



CARACTERIZAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS PARA TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

Krsthianna Palitot dos Santos Leite¹, Maria Wilma Nunes Cordeiro Carvalho²

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo determinar as características físico-químicas e elétricas dos óleos vegetais comerciais de origem regional: soja, milho e algodão e verificar qual destes oferece vantagens em relação ao óleo mineral. As propriedades analisadas foram: Cor, densidade, viscosidade, rigidez dielétrica, perdas dielétricas, estabilidade à oxidação, enxofre corrosivo, teor de água, índice de acidez total e estabilidade termo-oxidativa. A estabilidade termo-oxidativa é um dos aspectos mais críticos na maioria das aplicações dos óleos isolantes, o foco principal do trabalho foi a realização de um estudo cinético da oxidação dos óleos. Verificou-se que os óleos vegetais analisados apresentam vantagem em relação ao óleo mineral no que diz respeito à não produção de borra.

Palavras-chave: transformadores elétricos, óleo vegetal, características físico-químicas e elétricas.

CHARACTERIZATION OF VEGETABLE OILS FOR ELECTRIC TRANSFORMERS

ABSTRACT

This work aimed to determine the physicochemical characteristics of the commercial vegetable oils of regional origin: soy, corn and cotton, and verify which of those has advantages over the mineral oil. The properties that were analyzed were: color, density, viscosity, dielectric strength, oxidation stability, corrosive sulfur, water percentage, total index of acidity and thermooxidative stability. The thermooxidative stability is one of the most critical aspects in most of applications of insulating oils. The work focuses mainly on the realization of a kinetic study of the oils oxidation. The vegetable oils analyzed presented an advantage over the mineral oil, regarding to the absence of sediment production.

Keywords: electrical transformers, vegetal oil, electrical and physicochemical characteristics.

¹ Aluna de Curso de Engenharia Química, Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: krsthianna_cg@hotmail.com

² Engenheira Química, Profa, Unidade acadêmica de Engenharia Química, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: wilma@deq.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

Transmissão de energia elétrica é o processo de transportar energia entre dois pontos. O transporte é realizado através de um sistema com linhas de transmissão de alta potência e equipamentos destinados a gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica. Equipamentos fundamentais neste tipo de sistema são os transformadores elétricos e estão presentes em todo o percurso desde a usina até o consumidor, ou seja, podem estar nas usinas para elevação da tensão e posterior transmissão em grandes distâncias ou para rebaixamento próximo aos grandes centros de consumo urbano (ABNT,1993). A maior durabilidade e o funcionamento adequado destes aparelhos dependem de um eficiente sistema de isolamento e refrigeração, os quais são realizados por fluidos (óleos minerais) com propriedades tais como alta constante dielétrica e elevada estabilidade térmica. O óleo mineral, produzido por destilação do petróleo é, até o momento, o líquido mais utilizado como dielétrico, em transformadores, além desta função, o óleo desempenha o papel protetor do isolamento sólido, possuindo ainda propriedades de extinção do arco elétrico. É sabido da existência de limitadas reservas de petróleo e das crescentes preocupações ambientais, levantadas, por exemplo, pela presença de componentes aromáticos nos óleos minerais, além da sua muito baixa biodegradabilidade. Portanto é de suma importância para o setor elétrico a busca de alternativas para substituição do óleo mineral, derivado do petróleo, por fluidos biodegradáveis e renováveis. É nesse contexto que surge o óleo vegetal isolante como promissor candidato por ser um produto agrícola, ou seja, pode-se produzir sem quaisquer limitações, é de fácil biodegradabilidade, além de não serem tóxicos, ou seja não apresentam qualquer problema ambiental associado ao seu derrame, ao contrário dos óleos minerais (MARTINS, 2008). Os óleos vegetais pertencem a um grupo de compostos orgânicos chamados ésteres, produzidos pela união entre um ácido e um álcool. Devido esta composição química peculiar os óleos tornam-se altamente valiosos para fins industriais, sendo muito utilizados nas indústrias farmacêuticas, cosméticas, energéticas, químicas e de tintas. De acordo com dados da *CPFL Energia*, o óleo vegetal permite ampliar a potência do transformador, que passa a comportar mais kVA por quilo e ajuda a diminuir as falhas técnicas, além de ser decomposto no meio ambiente em apenas 45 dias, enquanto o mineral leva 15 anos para ser totalmente degradado.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Catálise da Unidade acadêmica de Engenharia Química no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

Material

Óleos vegetais de soja, milho e algodão .

Densidade

A determinação da densidade dos óleos a 20°C foi realizada através do método da picnometria. Os experimentos foram realizados em triplicata.

Procedimento para obtenção da viscosidade Cinemática

A viscosidade cinemática dos óleos foi determinada utilizando viscosímetro capilar Cannon-Fenske (Figura 1), imerso em banho com temperatura controlada. Esta determinação consistiu em avaliar o tempo que um volume fixo de líquido levou para escoar entre dois pontos fixos do capilar do viscosímetro calibrado, sob ação da gravidade. A viscosidade cinemática nada mais é que o produto desse tempo pela constante de calibração do viscosímetro. O ensaio de viscosidade foi realizado nas três temperaturas recomendadas pela NBR 15422 (20, 40 e 100°C).



Figura 1. Viscosímetro capilar Cannon Fenske

Índice de Acidez

Para a determinação do índice de acidez dos óleos foi adotada a metodologia descrita por Moretto & Fett (1998) que utiliza como titulante solução de hidróxido de sódio.

Neutralização do Óleo Vegetal

Os óleos vegetais objetos deste estudo, apresentaram acidez superior ao limite estabelecido pela NBR 15422. Após esta constatação procedeu-se a neutralização de 1L de cada amostra de óleo vegetal através do tratamento com solução de hidróxido de sódio.

A neutralização dos óleos vegetais foi procedida de acordo com metodologia descrita por Moretto & Fett (1998). De acordo estes autores, as condições da neutralização dependem do percentual de ácidos graxos livres presentes no óleo, sendo assim, fazem recomendações a respeito dos níveis de concentração de solução alcalina a ser usada durante o processo de neutralização.

O óleo foi colocado num Becker (figura 2.a) e esperou-se o aquecimento do mesmo entre 90 e 95°C, então adicionou-se a solução quente de hidróxido de sódio em água (3%), sob agitação. A razão em volume de solução-óleo foi de 1:10. A mistura permaneceu por 30 minutos sob aquecimento cuidadosamente para manter a temperatura constante. Ao término deste tempo a solução foi deixada em repouso por cerca de três horas para separação de sabão e borra. A retirada da borra foi feita utilizando funil de decantação, após isto, iniciou-se a lavagem do óleo com água destilada, respeitando um intervalo de aproximadamente 30 minutos entre cada adição de água (Figura 2.b), intercalando água morna com água fria. A remoção de sabão e hidróxidos remanescentes foi confirmada usando gotas de fenolftaleína como indicador na fase removida após lavagem. Quando não mais se visualizou coloração rosa naquela fase, foi encerrado este processo de lavagem do óleo e submetendo-o à secagem em estufa por cerca de 3 horas a 100°C.

Caracterizações físico-químicas e dielétricas foram realizadas, novamente, a fim de verificar se o processo de neutralização modificou as características iniciais dos óleos.



Figuras 2.a e 2.b. (2.a) aquecimento da solução; (2.b) Separação da borra

Determinação de Enxofre

A presença de compostos de enxofre corrosivos nos óleos foi verificada realizando o procedimento descrito pela NBR 10505 em triplicata.

Foram colocados 200 mL de óleo em frascos de vidro borossilicato de boca esmerilhada nos quais se depositou uma fita de cobre (25 mm x 6 mm) previamente polida e seca. Em seguida, fez-se borbulhar sob o óleo o gás nitrogênio numa vazão de pelo menos 1L/min durante 10 min. Transcorrido este tempo os frascos foram fechados e levados à estufa a 150°C durante 48 horas. Depois disto os frascos foram retirados da estufa e as fitas de cobre foram removidas com uma pinça. Cada óleo foi classificado como corrosivo ou não corrosivo quando as três fitas de cobre apresentavam colorações semelhantes, e comprando-as com a tabela de cores da ASTM D1275.

Teor de Água

O teor de água das amostras foi verificado pelo método de *Karl Fischer*, usando o Titulador *Water Content Measuring Test Equipment Aquameter KFM 3000* da Baur S.A., seguindo critérios recomendados pela NBR 10710. Esta norma recomenda que as análises sejam efetuadas em duplicata e para verificação da repetibilidade deve-se usar o seguinte critério:

“As determinações em duplicata efetuadas por um operador devem ser consideradas suspeitas, com um nível de confiança de 95%, se diferirem por mais de $0,60 \cdot \sqrt{x}$ ppm, onde x é a média das determinações duplicadas” (ABNT NBR 10710).

Neste trabalho para cada amostra de óleo a análise foi repetida por três vezes e ao final fez-se a média das leituras, não deixando de verificar se o critério supra citado era satisfeito.

Rigidez Dielétrica

Neste teste o óleo foi submetido a uma tensão elétrica sob condições prescritas no método de ensaio NBR 6869, exceto pelo fato de que o aumento da tensão foi 30kV/min (partindo do zero até o valor que produz a ruptura). Segundo esta norma, o aumento da tensão deveria ser 3kV/min, no entanto o equipamento usado, o Fully Automatic Insulating Oil Tester DTA 100 E da Baur S.A., não dispunha desta opção.

Foram realizados cinco ou dez ensaios consecutivos, para cada vez que a célula era cheia com óleo, o número de ensaios dependia da validade dos resultados, que era verificada usando critérios de consistência estatística:

“Para que o ensaio seja considerado válido, com um desvio padrão não muito elevado, a diferença entre o valor máximo e mínimo multiplicado por três não deve ser superior ao valor mais próximo do valor mínimo das cinco determinações” (ABNT NBR 6869).

Se este princípio fosse satisfeito a rigidez dielétrica da amostra era determinada calculando a média aritmética dos cinco ensaios. Senão, era efetuado um enchimento adicional procedendo mais cinco ensaios. Sendo assim, a rigidez dielétrica da amostra era determinada calculando a média aritmética dos dez ensaios obtidos.

Fator de Perdas

O fator de perdas foi determinado usando o Sistema Automático para a Medida do Fator de Dissipação e Resistividade DTL da Baur S.A.. A norma usada como referência para este ensaio foi a *ASTM D924*, na qual se baseou a ABNT para publicar a NBR 12133.

Após completar a primeira medição a célula foi esvaziada e novamente preenchida com uma segunda alíquota do óleo a ser testado. Para validar o ensaio, a norma NBR 12133 recomenda que seja usado o seguinte critério:

“Se a diferença entre os dois resultados for igual ou menor que $0,0001+10\%$ do mais alto dos dois valores, não é necessário realizar mais ensaios, e o fator de perdas da amostra deve ser considerado como a média dos dois resultados. Caso contrário encher a célula e procede uma terceira medição” (ABNT NBR 12133).

A norma NBR 12133 adverte ainda que se a diferença entre o terceiro e o primeiro ou segundo resultados não se encontrar dentro dos limites acima especificados, deve-se desconsiderar os resultados, limpar a célula e proceder novos testes até que dois resultados de uma mesma amostra se enquadrem dentro dos limites acima previstos.

Estabilidade à Oxidação

Uma vez que um teste de verificação da estabilidade a oxidação para fluidos isolantes elétricos vegetais ainda não foi desenvolvido, o ensaio *ASTM D2440* para óleos minerais foi escolhido. Sendo assim, cada amostra de óleo não neutralizado foi submetida a teste de oxidação acelerada, baseando-se neste teste.

Para evitar interferência da umidade, a corrente de alimentação de ar foi previamente seca ao passar por uma coluna contendo sílica conforme o diagrama ilustrado na figura 3. Em seguida, o ar (fluxo de 10L/h) foi borbulhado sob 50 mL de amostra de óleo não neutralizado e aquecida a 110°C por um período de 72 horas na presença de um fio de cobre de 30 cm enrolado em formato helicoidal, servindo de catalisador. Transcorridas às 72 horas de reação, uma amostra do óleo foi retirada do sistema e

determinou-se o teor de borra e o índice de acidez. Estes são os únicos parâmetros avaliados no ensaio ASTM D2440.

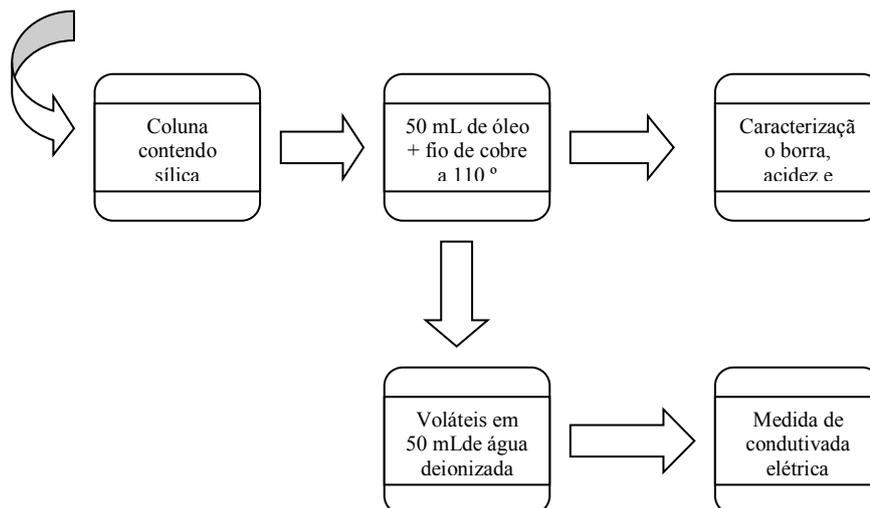


Figura 3. Diagrama do processo de envelhecimento acelerado dos óleos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aspecto Visual

O aspecto visual foi o primeiro item a ser observado nas amostras de óleos (vegetal/mineral) . Segundo a norma NBR 15422, o óleo vegetal isolante deve ser límpido, claro e não deve apresentar materiais em suspensão. Pode-se observar o aspecto visual dos óleos (vegetal/mineral) nas figuras respectivamente.

Na Figura 4 pode ser observado o aspecto visual das amostras dos óleos vegetais e mineral.

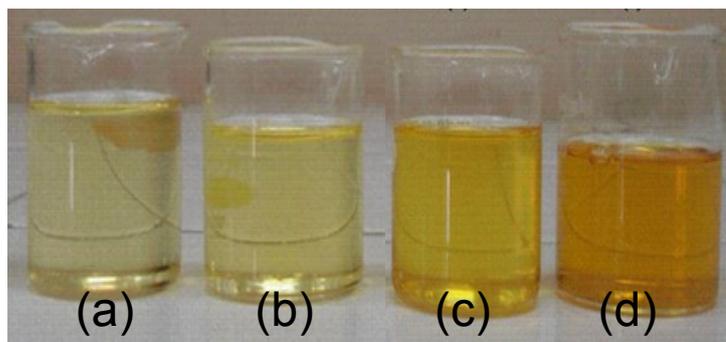


Figura 4. Aspecto visual dos óleos: (a)soja, (b) milho, (c) algodão (d) mineral

Índice de Acidez

Os óleos vegetais comestíveis apresentaram acidez superior ao limite estabelecido pela NBR 15422, que é 0,06 mgKOH/g. Em função disto, foram realizados experimentos de neutralização dos óleos para deixá-los no nível de acidez recomendado. Os índices de acidez dos óleos antes e após a neutralização (caracterizados por N) podem ser examinados na Tabela 1.

TABELA 1:
Índices de acidez dos óleos antes e após neutralização (N)

| Tipo de Óleo | Índice de acidez (mg KOH/g) |
|------------------------|-----------------------------|
| Valor Limite NBR 15422 | 0,06 |
| Algodão | 0,14±0,00 |
| Algodão (N) | 0,05±0,00 |
| Milho | 0,22±0,00 |
| Milho (N) | 0,03±0,00 |
| Soja | 0,20±0,01 |
| Soja (N) | 0,03±0,00 |

Densidade e Viscosidade

Os resultados das análises de densidade e viscosidade dos óleos estão listados na Tabela 2.

TABELA 2
Propriedades físico-químicas dos óleos

| Tipo de Óleo | *Densidade Relativa | Viscosidade (cSt) | | |
|------------------------|---------------------|-------------------|------------|-----------|
| | | T=20°C | T=40°C | T=100°C |
| Valor Limite NBR 15442 | 0,96 máximo | 150 máximo | 50 máximo | 15 máximo |
| Algodão | 0,9228±0,02 | 73,26±0,48 | 35,21±0,01 | 8,63±0,02 |
| Algodão (N) | 0,9207±0,00 | 66,81±0,09 | 33,98±0,09 | 8,04±0,00 |
| Milho | 0,9228±0,00 | 70,82±0,22 | 34,90±0,01 | 8,39±0,05 |
| Milho (N) | 0,9221±0,00 | 74,95±0,13 | 34,80±0,06 | 8,35±0,05 |
| Soja | 0,9202±0,03 | 66,67±0,29 | 32,18±0,01 | 8,21±0,00 |
| Soja (N) | 0,9239±0,00 | 67,99±0,27 | 31,60±0,00 | 8,27±0,02 |
| Mineral | 0,8797±0,01 | 20,9±0,00 | 9,35±0,01 | 2,74±0,00 |

* densidade óleo a 20°C em relação à água pura a 4°C

Analisando os resultados apresentados na Tabela 2 pode-se verificar que as viscosidades dos óleos vegetais são, mais que três vezes, superiores àquelas apresentadas pelo óleo mineral. As densidades também são superiores a do óleo mineral. Estas duas propriedades são muito importantes do ponto de vista da transferência de calor; seja por convecção natural em pequenos transformadores ou por convecção forçada em unidades maiores que dispõem de sistema de bombeamento de óleo. Valores de densidade e viscosidade altos podem inibir a capacidade de dissipação de calor levando o equipamento a sobrecargas de temperatura.

Em função das densidades e viscosidades superiores àquelas apresentadas pelo óleo mineral, o uso de óleos vegetais como isolante para equipamentos elétricos pode requerer mudanças no design e no sistema de bombeamento do fluido. É fato que, quanto maior a densidade do óleo, maior será a massa necessária para o preenchimento do equipamento e, além disso, menor a eficiência no arrefecimento em comparação com óleo mineral.

Determinação de Enxofre

Após o teste que avaliou a presença de enxofre corrosivo, foi verificado que não ocorreu mudança na coloração dos óleos, indicando que não houve oxidação durante o ensaio. A classificação das fitas de cobre foi feita de acordo com a tabela de cores da ASTM D1275.

Os óleos vegetais testados foram classificados como não corrosivos. Na Figura 5 pode-se verificar que as fitas de cobre apresentaram coloração dourada. Já o óleo mineral regenerado apresentou comportamento corrosivo.

De modo geral, os óleos minerais novos apresentam comportamento não corrosivo quando testado sob as condições deste ensaio. Considerando tal característica, podemos supor que o óleo mineral testado adquiriu comportamento corrosivo após desgaste durante serviço.



Figura 5. Fitas de cobre após ensaio de enxofre

Resultados desta análise devem ser avaliados com cautela, pois diversos transformadores no país apresentaram falhas, supostamente devidas enxofre corrosivo, mesmo tendo passado em testes dessa natureza.

Este ensaio é qualitativo e não deve ser considerado conclusivo para a presença ou não de compostos de enxofre. É interessante aliar este resultado a outras técnicas, como por exemplo, a Fluorescência de Raios-X para uma maior confiabilidade.

Características Dielétricas e Teor de Água dos Óleos

Na Tabela 3 foram listados os resultados de teor de água, umidade relativa, rigidez dielétrica e fator de perdas para os óleos originais e neutralizados. Não foi possível averiguar a umidade dos óleos neutralizados devido a avarias no equipamento.

TABELA 3
Características dielétricas e teor de água dos óleos

| Óleo | Teor de água (ppm) | *Umidade Relativa (%) | Rigidez Dielétrica (kV) | Fator de Perdas a 100°C (%) |
|------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Valor Limite NBR 15442 | 200 | - | 30 mínimo | 4,0 máximo |
| Algodão | 843±8 | 84,3±0,8 | 19,03±4,82 | 3,10±0,09 |
| Algodão(N) | - | - | 19,54±1,67 | 3,07±0,04 |
| Milho | 864±2 | 86,4±0,2 | 16,96±2,06 | 2,42±0,01 |
| Milho (N) | - | - | 49,27±2,83 | 1,90±0,03 |
| Soja | 849±2 | 84,9±0,2 | 21,14±2,10 | 5,23±0,21 |
| Soja (N) | - | - | 25,34±2,28 | 2,63±0,05 |
| Mineral | 50±3 | 90,9±0,3 | 12,06±1,18 | 3,13±0,16 |

As amostras de óleos vegetais apresentaram teor de água absoluto de aproximadamente 800 ppm, por outro lado o óleo mineral apresentou, cerca de 50 ppm. Diversos autores (FOFANA, *et al*, 2002; AMANULLAH *et al.*; 2005) tem reportado resultados semelhantes.

As três espécies de óleos vegetais não neutralizados apresentaram baixa rigidez dielétrica, não satisfazendo ao mínimo aceitável especificado na NBR 15422 para sistemas de isolamento elétrico, que é 30kV. Este fato pode estar relacionado ao elevado teor de água, para níveis de isolamento elétrica, apresentados pelos óleos. O máximo teor de água recomendado pela norma acima citada é 200 ppm.

Os óleos de algodão e soja apresentaram as menores umidades relativas e, também, as os melhores valores de rigidez dielétrica.

O óleo mineral também apresentou baixa rigidez dielétrica. Como se trata de um óleo usado, essa característica pode estar relacionada tanto à umidade relativa alta, quanto à produtos da deterioração gerados durante serviço.

A presença de umidade é um aspecto que merece atenção, pois acelera a reação com a celulose do papel isolante, conduzindo-o à degradação. Além disso, também ocorrerá diminuição da eficiência impregnação do óleo no papel isolante, levando a uma diminuição do ciclo de vida do sistema de isolamento. Dessa forma, o teor de água apresentado pelos óleos vegetais comestíveis é um parâmetro que precisa ser melhorado para o funcionamento seguro do equipamento que utilize líquido dielétrico à base de óleo vegetal.

O fator de perdas máximo especificado pela NBR 15422 nas condições ensaiadas é 4,0%. Como pode ser visto na Tabela 3, o óleo de soja comercial não atendeu este requisito, indicando a presença de umidade e outros produtos de deterioração do óleo.

Estabilidade à Oxidação

Efetuuou-se ensaios de envelhecimento acelerado a 110°C que teve como objetivo averiguar a estabilidade oxidativa da espécies de óleos selecionadas. Após os ensaios de envelhecimento foram realizadas caracterizações, a fim de indicar a tendência a oxidação mais lenta ou mais rápida do óleo em estudo. É muito importante observar que este ensaio não guarda nenhuma relação com o processo real de

oxidação do isolante no transformador. Trata-se apenas de uma medida da qualidade de fabricação do produto e indica uma tendência à oxidação mais rápida ou mais lenta.

O óleos vegetais sofreram alteração na sua coloração original após o aquecimento contínuo em fluxo de ar (figura 6), eles escureceram ligeiramente, já o óleo mineral apresentou coloração marrom-avermelhada, quase preto.

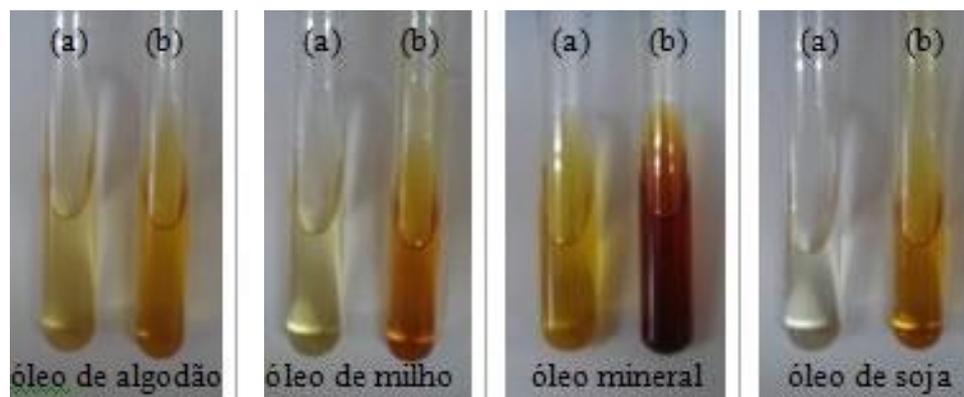


Figura 6. Aspecto visual dos óleos (a) antes e (b) após o envelhecimento acelerado

O óleo mineral produziu um precipitado marrom escuro, quase preto, ao contrário do óleo vegetal que durante a oxidação não produziu borra. Sob este aspecto o óleo vegetal apresenta-se vantajoso com relação ao mineral, já que a borra pode se depositar sobre a parte ativa ou nos trocadores de calor do transformador dificultando a transferência de calor para o meio ambiente, conduzindo a sobreaquecimento e, como conseqüência, à redução de vida útil do equipamento.

Os resultados das análises de viscosidade e índice de acidez das amostras envelhecidas por 72 horas em fluxo de ar podem ser visualizados na Tabela 4 .

TABELA 4
Propriedades dos óleos não neutralizados após envelhecimento acelerado por 72 horas a 110°C

| Tipo de Óleo | Índice de acidez (mgKOH/g) | Viscosidade a 100°C (cSt) |
|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Algodão | 2,52±0,02 | 96,43±0,00 |
| Milho | 2,22±0,09 | 149,36±0,58 |
| Soja | 4,46±0,11 | 184,90±1,19 |
| Mineral | 2,03±0,01 | 2,74±0,00 |

O processo de oxidação dos óleos produziu uma expressiva quantidade de produtos ácidos, caracterizada pelo elevado índice de acidez (IA). Os valores dos índices de acidez mostrados na Tabela 4 excedem os limites especificados pela ASTM D3487, 0,3 mgKOH/g para o óleo inibido e 0,5 mgKOH/g para o óleo não inibido.

Analisando os valores médios dos índices de acidez verifica-se que o óleo de soja apresentou aumento de 22 vezes, seguido pelos óleos de algodão (18 vezes), milho (10 vezes) e mineral (9 vezes). É fato que os óleos vegetais foram mais afetados que o mineral durante a oxidação, apesar de este último ser um óleo regenerado. Tal comportamento pode ter justificativas nas diferenças de composição química e antioxidantes de cada espécie.

Fazendo os cálculos verifica-se que a viscosidade do óleo de soja aumenta mais que 22 vezes, seguido pelos óleos de milho (mais que 17 vezes), algodão (mais que 11 vezes). O Óleo mineral não apresentou alteração na viscosidade após 72 horas de envelhecimento acelerado.

Os dados de condutividade elétrica foram coletados durante o aquecimento contínuo em fluxo de ar (figura 7).



Figura 7. Medição de condutividade

Para a medida da estabilidade oxidativa foram plotadas as curvas de condutividade elétrica x tempo apresentadas na Figura 8.

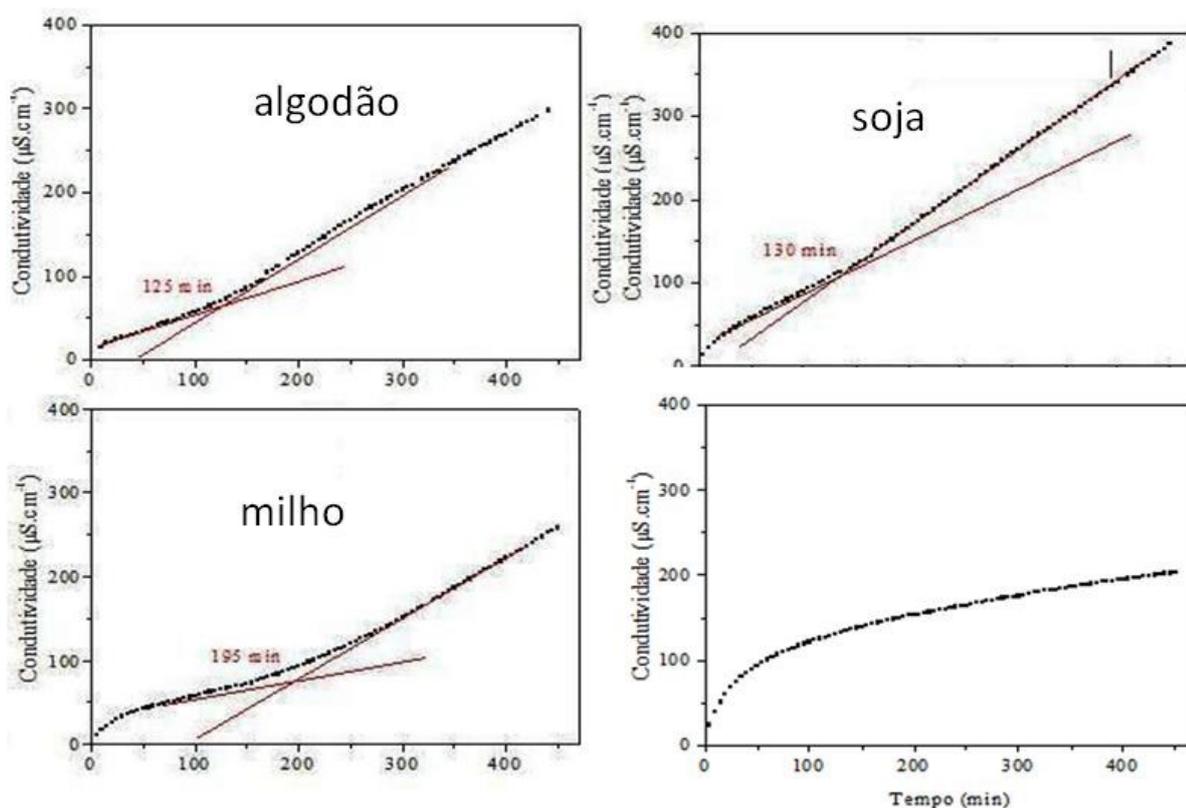


Figura 8. Determinação do tempo de indução por retas tangentes

A partir das curvas de condutividade elétrica vs tempo apresentadas na Figura 7 foi determinado o período de indução (em minutos) de cada espécie. Os resultados foram listados na Tabela 5.

TABELA 5:
Períodos de indução obtidos pela medida de condutividade elétrica durante envelhecimento

| Tipo de Óleo | Período de Indução (min) |
|--------------|--------------------------|
| Algodão | 125 |
| Milho | 195 |
| Soja | 130 |
| Mineral | > 400 |

De acordo com o período de indução apresentado por cada espécie pode-se elencar a seguinte ordem de resistência a oxidação: algodão < soja < milho. Sendo que os óleos de soja e algodão não apresentaram o período de indução mínimo exigido (195min) para aplicação em transformadores.

Diante do exposto, fica claro que os óleos vegetais são mais susceptíveis a oxidação que o óleo mineral. Dessa forma faz-se necessário desenvolver estudos relacionados a adição de antioxidantes. Além disso, é prudente recomendar que unidades preenchidas com óleos vegetais sejam cuidadosamente seladas para evitar contato com umidade e oxigênio do ar atmosférico.

CONCLUSÕES

Os óleos de soja, milho e algodão possuem densidade a 20°C e viscosidades a 20, 40 e 100°C dentro do limite recomendado pela NBR 15422.

As três espécies de óleos vegetais apresentaram comportamento não corrosivo quando testadas sob as condições da NBR 10505.

Os óleos vegetais comerciais apresentam acidez elevada para níveis de isolamento elétrico.

É possível estabelecer valores de índice de acidez dentro do limite estabelecido pela NBR 15422 procedendo a neutralização dos óleos com solução de hidróxido de sódio.

Quanto às propriedades dielétricas, verificou-se que óleos vegetais comerciais apresentam baixa rigidez dielétrica, não satisfazendo o mínimo aceitável especificado na NBR 15422 para sistemas de isolamento elétrico. Apenas o óleo de soja não neutralizados apresentou fator de perdas superior ao limite estabelecido pela norma.

A neutralização dos óleos vegetais promoveu melhoria na rigidez dielétrica e no fator de perdas quando comparados aos originais.

Dentre os óleos vegetais testados apenas o óleo de milho neutralizado apresentou rigidez dielétrica mínima recomendada para uso como isolante elétrico, mesmo com teor de água supostamente superior ao recomendado.

Os óleos vegetais não produzem borra durante o envelhecimento.

Quanto à resistência a oxidação, verificou-se a seguinte ordem de estabilidade para os óleos vegetais comestíveis não neutralizados: algodão<soja <milho.

- Os óleos vegetais comestíveis de algodão, soja e milho apresentam aspecto claro, límpido e isento de materiais em suspensão.
- Os óleos de soja, milho e algodão possuem densidade a 20°C e viscosidades a 20, 40 e 100°C dentro do limite recomendado pela NBR 15422.
- As três espécies de óleos vegetais apresentaram comportamento não corrosivo quando testadas sob as condições da NBR 10505.
- Os óleos vegetais comerciais apresentam acidez elevada para níveis de isolamento elétrico.
- É possível estabelecer valores de índice de acidez dentro do limite estabelecido pela NBR 15422 procedendo a neutralização dos óleos com solução de hidróxido de sódio.
- Quanto às propriedades dielétricas, verificou-se que óleos vegetais comerciais apresentam baixa rigidez dielétrica, não satisfazendo o mínimo aceitável especificado na NBR 15422 para sistemas de isolamento elétrico. Apenas o óleo de soja não neutralizados apresentou fator de perdas superior ao limite estabelecido pela norma.
- A neutralização dos óleos vegetais promoveu melhoria na rigidez dielétrica e no fator de perdas quando comparados aos originais.
- Dentre os óleos vegetais testados apenas o óleo de milho neutralizado apresentou rigidez dielétrica mínima recomendada para uso como isolante elétrico, mesmo com teor de água supostamente superior ao recomendado.
- Os óleos vegetais não produzem borra durante o envelhecimento.
- Quanto à resistência a oxidação, verificou-se a seguinte ordem de estabilidade para os óleos vegetais comestíveis não neutralizados: algodão<soja <milho.
-

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR 7037**. Rio de Janeiro,1993. 17 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR 5356-1**:Transformadores de Potência. Rio de Janeiro, 2008. 95 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR 15422**: Óleos vegetais para equipamentos elétricos. São Paulo,2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR 10505**: Óleo mineral isolante – Determinação de enxofre corrosivo. 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR 6869**: Líquidos isolantes dielétricos – Determinação da rigidez dielétrica (eletrodos de disco). 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR 12133**: Líquidos isolantes dielétricos – Determinação do fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica).2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: **NBR 10710**: Líquidos isolantes elétricos. 1997.

AMANULLAH, MD.; ISLAM, S. M.; CHAMI, S.; IENCO G. **Analyses of Physical Characteristics of Vegetable oils as an Alternative Source to Mineral Oil-based Dielectric Fluid**, In: International Conference on Web Services. 07, 2005. Orlando – Florida. **Anais...IEEE**, p. 397-400. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnum

FOFANA, I.; WASSERBERG, V.; BORSI, H.; GOCKENBACH, E. Challenge of Mixed Insulating Liquids for Use in High-Voltage Transformers, Part 1: Investigation of Mixed Liquid, **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, n. 3, p. 18-31, 2002.

MARTINS, Marcelo Neves. **Óleo vegetal isolante e sua influência no envelhecimento de transformadores**. Palestra conferida no Workshop Cepel Óleo Vegetal Isolante, 06 jun. 2008. Disponível em: <<http://www.cepel.br/workshop2/Presentation%20CPS%20-%20Workshop%20OVI%20CEPEL.pdf>> Acesso em 29 set. 2008.

MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos**. 1 ed. São Paulo: Livraria Varela. 1998. 150p.