

# Óleos ecológicos para Transformadores de Distribuição

Mônica B. C. Stocco, Helena M. Wilhelm, Marcelo A. Ravaglio, Luciane Tulio, Suely M. de Oliveira, Guilherme B. Stocco, Douglas A. Batista, Ricardo J. Ferracin, Silas B. Gomes Junior, Wilson Uhren

**Resumo** – O trabalho de pesquisa teve por objetivo avaliar o potencial de aplicação de ésteres naturais (óleos vegetais), de origem nacional, como os óleos de girassol, soja, arroz e mamona, como fluidos isolantes em transformadores de distribuição. O desempenho desses óleos foi comparado aos dos óleos mineral e vegetais isolantes comercialmente disponíveis. Avaliou-se as estabilidades oxidativas, a influência no processo de envelhecimento do papel isolante, a formação de gases dissolvidos após submissão do óleo a diferentes níveis de esforços elétricos e térmicos e a suportabilidade elétrica dos transformadores de distribuição. Os resultados mostraram que os óleos não são indicados para uso como fluido isolante porque suas características não atenderam as exigências elétricas solicitadas. Para serem utilizados como fluidos isolantes devem ser processados adequadamente com o objetivo de ajustar suas características às exigências dos equipamentos elétricos. Este estudo mostrou que, somente a aditivação não resultou em melhoria de desempenho dos óleos ensaiados.

**Palavras-chave** – equipamento elétrico, óleo ecológico, óleo isolante, óleo vegetal isolante, transformador.

## I. INTRODUÇÃO

Recentemente têm sido introduzidos no mercado internacional óleos vegetais isolantes ou ésteres naturais, denominados de fluidos ecologicamente corretos devido a sua característica biodegradável e renovável, mas que, semelhante aos sintéticos, ainda apresentam um custo muito elevado limitando sua aplicação no setor elétrico.[1 e 2] E, por conseguinte, há pouco conhecimento técnico quanto ao seu desempenho em campo e quanto a definição de valores limites provisórios para os ensaios de acompanhamento da condição

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Os autores agradecem a COPEL, pela bolsa de mestrado concedida a aluna Monica B. C. Stocco e ao CNPq, pela concessão da bolsa de produtividade em pesquisa a Dra. Helena Maria Wilhelm.

Wilson Uhren, e Silas B. Gomes Junior trabalham na COPEL Distribuição S.A. (e-mails: uhren.wilson@copel.com; silasjr@copel.com).

Luciane Tulio trabalha na COPEL Geração e Transmissão S.A. (e-mail: luciane.tulio@copel.com).

Ricardo J. Ferracin, Douglas A. Batista, Guilherme B. Stocco, Helena M. Wilhelm, Marcelo A. Ravaglio, Suely M. de Oliveira trabalham no LACTEC (e-mails: rferracin@lactec.org.br; batista@lactec.org.br; heleenaw@lactec.org.br; stocco@lactec.org.br; marcelo@lactec.org.br; suely@lactec.org.br)

Mônica B. C. Stocco trabalhou como bolsista de mestrado. (e-mail: mbceccato@gmail.com).

do fluido em uso (manutenção preditiva). Baseado neste contexto, foi desenvolvido o projeto de pesquisa “Óleos ecológicos para Transformadores de Distribuição” (código ANEEL: 2866-019-2005), concluído em 2009, desenvolvido pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) em parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). O aspecto inovador da pesquisa consistiu na investigação da suportabilidade elétrica de novos transformadores de distribuição, isolados com ésteres naturais (óleos vegetais - OV), como de soja, arroz, girassol e mamona, aditivados em laboratório, em comparação ao desempenho de transformadores isolados com ésteres naturais isolantes (óleos vegetais isolantes - OVI), comercialmente disponíveis (BIOVOLT A e ENVIROTEMP FR3), e ao óleo mineral isolante (OMI), visando a indicação de matérias-primas alternativas para produção de fluidos vegetais isolantes no Brasil.

Os principais objetivos da pesquisa foram:

- Estudar a estabilidade oxidativa de ésteres naturais (óleos vegetais), de origem nacional, obtidos a partir do girassol, da soja, do arroz e da mamona, comparativamente aos óleos vegetais isolantes comercialmente disponíveis e ao óleo mineral isolante (OMI), tradicionalmente utilizado como fluido isolante em transformadores de distribuição.
- Avaliar a influência dos de ésteres naturais (óleos vegetais) de origem nacional, obtidos a partir do girassol, da soja, do arroz e da mamona, no processo de envelhecimento do papel isolante em comparação aos óleos vegetais isolantes comercialmente disponíveis e ao OMI.
- Avaliar a suportabilidade elétrica de novos transformadores de distribuição, isolados com os ésteres naturais (óleos vegetais), de origem nacional, como de girassol, soja, arroz e mamona, comparativamente aos óleos vegetais isolantes e ao OMI.

Para o desenvolvimento da pesquisa, inicialmente foram adquiridos e analisados por diferentes ensaios físico-químicos os ésteres naturais (óleos de soja, arroz, girassol e mamona) e os ésteres naturais isolantes (BIOVOLT A e ENVIROTEMP FR3). Esses óleos foram aditivados com diferentes aditivos antioxidantes, sendo o desempenho do aditivo adicionado avaliado pelo método do Rancimat. Na sequência, foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado com esses óleos, na presença e ausência de papel Kraft isolante, sendo monitorada a condição do óleo, a formação de compostos furânicos e o grau de polimerização do papel (GP). E, por último, os diferentes óleos foram usados como fluidos isolantes em transformadores de distribuição (15 kV e 75 kVA). Todos os transformadores, independente

do desempenho nos ensaios elétricos realizados, foram, ao final da pesquisa, instalados na rede de distribuição da concessionária.

Ao final da pesquisa, a concessionária teve em mãos uma série de informações técnicas que lhe permitiram avaliar a potencialidade de emprego dos ésteres naturais, de origem nacional, sem tratamento específico apenas aditivados, como fluidos isolantes em transformadores de distribuição, em comparação aos ésteres naturais isolantes (óleos vegetais isolantes) comercialmente disponíveis e ao OMI, tradicionalmente utilizado.

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A metodologia empregada, os resultados obtidos e os benefícios da pesquisa estão descritos nas etapas relacionadas na sequência.

### A. Aquisição dos Fluidos Isolantes

O óleo mineral isolante (OMI) utilizado nesta pesquisa foi o AV-60-IN, da PETROBRAS.

Os óleos de girassol (marca: Salada), soja (marca: Soja) e arroz (marca: Carreteiro) foram adquiridos em supermercados. O óleo de mamona foi adquirido da agricultura familiar, no Ceará. Ao longo deste trabalho, os óleos de soja, girassol, arroz e mamona serão denominados por OV-1, OV-2, OV-3 e OV-4, respectivamente.

O óleo vegetal isolante (OVI) ENVIROTEMP®FR3 foi adquirido da COOPER POWER SYSTEMS e o BIOVOLT®A da MINERALTEC.

### B. Caracterização Físico-Química dos Óleos Vegetais

Os óleos vegetais usados no projeto foram devidamente caracterizados por meio dos ensaios descritos na norma ABNT NBR 15422 (Tabelas I e II), que trata da especificação de óleo vegetal isolante novo. O OMI foi devidamente caracterizado, atendendo as exigências da Resolução ANP nº 25 de 09.09.2005.

Os valores destacados em itálico e negrito são aqueles que estão fora dos limites estipulados nessa norma para óleo vegetal isolante novo. Nenhum dos óleos vegetais de origem nacional atendeu na íntegra os valores limites estipulados na norma ABNT NBR 15422 (Tabela I). Todos os óleos vegetais nacionais excederam o teor de água limite. No entanto, este parâmetro pode facilmente ser corrigido por meio de um processo de secagem adequado (materiais adsorventes ou termovácuo). O ponto de fluidez também pode ser facilmente reduzido pela adição de aditivos específicos para esta finalidade. O único parâmetro que necessita de uma análise mais detalhada é o fator de perdas dielétricas, que não foi atendido pelos óleos OV-3 e OV-4 em todas as temperaturas ensaiadas. Na verdade, o impacto deste incremento no desempenho do óleo como fluido isolante ainda não foi elucidado na literatura científica. Os óleos OV-1 e OV-3 não atenderam ao valor limite para o ensaio de determinação do índice de neutralização. Todos os óleos vegetais de origem nacional investigados neste trabalho apresentaram valores de rigidez dielétrica dentro do valor limite estipulado na norma

ABNT NBR 15422 (Tabela I). E, todos os óleos analisados podem ser considerados fluidos de segurança, pois apresentaram pontos de combustão superiores a 300 °C. Por apresentar parâmetros físico-químicos fora dos valores limites estipulados na norma ABNT NBR 15422, como índice de neutralização, fator de perdas dielétricas e viscosidade, o óleo OV-4 (óleo de mamona) foi descartado da presente pesquisa.

Os óleos vegetais isolantes comerciais atenderam a especificação para óleo novo descrita na norma ABNT NBR 15422 (Tabela II).

**Tabela I.** Caracterização físico-química dos óleos vegetais sob investigação.

Ensaio	Valor limite	Óleo Vegetal			
		OV-1	OV-2	OV-3	OV-4
Índice de neutralização, (mg KOH/g óleo)	0,06 máx	<b>0,08</b>	0,04	0,06	<b>1,51</b>
Teor de água (ppm m/m)	200	<b>663</b>	<b>581</b>	<b>610</b>	<b>1400</b>
Densidade a 20 °C, (g/ml)	0,96 máx	0,9205	0,9198	0,9181	0,9598
Fator de perdas dielétricas a 25°C, (%)	0,20 máx	0,16	0,15	<b>0,36</b>	<b>0,48</b>
Fator de perdas dielétricas a 90°C, (%)	3,6 máx	2,81	1,95	<b>5,97</b>	<b>28,4</b>
Fator de perdas dielétricas a 100°C (%)	4,0 máx	3,17	2,10	<b>6,96</b>	<b>39,5</b>
Ponto de fulgor, (°C)	275 mín	318	318	312	290
Ponto de combustão, (°C)	300 mín	352	357	350	328
Rigidez dielétrica, (kV)	30 mín	42	37	37	41
Viscosidade a 40°C, (cSt)	50 máx	33,1	32,3	37,5	<b>253,9</b>
Viscosidade a 100°C, (cSt)	15 máx	7,8	7,7	8,5	<b>19,3</b>
Ponto de fluidez, (°C)	- 10 máx	-12	-15	<b>-6</b>	-15

### C. Ensaios de Envelhecimento Acelerado dos Óleos Vegetais em Escala Laboratorial.

Foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado dos óleos BIOVOLT A, ENVIROTEMP®FR3, soja, girassol e arroz sem aditivação (800 mL), a 95 °C, sob fluxo constante de oxigênio (1 L/h), na presença de cobre metálico (3 m de fio de 1 mm de diâmetro). Amostras de óleo foram retiradas em intervalos regulares de tempo para monitorar seu envelhecimento por meio de análises físico-químicas.

**Tabela II.** Caracterização físico-química dos óleos vegetais isolantes.

Ensaio	Valor limite	Óleo Vegetal Isolante	
		ENVIROTEMP FR3®	BIOVOLT®A
Índice de neutralização, (mg KOH/g óleo)	0,06 máx	0,05	0,01
Teor de água (ppm m/m)	200	64	55
Densidade a 20 °C,(g/ml )	0,96 máx	0,9200	0,9182
Fator de perdas dielétricas a 25°C, (%)	0,20 máx	0,20	0,03
Fator de perdas dielétricas a 90°C, (%)	3,6 máx	3,32	0,40
Fator de perdas dielétricas a 100°C (%)	4,0 máx	4,00	0,70
Ponto de fulgor,(°C)	275 mín	312	310
Ponto de combustão, (°C)	300 mín	346	340
Rigidez dielétrica,(kV)	30 mín	55	49
Viscosidade a 40°C, (cSt)	50 máx	36,06	31,53
Viscosidade a 100°C, (cSt)	15 máx	8,45	7,66
Ponto de fluidez,(°C)	- 10 máx	-21	-12

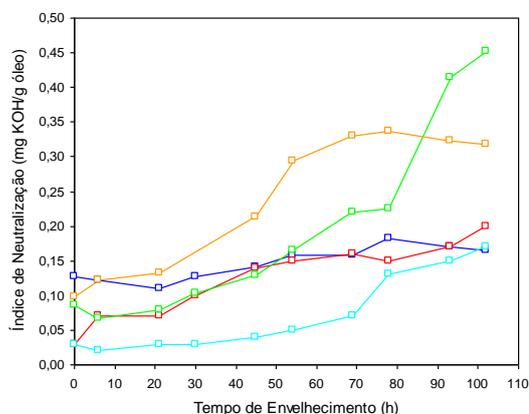
Devido ao alto teor de água encontrado nos óleos de soja, girassol e arroz, um procedimento de secagem foi utilizado anteriormente ao ensaio de envelhecimento: secagem por contato utilizando sílica gel pelletizada como agente secante, na proporção de 1g de sílica para 100 mL de óleo, sob agitação constante de 500 rpm, durante 6 horas.

Por apresentar valores físico-químicos fora dos parâmetros estipulados pela ABNT NBR 15422, optou-se por descartar o óleo de mamona dos ensaios, devido, principalmente, a sua alta viscosidade (Tabela I).

Os óleos vegetais de origem nacional (OV-1, OV-2 e OV-3) foram secos em laboratório e, após, submetidos ao envelhecimento acelerado. Os óleos comerciais foram envelhecidos da forma como foram recebidos. Os resultados obtidos para os óleos envelhecidos estão expressos nos gráficos mostrados nas Figuras 1, 2 e 3.

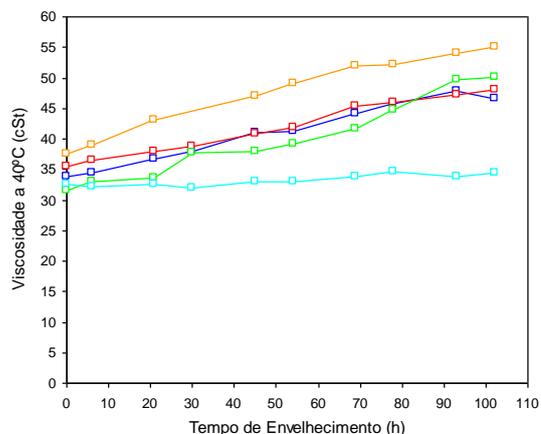
O óleo OV-2 apresentou, após 80 horas de envelhecimento (Figura 1), um aumento abrupto no índice de neutralização comparado aos demais óleos vegetais que apresentaram um aumento gradativo em função do tempo de envelhecimento. O óleo OV-3 apresentou um aumento gradativo inicial seguido por uma estabilização do índice de neutralização comparado aos demais

óleos (Figura 1). O produto comercial BIOVOLT®A apresentou os menores valores para este parâmetro em comparação aos demais óleos.



**Figura 1.** Efeito do envelhecimento acelerado sobre o índice de neutralização para os óleos vegetais: (□) OV-1, (□) OV-2, (□) OV-3, (□) ENVIROTEMP®FR3 e (□) BIOVOLT®A.

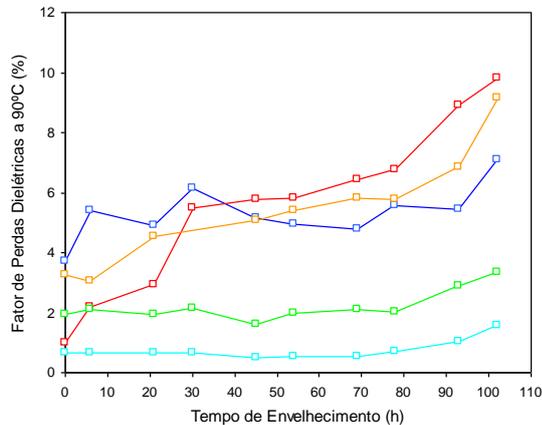
O comportamento da viscosidade (Figura 2) foi similar para os diferentes óleos testados. O OV-3 apresentou viscosidades superiores enquanto que o BIOVOLT®A apresentou valores inferiores em comparação aos demais óleos investigados.



**Figura 2.** Efeito do envelhecimento acelerado sobre a viscosidade a 40 °C para os óleos vegetais: (□) OV-1, (□) OV-2, (□) OV-3, (□) ENVIROTEMP®FR3 e (□) BIOVOLT®A.

Para o ensaio de fator de perdas dielétricas (Figura 3) os óleos OV-3 e ENVIROTEMP®FR3 mostraram os maiores valores para as perdas dielétricas dentre os óleos investigados, atingindo 9,1 e 9,8%, respectivamente, ao final do envelhecimento. Os valores obtidos para o OV-2 não variaram significativamente, apresentando valores na faixa de 2%. O OV1 apresentou valores que variaram na faixa de 3 a 7%. O produto comercial BIOVOLT®A apresentou os menores valores em comparação aos demais óleos, chegando a 1,6% ao final do envelhecimento. As perdas dielétricas, expressas em %, correspondem às medidas das perdas elétricas em um líquido isolante quando este é submetido a

um campo elétrico alternado e estão relacionadas com a quantidade de energia dissipada pelo material sob a forma de calor [3]. Dessa forma, sob o ponto de vista químico, as perdas dielétricas correspondem diretamente à corrente dissipada no óleo e, indiretamente, aos produtos polares e polarizáveis, partículas metálicas ou não-metálicas [3].



**Figura 3.** Efeito do envelhecimento acelerado dos Óleos sobre o Fator de Perdas Dielétricas a 90°C para os óleos vegetais: (□) OV-1, (□) OV-2, (□) OV-3, (□) ENVIROTEMP®FR3 e (□) BIOVOLT®A.

#### D. Avaliação de Aditivos na Estabilidade Térmica dos Óleos Vegetais

Aditivos antioxidantes foram testados visando melhorar a estabilidade térmica dos óleos vegetais. Para isto, adotou-se como parâmetro a estabilidade à oxidação de acordo com a norma Européia prEN 14112/2001 [4] que trata da determinação da estabilidade à oxidação pelo método Rancimat. O aparelho Rancimat 743 usado nestes ensaios foi gentilmente emprestado pela empresa *Metrohm Ion Analysis*.

Seis aditivos antioxidantes foram misturados aos óleos vegetais. Como ainda não existe normatização para aditivação de OVI, a concentração utilizada baseou-se na resolução nº 25 de 9/9/2005 da ANP (Agência Nacional de Petróleo) que estabelece concentração máxima de aditivo inibidor ao OMI igual a 3000 ppm.

Na Tabela III estão listados os aditivos antioxidantes utilizados e suas concentrações.

**Tabela III.** Aditivos antioxidantes utilizados nos óleos vegetais:

Aditivo antioxidante	Concentração (ppm)
$\alpha$ - tocoferol	3000
BHA (2 e 3 <i>terc</i> -butil-4-hidroxianisol)	3000
BHT (di- <i>terc</i> -butil metil fenol)	3000
TBHQ (butil hidroquinona <i>terceária</i> )	3000
Bayox Plus	3000
TBHQ + Ácido Cítrico	TBHQ = 2000 Ácido Cítrico = 1000

O ensaio do Rancimat baseia-se no arraste dos ácidos voláteis, produzidos no decorrer do aquecimento do óleo sob fluxo de ar ambiente seco para um frasco contendo água destilada e um eletrodo condutivimétrico [4].

Os óleos vegetais previamente secos foram aditivados com TBHQ na concentração de 3000ppm. Este aditivo antioxidante foi escolhido baseado nos ensaios comparativos realizados por apresentar maior estabilidade à oxidação de acordo com a norma Européia prEN 14112/2001 [4].

Foram realizados ensaios de envelhecimento acelerado nestes óleos aditivados a 95 °C por 103 horas, com borbulhamento de oxigênio. Após o envelhecimento, foram realizados ensaios de fator de perdas dielétricas a 90 °C, viscosidade a 40 °C e índice de neutralização em alíquotas destes óleos. Estes resultados foram comparados aos obtidos no óleo ENVIROTEMP® FR3 e nos óleos sem aditivação.

Na Tabela IV estão apresentados os períodos de indução dos óleos vegetais em estudo em comparação aos OVIs comerciais (BIOVOLT A e ENVIROTEMP FR3). O aditivo TBHQ proporcionou aos óleos em estudo, períodos de indução semelhantes ao do óleo comercial BIOVOLT A.

**Tabela IV.** Comparativo entre o tempo de Indução dos óleos estudados aditivados com TBQH, os óleos comerciais.

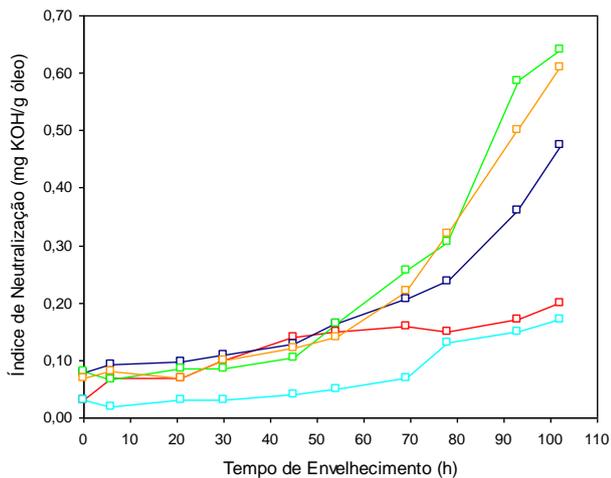
Óleo	Período de Indução (h)
OV-1	12,5
OV-2	12,0
OV-3	14,6
ENVIROTEMP FR3	3,3
BIOVOLT A	14,8

Após aditivação com aditivos específicos, os óleos OV-1, OV-2 e OV-3 foram submetidos ao envelhecimento acelerado. Os óleos vegetais isolantes comerciais foram envelhecidos nas mesmas condições para efeito comparativo. Os resultados obtidos para o envelhecimento dos óleos vegetais aditivados estão mostrados nas Figuras 4, 5 e 6.

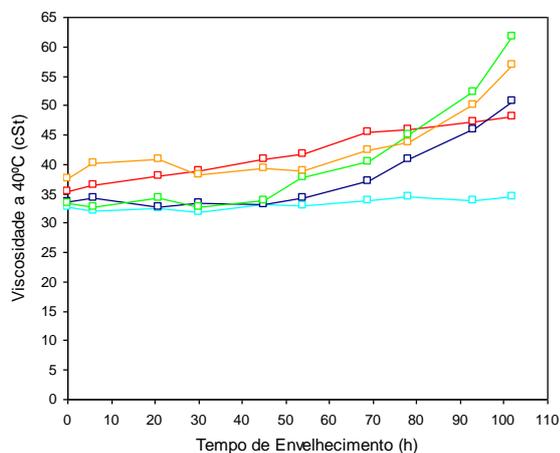
Quanto ao índice de neutralização (Figura 4), os óleos vegetais OV-1, OV-2 e OV-3 apresentaram aumentos abruptos do mesmo em comparação aos óleos vegetais isolantes comerciais (BIOVOLT®A e ENVIROTEMP®FR3), que apresentaram pequenas variações em função do tempo de envelhecimento. Entre os óleos comerciais, o BIOVOLT®A apresentou o melhor desempenho para este parâmetro.

Para a viscosidade não foram observadas variações significativas, tendo o BIOVOLT®A apresentado os menores valores em comparação aos demais óleos (Figura 5).

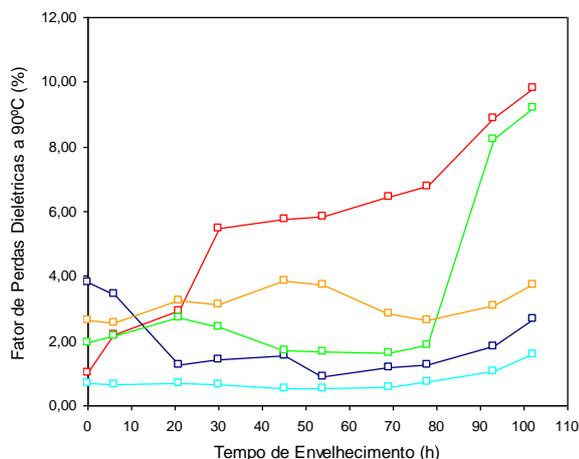
O ensaio de fator de perdas dielétricas apresentou as maiores variações, tendo o ENVIROTEMP®FR3 apresentado ao final do envelhecimento, os maiores valores em comparação aos demais óleos (Figura 6). Em comparação aos óleos OV-1 e OV-3, o óleo OV-2 apresentou os melhores resultados para este ensaio, mas os valores obtidos para este óleo ainda foram superiores aos obtidos para o BIOVOLT®A.



**Figura 4.** Efeito do envelhecimento acelerado sobre o Índice de Neutralização para os óleos aditivados: (□) OV-1, (□) OV-2, (□) OV-3, (□) ENVIROTEMP®FR3 e (□) BIOVOLT®A.



**Figura 5.** Efeito do envelhecimento acelerado sobre a Viscosidade a 40°C para os óleos aditivados: (□) OV-1, (□) OV-2, (□) OV-3, (□) ENVIROTEMP®FR3 e (□) BIOVOLT®A.



**Figura 6.** Efeito do envelhecimento acelerado sobre o Fator de Perdas Dielétricas a 90°C para os óleos aditivados: (□) OV-1, (□) OV-2, (□) OV-3, (□) ENVIROTEMP®FR3 e (□) BIOVOLT®A.

### E. Ensaio de Envelhecimento simulado do Papel Isolante em Óleos Vegetais

Para avaliar a influência dos diferentes tipos de óleos vegetais (soja, arroz e girassol) no processo de envelhecimento simulado do papel isolante, amostras de papel isolante foram dispostas dentro dos respectivos fluidos vegetais sob investigação. Foi avaliado o efeito da temperatura no processo de envelhecimento do papel, pelo monitoramento dos compostos furânicos e do grau de polimerização da celulose (GP). Paralelamente, foi analisado o comportamento do sistema de referência à base de OMI que serviu de modelo para a discussão dos resultados obtidos para os fluidos vegetais.

Amostras de 800 mL dos óleos vegetais (ENVIROTEMP®FR3, BIOVOLT®A, soja, girassol e arroz) foram colocadas para envelhecer, a 95, 130 e 140 °C, sob fluxo constante de oxigênio (1 L/h), na presença de cobre metálico (3 m de fio de um 1 mm de diâmetro) e de papel Kraft isolante (21,6g). Amostras de óleo e do papel foram retiradas em intervalos regulares de tempo para monitorar a degradação do papel Kraft pelos ensaios de determinação de compostos furânicos, por cromatografia em fase líquida e do grau de polimerização da celulose (GP).

As Figuras 7 e 8 têm o objetivo de ilustrar o andamento dos ensaios de envelhecimento a 140 °C.



**Figura 7.** Amostras dos óleos com papel Kraft isolante.



**Figura 8.** Banho termostabilizado a 140 °C para simulação de envelhecimento acelerado em OVIs com borbulhamento de oxigênio.

A extração dos compostos furânicos foi realizada misturando-se 6 ml da amostra de cada óleo com 4 ml de solução 25% metanol sob agitação constante por 10 minutos, em

rotação 180 rpm. A mistura então foi centrifugada 2 vezes por 10 minutos com rotação de 270 rpm e separada em funil de separação por decantamento. Foi injetado no cromatógrafo 20 µL da amostra, tendo como efluente solução de 20% de acetonitrila.

As amostras coletadas dos óleos vegetais envelhecidos a 95 °C não apresentaram traços de compostos furânicos, o que não permitiu monitorar o envelhecimento do papel Kraft isolante nestes óleos. Na falta de compostos furânicos nas amostras envelhecidas a 95 °C, optou-se por repetir o envelhecimento dos óleos, nas mesmas condições, a temperatura de 130 °C. e a esta temperatura, também não foram detectados traços de compostos furânicos.

Considerando que os ensaios de envelhecimento realizados anteriormente a 130 °C não apresentaram traços de compostos furânicos, estabeleceu-se repetir tais ensaios a uma temperatura mais elevada, a 140 °C.

Nas amostras dos óleos OV-1, OV-2, OV-3, BIOVOLT A, ENVIROTEMP FR3 e OMI envelhecidas a 140 °C em presença de papel foi avaliada por cromatografia em fase líquida a quantidade de compostos furânicos formados durante envelhecimento, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 9 a 13, respectivamente.

De uma forma geral, todos os óleos vegetais mostraram uma alta concentração inicial de álcool furfurílico seguido de um decréscimo acentuado com o aumento do tempo de envelhecimento. Quanto ao 2-FAL, os óleos vegetais isolantes comerciais, BIOVOLT A, ENVIROTEMP FR3, apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, valores constantes e próximos do limite de detecção da técnica. O OV-1 apresentou comportamento similar aos OVIs comerciais. Já os óleos OV-2 e OV-3 apresentaram aumentos significativos na concentração de 2-FAL seguido de um decréscimo ao final do ensaio.

O OMI apresentou uma borra depositada no fundo dos tubos aonde foi realizado o ensaio de envelhecimento acelerado. Em função disto, não foi possível extrair os compostos furânicos das amostras para obtenção de resultados confiáveis nas condições utilizadas nesse trabalho.

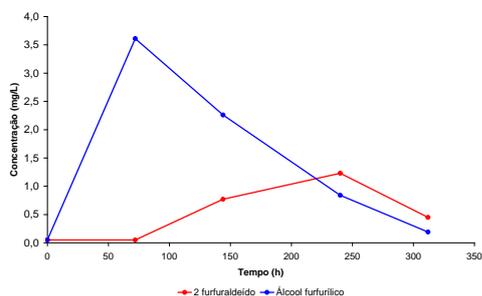


Figura 9. Compostos furânicos formados no óleo de arroz.

Os ensaios de grau de polimerização foram realizados em todas as amostras de papel Kraft em contato com os óleos. Notou-se um decréscimo no GP em função do aumento do tempo e da temperatura de envelhecimento para todos os óleos. A aditivação dos óleos OV-1, OV-2 e OV-3 (Tabela IV) praticamente não influenciou no envelhecimento do papel em comparação aos mesmos óleos sem aditivação (Tabela V). Nas condições utilizadas neste estudo não foi possível verificar diferenças significativas no comportamento do pa-

pel quando na presença de OMI em comparação aos demais óleos vegetais.

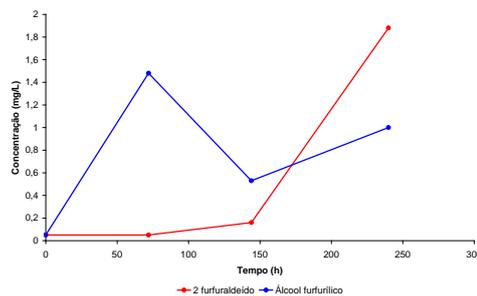


Figura 10. Compostos furânicos formados no óleo de girassol.

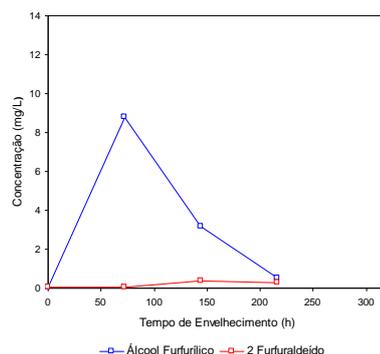


Figura 11. Compostos furânicos formados no óleo de soja.

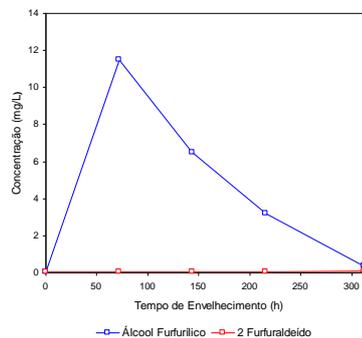


Figura 12. Compostos furânicos formado no óleo de BIOVOLT® A.

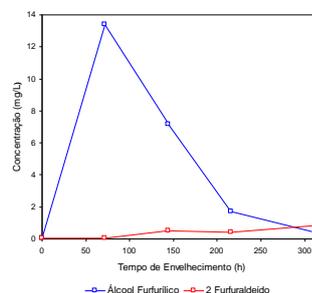


Figura 13. Compostos furânicos formado no óleo ENVIROTEMP® FR3.

**Tabela IV.** Grau de polimerização para o papel Kraft isolante em função do tempo de envelhecimento, a 95 °C para os óleos OV-1, OV-2 E OV-3 não aditivados.

Tempo (h)	Grau de Polimerização		
	OV-1	OV-2	OV-3
6	1013	1133	886
21	1058	979	959
30	848	1070	1031
45	816	960	1120
54	770	1097	1054
69	729	1051	1092
78	819	928	947
93	786	900	729
102	746	852	841

**Tabela V.** Grau de polimerização para o papel Kraft isolante em função do tempo de envelhecimento, a 95 °C para os óleos OV-1, OV-2 E OV-3 aditivados e demais fluidos isolantes comerciais .

Tempo (h)	Grau de Polimerização					
	OV-1	OV-2	OV-3	BIOVOLT A	FR3 *	OMI
6	975	1153	855	1042	965	1194
21	1084	1021	1114	931	904	1073
30	1028	771	1176	1174	883	995
45	957	778	987	1008	930	917
54	1047	825	787	1002	1010	880
69	870	737	610	1114	962	929
78	1017	1219	966	917	637	820
93	826	1021	590	594	506	788
102	707	813	758	894	547	835

\*ENVIROTEMP®FR3

#### F. Avaliação da formação de gases dissolvidos de diferentes matrizes de óleos vegetais através de cromatografia em fase gasosa, após submissão do óleo a diferentes níveis de esforço elétrico

Para calcular a quantidade de gás dissolvido no óleo isolante por cromatografia em fase gasosa é necessário conhecer o coeficiente de solubilidade de Ostwald do gás de interesse no óleo isolante em análise.

O coeficiente de solubilidade dos gases nos óleos vegetais foi determinado com base nos procedimentos descritos na norma ASTM D2780. Foi determinado o coeficiente para os seguintes gases: nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, etano, etileno, acetileno, dióxido de carbono, monóxido de carbono e metano.

Para determinar o coeficiente de solubilidade de Ostwald o gás padrão de interesse foi borbulhado durante 50 minutos em 200 ml de óleo vegetal inseridos em frasco apropriado, a temperatura ambiente, a partir do uso de uma pedra difusora. Após o borbulhamento, amostras de óleo foram coletadas (40 ml) em seringas com capacidade para 50 ml, e submetidas ao processo de extração de gases usando um extrator apropriado, em concordância com os procedimentos descritos na norma ASTM 3612-94. Durante o processo de extração as amostras foram submetidas a 2,0 x 10<sup>-1</sup> mbar de vá-

cuo, sob agitação magnética por 2 minutos, a temperatura ambiente.

Para determinar o coeficiente de solubilidade de Ostwald foi medido o volume de gás extraído bem como o volume de óleo injetado no extrator, conforme Equação 1. Os volumes foram determinados a pressão atmosférica.

$$\text{coeficiente de solubilidade de Ostwald} = \frac{\text{volume gás extraído (mL)}}{\text{volume óleo injetado (mL)}} \quad (1)$$

Visando a geração de gases dissolvidos de forma acelerada, os óleos vegetais de soja, girassol, arroz, ENVIROTEMP®FR3, BIOVOLT®A foram submetidos a diferentes níveis de esforço elétrico e térmico em comparação com o OMI.

Para avaliar o esforço elétrico foram aplicadas descargas disruptivas em torno de 40 kV, utilizando uma cuba aberta com eletrodos planos, espaçados de 2,5 mm. Em cada óleo testado (400 ml) foram aplicadas 15, 45, 75 e 105 descargas, sendo que, após cada intervalo de descarga foram retiradas alíquotas de óleo (40 ml) para posterior análise de gases dissolvidos no óleo por cromatografia em fase gasosa.

Para avaliar o esforço térmico, os óleos vegetais foram acondicionados em estufa, a 150°C, em frascos âmbar, fechados, com capacidade para 250 ml. Alíquotas de 40 ml de cada óleo foram retiradas em intervalos regulares de tempo para posterior análise de gases dissolvidos no óleo por cromatografia em fase gasosa.

A determinação dos gases dissolvidos nos diferentes óleos vegetais que foram submetidos, tanto ao esforço elétrico quanto ao esforço térmico, foi realizada por cromatografia em fase gasosa de acordo com a metodologia descrita na norma ABNT NBR 7070.

Para quantificação dos gases dissolvidos gerados nos óleos de arroz, girassol e BIOVOLT® A, foram utilizados os coeficientes de solubilidade de Ostwald, determinados anteriormente. Para o óleo vegetal isolante ENVIROTEMP®FR3 e o óleo vegetal de soja foram utilizados os coeficientes tabulados pelo fabricante (COOPER POWER SYSTEMS) enquanto que para mineral isolante foram utilizados os coeficientes descritos na norma ABNT NBR 7070.

Para os OVIs submetidos aos esforços elétricos, observou-se a geração dos gases H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>. O teor de gases H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> depois de formados se manteve praticamente constante do longo do tempo de ensaio. O teor do gás C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> foi maior do que o teor dos gases H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. O gás C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> é indicativo de descarga elétrica no óleo isolante.

Para os óleos vegetais submetidos aos esforços térmicos ocorreu a geração dos gases H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. O teor de gases H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, e C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> depois de formados, não apresentaram aumento significativo em função do aumento do stress térmico. Os aumentos mais significativos observados deram-se nos gases CO, CO<sub>2</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>.

### *G. Avaliação da Influência do Óleo Vegetal Natural sobre o Sistema de Refrigeração do Transformador de Distribuição*

Foram adquiridos 06 transformadores de distribuição novo, de classe 15 kV e de potência nominal igual a 75 kVA, da WEG TRANSFORMADORES, para realização dos testes de desempenho dos óleos vegetais como fluidos isolantes, em escala laboratorial e em campo. Os ensaios em laboratório foram realizados no Laboratório de Alta Tensão do LACTEC. Após estes ensaios, os transformadores foram enviados a COPEL, regional de Cascavel para instalação na rede de distribuição de energia.

Foram realizados ensaios laboratoriais nos transformadores de distribuição, cada qual isolado com um óleo vegetal específico, aditivados com TBHQ: 03 (três) equipamentos isolados com os óleos de girassol, soja, arroz; 01 (um) com BIOVOLT®A; 01 (um) com o ENVIROTEMP®FR3 e 01 (um) com o OMI Lubrax Industrial AV-60-IN. Esses transformadores foram submetidos ao ensaio de elevação de temperatura. Com este experimento foi possível avaliar eventuais diferenças no sistema de refrigeração dos mesmos, causadas pelas características distintas de viscosidade de cada óleo testado. Os resultados obtidos foram comparados entre os diferentes sistemas isolantes testados e com o sistema de referência (sistema isolado a OMI).

Foram realizados ensaios de rotina, elevação de temperatura, resistência de isolamento, tensão de rádio interferência, fator de potência do isolamento, ensaio de tensão de impulso atmosférico, tensão aplicada e tensão induzida em seis transformadores de distribuição, todos com óleo vegetal isolante, nos seguintes transformadores WEG:

- Número de série 0942988 preenchido com óleo de girassol.
- Número de série 0942984 preenchido com óleo de soja.
- Número de série 0942986 preenchido com óleo de arroz.
- Número de série 0942987 preenchido com OMI.
- Número de série 0942983 preenchido com óleo BIOVOLT®A.
- Número de série 0942985 preenchido com óleo ENVIROTEMP®FR3.

#### *1) Ensaios de Impulso Atmosférico*

O transformador isolado com óleo vegetal de girassol foi submetido ao ensaio de impulso atmosférico, conforme padroniza as normas ABNT NBR 5356 e NBR 5390, ambas de 1993. O ensaio foi realizado aplicando-se a seguinte seqüência de impulsos de polaridade negativa, com forma de onda 1,2/50 µs:

- um impulso pleno com valor reduzido (60 kV);
- um impulso pleno com valor especificado (95 kV);
- um impulso cortado com valor reduzido (66 kV);
- dois impulsos cortados com valor especificado (105 kV);
- dois impulsos plenos com valor especificado (95kV).

#### *2) Medição de Tensão de Rádio Interferência*

Foi medida a tensão de rádio interferência dos seis transformadores de distribuição. Anteriormente às medições, foram definidos os fatores de correção de cada um dos transformadores avaliados. No processo de medição, aplicou-se 90, 100 e 110 % da tensão fase-terra (8 kV) a cada um dos terminais do lado de alta tensão do transformador em teste, em degrau ascendente e descendente.

#### *3) Medição do Fator de Potência do Isolamento*

Mediram-se o fator de potência do isolamento dos seis transformadores de distribuição de classe 15 kV, 75 kVA preenchidos com os diferentes óleos. Testaram-se as seguintes isolações:

- CH;
- CX;
- CHX.

Durante os ensaios o terminal de alta tensão do transformador foi energizado com tensão de 2,5 kV e o lado de baixa com tensão igual a 500 V.

#### *4) Ensaio de Impulso Atmosférico*

Para cada transformador, os terminais H1, H2 e H3 foram ensaiados com a seguinte seqüência de impulsos atmosféricos de polaridade negativa, com forma de onda 1,2/50 µs, conforme estabelece a norma ABNT NBR-5356 – parte 3 de 2007.

- Um impulso pleno com valor reduzido (60 kV).
- Um impulso pleno com valor especificado (95 kV).
- Um impulso cortado com valor reduzido (66 kV).
- Dois impulsos cortados com valor especificado (105 kV).
- Dois impulsos plenos com valor especificado (95 kV).

#### *5) Ensaio de Tensão Aplicada*

No enrolamento de tensão superior de cada transformador foi aplicado 34 kV aos seus terminais curto-circuitados, na frequência de 60 Hz, durante 60 segundos, estando todos os terminais do enrolamento de tensão inferior curto-circuitados e aterrados junto com o tanque. Para o ensaio do enrolamento de tensão inferior, utilizou-se procedimento similar, entretanto aplicando-se a tensão de 10 kV, por 60 segundos, conforme estabelece a norma ABNT NBR-5356 – parte 3 de 2007.

#### *6) Ensaio de Tensão Induzida*

Cada transformador foi ensaiado aplicando-se a tensão de 254 V (2 x 127 V) aos terminais de baixa tensão, com uma fonte de alimentação de frequência 240 Hz, por 30 segundos, conforme estabelece a norma ABNT NBR-5356 – parte 3 de 2007.

### *H. Avaliação da Influência do Óleo Vegetal sobre a Suportabilidade Dielétrica do Transformador*

Foram realizados ensaios dielétricos em laboratório nos transformadores de distribuição cada qual isolado com um

óleo específico, a fim de verificar eventuais diferenças de comportamento entre os diversos sistemas testados. Os resultados foram comparados entre si e com o sistema de referência.

Amostras dos óleos foram retiradas antes e após o ensaio elétrico realizado nos transformadores de distribuição.

A avaliação dos gases dissolvidos nos diferentes óleos vegetais foi realizada por cromatografia em fase gasosa de acordo com a metodologia descrita na norma ABNT NBR 7070.

Para quantificação dos gases dissolvidos gerados nos óleos de arroz, girassol e BIOVOLT® A, foram utilizados os coeficientes de solubilidade de Ostwald, determinados anteriormente. Para o óleo vegetal isolante ENVIROTEMP®FR3 e o óleo vegetal de soja foram utilizados os coeficientes tabulados pelo fabricante (COOPER POWER SYSTEMS) enquanto que para o OMI foram utilizados os coeficientes descritos na norma ABNT NBR 7070.

As elevações de temperatura medidas no protótipo ensaiado satisfazem os limites prescritos pela norma ABNT NBR 5365/1993, ou seja, 50°C para o óleo isolante e 55°C para a média dos enrolamentos.

#### 1) Ensaio de Medição de Perdas e de Elevação de Temperatura nos Transformadores de Distribuição

Foram realizados ensaios de medição das perdas em vazio e em curto-circuito em seis transformadores de distribuição preenchidos com óleo vegetal.

Em todos os casos, os transformadores atenderam aos valores admissíveis de perdas em vazio (330 W), perdas totais, (1470 W), perdas em carga (1470 – 330 = 1140 W) e corrente de excitação (3,1 %), prescritos na norma ABNT NBR 5440 de 1999.

Os seis transformadores isolados com óleo vegetal também foram submetidos ao ensaio de elevação de temperatura normalizado.

Pode-se observar que todos os transformadores de distribuição isolados com óleo vegetal isolante apresentaram elevação de temperatura (55° C) do óleo e dos enrolamentos inferior ao estabelecido na norma ABNT 5440 de 1999.

#### 2) Medição de Resistência de Isolamento

Foi medida a resistência de isolamento dos seis transformadores de distribuição, todos isolados com óleo vegetal. Os transformadores de número de série 0942983, 0942984, 0942985 tiveram as resistências de isolamento medidas até 3 minutos, sendo possível somente definir o índice DAR (Relação de Absorção =  $R_{1min}/R_{15s}$ ). Os transformadores número de série 0942986, 0942987, 0942988 tiveram suas resistências de isolamento medidas até 10 minutos, sendo possível a definição dos índices DAR e PI (Índice de Polarização =  $R_{10min}/R_{1min}$ ).

Os transformadores de distribuição ensaiados apresentaram índices que poderiam ser classificados como isolamento questionável. No entanto, deve-se observar que os limites foram definidos para transformadores de maior porte. A norma IEEE 62-1995 (IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors) diz que para transformadores de menor porte, IP próximo de 1 é adequado.

Portanto, os resultados obtidos foram satisfatórios para todos os equipamentos ensaiados.

#### 3) Medição de Tensão de Rádio Interferência

Todos os transformadores de distribuição apresentaram níveis abaixo do limite especificado de tensão de rádio interferência (250  $\mu$ V, para classe 15 kV) pela norma ABNT 5440 de 1999.

#### 4) Medição do Fator de Potência do Isolamento

Todos os transformadores apresentaram fator de potência inferior a 2 %, portanto estes transformadores apresentam condição adequada de isolamento.

#### 5) Ensaio de Impulso Atmosférico

a) Transformador WEG preenchido com óleo vegetal BIOVOLT® A: não foram observadas descargas disruptivas internas ou evidências de defeito.

b) Transformador WEG preenchido com óleo vegetal Soja: não foram observadas descargas disruptivas internas ou evidências de defeito.

c) Transformador WEG preenchido com óleo vegetal ENVIROTEMP®FR3: não foram observadas descargas disruptivas internas ou evidências de defeito.

d) Transformador WEG preenchido com óleo vegetal arroz: não foram observadas descargas disruptivas durante o ensaio, mas os oscilogramas da Figura 14 apresentam pequenos indícios de falhas incipientes para os ensaios aplicados aos terminais H1, H2 e H3, respectivamente.

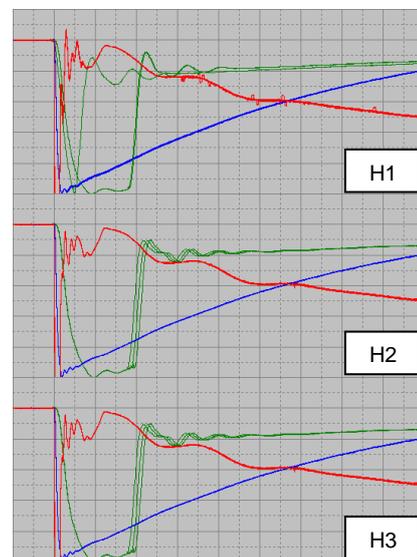


Figura 14. Ensaio em Transformador WEG 75 KVA, N° de Série 0942986

e) Transformador WEG preenchido com óleo AV 60 IN: não foram observadas descargas disruptivas internas ou evidências de defeito.

f) Transformador WEG preenchido com óleo Girassol: não foram observadas descargas disruptivas internas nos oscilogramas da Figura 15, relativos à aplicação de impulso nos terminais H1, H2 e H3, respectivamente. Mas no oscilograma do terminal H1 observou-se um pequeno indício de falha incipiente, semelhante ao equipamento isolado com óleo de arroz.

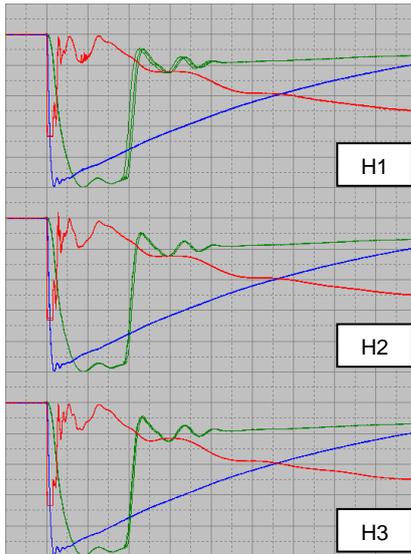


Figura 15. Ensaio em Transformador WEG 75 KVA, N° de Série 0942988.

#### 6) Ensaio de Tensão Aplicada

Não se observou nenhuma evidência de defeito ou descarga disruptiva interna nos ensaios aplicados aos seis transformadores de distribuição em avaliação.

#### 7) Ensaio de Tensão Induzida

Não se observou nenhuma evidência de defeito ou descarga disruptiva interna nos ensaios aplicados aos seis transformadores de distribuição em avaliação neste projeto.

#### I. Avaliação da Influência do Óleo Vegetal sobre a Suportabilidade Dielétrica do Transformador

Não houve variação significativa de gases dissolvidos nos ensaios realizados antes e após o ensaio elétrico nos seis óleos em questão.

#### J. Levantamento do Custo dos Óleos Vegetais em relação aos OVI's e ao OMI

Foi levantado o custo dos óleos vegetais nacionais e dos óleos vegetais isolantes comercialmente disponíveis no Brasil em 2009, bem como o do OMI. Os dados apresentados na Tabela VI foram levantados em abril de 2009.

Observa-se que os óleos vegetais estudados apresentaram custos inferiores aos óleos vegetais isolantes comercialmente disponíveis e também em relação ao OMI. Porém, conforme resultados apresentados, não estão qualificados para serem usados como fluidos isolantes, em especial o de girassol e de arroz que apresentaram indícios de falhas no ensaio de impulso atmosférico.

### III. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que os óleos vegetais de girassol, soja, arroz e mamona não são indicados para uso como fluido isolante porque suas características não atenderam as exigências elétricas solicitadas durante os ensaios. Para que

esses óleos possam ser utilizados como fluido isolante, devem ser processados adequadamente com o objetivo de ajustar suas características às exigências dos equipamentos elétricos. Este estudo mostrou que, somente a aditivação não resultou em melhoria de desempenho dos óleos ensaiados.

Tabela VI. Preço por litro de óleo isolante.

Óleo Isolante	Marca Comercial	Fabricante	Custo / Litro
Arroz	Carreteiro	Irgovel - Ind. Riograndense e de Óleos Vegetais Ltda.	R\$ 6,42
Girassol	Salada	Bunge Alimentos S/A.	R\$ 4,20
Soja	Soya	Bunge Alimentos S/A.	R\$ 2,24
ENVIROTEMP® FR3	ENVIROTEMP® FR3	Cooper Power System Inc.	R\$ 9,30
BIOVOLT®A	BIOVOLT®A	Mineraltec – Tecnologia em óleos minerais	R\$ 8,50
Mineral	Lubrax AV-60-IN	Petrobras S/A.	R\$ 7,88

Convém lembrar que o atendimento a norma ABNT NBR 15422 é necessário, mas não suficiente para garantir a aplicabilidade de um óleo vegetal como fluido isolante em transformadores, seja de distribuição ou de força. Ensaios adicionais elétricos, dielétricos e de compatibilidade com materiais precisam ser conduzidos para comprovar a aplicabilidade e o desempenho.

### IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bertrand, Y., Hoang, L. C. "Vegetable oils as substitute for mineral insulating oils in medium-voltage equipments". CIGRÉ, D1-202, 2004.
- Wilhelm, H. M. et al. "Aspectos Relacionados com a Utilização de OVI no Brasil". IV WORKSPOT - International Workshop on Power Transformers, Recife – PE, mar, 2006.
- Granato, R., Levy, N; Tulio, L. "Apostila de Óleo Mineral Isolante". LACTEC, 2001, 25 p.
- BS EN 14112:2003. BRITISH STANDARDS. Fat and oil derivatives. Fatty acid methyl esters (FAME). Determination of oxidation stability (accelerated oxidation test). 2003.

### V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ANEEL, pela aprovação do projeto de P&D, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Paraná, ao LACTEC, pelo apoio e pela infra-estrutura disponibilizada.