

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

BEATRIZ TEIXEIRA DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL PELO
ÓLEO VEGETAL EM TRANSFORMADORES DE REDES AÉREAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. ESTUDO DE CASO:
COOPERATIVA ENERGÉTICA COCAL**

CRICIÚMA

2013

BEATRIZ TEIXEIRA DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL PELO
ÓLEO VEGETAL EM TRANSFORMADORES DE REDES AÉREAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. ESTUDO DE CASO:
COOPERATIVA ENERGÉTICA COCAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do grau de Engenharia Ambiental no curso de Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientador(a): Prof. M.Eng. Evânio Ramos Nicoleit

CRICIÚMA

2013

BEATRIZ TEIXEIRA DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL PELO
ÓLEO VEGETAL EM TRANSFORMADORES DE REDES AÉREAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. ESTUDO DE CASO:
COOPERATIVA ENERGÉTICA COCAL**

Trabalho de Conclusão de Curso, aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do grau de Engenharia Ambiental no curso de Engenharia Ambiental da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com Linha de Pesquisa em Energia, Sociedade e Meio Ambiente.

Criciúma, 26 de novembro de 2013.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Evânio Ramos Nicoleit – Mestre – UNESC – Orientador

Prof^a. Gilca Benedet – Mestre – UNESC

Prof^a. Paula Tramontim Pavei – Mestre – UNESC

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todos os momentos da minha vida, me amparando nas horas difíceis e me presenteando com tantos momentos felizes ao longo desta caminhada.

A meu pai Aleir Corrêa de Oliveira, minha mãe Maria Janice Teixeira de Oliveira e meu irmão Eduardo Teixeira de Oliveira que em todos os momentos desta caminhada estiveram ao meu lado me dando toda a força necessária para atravessar os obstáculos que me eram impostos.

Ao meu orientador Evânio Ramos Nicoleit, que me forneceu todo o apoio e incentivo para que esta etapa fosse concluída. Pelos seus conselhos e ensinamentos, meu muito obrigada.

Ao meu querido amigo Ricardo Minatto Machado, que não mediu esforços em me auxiliar, não somente como supervisor de campo em todo o processo de desenvolvimento e aplicação dos meus estudos, mas que gentilmente me concedeu sua amizade, me incentivando e apoiando. De coração, muito obrigada.

A toda a equipe da COOPERCOCAL que me prestaram todo o auxílio necessário para a realização do meu estágio de conclusão de curso e que me permitiram implantar uma nova visão para o desenvolvimento da empresa.

Gostaria de agradecer a empresa FECOERUSC, em nome de Antônio Adriano, a empresa Mineraltec, em nome de Pedro Lazzarini, ao laboratório Diagno Pesquisa Desenvolvimento e Inovação, em nome de Helena Wilhelm e a empresa MGM Consultoria e Diagnóstico em Equipamentos Elétricos, em nome de Claudio Galdeano, por todo o investimento e confiança depositados em mim durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Meus sinceros agradecimentos.

Em geral, agradeço a todos os meus amigos e colegas que se fizeram presentes durante toda essa caminhada. Obrigada.

"É possível encontrar a felicidade mesmo nas horas mais sombrias, se lembrar de acender a luz."

Alvo Dumbledore

RESUMO

Este trabalho consiste em um estudo da viabilidade de substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal e verifica os possíveis meios de implantação desta substituição em transformadores de redes aéreas de distribuição de energia elétrica de uma cooperativa energética. O óleo mineral é um fluido de origem fóssil e gera passivos ambientais quando em contato com o ar, água e o solo. Pesquisas se intensificaram na busca por um substituto, sendo o óleo vegetal indicado para uso em transformadores. Realizou-se neste trabalho comparativos técnicos, ambientais e econômicos da aplicação destes fluidos. Verificou-se também quais os tipos disponíveis no mercado, na busca de adequadas formas de implantação e quais os custos para um possível investimento do fluido vegetal na área de estudo. Por fim, realizou-se a substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal em um transformador na Cooperativa, e compartilhando-se os resultados com a comunidade acadêmica e demais cooperativas energéticas e distribuidoras de energia, na tentativa de aliar inovação, desenvolvimento e sustentabilidade. O trabalho ainda engloba uma pesquisa sobre o tema em estudo, verificando por meio de artigos, teses, procedimentos, publicações características específicas de cada fluido. Ainda abordou-se a substituição do fluido até a instalação de um transformador na rede de distribuição, os quais foram acompanhados *in loco*. Verificou-se também as normas aplicáveis ao tema e criou-se o Registro de Acompanhamento de Transformadores Elétricos como ferramenta de gestão para a cooperativa, a fim de manter um histórico destes equipamentos. Como resultado, obteve-se um referencial sobre a aplicação destes fluidos em transformadores. Foram apresentados os procedimentos necessários para a realização da substituição e instalação do transformador e as descrições dos ensaios em laboratórios. Por fim, foi realizada uma análise financeira do investimento necessário para implantação do uso de óleo vegetal nos transformadores da rede de distribuição, na busca pela expansão desta possibilidade para os demais transformadores da área em estudo.

Palavras-chave: Energia; Transformadores; Óleo Mineral; Óleo Vegetal.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil (2012).	16
Figura 2 – Geração mundial de eletricidade por fonte de energia (2010).	16
Figura 3 – Sistema de distribuição de energia elétrica.	18
Figura 4 – Princípio de funcionamento do transformador elétrico.	19
Figura 5 – Refrigeração do transformador.	20
Figura 6 – Processamento para obtenção do óleo de soja bruto e do farelo desengordurado.	24
Figura 7 - Área de permissão da COOPERCOCAL 2012 (242 Km ²).	36
Figura 8 - Distribuição de energia elétrica com utilização de redes compactas.	37
Figura 9 - Lavagem do transformador com óleo vegetal Biovolt [®] B.	43
Figura 10 - Enchimento do transformador com adição de nitrogênio.	44
Figura 11 - Transformador lacrado com a logomarca da Biovolt.	44
Figura 12 - Ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos.	46
Figura 13 - Ensaio de resistência de isolamento.	47
Figura 14 - Instalação do transformador na rede de distribuição.	48
Figura 15 - Transformador com óleo vegetal na rede de distribuição.	48
Figura 16 - Comunicado de desligamento no site da COOPERCOCAL.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção anual brasileira de óleo (mil toneladas) de 2002 a 2006.	27
Tabela 2 - Características técnicas do transformador.	38
Tabela 3 - Resultado de ensaio do óleo Biovolt® B.	42
Tabela 4 - Ensaio de rotina no transformador.	46
Tabela 5 - Resultado de ensaio físico-químico em amostra de óleo vegetal após um mês.	52
Tabela 6 - Custos gerais de óleos isolantes em 2013.	53
Tabela 7 - Dados gerais dos transformadores da COOPERCOCAL.	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características do óleo mineral isolante (OMI) novo.	21
Quadro 2 - Características do óleo vegetal isolante (OVI) novo.	25
Quadro 3 - Propriedades do óleo Biotemp [®] .	28
Quadro 4 - Propriedades do óleo Envirotemp [®] FR3 [™] .	29
Quadro 5 - Propriedades do óleo Biovolt [®] B.	30
Quadro 6 - Caracterização físico-química dos fluidos isolantes BIOTEMP [®] e Biovolt [®] B.	32
Quadro 8 - Registro de acompanhamento do transformador com óleo vegetal.	51
Quadro 7 - Custo de transformadores novos.	54
Quadro 9 - Investimento necessário na aquisição de transformadores novos.	56
Quadro 10 - Investimento para substituição para óleo vegetal nos transformadores em manutenção.	57
Quadro 11 - Investimento para substituição para óleo mineral regenerado nos transformadores em manutenção.	57
Quadro 12 - Custo relacionado a produtos e serviços do processo de substituição do fluido isolante.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	<i>American Society For Testing and Materials</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COBEI	Comitê Brasileiro de Eletricidade
COOPERCOCAL	Cooperativa Energética Cocal
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte
FECOERUSC	Federação das Cooperativas de Energia do Estado de Santa Catarina
HTH's	Hidrocarbonetos de Alta Temperatura
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OECD	<i>Organization to Economic Co-operation and Development</i>
OMI	Óleo Mineral Isolante
OVI	Óleo Vegetal Isolante
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Nacional
RATE	Registro de Acompanhamento de Transformadores Elétricos
SIN	Sistema Interligado Nacional
UC	Unidades Consumidoras

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL.....	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO	15
2.2	DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	17
2.3	TRANSFORMADORES.....	18
2.4	ÓLEO MINERAL ISOLANTE.....	20
2.5	ÓLEO VEGETAL ISOLANTE	23
2.5.1.	Tipos de óleo vegetal	25
2.5.1.1.	Ésteres sintéticos	26
2.5.1.2.	Ésteres naturais.....	26
2.6	COMPARATIVO ENTRE O ÓLEO MINERAL E O ÓLEO VEGETAL.....	31
3	METODOLOGIA	35
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – A EMPRESA	35
3.2	ESTUDO SOBRE A TEMÁTICA	37
3.3	FLUIDOS ISOLANTES E MATERIAIS UTILIZADOS	38
3.4	REALIZAÇÃO DE ENSAIOS.....	39
3.5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL PELO ÓLEO VEGETAL.....	40
3.6	INVESTIMENTO FINANCEIRO	40
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	42
4.1	SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL PELO ÓLEO VEGETAL.....	42
4.2	ENSAIOS DIELÉTRICOS REALIZADOS NO TRANSFORMADOR.....	45
4.3	INSTALAÇÃO DO TRANSFORMADOR NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	47
4.4	REGISTRO DE ACOMPANHAMENTO DO TRANSFORMADOR	49
4.5	ENSAIO FÍSICO-QUÍMICO EM AMOSTRAS DE ÓLEOS VEGETAIS.....	50
4.6	ANÁLISE FINANCEIRA.....	53
4.6.1.	Custos do óleo mineral e do óleo vegetal	53

4.6.2.	Custos de transformadores com óleo mineral e de transformadores com óleo vegetal	53
4.6.3.	Análise comparativa na aquisição de transformadores novos	55
4.6.4.	Análise da substituição do fluido dos transformadores em manutenção	56
5	CONCLUSÃO.....	60
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda de distribuição de energia elétrica no país e no mundo, o setor energético vem se expandindo cada vez mais e com ele o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis é cada vez mais requerido.

Passando pela geração e rede de transmissão, a energia produzida pelas hidrelétricas, termoelétricas, dentre outras, chega até a rede de distribuição, necessitando passar pelos transformadores para poder atender o consumidor final.

O óleo mineral, atualmente utilizado nos transformadores de redes de energia elétrica, é o fluido isolante utilizado para proteger o funcionamento destes, bem como refrigerá-los. Por ser de origem fóssil (petróleo), este fluido promove a poluição atmosférica, de recursos hídricos e do solo, fatores que nos últimos anos tem se tornado pauta no mundo inteiro.

Estudos se intensificaram pela busca de um fluido isolante que pudesse ser substituto do óleo mineral utilizado nos transformadores de distribuição, encontrando o óleo vegetal como melhor substituto atualmente. Além de ser biodegradável, o fluido à base de ésteres naturais proporciona segurança para o equipamento.

Pensando nisto, o estudo acerca da viabilidade da substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal em transformadores utilizados em redes aéreas de distribuição de energia elétrica faz-se importante, a fim de oportunizar uma análise técnica que possa promover redução e/ou evitar impactos ambientais significativos. O apelo ambiental para a substituição do mesmo originou diversas pesquisas, às quais serão utilizadas como referências para o estudo acerca da viabilidade da substituição do mesmo em transformadores na Cooperativa Energética Cocal.

O foco do trabalho será o estudo que resultará na substituição do fluido mineral pelo fluido vegetal, em um transformador da Cooperativa Energética Cocal. Será apresentado e discutido o procedimento utilizado para a aplicação desta tecnologia, bem como a análise da viabilidade de implantação desta na

COOPERCOCAL.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a viabilidade da substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal em transformadores de redes aéreas de distribuição de energia elétrica. Estudo de caso: Cooperativa Energética Cocal.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar análises comparativas em termos técnicos de operação, ambientais e de custos envolvidos na substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal em transformadores de redes de energia elétrica;
- Determinar os tipos de óleos vegetais aplicáveis em transformadores e selecionar o óleo a ser utilizado no estudo de caso;
- Realizar a substituição do óleo mineral por óleo vegetal em um transformador de pequeno porte da Cooperativa em estudo a fim de verificar seu desempenho na rede de distribuição;
- Estudar o investimento necessário para a aquisição de transformadores com óleo vegetal, conforme necessidade da Cooperativa e;
- Estimar o custo anual para substituição do óleo mineral para o óleo vegetal nos transformadores existentes da Cooperativa em estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O trabalho está embasado no uso de transformadores de redes aéreas de distribuição de energia elétrica. Sendo assim, inicia-se o referencial teórico com a apresentação do cenário energético brasileiro, bem como com a distribuição de energia elétrica, à qual inclui os transformadores. O uso do óleo mineral e do óleo vegetal, objeto de estudo deste trabalho, está na operação do transformador de energia, cujas características envolvendo serão abordadas.

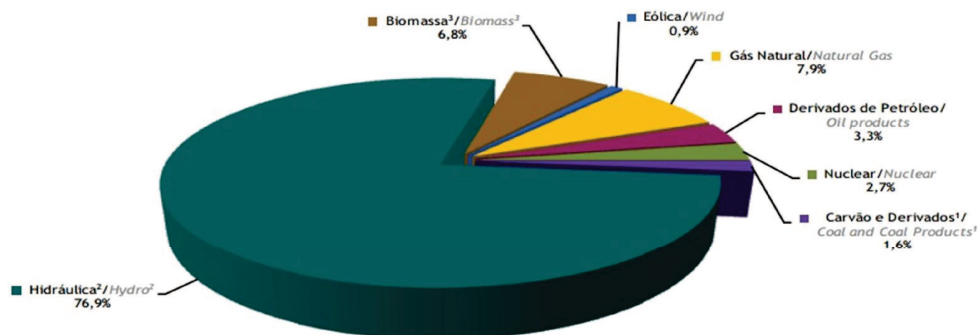
2.1 CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO

Segundo Tolmasquim (2012), a sustentabilidade econômica de um país se baseia na sua capacidade de prover logística e energia para o seu desenvolvimento, com segurança e em condições competitivas e ambientalmente sustentáveis.

O Brasil possui aproximadamente 191 milhões de habitantes (IBGE, 2010), sendo que em 2008, segundo ANEEL (2008), 97% da população tinha acesso à rede elétrica. O setor elétrico brasileiro concentra-se, essencialmente, nas atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica (ANEEL, 2008).

Em 2012, com acréscimo de aproximadamente 3,8 GW (gigawatts), a capacidade instalada das centrais de geração de energia elétrica do Brasil alcançou 120.973 MW (megawatts), apresentando uma matriz de geração elétrica predominantemente renovável, como pode ser observado na figura 1 (BEN, 2013 apud MME, 2013).

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil (2012).



Notas/ Notes:

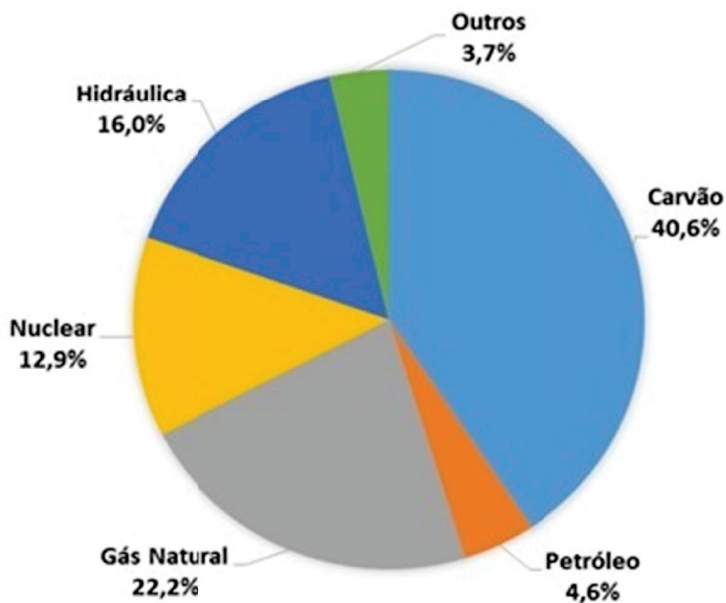
¹ Inclui gás de coque/ Includes coke oven gas

² Inclui importação de eletricidade/ Includes electricity imports

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações/ Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Fonte: Adaptado de BEN, 2013 apud MME, 2013.

Figura 2 – Geração mundial de eletricidade por fonte de energia (2010).



Fonte: Adaptado de OECD, 2013, tradução nossa.

Para geração e transmissão de energia elétrica, o país conta com o Sistema Interligado Nacional (SIN) (conjunto composto por usinas, linhas de

transmissão e ativos de distribuição), que abrange as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte do Norte. Concentra aproximadamente 900 linhas de transmissão e abriga 96,6% de toda a capacidade de produção de energia elétrica do país (ANEEL, 2008).

2.2 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O sistema de distribuição de energia elétrica é ramificado ao longo de ruas e avenidas para conectar fisicamente o sistema de transmissão, ou mesmo unidades geradoras de médio e pequeno porte, aos consumidores finais da energia elétrica (ABRADEE, 2013).

O Brasil conta com mais de 69 milhões de “Unidades Consumidoras” (UC), sendo 85% destas, residenciais (ABRADEE 2013). A conexão e atendimento ao consumidor, qualquer que seja o seu porte são realizados pelas distribuidoras de energia elétrica, formado por 63 concessionárias, que funcionam como elo entre o setor de energia elétrica e a sociedade, visto que suas instalações recebem das companhias de transmissão todo suprimento destinado ao abastecimento no país (ANEEL, 2008).

A distribuição de energia elétrica brasileira é regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), bem como por normas vigentes do setor, destacando-se os Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Nacional (PRODIST) (MACHADO, 2012).

A geração de energia parte das usinas, percorrendo toda a rede de transmissão (Figura 3). Entretanto, para a energia chegar às residências, empresas e indústrias, a tensão elétrica precisa ser reduzida para a rede de distribuição, na chamada subestação de distribuição (BRAIN, 2009).

Uma subestação de distribuição faz geralmente três operações:

Reduzir a tensão de transmissão para a tensão de distribuição por meio de transformadores; Direcionar a energia para várias cargas através dos barramentos e; Desconectar a subestação da rede de transmissão ou desligar linhas que saem da subestação de distribuição quando necessário, por meio de disjuntores, chaves e outros dispositivos de seccionamento (BRAIN, 2009).

Figura 3 – Sistema de distribuição de energia elétrica.



Fonte: ABRADÉE, 2013.

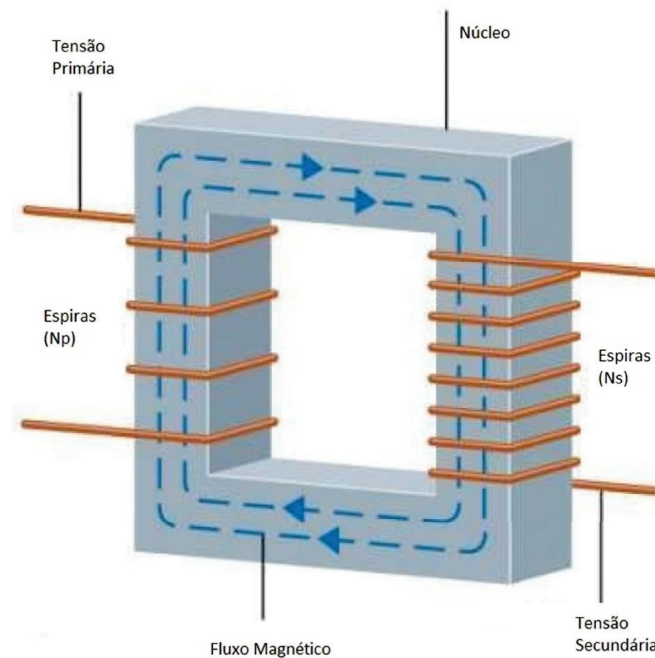
Segundo Sigma (2013) a distribuição de energia até os pontos de utilização não dependem somente de fios e postes, mas de toda a rede de distribuição, inclusive os transformadores.

2.3 TRANSFORMADORES

Os transformadores são equipamentos estáticos que transferem energia elétrica (potência) do enrolamento primário para o enrolamento secundário, possuindo como característica principal a alteração dos níveis de tensão e de corrente sem a alteração da frequência (CORIOLANO, 2011 apud MACHADO, 2012).

Os transformadores consistem de dois enrolamentos de fio, como pode ser observado na figura 4, que geralmente envolvem os braços de um núcleo metálico. Quando uma corrente alternada é aplicada ao enrolamento primário, produz um campo magnético proporcional à intensidade dessa corrente e ao número de espiras do enrolamento. Através do núcleo de metal, o fluxo magnético promove uma indução eletromagnética no enrolamento secundário, gerando uma tensão elétrica e corrente induzida (SIGMA, 2013).

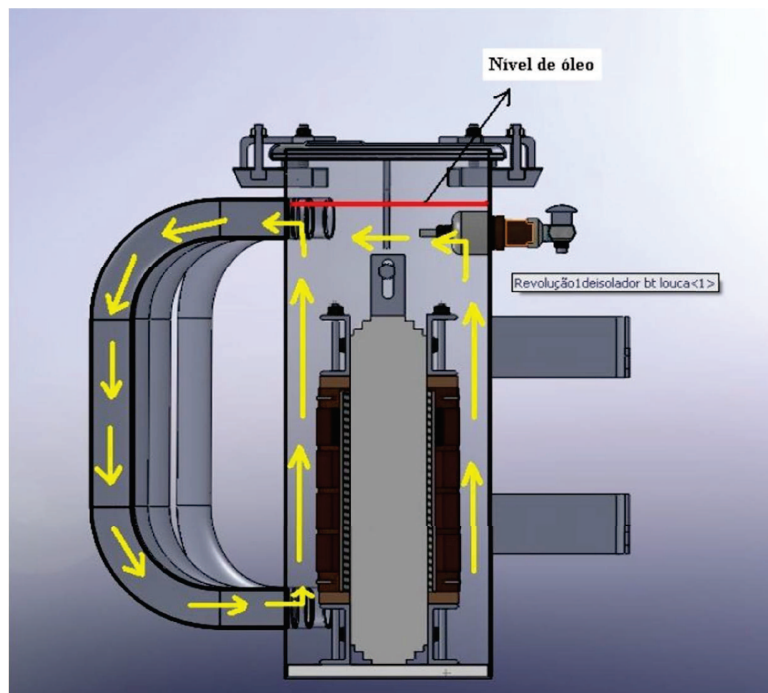
Figura 4 – Princípio de funcionamento do transformador elétrico.



Fonte: Adaptado de SIGMA, 2013.

O núcleo do transformador de rede de distribuição fica imerso em óleo isolante, que segundo Machado (2012) possui a função principal de isolar as partes energizadas do transformador e refrigerar as aquecidas (Figura 5), por meio da transferência de calor.

Figura 5 – Refrigeração do transformador.



Fonte: SIGMA, 2013.

Segundo Sigma (2013), o óleo aliado ao aquecimento, acaba gerando uma corrente de convecção dentro do transformador, que quando esquenta fica menos denso e sobe. Após passar pelos radiadores ele resfria, aumentando sua densidade, e assim se mantém a refrigeração do transformador.

Os equipamentos utilizados na transmissão e distribuição de energia elétrica apresentam hoje um isolamento, predominantemente, à base de papel e óleo mineral isolante (OMI), conforme mencionado por Franch (2010).

O papel é praticamente o elemento responsável por definir a vida útil do transformador, pois o mesmo não pode ser regenerado, diferente do óleo em uso que pode ser revitalizado (MYERS et al, 2004 apud JUNIOR, 2010).

2.4 ÓLEO MINERAL ISOLANTE

Segundo Claiborne; Cherry (2006 apud FRANCH, 2010), o óleo mineral isolante (OMI) oriundo do refino de petróleo tem sido usado como líquido isolante em transformadores há mais de um século. A popularidade do óleo mineral se

deve, à sua disponibilidade, ao baixo custo e às suas excelentes propriedades dielétricas e refrigerantes (GEORGILAKIS, 2011 apud SILVA et al, 2012).

Dielétrico, ou isolante, é um material que não conduz corrente elétrica, portanto, rigidez dielétrica é a intensidade máxima do campo elétrico que este material pode suportar sem tornar-se um condutor de eletricidade (VIANA, 2005).

O OMI utilizado em equipamentos elétricos é obtido pela destilação do petróleo, correspondendo à fração obtida entre 300°C a 400°C. Este líquido pode ser de origem parafínica ou naftênica (CLARK, 1962; LIPSTEIN; SHAKHNOVICH, 1970 apud UHREN, 2007), cada qual com sua característica, como pode ser observado no quadro 1. Este fluido mineral é uma mistura de compostos na qual as moléculas são constituídas, em sua maior parte, por hidrocarbonetos e, em pequenas quantidades, por compostos que apresentam nitrogênio e oxigênio em sua estrutura (WILSON, 1980 apud FRANCH, 2010). Por outro lado, o OMI possui também compostos orgânicos à base de enxofre que são termicamente estáveis e inibidores naturais do processo de oxidação (UHREN, 2007).

Quadro 1 - Características do óleo mineral isolante (OMI) novo.

(continua)

Características	Unidade	Método de ensaio	Valor especificado		
			Naftênico	Parafínico	
Aspecto visual	-	Visual	O óleo deve ser claro, límpido e isento de materiais em suspensão		
Cor	-	ABNT NBR 14483	1,0 máx.		
Massa específica a 20°C	kg.(m ³) ⁻¹	ABNT NBR 7148	861 – 900	860 máx.	
Viscosidade cinemática	20°C	ABNT NBR 10441	25 máx.		
	40°C		12 máx.		
	100°C		3 máx.		
Ponto de fulgor	°C	ABNT NBR 11341	140 mín.		
Ponto de fluidez	°C	ABNT NBR 11349	- 39 máx.	- 12 máx.	
Rigidez dielétrica	Eletrodo de disco	kV	ABNT NBR 6869 ABNT NBR IEC 60156	30 mín.	
	Eletrodo de calota			42 mín.	
Rigidez dielétrica a impulso	kV	ASTM D 3300	145 mín.		
Fator de perdas dielétricas	25°C	%	ABNT NBR 12133	0,05 máx.	
	90°C			0,40 máx.	
	100°C			0,50 máx.	
Enxofre Corrosivo	-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo		

Quadro 1 – Características do óleo mineral isolante (OMI) novo.

(conclusão)

Características		Unidade	Método de ensaio	Valor especificado	
				Naftênico	Parafínico
Índice de neutralização		mg KOH.(g óleo) ⁻¹	ABNT NBR 14248	0,03 máx.	
Teor de água		mg.kg ⁻¹	ABNT NBR 10710 B	35	
Bifenila policlorada (PCB)		mg.kg ⁻¹	ABNT NBR 13882	Não detectável	
Cloretos e sulfatos		-	ABNT NBR 5779	Ausente	
Tensão interfacial a 25°C		mN.m ⁻¹	ABNT NBR 6234	40 mín.	
Aditivo inibidor de oxidação DBPC	Óleo não inibido	% massa	ABNT NBR 12134 A	Não detectável	
	Óleo inibido			0,33 máx.	
Estabilidade a oxidação (óleo não inibido)	Índice de neutralização	mg KOH.(g óleo) ⁻¹	ABNT NBR 10504	0,40 máx.	
	Borra	% massa		0,10 máx.	
	Fator de perdas dielétricas a 90°C	%		20 máx.	

Fonte: Adaptado da Resolução 36 da ANP, 2008 apud FRANCH, 2010.

Conforme Uhren (2007), com o tempo o óleo passa por um processo de envelhecimento, resultado da solicitação por elevação de temperatura, ação do oxigênio e do contato com os metais internos (cobre e ferro), assim promovendo a degradação das propriedades isolantes do óleo. Entretanto, segundo ABNT NBR 10576 (1988), o desempenho do óleo mineral em um sistema de isolamento depende de certas características, como: rigidez dielétrica; viscosidade adequada; propriedades adequadas às condições climáticas e; resistência a oxidação. Sendo estes quesitos necessários para o seu melhor desempenho como agente de transferência de calor e extintor de arco.

Segundo Franch (2010), o OMI tem apresentado alguns problemas quanto à sua utilização, sendo estes: A ocorrência de falhas em reatores devido à presença de enxofre corrosivo; Contaminação do solo e de sistemas hídricos, no caso de vazamentos ou derramamentos (pouco biodegradável) e; Ocorrência de incêndios em função de seu baixo ponto de combustão (~150°C).

Contudo, além destes problemas, a existência de limitadas reservas de crude e as crescentes preocupações ambientais (baixa biodegradabilidade), fizeram com que a comunidade científica começasse a encarar os óleos vegetais, como uma eventual alternativa aos óleos minerais, para uso em transformadores (MARTINS, 2008).

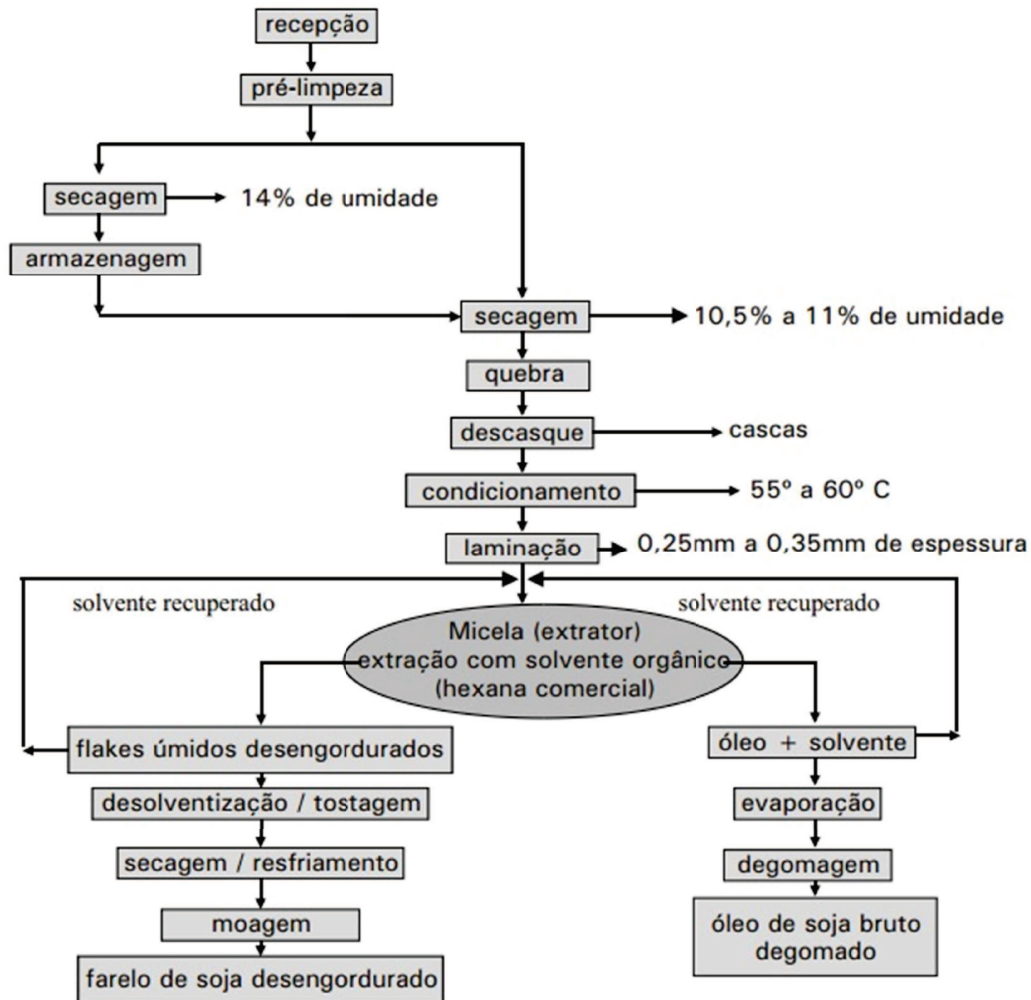
2.5 ÓLEO VEGETAL ISOLANTE

Segundo Franch (2010), após a década de 1990, uma nova classe de fluidos isolantes obtidos de oleaginosas foi desenvolvida para uso em transformadores, devido principalmente às suas características biodegradáveis e renováveis.

São óleos com uma elevada resistência ao fogo (330°C) e cujas propriedades ambientais, químicas, elétricas e de segurança contra incêndio lhe conferem o estatuto de “óleo do futuro”. São formulados à base de óleo de sementes combinado com aditivos de classe alimentar. Não derivam do petróleo e têm a propriedade de se degradarem rapidamente (OLIVEIRA, 2005). O gás carbônico (CO₂) liberado na sua combustão ou degradação é reciclado por absorção durante o próprio crescimento das oleaginosas, no processo de fotossíntese (FRANCH, 2010).

Os óleos vegetais isolantes (OVI) são sempre obtidos a partir de grãos, por meio de alguns processos industriais. A figura 6 representa o processo produtivo do óleo vegetal à base de soja, que de maneira geral, divide-se em duas etapas principais: a produção de óleo bruto, tendo como resíduo o farelo, e o refino do óleo bruto produzido (MANDARINO; ROESSING, 2001).

Figura 6 – Processamento para obtenção do óleo de soja bruto e do farelo desengordurado.



Fonte: MANDARINO; ROESSING, 2001.

Segundo Mandarino e Roessing (2001), após este processo, o óleo de soja bruto passa para a refinação, que pode ser definida como um conjunto de processos que visam transformar os óleos brutos em óleos comestíveis. As principais etapas deste processo são: degomagem ou hidratação; neutralização ou descacidificação; branqueamento ou clarificação e; desodorização.

Segundo Kapila et al (2004 apud MARTINS, 2008), os principais componentes destes óleos são triglicéridos, ou seja, ésteres de glicerol e ácidos

gordos, sendo que sua composição e grau de instauração dependem da origem do óleo, variando significativamente as propriedades físico-químicas.

Em 2006, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), elaborou e publicou uma norma específica para avaliação e caracterização de óleos vegetais novos (Quadro 2). A norma titulada como “Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos”, possui numeração ABNT NBR 15422.

Quadro 2 - Características do óleo vegetal isolante (OVI) novo.

Características		Unidade	Método de ensaio	Valor especificado
Aspecto visual		-	-	O óleo deve ser claro e límpido
Cor		-	ABNT NBR 14483	1,0 máx.
Densidade relativa a 20/4°C		-	ABNT NBR 7148	0,96 máx.
Viscosidade cinemática	20°C	cSt	ABNT NBR 10441	150 máx.
	40°C			50 máx.
	100°C			15 máx.
Ponto de fulgor		°C	ABNT NBR 11341	275 mín.
Ponto de combustão		°C	ABNT NBR 11341	300 mín.
Ponto de fluidez		°C	ABNT NBR 11349	- 10 máx.
Rigidez dielétrica	Eletrodo de disco	kV	ABNT NBR 6869 ABNT NBR IEC 60156	30 mín.
	Eletrodo de calota			42 mín.
Rigidez dielétrica a impulso		kV	ASTM D 3300	130 mín.
Fator de perdas dielétricas	25°C	%	ABNT NBR 12133	0,20 máx.
	90°C			3,6 máx.
	100°C			4,0 máx.
Enxofre Corrosivo		-	ABNT NBR 10505	Não corrosivo
Índice de neutralização		mg KOH/g	ABNT NBR 14248	0,06 máx.
Teor de água		mg/kg	ABNT NBR 10710 B	200
Teor de PCB (bifenila policlorada)		mg/kg	ABNT NBR 13882	Não detectável

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15422, 2006.

2.5.1. Tipos de óleo vegetal

Segundo Araujo; Martins; Silva (2006), os óleos vegetais são compostos por ésteres, os quais compõem uma classe ampla de compostos orgânicos (naturais), disponíveis como produtos agrícolas ou sintetizados quimicamente por precursores orgânicos (sintéticos).

2.5.1.1. Ésteres sintéticos

Os fluídos dielétricos à base de ésteres sintéticos, também conhecidos como POE, possuem propriedades dielétricas adequadas, excelente estabilidade térmica, boas propriedades em baixas temperaturas e ponto de fluidez próximo ao do óleo mineral convencional, possuindo rigidez dielétrica e viscosidade similares à formulação com éster natural (MCSHANE, 2003 apud ARAUJO; MARTINS; SILVA, 2006) Ainda, segundo os mesmos autores, em 1984 os fluídos a base de ésteres sintéticos foram utilizados como substitutos do Ascarel (líquidos isolantes elétricos constituídos por uma mistura de 60 a 40% de Triclorobenzeno (TCB) e igual proporção de Bifenilas Policloradas (PCBs) (MMA, 2012). Entretanto, segundo Hallerberg (1999 apud ARAUJO; MARTINS; SILVA, 2006), os fluidos a base de ésteres sintéticos possuem ponto de combustão mais baixo, taxa de biodegradação lenta, alto custo e tem seu uso limitado.

2.5.1.2. Ésteres naturais

Os ésteres naturais, óleos a base de sementes, foram considerados inadequados para uso em transformadores devido a sua susceptibilidade alta à oxidação, principal obstáculo na aplicação como fluído dielétrico (ARAUJO; MARTINS; SILVA, 2006)

Com o aumento da demanda por opções viáveis ao óleo mineral, as pesquisas se intensificaram e foram avaliadas diversas misturas de óleos de classe comestível, sendo que estes passaram por uma seleção de aditivos (combinação e quantidade). A formulação contendo materiais de classe comestível se adequa a várias categorias, como: resistência alta ao fogo; rigidez dielétrica superior e viscosidade próxima a do OMI. Entretanto, possui ponto de fluidez relativamente alto (ARAUJO; MARTINS; SILVA, 2006).

Araujo, Martins e Silva (2006), ainda ressaltam que o atrativo dos ésteres naturais são os óleos de sementes comestíveis, os quais estão disponíveis em larga escala e baixo custo, apresentando uma taxa de degradação bem superior a do óleo mineral.

Na tabela 1, é possível observar a produção brasileira, até 2006, de óleo, expressa em mil toneladas.

Tabela 1 - Produção anual brasileira de óleo (mil toneladas) de 2002 a 2006.

Espécie	2002	2003	2004	2005	2006
Soja	4.937,0	5.387,0	5.571,0	5.549,0	5.709,0
Algodão	195,7	217,0	268,4	251,2	270,8
Dendê	118,0	129,0	140,0	147,0	152,0
Girassol	55,7	62,1	74,6	76,2	78,6
Milho	45,9	55,0	63,6	65,6	68,0
Mamona	40,1	39,7	60,8	68,1	69,8
Canola	16,9	20,4	22,8	24,0	26,2
Amendoim	28,1	21,8	21,8	22,3	23,8
Palmiste	13,3	14,5	15,8	17,0	19,2
Linhaça	1,7	2,0	2,1	2,2	2,2
Coco	1,9	1,9	1,9	2,0	2,1
Total	5.454,3	5.950,4	6.242,8	6.224,6	6.421,7

Fonte: YAMAOKA, 2007 apud STOCCO, 2009.

Existe também outros óleos, como o do babaçu, que segundo análises realizadas por Silva et al (2012), não apresenta características fluidodinâmicas adequadas para a utilização como fluido isolante de transformadores, devido a sua característica pastosa e opaca, para análise de viscosidade à 20°C.

Os primeiros produtos comerciais de OVI lançados no mercado nacional foram o BIOTEMP® e o ENVIROTEMP® FR3™. Em 2007, foi lançado um novo óleo no mercado nacional, os óleos BIOVOLT®, produzidos e comercializados a partir de uma tecnologia 100% nacional, pela empresa Mineraltec (WILHELM, 2008 apud WILHELM; TULIO; UHREN, 2009).

- Óleo vegetal isolante BIOTEMP®

O Biotemp® é um meio isolante, dielétrico, avançado e desenvolvido pela ABB (Asea Brown Boveri) para ser compatível com o meio ambiente. Está sendo usado atualmente em transformadores de força e de distribuição no Brasil e Estados Unidos (BIOTEMP, 2013). Possui fluido a base de óleo de girassol, obtido a partir de sementes geneticamente selecionadas ou manipuladas, conforme Oommen (2002, apud UHREN, 2007).

Este óleo possui rigidez dielétrica superior a do óleo mineral e dos Hidrocarbonetos de Alta Temperatura (HTH's) e mantém a rigidez dielétrica com níveis mais altos de umidade (Quadro 3). O Biotemp[®] não se dilata no congelamento e solidifica formando um sólido com características de gel que ainda atua como um meio isolante e de resfriamento (BIOTEMP, 2013).

Quadro 3 - Propriedades do óleo Biotemp[®].

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

Fonte: Adaptado de BIOTEMP, 2013.

A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), em agosto de 2006, colocou em operação o primeiro transformador do mundo que funciona totalmente a óleo vegetal, desenvolvido em parceria com o fabricante de equipamentos ABB e utiliza o óleo vegetal Biotemp[®] (UHREN, 2007).

- Óleo vegetal isolante ENVIROTEMP[®] FR3[™]

O fluido ENVIROTEMP[®] FR3[™], comercializado pela Cooper Power Systems, e fabricado pela Cargill, é à base de óleo de soja (UHREN, 2007). Não contem petróleo, halogenados, silicones ou outros materiais censurados. Degrada-se rapidamente no solo e em ambientes aquáticos, não possuindo comportamento tóxico em ensaios de toxicidade aquáticos (COOPER POWER SYSTEMS, 2007, tradução nossa).

Segundo a Cooper Power Systems (2007, tradução nossa), o fluido ainda possui ponto de combustão de 360°C e ponto de fulgor de 330°C, os quais podem ser observados no quadro 4.

Quadro 4 - Propriedades do óleo Envirotemp® FR3™.

Propriedade		Método de Ensaio	Envirotemp® FR3™
Aspecto visual		ASTM D1524	Transparente; Verde claro.
Cor		ASTM D1500	L 0,5
Viscosidade Cinemática (cSt)	40°C	ASTM D445	34
	100°C		8
Ponto de fulgor (°C)		ASTM D92	330
Ponto de combustão (°C)		ASTM D92	360
Rigidez dielétrica (kV) a 25°C		ASTM D1816	56
Fator de perdas dielétricas (%)	25°C	ASTM D924	0,08
	100°C		3,0
Índice de neutralização (mg de KOH/g)		ASTM D974	0,04
Teor de água (mg/kg)		ASTM D1533B	30

Fonte: Adaptado de COOPER POWER SYSTEMS, 2013.

As Centrais Elétricas do Norte (ELETRONORTE) e a filial brasileira da estatal francesa AREVA desenvolveram em conjunto, o primeiro reator de 242 kV à base de óleo vegetal (Envirotemp® FR3™) no mundo. Antes disso, somente alguns transformadores com classes de tensão inferiores usavam este tipo de óleo no Brasil e no mundo (UHREN, 2007).

- Óleo vegetal isolante BIOVOLT®

Os óleos Biovolt® são fluidos dielétricos à base de óleos vegetais, obtidos de diferentes oleaginosas. São formulados a partir da mistura destas oleaginosas especialmente tratadas e aditivadas, formuladas 100% a partir de óleos vegetais naturais, não contendo aditivos halogenados, óleo mineral isolante, silicone ou ésteres sintéticos na sua composição (BIOVOLT, 2012).

Segundo Mineraltec (2012), a empresa que produz e comercializa os óleos Biovolt® possui três classificações de óleo vegetal, os óleos Biovolt® HW (óleo de girassol), Biovolt® A (óleo de milho) e Biovolt® B (óleo de soja), sendo o primeiro com maior resistência a oxidação em relação aos seguintes, portanto,

maior durabilidade. O Biovolt® HW é recomendado para equipamentos de maior potência ou instalado em locais de temperatura ambiente mais elevada (MINERALTEC, 2012).

Conforme especificações da norma ABNT NBR 15422/2006, seguem no quadro 5, as características típicas do óleo Biovolt® B, o qual será utilizado no estudo de caso.

Quadro 5 - Propriedades do óleo Biovolt® B.

Característica	Método de Ensaio	ABNT NBR 15422	BIOVOLT® B
Aspecto visual	-	Claro, límpido, isento de materiais em suspensão	Claro, límpido, isento de materiais em suspensão
Cor	ABNT NBR 14483	1,0 máx.	0,5
Densidade relativa (20/4°C)	ABNT NBR 7148	0,96 máx.	0,9184
Viscosidade Cinemática (cSt)	20°C	ABNT NBR 10441	150 máx.
	40°C		50 máx.
	100°C		15 máx.
Ponto de fulgor (°C)	ABNT NBR 11341	275 mín.	316
Ponto de combustão (°C)	ABNT NBR 11341	300 mín.	348
Rigidez dielétrica (kV)	Eletrodo de disco	ABNT NBR 6869 ABNT NBR IEC 60156	30 mín.
	Eletrodo de calota		42 mín.
Fator de perdas dielétricas (%)	25°C	ABNT NBR 12133	0,20 máx.
	90°C		3,6 máx.
	100°C		4,0 máx.
Enxofre Corrosivo	ABNT NBR 10505	Não corrosivo	Não corrosivo
Índice de neutralização (mg de KOH/g)	ABNT NBR 14248	0,06 máx.	0,03
Teor de água (mg/Kg)	ABNT NBR 10710-B	200 máx.	150
Teor de PCB – Ascarel (mg/Kg)	ABNT NBR 13882-B	Não detectável	Não detectável
Resistência à oxidação (h)	PrEN 14112:2000 Método Rancimat	-	12 h.
	ASTM D2112 Método Bomba Rotatória	-	~7 min.
Permissividade relativa (Constante dielétrica) a 25°C	ASTM D924	-	3,0
Coeficiente de expansão a 25°C (1/°C)	ASTM D1903	-	7,0x10 ⁻⁴
Calor específico a 25°C(cal/gm/°C)	ASTM D2766	-	0,46

Fonte: MINERALTEC, 2012.

Conforme Mineraltec (2012), da mesma forma que outros fluidos isolantes, o óleo Biovolt®B sofre degradação normal durante seu uso em equipamentos elétricos, em decorrência de sua solicitação aos efeitos combinados de calor, umidade, oxigênio e metais. Para o monitoramento, visando à manutenção preventiva, devem ser realizados preferencialmente os seguintes ensaios físico-químicos conforme recomendação da Mineraltec:

Viscosidade: O limite máximo de aceitação para os óleos Biovolt® B em uso, é de 37 cSt, à 40°C; Índice de neutralização: O limite máximo de aceitação para o óleo em uso, é de $\leq 0,3$ mg KOH/g de óleo; Fator de perdas dielétricas: O limite máximo de aceitação para o óleo em uso é de $\leq 3\%$, a 25°C e; Teor de água: O limite máximo de aceitação para o óleo em uso é de ≤ 400 mg/kg para classes de tensão ≤ 69 kV; ≤ 200 mg/kg para classes de tensão $> 69 < 230$ kV e; ≤ 150 mg/kg para classes de tensão acima de 230 kV (MINERALTEC, 2012).

2.6 COMPARATIVO ENTRE O ÓLEO MINERAL E O ÓLEO VEGETAL

Segundo Franch (2010), os problemas causados pelo uso do OMI geram impactos ambientais e, por conseguinte, impactos econômicos para as concessionárias de energia. Visando eliminar ou minimizar estes impactos, o óleo vegetal isolante entrou no mercado nacional como uma alternativa ao OMI, devido a sua:

Ausência de enxofre corrosivo na sua composição química; Rápida biodegradação, por se tratar de um produto natural, derivado de oleaginosas e; Maior resistência ao incêndio uma vez que seu ponto de combustão é em torno de duas vezes maior ao do OMI (FRANCH, 2010).

Apesar destas características favoráveis, o uso do OVI ainda é reduzido no Brasil principalmente em função do conservadorismo do setor elétrico, por se tratar de um produto novo no mercado (FRANCH, 2010).

Wilhelm et al (2006) realizou ensaios físico-químicos para obter a caracterização dos fluidos isolantes utilizados em transformadores de redes de energia elétrica, sendo estes caracterizados de acordo com a Comissão de Estudos de Líquidos Isolantes Sintéticos e Naturais, o projeto da norma CE-03:010.02-027, do Comitê Brasileiro de Eletricidade (COBEI) (FRANCH, 2010). Os valores obtidos do ensaio podem ser visualizados no quadro 6.

Os tipos de óleos utilizados foram o óleo mineral isolante AV-58 e o óleo vegetal BIOTEMP[®]. Adicionou-se a fim de comparação, o óleo vegetal Biovolt[®] B, devido o mesmo ser utilizado posteriormente no estudo de caso deste trabalho.

Quadro 6 - Caracterização físico-química dos fluidos isolantes BIOTEMP[®] e Biovolt[®]B.

Ensaio		Óleo mineral isolante	Óleo vegetal isolante	
Propriedade	Método	AV-58	BIOTEMP [®]	Biovolt [®] B
Análise visual		Claro e límpido	Claro e límpido	Claro e límpido
Índice de neutralização, (mg KOH/g óleo)	ABNT NBR 14248	0,01	0,01	0,03
Teor de água (ppm m/m)	ABNT NBR 10710/B	16	81	150
Cor	ABNT NBR 14483	0,0	L 0,5	0,5
Densidade a 20°C, (g/ml)	ABNT NBR 7148	0,8880	0,9159	0,9184
Fator de perdas dielétricas a 25°C, (%)	ABNT NBR 12133	0,01	0,05	0,15
Fator de perdas dielétricas a 100°C, (%)	ABNT NBR 12133	0,17	1,6	2,5
Ponto de fulgor, (°C)	ABNT NBR 11341	142	322	316
Ponto de combustão, (°C)	ABNT NBR 11341	154	356	348
Rigidez dielétrica, (kV)	ABNT NBR 6869	53	45	51
Viscosidade a 20°C, (cSt)	ABNT NBR 10441	Não realizado	82	70,6
Viscosidade a 40°C, (cSt)	ABNT NBR 10441	9,63	39,63	33,2
Viscosidade a 100°C, (cSt)	ABNT NBR 10441	2,34	8,53	7,9
Enxofre corrosivo	ABNT NBR 10505	Não corrosivo	Não corrosivo	Não corrosivo
Teor de PCB, (ppm)	ABNT NBR 13882/B	Não detectado	Não detectado	Não detectado
Ponto de fluidez, (°C)	ABNT NBR 11349	< -30	-18	-

Fonte: Adaptado de WILHELM et al, 2006.

Segundo Wilhelm et. al. (2011), devido à sua composição química, os ésteres naturais apresentam maior afinidade pela água em comparação ao óleo

mineral isolante, o que pode lhes conferir a propriedade de "secar" a celulose que compõe o papel Kraft isolante. Fabricantes informam, baseados em ensaios de laboratório, que o uso deste, proporciona ao papel Kraft isolante, uma vida útil em torno de 2 a 5 vezes superior à obtida com óleo mineral isolante. Entretanto, estudos realizados por Martins (2008), apontam que esta vida útil, ocorre somente em temperaturas superiores a 130°C/140°C.

Os índices de neutralização típicos dos fluidos isolantes à base de óleo vegetal são normalmente mais altos do que os do OMI. OVI tendem a formar longas cadeias de ácidos graxos enquanto que o óleo mineral tende a formar ácidos orgânicos de cadeia curta, sendo estes muito mais agressivos (RAPP, 2005 apud TULIO, 2008). É necessário um baixo conteúdo de acidez total do fluido à base de óleo vegetal para minimizar a condução elétrica e corrosão metálica, aumentando a vida do sistema isolante (ABNT NBR 15422, 2006).

Um baixo fator de perdas dielétricas indica baixo grau de contaminantes solúveis. Os OVI têm, normalmente, fatores de perdas dielétricas mais altas do que os OMI, especialmente em elevadas temperaturas (ABNT NBR 15422, 2006).

Segundo Tulio (2008), o óleo mineral possui condutividade térmica próxima a de outros fluidos isolantes como silicone, R-Temp e OVI. Como sua viscosidade é mais baixa que a destes líquidos isolantes, é necessário um menor volume de óleo para a refrigeração do equipamento.

Os fluidos a base de ésteres naturais, além de não tóxicos e biodegradáveis, ao contrário dos óleos minerais podem produzir-se sem quaisquer limitações (MARTINS, 2008).

Estudos realizados por Martins (2008), com os dois óleos, mostram que os gases metano, etano e etileno, ambos produzidos pela degradação do óleo (mineral ou vegetal), aumentam consideravelmente nos testes com óleo mineral/papel Kraft em temperaturas superiores a 130°C. Já com relação ao papel imerso no óleo vegetal, somente a produção de metano aumenta para temperaturas a partir de 180°C.

Podem ser visualizadas a seguir, as principais vantagens da utilização do óleo vegetal, neste caso informações obtidas pelo óleo vegetal Biotemp® da ABB (SANTOS; NOGAWA; MENDES, 2007): Biodegradável; Não tóxico; Menor risco de acidentes no manuseio e armazenamento; Menor risco patrimonial; Difícil

inflamabilidade (Segurança contra incêndios); Boa rigidez dielétrica; Estabilidade a alta temperatura; Estabilidade na oxidação; Compatibilidade com outros materiais; Melhor tolerância a umidade; Maior vida operacional em transformadores; Absorção e evolução de gases e; Excelentes características térmicas.

Ainda, segundo a CEMIG (2012), o óleo vegetal é reciclável, recondicionável e de fácil descarte, pois após atingir um estado de degradação que exija sua substituição, o óleo vegetal pode ser recuperado ou descartado e, em alguns casos, transformado em biodiesel, diferentemente do óleo mineral. Por outro lado, uma desvantagem dos óleos vegetais é que apresentam menor estabilidade à oxidação em comparação com óleos minerais (OOMMEN; CLAIBORNE, 1999 apud SILVA et al, 2012).

Dentre estas e outras características, os ésteres naturais estão aumentando sua participação no mercado como fluido de isolamento de transformadores de alta potência. A característica de biodegradabilidade, alto ponto de fulgor ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) e a possibilidade de aumentar a vida útil do papel isolante, são os pontos mais relevantes que podem ser abordados (FOFANA; HEMMATJOU; FARZANEH, 2010 apud SILVA et al, 2012).

3 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho inicia-se na fase de caracterização da área onde será realizado o estudo de caso. Após a definição da área de estudo, aprofunda-se sobre a temática a ser abordada no trabalho para posteriormente definirem-se as etapas para o desenvolvimento prático envolvendo: materiais a serem utilizados; realização de ensaios e; procedimento experimental de substituição do fluido isolante. O trabalho inclui o investimento financeiro necessário para aplicação do óleo vegetal, o qual será descrito posteriormente.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – A EMPRESA

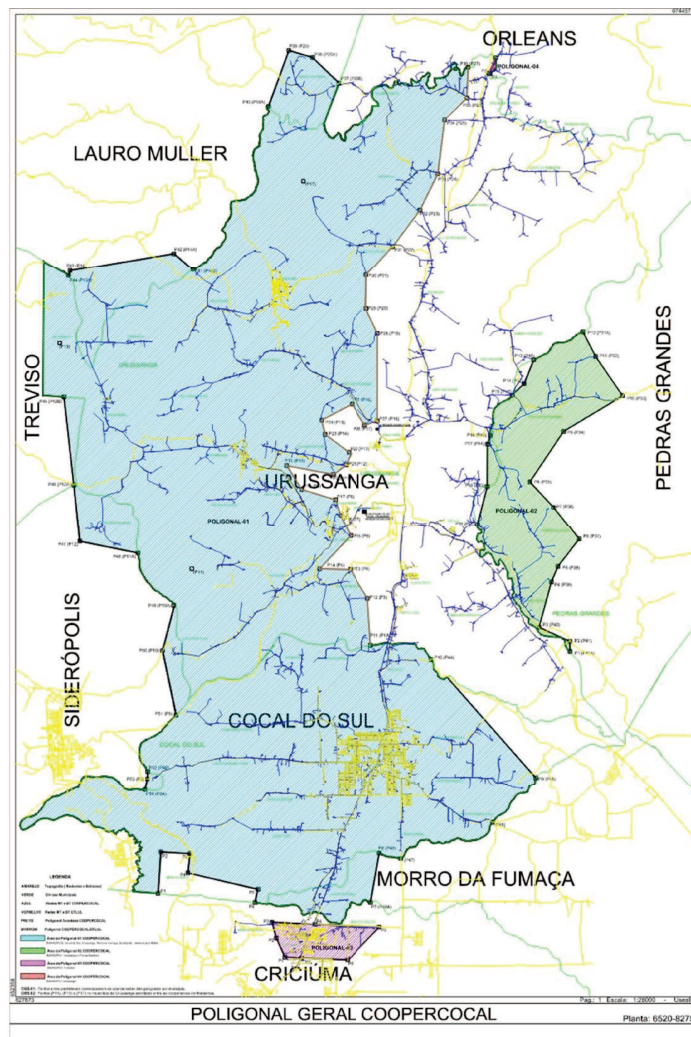
A Cooperativa Energética Cocal – COOPERCOCAL é uma sociedade cooperativa, sem fins lucrativos, fundada em 02 de março de 1964, prestadora do serviço público de distribuição de energia elétrica, sujeita às normas jurídicas do direito administrativo e disposições contidas na Lei nº 5.764/71 “Legislação Cooperativista” e Estatuto Social aprovado em assembleia geral. A COOPERCOCAL tem sua receita proveniente da atividade classificada como “serviço de distribuição de energia elétrica” (COOPERCOCAL, 2012a).

Atuando em nove municípios, a empresa conta com 62 (sessenta e dois) colaboradores, 9.290 (nove mil duzentos e noventa) associados/consumidores e possui uma capacidade instalada de 41,47 MVA (COOPERCOCAL, 2012a).

A sede da COOPERCOCAL esta localizada na Avenida Doutor Polidoro Santiago, 555 – Centro – Cocal do Sul/SC. Sua área de permissão (242 km²) incluem os municípios de Cocal do Sul, Criciúma, Lauro Muller, Morro da Fumaça, Orleans, Pedras Grandes, Siderópolis, Treviso e Urussanga, conforme representados na figura 7.

A COOPERCOCAL possui uma subestação de energia de 69/13,8 kV com um transformador de 20/26 MVA. A empresa ainda conta com 614 transformadores espalhados por toda sua rede de distribuição. Dentre estes, encontram-se monofásicos, bifásicos e trifásicos.

Figura 7 - Área de permissão da COOPERCOCAL 2012 (242 Km²).



Fonte: COOPERCOCAL, 2012a.

A cooperativa em estudo possui rede compacta¹ (Figura 8) desenvolvida para substituir a rede convencional, onde a arborização é muito rica. Em 2001 a COOPERCOCAL contava com 7,23 km de rede compacta, sendo em 2012 este número duplicado (14,47 km) (COOPERCOCAL, 2012b).

¹ Sistema composto por cabos de alumínio recobertos (condutores protegidos) com uma camada plástica a fim de reduzir a necessidade de poda de árvores em torno dos condutores (COOPERCOCAL, 2012b).

Figura 8 - Distribuição de energia elétrica com utilização de redes compactas.



Fonte: COOPERCOCAL, 2012a.

3.2 ESTUDO SOBRE A TEMÁTICA

O desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso inicia-se na etapa de levantamento bibliográfico sobre a temática a ser estudada, sendo as pesquisas realizadas em artigos, manuais, normas técnicas, dissertações, entre outros. Apresenta-se, preliminarmente, o cenário energético brasileiro, bem como o funcionamento da distribuição de energia elétrica, a fim de fundamentar o entendimento do sistema elétrico.

Há diversas pesquisas sendo desenvolvidas envolvendo a substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal em transformadores de redes de distribuição de

energia elétrica, descrevendo dados técnicos de comportamento nos transformadores, propriedades físico-químicas, perdas de carga, dentre outras. Características técnicas foram obtidas tanto para o óleo mineral quanto para o óleo vegetal, a fim de elaborar análises comparativas. Ressalta-se que estas foram realizadas a partir de dados coletados do referencial bibliográfico.

Os estudos de características em termos ambientais realizaram-se por meio das comparações sobre informações coletadas em referências, baseando-se nas vantagens e desvantagens do uso de cada tipo de óleo. As análises acerca de custos relacionados à substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal deram-se por meio da coleta de dados com fornecedores, estudando-se o investimento necessário para: a) aquisição de transformadores novos com óleo vegetal, conforme necessidade da cooperativa, bem como; b) investimento para substituição somente do óleo existente nos transformadores já em operação da cooperativa.

3.3 FLUIDOS ISOLANTES E MATERIAIS UTILIZADOS

Para a elaboração deste estudo foram utilizados o óleo vegetal Biovolt[®]B, adquirido da empresa Mineraltec e o transformador, novo, para a substituição do óleo, foi adquirido pela COOPERCOCAL, do fabricante Romagnole Transformadores.

Tabela 2 - Características técnicas do transformador.

Dados Gerais	
Número de fabricação	846834
Marca	Romagnole
Potência nominal	10 kVA
Tensão primária	7967 à 7275 V
Tensão secundária	440/220 V
Frequência	60 Hz
Norma	NBR 5440/11
Data de fabricação	Out/12
Número de fases	1 (monofásico)
Tipo	TDMAL 50/15/1.2

Fonte: Adaptado de ROMAGNOLE, 2012.

Na tabela 2 podem ser observadas as características técnicas do transformador, como potência nominal 10 kVA, fabricado em outubro de 2012, contendo 42 litros de óleo mineral isolante, ambas informações descritas em sua placa de identificação.

3.4 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS

A realização de ensaios é necessária para a obtenção de características técnicas, a fim de se chegar a um comparativo sobre o comportamento do transformador com óleo mineral e com óleo vegetal, bem como para verificar se este se encontra apto para o funcionamento na rede.

Foram executados os seguintes ensaios elétricos, realizados no laboratório da FECOERUSC (Federação das Cooperativas de Energia do Estado de Santa Catarina), no transformador de distribuição da COOPERCOCAL:

- Resistência elétrica dos enrolamentos;
- Perdas a vazio;
- Perdas em carga;
- Resistência de isolamento;
- Tensão induzida e;
- Tensão aplicada.

Para estes ensaios, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- NL 024 Whatstone Bridge;
- Ponte de Kelvin;
- Monômetro Eletrônico Megabras MI 5500;
- TP de Elevação de 30 kVA;
- Gerador de 30 kVA e;
- TTR MULTITEST.

Os ensaios foram realizados tanto com o transformador com óleo mineral, quanto com óleo vegetal.

Tanto o óleo mineral contido no transformador, quanto o óleo vegetal Biovolt B, não foram submetidos a ensaios, devido aos mesmos já terem sido realizados pelos fabricantes quando o óleo é produzido. Os mesmos foram

caracterizados como novos, conforme apresentado no referencial bibliográfico nas tabelas 1 e 2, atendendo as especificações das normas ABNT NBR 15422 de 2008 e Resolução 36 da ANP de 2008, para óleo vegetal e óleo mineral, respectivamente.

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL PELO ÓLEO VEGETAL

O óleo mineral presente no transformador de energia da COOPERCOCAL foi drenado na FECOERUSC, onde posteriormente o mesmo pode ser remanejado e adicionado em outros transformadores, que podem, inclusive, pertencer a outras cooperativas energéticas.

Após a drenagem do óleo mineral isolante e antes do enchimento com o óleo vegetal, o transformador foi lavado várias vezes com o óleo vegetal para remover completamente o óleo mineral residual, procedimento este realizado pela empresa Mineraltec – Pato Branco/PR.

Vale ressaltar que os óleos vegetais misturam-se em todas as proporções com o óleo mineral isolante (MINERALTEC, 2013) e que o óleo deverá ser completamente drenado, pois se a contaminação do óleo vegetal com óleo mineral for superior a 7%, o ponto de combustão do óleo vegetal cai abruptamente (ARAUJO; MARTINS; SILVA, 2006).

3.6 INVESTIMENTO FINANCEIRO

Para o desenvolvimento da análise financeira foram utilizados dados coletados pelo banco de dados da cooperativa em estudo, tais como: quantidade de transformadores existentes na rede de distribuição; quantidade de transformadores que vão para manutenção anualmente; quantidade de transformadores comprados anualmente e; quantidade de litros de óleo isolante, conforme a potência do transformador.

Considerou-se que a cooperativa em estudo possui em sua rede de distribuição 614 transformadores de diversas potências nominais. Entretanto, para este estudo, foram considerados apenas os transformadores instalados de 30kVA, 45kVA, 75kVA e, 112,5kVA, uma vez que representa 64% do total de transformadores instalados.

Anualmente vão para manutenção tipicamente 25 transformadores, podendo variar, por ano, as potências de cada transformador danificado. Para este estudo, consideraram-se os transformadores que foram para manutenção de 30kVA, 45kVA, 75kVA e, 112,5kVA, no ano de 2012.

Foram utilizados os custos do Fornecedor A para compra de transformadores novos de 45kVA e 112,5kVA e, os custos do Fornecedor B para compra de transformadores novos de 30kVA e 75kVA. Utilizou-se este quesito devido à cooperativa em estudo trabalhar com diversos fornecedores.

Os valores referentes ao número de transformadores comprados por ano, bem como quantidade de óleo por potência de transformador são valores médios.

O óleo vegetal utilizado para cálculo de substituição será o óleo vegetal B, devido o seu custo ser mais acessível em comparação ao óleo vegetal A. Considerou-se o valor real obtido com o fornecedor, desconsiderando-se o possível desconto a ser obtido na compra de grande quantidade de óleo isolante.

Foram realizados cálculos para substituição do óleo mineral pelo óleo vegetal somente em transformadores que vão para manutenção corretiva, devido à inviabilidade operacional e financeira de retirar da rede um transformador que opera normalmente somente para substituir o fluido isolante.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

4.1 SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL PELO ÓLEO VEGETAL

O transformador foi encaminhado à empresa Mineraltec, em Pato Branco/PR, no dia 23 de agosto de 2013, onde foi realizado o enchimento do mesmo com óleo vegetal isolante Biovolt® B, sendo que o óleo mineral isolante utilizado anteriormente no transformador foi retirado pela FECOERUSC no dia 19 de agosto de 2013, data em que foram realizados os ensaios elétricos no transformador. Ambos foram acompanhados *in loco*.

Antes do enchimento, o óleo vegetal isolante foi submetido ao processo de tratamento termo vácuo, para secagem, desgaseificação e filtração, durante um período de 13 horas.

De acordo com os ensaios físico-químicos realizados pelo laboratório Diagno, as características do óleo vegetal isolante utilizado no enchimento do transformador, encontram-se apresentadas na tabela 3 para Amostra 7784/2013, bateria 001/2013 B, reservatório de tanque nº 9, com saída do laboratório no dia 28 de março de 2013.

Tabela 3 - Resultado de ensaio do óleo Biovolt® B.

Ensaio	Unidade	Método	Resultado
Viscosidade Cinemática 20°C	cSt	ABNT NBR 10441	67,05
Viscosidade Cinemática 40°C	cSt	ABNT NBR 10441	31,44
Viscosidade Cinemática 100°C	cSt	ABNT NBR 10441	7,42
Teor de Água	ppm	ABNT NBR 10710	52
Índice de Neutralização	mg KOH/g	ABNT NBR 14248	0,02
Rigidez Dielétrica	kV	ABNT NBR 6869	57
Fator de Potência a 25°C (1)	%	ABNT NBR 12133	0,34
Fator de Potência a 90°C (1)	%	ABNT NBR 12133	1,94
Fator de Potência a 100°C (1)	%	ABNT NBR 12133	2,08
Ponto de Fulgor	°C	Cromatografia (DIAGNO)	> 320
Ponto de Combustão	°C	ABNT NBR 15349	> 320
Rancimat	Horas	IEC 60666	13,9

Fonte: Adaptado de DIAGNO, 2013a.

(1) Fator de Potência está associado ao Fator de Perdas Dielétricas apresentado no quadro 5, conforme NBR 15422/2006.

O processo de substituição iniciou-se com a lavagem interna do transformador com o óleo vegetal Biovolt® B (Figura 9), procedimento repetido por duas vezes. Após a lavagem com termo vácuo, segundo o fornecedor do fluido isolante vegetal, é segura a informação de que não restaram traços de óleo mineral isolante no equipamento que interfiram nas características do óleo vegetal isolante.

O óleo vegetal isolante utilizado no processo de lavagem interna foi adicionado ao óleo mineral isolante produzido pela empresa e regenerado, sendo que o óleo mineral isolante não apresenta qualquer alteração, segundo o fornecedor do óleo vegetal.

Figura 9 - Lavagem do transformador com óleo vegetal Biovolt® B.



Fonte: Do autor, 2013.

O enchimento do transformador com o óleo vegetal isolante Biovolt® B, foi feito sob atmosfera de gás inerte N₂ (nitrogênio) de acordo com a figura 10. Após o processo de enchimento, o transformador foi lacrado e recebeu o adesivo da empresa Mineraltec, com a logomarca da Biovolt (Figura 11), para futura identificação e avaliação.

Adicionou-se para fins de identificação para a própria cooperativa, bem como para associados/consumidores e sociedade em geral, um adesivo de

coloração verde, que identifica o transformador com uso de óleo vegetal, ambientalmente mais seguro.

Figura 10 - Enchimento do transformador com adição de nitrogênio.



Fonte: Do autor, 2013.

Figura 11 - Transformador lacrado com a logomarca da Biovolt.



Fonte: Do autor, 2013.

A substituição foi realizada apenas em um dos transformadores da cooperativa a fim de se verificar a viabilidade de uso do óleo vegetal e o procedimento de substituição deste fluído para, posteriormente, servir como referência para a aplicação nos demais transformadores da rede de distribuição, conforme a necessidade da cooperativa em estudo.

Ressalta-se que toda a parte de descarte do óleo mineral, que pode gerar passivos ambientais se descartado de forma incorreta, deve ser considerada. Entretanto, o óleo coletado de cada transformador da COOPERCOCAL não é descartado, devido ao mesmo ser regenerado e adicionado a outros transformadores que necessitam do fluído em questão que, conforme descrito na seção 3.5, podem pertencer a outras cooperativas energéticas. Este procedimento poderá ser realizado pela empresa FECOERUSC, por meio de convênio firmado, onde a mesma encaminha o óleo mineral retirado para ser regenerado com empresa adequada para este fim.

4.2 ENSAIOS DIELÉTRICOS REALIZADOS NO TRANSFORMADOR

O transformador, encaminhado à FECOERUSC, foi submetido a testes, conforme descritos na metodologia e realizados tanto com o transformador operando com óleo mineral, quanto com óleo vegetal.

Os testes de resistência ôhmica dos enrolamentos (Figura 12), perdas a vazio e perdas em carga, são relacionados especificamente para o transformador, sem levar em consideração o fluído isolante presente neste. Portanto, estes ensaios, foram realizados apenas uma vez, no dia 19 de agosto de 2013, com o transformador operando com óleo mineral, original de fábrica. Os valores correspondentes ao ensaio podem ser visualizados na tabela 4 e atendem as especificações da NBR 5440 de 2011.

Figura 12 - Ensaio de resistência elétrica dos enrolamentos.

Fonte: Do autor, 2013.

Tabela 4 - Ensaio de rotina no transformador.

Ensaio	Resultado
Resistência ôhmica dos enrolamentos primários	56,000 Ω
Resistência ôhmica dos enrolamentos secundários	0,12 Ω
Perdas a vazio	28,0 W
Perdas em carga	172,8 W
Tensão induzida	880 V
Tensão aplicada	10 kV

Fonte: FECOERUSC, 2013.

Já o ensaio de resistência de isolamento (Figura 13), o qual leva em consideração o fluído isolante, foi realizado com o óleo mineral e com o óleo vegetal, obtendo resultados satisfatórios para o transformador com o óleo vegetal. A resistência de isolamento para o óleo mineral foi de 5,00 [M Ω] para baixa tensão-alta tensão e 5,00 [M Ω] para baixa tensão-massa. Já para o óleo vegetal este valor quintuplicou para baixa tensão-alta tensão, com 25,00 [M Ω] e, 20,00 [M Ω] para baixa tensão-massa, proporcionando características de desempenho superiores, podendo operar em sua potência nominal com segurança.

Figura 13 - Ensaio de resistência de isolamento.



Fonte: Do autor, 2013.

Testes relacionados à tensão induzida e tensão aplicada também foram realizados e seus resultados encontram-se aprovados pela FECOERUSC (Tabela 4), tanto com o transformador com óleo mineral quanto com o óleo vegetal.

4.3 INSTALAÇÃO DO TRANSFORMADOR NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

O transformador foi instalado na rede de distribuição no dia 02 de outubro de 2013 pela COOPERCOCAL. Por ser um transformador de pequeno porte e de potência nominal de 10kVA, o mesmo foi instalado em zona rural, na rua geral Rio Perso, no bairro Rio Perso em Cocal do Sul/SC.

Toda a execução do processo de instalação deste transformador teve acompanhamento e supervisão de um responsável técnico, o engenheiro eletricitista da empresa. Os colaboradores que trabalharam nesta instalação utilizaram equipamentos de proteção individual, conforme mostra a figura 14. Posteriormente, na figura 15, pode-se observar o transformador instalado na rede e operando normalmente.

Figura 14 - Instalação do transformador na rede de distribuição.



Fonte: Do autor, 2013.

Figura 15 - Transformador com óleo vegetal na rede de distribuição.



Fonte: Do autor, 2013.

Por norma da ANEEL, as cooperativas energéticas devem avisar por escrito quando haverá desligamento de energia e por quanto tempo a rede ficará desligada. Este procedimento também foi utilizado para a instalação do

transformador em estudo, tendo seu desligamento com início às 14h30min e término às 16h00min (Figura 16).

Figura 16 - Comunicado de desligamento no site da COOPERCOCAL.



Fonte: Do autor, 2013.

4.4 REGISTRO DE ACOMPANHAMENTO DO TRANSFORMADOR

É necessário fazer um acompanhamento operacional do transformador com o óleo vegetal, conforme orientações do fornecedor deste fluido isolante, sendo este acompanhamento possível por meio de registros, já que é o primeiro operando com este tipo de fluido na cooperativa em estudo, a fim de se manter um histórico do transformador.

Elaborou-se, portanto, um Registro de Acompanhamento de Transformador Elétrico (RATE). Este pode ser aplicado aos demais transformadores da cooperativa, sejam estes com óleo mineral ou óleo vegetal, a fim de manter o histórico e informações de manutenção dos equipamentos instalados.

Para a realização das revisões neste e em outros transformadores com óleo vegetal, sugere-se que essas sejam realizadas anualmente e em dias secos, para que o fluido isolante não seja submetido à alta umidade e a fim de se evitar

efeito negativo sobre as propriedades elétricas e químicas do OVI (BIOTEMP, 2013).

No quadro 8, seção 4.5 (ensaio físico-químico em amostra de óleo vegetal), pode ser observado o preenchimento do RATE. Neste, utilizaram-se as informações da primeira revisão tendo como motivo/objetivo a coleta da amostra do óleo, que deve ser feito um mês após a instalação do transformador na rede de distribuição, conforme orientação do fabricante do fluido isolante. A partir desta revisão, as próximas devem ser realizadas anualmente, como citado previamente.

Cada revisão deve ter seu próprio registro para que as informações a respeito das manutenções sejam mantidas de forma clara e inequívoca.


4.5 ENSAIO FÍSICO-QUÍMICO EM AMOSTRAS DE ÓLEOS VEGETAIS

Os ensaios físico-químicos referentes à primeira coleta de amostras de óleos vegetais foram realizados pelo laboratório do Diagno, em Curitiba/PR. As amostras foram coletadas no dia 31 de outubro de 2013 e enviadas no mesmo dia, conforme dados descritos no primeiro RATE (Quadro 8).

Lembrando que, conforme procedimento de desligamento do transformador na rede de distribuição, a COOPERCOCAL também emitiu aviso de desligamento para realização desta coleta.

O relatório técnico emitido pelo laboratório do Diagno é apresentado na tabela 05, para amostra 9070/2013. Como pode ser observado, grande parte dos resultados se encontram dentro dos padrões estabelecidos pelas NBR 15422/2006.

Quadro 7 - Registro de acompanhamento do transformador com óleo vegetal.

 <p>COOPERATIVA ENERGÉTICA COCAL</p>	<p>REGISTRO DE ACOMPANHAMENTO DE TRANSFORMADOR DE ENERGIA</p>
Revisão nº: 01	Data: 31/10/2013
<p>Identificação do equipamento:</p> <p>Numero de Fabricação: 846834 Marca: Romagnole Potência: 10kVA Data de fabricação: out/2012 Fluido isolante: Óleo vegetal Biovolt® B</p>	
<p>Rede de distribuição: Transformador 022</p> <p>Número da instalação do transformador: 146</p> <p>Rua: Rua Geral Rio Perso Bairro: Rio Perso Zona: Rural Cidade: Cocal do Sul Data de instalação: 02/10/2013</p>	
<p>Motivo da manutenção: (Opção "outros" favor especificar o motivo).</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Preventiva <input type="checkbox"/> Vazamento de óleo <input type="checkbox"/> Outros <input checked="" type="checkbox"/> Coleta amostra de óleo <input type="checkbox"/> Queima</p> <p>Outros:</p>	
<p>Coleta amostra de óleo: (Opção "outros" favor especificar o ensaio).</p> <p>Laboratório: Diagno Data da coleta: 31/10/2013 Quantidade de amostras: 01 Data de envio: 31/10/2013</p> <p>Ensaio realizados:</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Índice de neutralização <input checked="" type="checkbox"/> Teor de água <input type="checkbox"/> Outros <input checked="" type="checkbox"/> Viscosidade cinemática a 40°C <input checked="" type="checkbox"/> Rigidez dielétrica <input checked="" type="checkbox"/> Fator de perdas dielétricas <input checked="" type="checkbox"/> Tempo de indução à oxidação</p> <p>Outros:</p> <p style="text-align: center;">O laudo dos ensaios deve ser anexado/grampeado juntamente com o registro.</p>	
<p>Anotações: Coletado aproximadamente 850 mL de óleo vegetal.</p>	
<p>Previsão para próxima revisão: 31/10/2014</p>	
<p>Assinatura</p> <p>_____ Supervisor de Campo Matrícula: _____</p> <p>_____ Engenheiro Responsável Matrícula: _____</p>	

Fonte: COOPERCOCAL, 2013c.

Tabela 5 - Resultado de ensaio físico-químico em amostra de óleo vegetal após um mês.

Ensaio	Unidade	Método	Resultado
Viscosidade Cinemática 40°C	cSt	ABNT NBR 10441	31,60
Teor de Água	ppm	ABNT NBR 10710	87
Índice de Neutralização	mg KOH/g	ABNT NBR 14248	0,05
Rigidez Dielétrica	kV	ABNT NBR 6869	62
Fator de Potência a 20°C (1)	%	ABNT NBR 12133	0,25
Fator de Potência a 90°C (1)	%	ABNT NBR 12133	4,57
Fator de Potência a 100°C (1)	%	ABNT NBR 12133	5,06
Rancimat	Horas	IEC 60666	13,49

Fonte: Adaptado de DIAGNO, 2013b.

(1) Fator de Potência está associado ao Fator de Perdas Dielétricas apresentado no quadro 5, conforme NBR 15422/2006.

Entretanto, os valores apresentados para fator de potência a 20°C, 90°C e 100°C encontram-se alterados. Segundo a norma, quando estes valores se encontram elevados, conclui-se que existem contaminantes presentes no óleo. A norma ABNT NBR 15422/2006 cita que o OVI tem, normalmente, fatores de perdas dielétricas mais altos do que o OMI, especialmente em altas temperaturas.

Uma análise físico-química acerca dos possíveis contaminantes é desejável para trabalhos futuros e servirá de base para uma melhor investigação sobre esta alteração, bem como para possíveis soluções.

4.6 ANÁLISE FINANCEIRA

4.6.1. Custos do óleo mineral e do óleo vegetal

Ao longo do tempo, o óleo vegetal foi tendo seu custo reduzido para mais próximo do custo do óleo mineral. Em 2005, o custo do OVI era duas a três vezes o do óleo mineral (abril/05: R\$9,00/L). Já em 2007, o preço era de R\$7,50/L (UHREN, 2007). Entretanto, ressalta-se que os valores referentes ao preço do óleo isolante podem variar de acordo com o mercado e a quantidade fornecida.

Conforme informações coletadas com as empresas fornecedoras de óleo vegetal e óleo mineral, na tabela 6 podem-se observar os valores referentes à aquisição de cada um para o ano de 2013.

Tabela 6 - Custos gerais de óleos isolantes em 2013.

Tipo de óleo	Custo (R\$/L)
Óleo vegetal A (novo)	22,75
Óleo vegetal B (novo)	6,00
Óleo mineral A (novo)	5,00
Óleo mineral B (regenerado)	3,00

Fonte: Do autor, 2013.

Acredita-se que o elevado custo do óleo vegetal A seja devido ao óleo ser de categoria internacional. Entretanto, de acordo com os fornecedores, o custo do óleo pode se tornar reduzido dependendo da quantidade a ser fornecida.

4.6.2. Custos de transformadores com óleo mineral e de transformadores com óleo vegetal

Os custos relacionados à compra de transformadores com o óleo vegetal em comparação com o custo de um transformador com o óleo mineral, conforme utilizado hoje em dia, são relativamente similares. A diferença de preço varia de acordo com a potência do transformador, sendo que o de potência maior possui maior valor agregado, portanto, maior diferença de preço em nível de comparação.

No quadro 7 é possível verificar os valores dos transformadores novos de acordo com a potência e tipo de óleo utilizado.

Quadro 8 - Custo de transformadores novos.

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

Fonte: Do autor, 2013.

Os fornecedores ainda trabalham com outras potências de transformadores com óleo vegetal e óleo mineral, entretanto para este trabalho, as informações tornam-se desnecessárias devido este estudo não englobar estes tipos de transformadores.

Analisando-se as possíveis maneiras de realizar a substituição do fluido mineral isolante para o fluido à base de éster natural, opta-se por duas formas que apresentaram ser mais atrativas para a cooperativa em estudo: a) na aquisição de transformadores novos já com óleo vegetal e; b) substituindo o fluido nos transformadores que são deslocados à manutenção.

Na tabela 7 pode-se observar alguns dados adquiridos do banco de dados da COOPERCOCAL a fim de realizar a análise financeira.

Tabela 7 - Dados gerais dos transformadores da COOPERCOCAL.

Descrição	Unidade	Quantidade
Transformadores que vão para manutenção de 30kVA	Unid./ano	07
Transformadores que vão para manutenção de 45kVA	Unid./ano	09
Transformadores que vão para manutenção de 75kVA	Unid./ano	05
Transformadores que vão para manutenção de 112,5kVA	Unid./ano	01
Transformadores comprados de 30kVA	Unid./ano	08
Transformadores comprados de 45kVA	Unid./ano	05
Transformadores comprados de 75kVA	Unid./ano	06
Transformadores comprados de 112,5kVA	Unid./ano	01

(continua)

Tabela 7 - Dados gerais dos transformadores da COOPERCOCAL.

Descrição	Unidade	(conclusão)
		Quantidade
Quantidade de óleo isolante em transformador de 30kVA	Litros	48
Quantidade de óleo isolante em transformador de 45kVA	Litros	65
Quantidade de óleo isolante em transformador de 75kVA	Litros	79
Quantidade de óleo isolante em transformador de 112,5kVA	Litros	151
Custo do óleo vegetal B	R\$	6,00
Custo do óleo mineral B (regenerado)	R\$	3,00

Fonte: Do autor, 2013.

O óleo vegetal utilizado para cálculo de substituição será o óleo vegetal B, devido o seu custo ser mais acessível em comparação ao óleo vegetal A.

4.6.3. Análise comparativa na aquisição de transformadores novos

A COOPERCOCAL adquire anualmente em média, com base na média de aquisição dos últimos dois anos, 20 (vinte) transformadores novos, levando em consideração somente as potências trabalhadas neste estudo de caso, conforme descrito na tabela 4, seção 3.6 (investimento financeiro).

A aquisição de transformadores se dá na necessidade da cooperativa em estudo ampliar a rede de distribuição e/ou substituir transformadores antigos. Pensando nisto, encontra-se uma grande oportunidade para adquirir transformadores que já possuem o fluído isolante vegetal.

No quadro 9 é possível verificar o lote de transformadores comprados anualmente, bem como o custo de aquisição destes com óleo mineral e com óleo vegetal. O objetivo deste é visualizar o investimento que a cooperativa em estudo teria ao implantar transformadores com fluído à base de éster natural.

Quadro 9 - Investimento necessário na aquisição de transformadores novos.

Transformador (potência)	Lote (unid.)	Óleo Mineral (R\$)	Óleo Vegetal (R\$)	Investimento (R\$) (3)
30 kVA (1)	08	32.788,24	39.345,92	6.557,68
45 kVA (2)	05	26.620,00	30.390,00	3.770,00
75 kVA (1)	06	37.933,56	45.520,26	7.586,70
112,5 kVA (2)	01	8.400,00	9.408,00	1.008,00
Total	20	105.741,80	124.664,18	18.922,38

Fonte: Do autor, 2013.

- (1) Aquisição de transformadores do Fornecedor B, conforme quadro 7, seção 2.7.2.
 (2) Aquisição de transformadores do Fornecedor A, conforme quadro 7, seção 2.7.2.
 (3) Diferença de investimento na aquisição do OMI/OVI.

Analisando o quadro acima, pode-se observar que a COOPERCOCAL faria um investimento de R\$ 18.922,38 reais a mais na compra de transformadores com óleo vegetal (22%), baseando-se no valor de aquisição anual do transformador com óleo mineral.

O investimento necessário para a aquisição não chega a R\$ 1.000,00 reais por transformador, sendo este valor acessível para a cooperativa em estudo. Este investimento não só se justifica por todos os benefícios da utilização do óleo vegetal em transformadores de energia elétrica, mas pela imagem de comprometimento com a sustentabilidade que a COOPERCOCAL irá transmitir para seus associados/consumidores, bem como para a sociedade em geral. A mesma ainda pode ser exemplo para que outras cooperativas energéticas possam implantar a mesma filosofia em sua rede de distribuição.

4.6.4. Análise da substituição do fluido dos transformadores em manutenção

Como citado previamente, uma das formas de implantar o óleo vegetal nos transformadores da cooperativa em estudo é através da substituição do fluido isolante quando é realizada manutenção no equipamento.

Criou-se uma planilha a fim de se chegar a um resultado de quantos litros seriam necessários para preencher os transformadores que vão para manutenção anualmente, conforme dados apresentados na tabela 4, bem como qual o investimento anual para essas substituições.

Quadro 10 - Investimento para substituição para óleo vegetal nos transformadores em manutenção.

Substituição para Óleo Vegetal					
<i>Transformador (potência)</i>	<i>Manutenção de transformadores (unid./ano)</i>	<i>Óleo por transformador (L)</i>	<i>Total (L)</i>	<i>Óleo vegetal B (R\$)</i>	<i>Total (R\$)</i>
30 kVA	07	48	336	6,00	2.016,00
45 kVA	09	65	585	6,00	3.510,00
75 kVA	05	79	395	6,00	2.370,00
112,5 kVA	01	151	151	6,00	906,00
Total	22	343	1.467	24,00	8.802,00
Resultados					
Total de transformadores (unid.) (1)					394
Investimento mensal (R\$)					733,50
Investimento anual (R\$)					8.802,00
Tempo estimado para substituição nos transformadores (ano)					17,91

Fonte: Do autor, 2013.

(1) Todos os transformadores instalados de 30kVA, 45kVA, 75kVA e 112,5kVA na rede da COOPERCOCAL.

No quadro 10 é possível verificar que em 18 (dezoito) anos, 394 (trezentos e noventa e quatro) transformadores já estariam operando com o óleo vegetal, valor este que representa 64% da rede da COOPERCOCAL.

Quadro 11 - Investimento para substituição para óleo mineral regenerado nos transformadores em manutenção.

Substituição para Óleo Mineral Regenerado					
<i>Transformador (potência)</i>	<i>Manutenção de transformadores (unid./ano)</i>	<i>Óleo por transformador (L)</i>	<i>Total (L)</i>	<i>Óleo mineral B (R\$)</i>	<i>Total (R\$)</i>
30 kVA	07	48	336	3,00	1.008,00
45 kVA	09	65	585	3,00	1.755,00
75 kVA	05	79	395	3,00	1.185,00
112,5 kVA	01	151	151	3,00	453,00
Total	22	343	1.467	12,00	4.401,00
Resultados					
Investimento mensal (R\$)					366,75
Investimento anual (R\$)					4.401,00

Fonte: Do autor, 2013.

De acordo com as informações apresentadas no quadro 10 e 11, a COOPERCOCAL duplicaria seu investimento anual, já que o valor do óleo mineral

é a metade do custo do óleo vegetal. Seria um investimento de R\$ 4.401,00 reais a mais no valor já investido anualmente, para substituir o óleo mineral pelo óleo vegetal em 22 (vinte e dois) transformadores. Entretanto, esse valor pode vir a ser reduzido, uma vez que as empresas fornecedoras aplicam um desconto no valor total da compra quando adquirido grande quantidade de óleo vegetal.

Ainda analisando o investimento financeiro na parte de substituição através da manutenção, devem-se levar em consideração os custos relacionados a produtos e serviços adicionais (Quadro 120, valores estes dirigidos a empresa que prestara esse tipo de serviço).

Quadro 12 - Custo relacionado a produtos e serviços do processo de substituição do fluido isolante.

Transformador (potência)	Óleo Mineral (R\$) (1)	Óleo Vegetal (R\$) (2)	Investimento (R\$) (3)
30 kVA	700,00	3.200,00	2.500,00
45 kVA	900,00	5.580,00	4.680,00
75 kVA	500,00	3.760,00	3.260,00
112,5 kVA	100,00	1.438,00	1.338,00
Total	2.200,00	13.978,00	11.778,00

Fonte: Do autor, 2013.

- (1) Valores obtidos com a prestadora de serviços responsável.
- (2) Valores estimados com base nos valores do estudo de caso.
- (3) Diferença de investimento na aquisição do OMI/OVI.

Vale ressaltar que quando um transformador vai para manutenção, todo o óleo mineral presente neste é drenado, regenerado, e volta para o transformador, por isso o custo de mão-de-obra é menor em comparação com o do óleo vegetal. O custo superior de mão-de-obra se deve ao procedimento de lavagem do transformador e enchimento do mesmo por termo vácuo, como disposto na seção 3.5.

Verificando os valores apresentados ao longo da análise, o investimento necessário para a implantação desta inovação na cooperativa em estudo a partir da substituição na manutenção seria de R\$ 16.179,00 reais a mais do que já é investido, ou seja, R\$ 22.780,00 reais/ano.

O uso do óleo vegetal se justifica, uma vez que o investimento na aquisição e na substituição do óleo na manutenção trará benefícios, principalmente em se falando de meio ambiente e segurança.

A cooperativa em estudo deve se manter sempre atenta aos cuidados com o meio ambiente. A legislação relacionada à proteção e preservação deste meio é cada vez mais rigorosa, tendo como intuito a prevenção de futuros impactos e também serve para instruir a sociedade a pensar e se conscientizar perante as questões ambientais. Não é de hoje que desastres com derramamento de óleo acontecem e altíssimas multas são aplicadas pelos órgãos ambientais na tentativa de recuperar o dano provocado, além de colocar em risco a saúde dos seres humanos caso, por exemplo, o óleo destes transformadores venha escoar para um riacho.

Pensando nisto e em todas as vantagens técnicas (resistência ao fogo, aumento da vida útil do papel Kraft e conseqüentemente do transformador), de segurança (contra incêndio, menor risco de acidente no manuseio e armazenamento, menor risco patrimonial) e ambientais (biodegradável, renovável, reciclável, degrada rapidamente no solo e na água, não tóxico), o investimento é muito positivo e justificável.

5 CONCLUSÃO

Por meio de pesquisas em artigos, teses e publicações, informações mais aprofundadas foram apresentadas durante o desenvolvimento do trabalho, a cerca dos problemas e características relacionadas ao óleo mineral nos transformadores de energia elétrica. O uso deste fluido isolante deve ser acompanhado, em decorrência de o equipamento ser instalado em postes e estar sujeito a qualquer tipo de intempéries da natureza, como descargas atmosféricas, por exemplo, ou até mesmo podemos citar as sobrecargas de energia. As consequências às quais o transformador pode vir a sofrer incluem os vazamentos de OMI. Estes vazamentos, sendo eles em pequenas ou grandes proporções podem vir a contaminar o solo, bem como os recursos hídricos, gerando passivos ambientais.

Em contrapartida o óleo vegetal veio como grande substituto do OMI, devido as suas favoráveis características técnicas e ambientais. Possuem grandes vantagens por ter menos risco com acidentes no manuseio e armazenamento, não tóxico, dentre outros, mas principalmente por sua rápida biodegradação. Vale ressaltar ainda, que os transformadores elétricos com OMI estão mais propícios a ocorrência de incêndios, realidade esta que com a utilização do OVI se torna reduzida, já que os fluidos a base de ésteres naturais possuem maior resistência a incêndios, uma vez que seu ponto de combustão é maior com relação ao fluido mineral.

Pesquisadores, a cada ano, intensificam suas pesquisas quanto à utilização do OVI em transformadores de energia, a fim de buscar tecnologias que visam melhorar o desempenho do OVI, quando em contato com as ferramentas internas do transformador. Aliar desenvolvimento com sustentabilidade vem se tornando desafios, os quais vindo sendo conquistados, para cientistas, pesquisadores e, inclusive, fabricantes destes equipamentos, uma vez que estes já fabricam transformadores tendo como seu meio isolante, o OVI.

Acompanhar as tendências de mercado engajadas com as preocupações ambientais, já é realidade para muitas empresas fabricantes, e aqui não cita-se apenas para equipamentos elétricos, mas de todos os ramos como plásticos, cerâmico, dentre outros. A legislação é cada vez mais exigente e, na

busca por atendê-las, várias inovações surgiram no mercado a fim de aprimorar o que já temos e transforma-los em “produtos verdes”. Pensando nisto, fabricantes de transformadores elétricos possuem projetos para implantação destes equipamentos utilizando OVI, em ilhas. A iniciativa além de gerar muita credibilidade, promove a conscientização ambiental.

O investimento para adotar esta nova tecnologia na cooperativa em estudo, o qual foi apresentado neste trabalho, se faz necessário quando pensamos em comprometimento socioambiental e desenvolvimento sustentável. Colocar o OVI como fluido dos transformadores quanto implantar quaisquer outros mecanismos ambientais mais seguros, geram custos. Entretanto, a conscientização aliada à legislação cada vez mais rígida, exige que melhorias sejam aplicadas em todos os ramos possíveis, dentre eles, a de distribuição de energia elétrica. Vindo ao encontro deste, os transformadores com óleo vegetal já são uma realidade em outros estados e em comparação aos custos de aquisição do OVI, com os do OMI, o investimento é de aproximadamente 20% a mais, o qual se justifica comparado com o ganho ambiental.

Este trabalho vem a contribuir para a COOPERCOCAL, que com a instalação do seu primeiro transformador a OVI, esta servindo de exemplo para que outras cooperativas energéticas também possam estar implantando esta inovação em sua rede de distribuição. Desta forma, a cooperativa em estudo assume sua responsabilidade socioambiental, mitigando os possíveis impactos ambientais provenientes do uso de transformadores.

Ainda podemos ressaltar a criação da identificação verde no transformador em estudo, o qual pode estar se tornando padrão para os futuros transformadores que possuam o mesmo componente vegetal. Dentre estes, a elaboração do Relatório de Acompanhamento de Transformadores Elétricos (RATE) vem para auxiliar no controle das manutenções e/ou possíveis adaptações que o transformador possa vir a sofrer, além de manter um histórico do equipamento arquivado na COOPERCOCAL.

Sugerem-se como trabalhos futuros, aprofundar as pesquisas com relação às alterações encontradas na amostra de óleo vegetal do transformador, os quais não foram possíveis devido ao tempo de realização deste trabalho, bem como um estudo sobre a possibilidade de utilizar/fabricar um produto para limpeza

do transformador ao retirar o OMI, já que atualmente o transformador é lavado com o fluido vegetal, a fim de se retirar o OMI impregnado na parte interna do equipamento.

Ainda pode-se realizar um levantamento dos melhores locais, como perto de rios, por exemplo, para realizar a substituição dos transformadores na área de permissão da cooperativa em estudo, com o objetivo de dar preferência aos locais com maior risco de contaminação em casos de vazamento.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **ABNT NBR 10576-88**: Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos: Diretrizes para supervisão e manutenção. 1. ed. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **ABNT NBR 15422-06**: Óleo vegetal isolante para equipamentos elétricos. 1. ed. Rio de Janeiro, 2006.

ABRADEE (Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica). **A distribuição de energia**. Brasília: Distrito Federal, 2013. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>>. Acesso em: 04 ago. 2013.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, ANEEL, 2008. 236 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689>. Acesso em: 19 jul. 2013.

ARAUJO, D. C. P.; MARTINS, A. J. A. L.; SILVA, N. **As vantagens da revitalização de transformadores de potência utilizando repotenciação e óleo vegetal**. Minas Gerais, 2006. Disponível em: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/SBSE/anais/132_sbse2006_final.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2013.

BIOTEMP. **Fluído isolante dielétrico biodegradável**. São Paulo: ABB, 2013. Disponível em: <<http://www.cepel.br/workshop2/ABB-BR-03-BIOTEMP-OleoVegetal-rev0.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2013.

BIOVOLT. **Boletim técnico nº1.**, Paraná, 27 jul. 2012.

BRAIN, M. How Stuff Works. **Como funcionam as redes elétricas**, [S.l.], 03 nov. 2009. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/redes-eletricas.htm>>. Acesso em: 18 jul. 2013.

CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais). **Cemig desenvolve transformador “verde” e inédito no mundo**. Minas Gerais, 19 mar. 2012. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/cemig_desenvolve_transformador_verde.aspx>. Acesso em: 20 ago. 2013.

COOPERCOCALa. **Relatório de responsabilidade socioambiental 2012**. Cocal do Sul, 2012. 42 p. Disponível em: <<http://www.coopercocal.com.br/site/wp-content/uploads/2012/08/Relat%C3%B3rio-de-Responsabilidade-Socio-Ambiental-2012.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2013.

COOPERCOCALb. **Relatório do conselho de administração 2012**. Cocal do Sul, 2012. 112 p. Disponível em: <<http://www.coopercocal.com.br/site/wp-content/uploads/2012/08/Relat%C3%B3rio-Anual-do-Conselho-de-Administra%C3%A7%C3%A3o-2012.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2013.

COOPERCOCALc. **Registo de acompanhamento de transformador de energia**: transformador 022. r. 1. Cocal do Sul, 2013.

COOPER POWER SYSTEMS. **Fluido Envirotemp FR3**. Pewaukee, p. 1, 2007. Disponível em: <http://cm.transformadores.net/fr3/Aceite_vegetal_FR3.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2013.

DIAGNOa. **Resultado de ensaio**: amostra 7784/2013. Curitiba, mar. 2013.

DIAGNOb. **Resultado de ensaio**: amostra 9070/2013. Curitiba, mar. 2013.

FECOERUSC (Federação das Cooperativas de Energia do Estado de Santa Catarina). **Ensaio de rotina de transformadores**. Içara, 2013.

FRANCH, V.S. **Avaliação da compatibilidade de óleos vegetais isolantes com materiais internos do transformador**. Curitiba: UFPR, 2010. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2010. 128 p. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/182.pdf>>. Acesso em: 09 jul. 2013.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Censo demográfico 2010**. Brasil, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>>. Acesso em: 05 ago. 2013.

JUNIOR, S. B. G. **Avaliação técnica e econômica da aplicação de óleo vegetal de crambe como isolante elétrico em comparação com óleo de soja**. Curitiba: IEP, LACTEC, PRODETEC, 2010. Dissertação de mestrado, Instituto de Tecnologia do Paraná, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Tecnologia, 2010. 138 p. Disponível em: <<http://www.lactec.org.br/mestrado/dissertacoes/arquivos/SilasGomes.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2013.

MACHADO, R.M. **Estudo de viabilidade técnica e econômica de transformadores**: um estudo de caso em uma cooperativa de distribuição. Criciúma: SATC, 2012. 79 p. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade SATC, 2012.

MANDARINO, J. M. G.; ROESSING, A. C. **Tecnologia para produção do óleo de soja**: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos. Londrina: Embrapa, 2001. 40 p. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPSO/18455/1/doc171.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2013.

MARTINS, M. A. G. **Será o óleo vegetal um possível substituto do óleo mineral para transformadores:** comparação da degradação térmica do sistema óleo vegetal/papel kraft com a do óleo mineral/papel kraft. Portugal, v. 20, n. 3/4, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.oces.mctes.pt/pdf/ctm/v20n3-4/v20n3-4a04.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2013.

MINERALTEC. **Biovolt – óleo vegetal** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <pedro@mineraltec.com.br> em 12 ago. 2013.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Estudo Sobre as Bifenilas Policloradas:** proposta para atendimento á “convenção de estocolmo”. Brasil, 2012. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_prorisc_upml/_arquivos/estudo_sobre_as_bifenilas_policloradas_82.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2013.

MME (Ministério de Minas e Energia). **Balanco Energético Nacional 2013.** Brasília: Distrito Federal, 2013. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2013.

OCDE (Organisation for Economic Co-operation and Development. Electricity Generation). In.: **OECD Factbook 2013:** Economic, Environmental and Social Statistics. 2013. 4p. Disponível em: <http://www.oecd-ilibrary.org/economics/oecd-factbook_18147364>. Acesso em: 06 ago. 2013.

OLIVEIRA, A. A. L. **Utilização de óleos biodegradáveis em transformadores de distribuição.** Portugal: UP, 2005. Trabalho de conclusão de curso, Universidade do Porto, 2005. 90 p. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~ee99254/images/Relatorio_PSTFC_final.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2013.

ROMAGNOLE. **Relatório de ensaios de transformadores.** Mandaguari, r. 2, nov.2012.

SANTOS, A.; NOGAWA, E. C.; MENDES, J. C. **Óleo vegetal:** aplicação em transformadores de 145kV, 100% a óleo vegetal. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 19., 2007, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Rio de Janeiro: ABB, 2007. p. 3. Disponível em: <<http://www.cepel.br/workshop2/ABB-BR-04-SNPTEE2007-OleoVegetalAplicacaoTransformador145kV.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

SIGMA. Soluções em energia. **O transformador.** 2013. Disponível em: <<http://www.sigmatransformadores.com.br/o-transformador/>>. Acesso em: 18 jul. 2013.

SILVA, C. R. et al. **Caracterização físico-química e dielétrica de óleos biodegradáveis para transformadores elétricos**. REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL. Campina Grande, v. 16, n. 2, fev. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662012000200015&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 jul. 2013.

STOCCO, M. B. C. **Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica**. Curitiba: UFPR, 2009. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2009. 129 p. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/165.pdf>>. Acesso em: 09 jul. 2013.

TULIO, L. **Estudo do envelhecimento acelerado de óleo vegetal isolante em escala laboratorial**. Curitiba: IEP, LACTEC, 2008. Dissertação de mestrado, Instituto de Tecnologia do Paraná e Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2008. 123 p. Disponível em: <<http://www.lactec.org.br/mestrado/dissertacoes/arquivos/LucianeTulio.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2013.

TOLMASQUIM, M. T. **Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil**. São Paulo, v. 26, n. 74, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 05 ago. 2013.

UHREN, W. **Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao óleo mineral**. Curitiba: IEP, LACTEC, PRODETEC, 2007. Dissertação de mestrado, Instituto de Tecnologia do Paraná, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Tecnologia, 2007. 142 p. Disponível em: <<http://www.lactec.org.br/mestrado/dissertacoes/arquivos/WilsonUhren.pdf>>. Acesso em: 04 ago. 2013.

VIANA, R. L. **Aula 11: Dielétricos**. Paraná: UFPR, 2005. Disponível em: <http://fisica.ufpr.br/viana/fisicab/aulas2/a_11.htm>. Acesso em: 29 nov. 2013.

WILHELM, H. M. et al. **Aspectos relacionados com a utilização de óleo vegetal isolante no Brasil**. In: WORKSPOT, 4., 2006, Recife. Workshop... Recife: LACTEC, COPEL, 2006. p. 4. Disponível em: <http://www.biovolt.com.br/conteudo/artigos_cientificos/IV%20WORKSPOT%20-%20International%20Worskshop%20on%20Power%20Transformers%20-%20Trabalho%20tecnico%20-%20HELENA%20WILHELM.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2013.

WILHELM, H. M. et al. **Avaliação da extensão da vida útil do papel kraft isolante em ésteres naturais**: óleo vegetal isolante. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 21., 2011, Florianópolis. Anais eletrônicos... Florianópolis: DIAGNO, ELEKTRO, 2011. p. 2. Disponível em: <http://biovolt.com.br/conteudo/artigos_cientificos/2011%20XXI%20SNPTEE.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2013.

WILHELM, H. M.; TULIO, L.; UHREN, W. **Produção e uso de óleos vegetais isolantes no setor elétrico**. [S.l.], 2009. Disponível em: <http://www.brasilengenharia.com.br/ed/592/Art_Eng_Eletrica_2.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2013.