L. H. M. **Fatty Acid Profiles and Tocopherol Contents of Buriti (*Mauritia flexuosa*), Patawa (*Oenocarpus bataua*), Tucuma (*Astrocaryum vulgare*), Mari (*Poraqueiba paraensis*) and Inaja 100 (*Maximiliana maripa*) fruits.** Journal of the Brazilian Chemical Society, São Paulo, v. 21, 2010.
- SILVA, A. C. M.. **Microemulsões aplicadas ao tratamento de óleo isolante.** 160f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Natal, 2006.
- SCHMIDT, Walfredo. **Materiais elétricos: Isolantes magnéticos.** 3. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, V.2. 2010.

SOARES, V.R., **Requisitos e restrições do uso do óleo vegetal de tungue como 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”. Cornélio Procópio, 2015.

SCHOLZ, R.C., **Avaliação do comportamento dielétrico dos materiais isolantes utilizados em transformadores de distribuição por meio de espectroscopia dielétrica**, Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia e ciência dos materiais da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013

SILVA, C.R. **Propriedades físico-químicas e dielétricas de óleos vegetais para uso como isolante em transformadores**, Campinas Grande, 2009.

SILVA, A. C. M.; ALBUQUERQUE, M. C. G.; CAVALCANTE JR, C. L.; CASTRO DANTAS, T. N.; ARAÚJO, M. A. S.. **Reclamation of used transformer oil by adsorption. *Tribology Transactions***. 2011.

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, Campina Grande, 2011.

SOLOMONS, T. W. **Química orgânica 2**, 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

STOCCO, M. B. **Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 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 isolante**. Dissertação (Mestrado Profissionalizante - PRODETEC) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007

- VASCONCELLOS, V., **Monitoramento da umidade no óleo isolante de transformador de potência visando o aumento da confiabilidade operativa.** In: Congresso latino-americano de distribución eléctrica, Argentina 2008.
- VASCONCELLOS, J.C., **Análise das perdas no transformador monofásico para diferentes condições de operação,** Rio de Janeiro, 2013
- VASCONCELLOS, V., **Compactação e elevação da vida útil de transformadores de distribuição empregando óleo vegetal isolante,** Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor. São Paulo, 2016
- WILSON, A. C. M. **Insulating liquids: their uses manufacture and properties.** London: Peter Peregrinus Ltd., 1980.
- WILHELM, H. M., GRANATO, R. C., TULIO, L., STOCCO, G. B., RAVAGLIO M. A., BATISTA, D. A., MATTOSO, M., TRINDADE, E. M., UHREN, W., JÚNIOR, S. B. G., ADONIS, N. G. **Aspectos relacionados com a utilização de óleo vegetal isolante no Brasil.** Anais do IV International Workshop on Power Transformer (IV WORKSPOT). 2006.
- WARNER, K. & FRANKEL, E.N. Effects of β -carotene on light stability of soybean oil. **J. Am. Oil Chem. Soc.**, Champaign, 1987.
- Z. Wang, A. Darwin, M. Russel, CIGRÉ A2-D1 Seminar, Brugge 2007, Paper CIGRÉ