



Óleo vegetal – um substituto do óleo mineral para uso em transformadores: revisão do estado da arte

Vegetable oil – a substitute of mineral oil for transformers: review of the state of the art

M. Augusta G. Martins*

Labelec, Rua Cidade de Goa, n° 4, 2685 – 039 Sacavém, Portugal

Resumo

A importância do papel desempenhado pelos isolantes líquidos no bom funcionamento dos transformadores eléctricos, associada ao constante aumento das preocupações ambientais em caso de incêndio, explosão, ou eventuais fugas, que podem ocorrer nestes equipamentos, faz com que os óleos vegetais tenham vindo a ser investigados com um crescente interesse, para substitutos dos óleos minerais. Neste artigo, é efetuada a revisão do estado da arte, relativamente à comparação dos óleos vegetais com os óleos minerais, em termos das suas propriedades, incluindo ainda a influência destes óleos na degradação do papel isolante neles imerso. Apresenta-se também um resumo das principais vantagens dos óleos vegetais, em relação aos óleos minerais, identificando ainda as principais melhorias que mais recentemente, têm vindo a ser introduzidas nos primeiros. Apesar de, a nível mundial, já existirem a funcionar e com boa “performance”, algumas centenas de transformadores cheios com óleo vegetal, a sua utilização continua a ter ainda um enorme potencial de crescimento, como fluidos alternativos aos óleos minerais, para cumprirem as funções de isolante e fluido arrefecedor em transformadores, para além de elemento extintor do arco eléctrico. Para tal, é imprescindível o esclarecimento de algumas dúvidas sobre os pontos fortes e fracos destes óleos, que aqui pretendemos ajudar a clarificar.

© 2015 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos os direitos reservados.

Palavras chave: óleos vegetais; ésteres naturais; óleos minerais; transformadores; papel isolante; degradação.

Abstract

The importance of the role played by insulating liquids in the good performance of transformers, associated to the increase of environmental concerns, in case of fire, explosion, or possible oil leaks, explains the increased interest in the research about the use of vegetable oils (an earth friendly and fire resistant product), in electrical industry, as substitute of minerals oils. This paper presents the comparison of vegetable oils with mineral oils, in terms of their properties including their influence in the degradation of paper immersed in those oils. It is also presented here, the main advantages of vegetable oils, and the most important improvements that have been recently introduced in such oils, based mainly on experimental research data from laboratory. In spite of the fact that some hundreds of transformers filled with vegetable oils have been working worldwide with good performance, these oils have, until now, a limited use. So, there is a high potential increase for their application, as substitutes of mineral oils, playing the role of electrical insulating, coolant and arc quenching fluid, in electrical transformers, what demands a better knowledge about these fluids. So, the clarification of some doubts, in this field, is one of the main goals of this paper.

© 2015 Portuguese Society of Materials (SPM). Published by Elsevier España, S.L.U.. All rights reserved.

Keywords: vegetable oils; natural esters; mineral oils; transformers; insulating paper; degradation.

1. Introdução

As crescentes preocupações ambientais têm sido o principal móbil para a procura crescente de óleos de

origem natural (quimicamente ésteres naturais), com especial incidência nos óleos vegetais, para substitutos do óleo mineral utilizado em transformadores eléctricos.

* Corresponding author.

E-mail address: m.augusta.pt@gmail.com (M.A.G. Martins)

Quimicamente, os óleos vegetais são misturas de ésteres naturais de ácidos gordos, sendo que os ácidos gordos que se encontram nos óleos vegetais podem ser ácidos gordos saturados, com 8 até 22 átomos de carbono, ácidos gordos com uma ligação insaturada, os quais têm de 10 a 22 átomos de carbono, ou ainda ácidos gordos com duas ou três ligações insaturadas, os quais normalmente possuem 18 átomos de carbono (por exemplo o ácido linoleico e o ácido linolénico, respetivamente) [1].

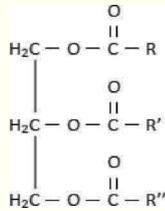


Fig. 1. Fórmula química dum éster natural (onde R, R', R'' representam cadeias de ácido gordo).

Os óleos vegetais, cuja utilização na indústria elétrica se iniciou em transformadores de potência pequenos, (transformadores de distribuição até 60 kV) e se tem alargado ultimamente a transformadores de média tensão, já começaram a ser usados (embora ainda em menor escala), em transformadores de alta tensão e em reactâncias [1-3].

As principais vantagens dos óleos vegetais, em relação aos óleos minerais convencionais, é a sua maior biodegradabilidade, (como se pode ver na Fig. 2), a sua menor toxicidade, e o seu muito mais elevado ponto de inflamação e ponto de combustão, o que é por exemplo particularmente importante para transformadores localizados no interior de edifícios, em que as consequências dum incêndio num transformador cheio com óleo mineral podem ser dramáticas.

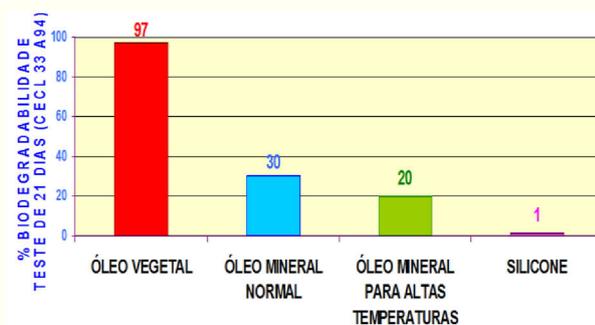


Fig. 2. Comparação da biodegradabilidade do óleo vegetal com a de óleos minerais e de silicone [1].

Contudo, algumas melhorias tem vindo a ser introduzidas pelos vários fabricantes de óleos vegetais, isolantes e de equipamentos elétricos, para que estes possam ser considerados como reais substitutos dos óleos minerais, para utilização em transformadores de maiores dimensões.

Para além disto, a necessidade de avaliação da adequabilidade dos métodos de teste usados para os óleos minerais, à caracterização dos óleos vegetais e o desenvolvimento de normas internacionais neste âmbito, têm sido outras das dificuldades que estão a ser ultrapassadas, e às quais a Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI), a maior organização internacional de normalização no domínio elétrico e eletrónico, tem dedicado bastante atenção, ultimamente.

Estudos realizados por diversos investigadores [1, 3-7], cujos resultados se encontram aliás de acordo com os estudos desenvolvidos na LABLEC [8-11], permitem augurar um futuro de sucesso, para a aplicação (de forma ainda mais significativa) destes óleos de origem natural, como dielétrico em transformadores, em substituição dos óleos minerais.

2. Óleo vegetal isolante versus óleo mineral isolante

Um dos aspetos mais importantes a ter em conta na utilização do óleo vegetal como substituto do óleo mineral, como líquido dielétrico em transformadores, é o envelhecimento do papel isolante celulósico (papel Kraft, ou papel estabilizado termicamente, este último designado com alguma frequência pelo termo inglês “thermally-upgraded”) impregnado nestes óleos.

O papel isolante, um dos principais constituintes do transformador, cujo fim de vida está normalmente associado ao fim de vida útil do transformador, em contacto com óleos de origem vegetal, tem uma velocidade de envelhecimento usualmente inferior, à que ocorre no caso do mesmo papel se encontrar imerso em óleo isolante mineral, para as mesmas condições experimentais.

Isto verificou-se, por exemplo, nos estudos experimentais realizados num óleo vegetal, (aqui designado por óleo vegetal ⁽¹⁾, em que a velocidade de degradação térmica do papel Kraft, imerso neste óleo, era menor que a velocidade de degradação do papel no óleo isolante mineral, para temperaturas superiores a 130 °C [11], o que significa que o papel é melhor preservado no óleo vegetal, do que no óleo mineral, para estas temperaturas [7-11], embora para temperaturas inferiores a 130 °C, o comportamento de

⁽¹⁾ O óleo vegetal 1, é baseado em óleo de girassol aditivado com estabilizadores de oxidação, (aditivos anti-oxidantes) [4].

ambos os óleos fosse semelhante, neste caso.

Uma outra grande vantagem do óleo vegetal, em relação ao óleo mineral, é o facto de, para a mesma quantidade de água presente no sistema óleo/papel, devido à maior higroscopicidade/maior solubilidade da água no óleo vegetal, em comparação com o óleo mineral, o papel ser conservado mais seco e consequentemente a sua degradação, por hidrólise, ser menor no óleo vegetal, do que no óleo mineral.

Para além disso, as propriedades dielétricas dum fluido não dependem do respetivo teor absoluto de humidade, mas sim da sua humidade relativa (quociente do teor absoluto de água, pelo limite de solubilidade, o qual é dado pela concentração de água no óleo correspondente à saturação).

Uma vez que a solubilidade da água nos ésteres naturais, é cerca de 20–40 vezes superior à solubilidade da água nos óleos minerais, dependendo da temperatura [5], para a mesma quantidade absoluta de água no sistema óleo-papel, a humidade relativa do óleo é cerca de 20–40 vezes menor no óleo vegetal, do que no óleo mineral e consequentemente a rigidez dielétrica, (medida através da tensão disruptiva) do óleo vegetal é normalmente melhor que a do óleo mineral, para a mesma concentração de água dissolvida.

Verifica-se mesmo que a tensão disruptiva permanece praticamente constante, com o aumento de teor de humidade no óleo vegetal, só decrescendo significativamente quando a humidade relativa ultrapassa o valor de 30% [1].

Esta maior solubilidade da água nos óleos vegetais favorece a extração da água presente no papel isolante celulósico, por parte do óleo. Isto tem um efeito muito positivo no papel, provocando um decréscimo da humidade deste e consequentemente da degradação do papel, por hidrólise e portanto um aumento no tempo de vida útil do papel [3,7] e consequentemente do transformador.

Uma segunda razão pela qual a degradação do papel imerso em óleo vegetal é menor que o do papel imerso em óleo mineral, é o facto dos ácidos gordos, formados por hidrólise do óleo vegetal, protegerem por impedimento estereoquímico, os grupos hidroxilo da celulose (que constituem os sítios reativos da celulose), impedindo portanto a despolimerização desta, por hidrólise.

Apesar disto, há algumas propriedades dos óleos vegetais, que ainda poderão ser melhoradas, por exemplo:

1) A mais elevada viscosidade dos óleos vegetais [3], continua a ser alvo de melhoria por parte dos fabricantes destes óleos, uma vez que coloca certos problemas de impregnação dos isolantes sólidos, o que

é muito importante para o uso destes óleos em transformadores. Estes problemas poderão no entanto ser minorados, com a realização da operação de impregnação, a uma temperatura mais elevada que a usada no caso do óleo mineral, uma vez que a viscosidade do óleo vegetal diminui significativamente com a temperatura.

Devido à maior viscosidade, também a circulação do óleo vegetal será mais lenta para a mesma temperatura e portanto a velocidade de arrefecimento do transformador será inferior. Contudo, a mais elevada condutividade térmica do óleo vegetal, em relação ao óleo mineral, funciona em sentido contrário, facilitando as trocas térmicas.

2) O mais elevado ponto de fluxão que pode no entanto ser melhorado através de aditivos depressores de ponto de fluxão, à semelhança do que se faz nos óleos minerais, em casos de utilização dos óleos em climas muito frios.

3) A propensão de alguns óleos vegetais para gelificar na presença de ar, também pode causar problemas adicionais na circulação do óleo, no interior do transformador, por reduzir o diâmetro útil dos canais de circulação do óleo, podendo mesmo chegar a entupi-los completamente, (sobretudo no caso dos canalículos de menor diâmetro). Contudo, a utilização destes óleos em transformadores herméticos (sem conservador de óleo, ou com conservador, mas em que o óleo deste não tem contacto direto com o ar: por exemplo conservador munido de uma membrana elástica, ou de uma almofada de azoto), elimina praticamente o impacto deste problema.

4) Outra das propriedades dos óleos vegetais, que continua a ser alvo de melhoria, é a sua baixa estabilidade à oxidação, devida à presença de compostos insaturados nestes óleos, que reagem rapidamente com o oxigénio atmosférico [12].

O grau de insaturação das moléculas é um indicador da estabilidade destes óleos, em relação à oxidação. Essa estabilidade diminui, à medida que o grau de insaturação aumenta, desde a mono-insaturação até à tri-insaturação. A relação entre a estabilidade à oxidação dos seguintes ácidos gordos: ácidos saturados / ácidos mono-insaturados/ácidos di-insaturados / ácidos tri-insaturados encontra-se na proporção 200/100/10/1, ou seja, a estabilidade à oxidação dos ácidos gordos saturados é cerca de 200 vezes superior à estabilidade à oxidação dos ácidos gordos tri-insaturados.

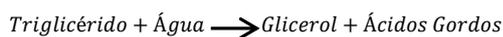
Devido à elevada concentração de ácidos gordos insaturados, certos óleos vegetais, como por exemplo o óleo de girassol convencional, têm tendência para se oxidar rapidamente, à temperatura ambiente. Por esta

razão, estes óleos têm vindo a ser alvo de diversos desenvolvimentos, através, por exemplo, de modificações genéticas.

No caso do óleo de girassol, o óleo produzido após tais modificações, possui um elevado conteúdo de ácidos gordos mono-insaturados (mais de 90% de ácido oleico), o que lhe confere uma aceitável estabilidade à oxidação (muito superior à do óleo não modificado), sendo este óleo designado por HOSO 90 Plus (High Oleic Sunflower Oil, ou seja “óleo de girassol de elevado teor de ácido oleico”) [13].

A estabilidade à oxidação dos óleos vegetais é assim enormemente dependente da composição destes, em termos do grau de saturação das moléculas. No entanto, este problema tem vindo a ser minorado pelos fabricantes de óleos vegetais, através do desenvolvimento de novas formulações, embora também a utilização destes óleos em transformadores sem acesso direto de ar, minimize este problema.

Para além da oxidação, e de acordo com o referido anteriormente, um outro tipo de degradação possível, destes óleos, é a hidrólise, na qual o éster é decomposto em ácidos gordos e glicerol, sendo a hidrólise catalisada por um aumento da temperatura e pela presença de ácidos e de metais.



Contudo, tal como já foi referido anteriormente, os ácidos gordos formados nesta reação podem reagir com os grupos hidroxilo do papel, protegendo, por impedimento estereoquímico, esses pontos do papel onde normalmente se dá o ataque das moléculas de água e reduzindo portanto a degradação do papel por hidrólise deste, o que se traduz numa importante vantagem destes óleos sobre os minerais.

5) Uma outra desvantagem do óleo vegetal, em relação ao mineral, é a menor resistividade e um mais elevado fator de dissipação dielétrica, do óleo vegetal, devido ao facto do éster ser mais polar.

As pesquisas para melhorar o comportamento global dos óleos vegetais nos seus vários aspetos continuam, e tendo vindo a incorporar as mais recentes tecnologias, tais como, por exemplo, o uso de nanopartículas dispersas no óleo, para melhoria das suas propriedades dielétricas [14].

Para além disto, um outro aspeto menos positivo que, no entanto, tem vindo a ser ultrapassado com sucesso, é a incompatibilidade de certos óleos vegetais, com alguns dos materiais normalmente utilizados em transformadores cheios com óleos minerais, por exemplo a incompatibilidade daqueles óleos com a

borracha de nitrilo, muito usada principalmente nos empanques de certos ruptores, (cuja função é garantir a vedação entre a cuba do ruptor e a cuba principal do transformador). Em vez deste material, poderá no entanto ser usada uma borracha à base de polímeros fluoretados [15], que apresentam uma boa compatibilidade com o óleo vegetal.

Como já foi referido anteriormente, principalmente pelos factos apontados em 3) e 4), os óleos vegetais têm vindo a ser usados, até ao momento, exclusivamente em transformadores sem respiração livre, ou seja, transformadores herméticos em que não há qualquer contacto direto com o ar, do óleo contido no transformador.

Nos gráficos seguintes (Figuras 3 e 4), apresentam-se as concentrações, (determinadas por Cromatografia em Fase Gasosa), de etano e hidrogénio dissolvidos em amostras de óleo vegetal (neste caso o óleo vegetal 2⁽²⁾), e mineral, (neste caso um óleo nafténico inibido: o Nynas Nytro Lyra X), contidas em contentores estanques, após um ensaio de envelhecimento acelerado, realizado em laboratório, a diversas temperaturas.

Estes resultados evidenciam assim uma outra diferença de comportamento entre o óleo vegetal e o óleo mineral. Trata-se da diferença na velocidade de geração daqueles gases, produzidos por degradação térmica de ambos os óleos, por aquecimento destes à mesma temperatura, e restantes condições experimentais idênticas, na gama de temperaturas 25 °C - 190 °C.

Duma forma geral, essas diferenças não são muito significativas, embora usualmente os óleos vegetais,

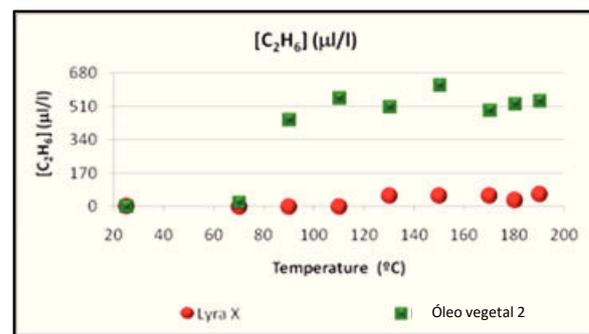


Fig. 3. Comparação entre o etano (C₂H₆) produzido por degradação térmica do óleo vegetal 2 e do óleo mineral Nynas Nytro Lyra X, na gama de temperatura 25 °C – 190 °C, [17].

⁽²⁾ O óleo vegetal 2 é baseado em óleo de soja, que é constituído por cerca de 15,1% de ácidos gordos saturados (principalmente ácido palmítico e esteárico) e cerca de 83,5% de ácidos gordos insaturados (principalmente ácido oleico, linoleico e linolénico), [16].

por degradação térmica, gerem etano em muito maior quantidade que os óleos minerais, como se pode ver no gráfico da Fig. 3. Quanto aos outros hidrocarbonetos, (por exemplo metano e etileno), a sua produção, por degradação térmica do óleo vegetal, não é muito diferente da produção destes gases em óleos minerais, embora seja variável de um óleo vegetal para outro [8-11, 17-20].

No caso do óleo vegetal 2, como se pode ver na Fig. 4, a maior produção de hidrogénio no óleo vegetal, para temperaturas inferiores a 130 °C, deve-se essencialmente ao facto de, na zona mais baixa da gama de temperaturas estudadas, o “stray gassing” ser no óleo vegetal, superior ao que ocorre no óleo mineral [17].

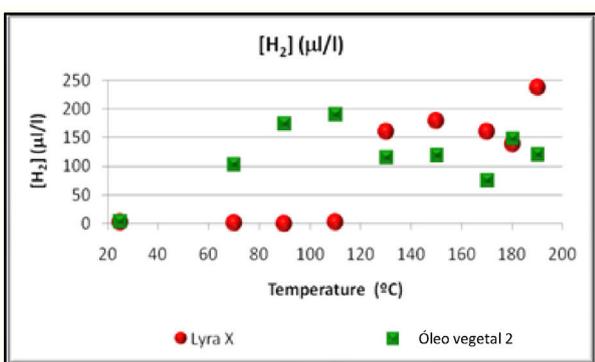


Fig. 4. Comparação entre o hidrogénio (H₂) produzido por degradação térmica no caso do óleo vegetal 2 e do óleo mineral, Nynas Nytro Lyra X, na gama de temperatura 25 °C – 190 °C [17].

Assim, os critérios de interpretação da análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo mineral deverão ser adaptados ao caso dos óleos vegetais, uma vez que as proporções de alguns dos gases, produzidos em idênticas condições, não são as mesmas que no caso dos óleos minerais.

A importância cada vez maior da utilização de óleos vegetais como fluido dielétrico, em transformadores, justificou o interesse de organizações de normalização, como o IEEE [21], ou a ASTM [22], para além da Comissão Eletrotécnica Internacional, (CEI), em desenvolver nova normalização no domínio dos óleos vegetais, não só no que concerne às especificações técnicas destes novos óleos, para uso em transformadores, mas também à vigilância destes óleos em serviço.

Por exemplo, a Norma CEI relativa às especificações de óleos vegetais novos, para utilização em equipamentos elétricos (Norma CEI 62770 Ed. 1), é relativamente recente, tendo sido publicada em Novembro de 2013 [23].

3. Utilização de óleos vegetais em transformadores

Para além dos resultados dos múltiplos estudos realizados em laboratório, a experiência recolhida, relativa ao comportamento em serviço, de transformadores cheios com óleo vegetal, é bastante promissora, para um cada vez maior alargamento do uso destes fluidos, não só a um maior número de transformadores de distribuição, como também a transformadores com tensões, potências e dimensões cada vez mais elevadas [24, 25].

É isso que tem vindo a acontecer ultimamente, sendo de referir, por exemplo, a construção, pela Siemens, de um transformador de 380 kV/110 kV, 300 MVA (cheio com cerca de 100 toneladas de óleo vegetal), que foi instalado na Subestação de Bruchsal-Kandelweg, próximo de Karlsruhe (Alemanha), e que se encontra em funcionamento desde Novembro de 2013. Este transformador pertence à Transnet BW, um operador de rede do estado de Baden-Württemberg [26] e é atualmente o maior transformador cheio com óleo vegetal, existente a nível internacional.

A crescente utilização dos óleos vegetais em transformadores, em substituição dos óleos minerais deve-se sobretudo às vantagens apresentadas por estes, no que concerne à maior proteção, não só do papel isolante [27], como já se referiu, mas também do cartão isolante [28], relativamente à degradação destes, por ação da água (degradação por hidrólise), e à melhor rigidez dielétrica do óleo vegetal, quando comparado com o óleo mineral, para o mesmo valor de humidade total no sistema óleo/papel [29].

Uma confirmação disto é o facto do grau de polimerização do papel envelhecido em óleo vegetal ser mais elevado que o do papel envelhecido em óleo mineral [6-13], nas mesmas condições operatórias (incluindo idêntica temperatura) e para o mesmo tempo. Por outro lado, embora sejam reportados na literatura, casos de sucesso de “retrofilling” (substituição, por óleo vegetal, do conteúdo total de óleo de transformadores previamente cheios com óleo mineral) [29, 30], sem introdução de qualquer alteração no projeto da parte ativa do transformador, considera-se recomendável a adaptação do “design”, modelo térmico e características construtivas dos transformadores, para uma utilização mais adequada destes fluidos, como fluidos dielétricos [31].

O uso de óleos vegetais em transformadores beneficiará, em princípio, das adaptações do respetivo projeto, de forma a ter em conta as diferenças (em relação aos óleos minerais), que esses óleos apresentam, por exemplo, na circulação do fluido no

interior do transformador, devido à sua maior viscosidade [32].

Finalmente, os óleos vegetais em serviço, à semelhança do que sucede com os óleos minerais, quando atingirem um determinado estado de degradação, poderão também ser regenerados [33], o que pode ainda aumentar significativamente o seu tempo de vida útil,

4. Conclusões

Foram aqui apresentadas as principais vantagens dos óleos vegetais, assim como os seus inconvenientes, em relação aos óleos minerais, tendo no entanto tais inconvenientes vindo a ser ultrapassados com sucesso. Contudo, ainda existem algumas melhorias a introduzir, para que estes óleos possam tornar-se mais fortes concorrentes dos óleos minerais, por exemplo no que diz respeito à melhoria de determinadas propriedades, tais como a estabilidade à oxidação, a viscosidade, o ponto de fluxo, a tangente de delta e a resistividade.

Por exemplo, estudos muito recentes realizados na Suécia, referem a obtenção duma melhoria da viscosidade e do ponto de fluxo de óleos vegetais (propriedades estas mais problemáticas em climas frios), sem comprometer no entanto, os excelentes pontos de inflamação e de combustão. Isto foi conseguido à custa de alterações na estrutura molecular do éster natural, isto porque a viscosidade dum éster natural depende da estrutura química das cadeias de ácidos gordos ligados ao glicerol, designadamente o grau de insaturação e o comprimento da cadeia.

Apesar destes problemas, (que aliás têm vindo a ser minorados), os múltiplos e relevantes fatores positivos, a favor dos óleos vegetais, faz destes, credíveis substitutos dos óleos minerais, para uso cada vez mais generalizado, em transformadores de potência.

Dos vários fatores positivos, podemos salientar a sua bastante mais elevada biodegradabilidade, o seu mais elevado ponto de inflamação, (relacionado com uma maior segurança de utilização, no que concerne à ocorrência de incêndios em transformadores), a sua muitíssimo maior capacidade para, nas mesmas condições, extrair mais água do papel nele mergulhado, (o que tem como consequência um aumento do tempo de vida útil do papel e, portanto, um aumento da vida útil do transformador), a sua mais elevada condutividade térmica e o seu mais baixo coeficiente de expansão térmica, e ainda o seu carácter renovável (recurso sustentável).

Finalmente, também não deixa de ser importante que, ao contrário dos óleos minerais, cujo processo de

produção tem um elevado índice de carbono, os óleos vegetais apresentem um valor nulo para este índice, uma vez que o CO₂ (produzido pela incineração do óleo no final da sua vida útil), é compensado pelo CO₂ absorvido nas reações de fotossíntese, que ocorrem nas plantas de que os óleos vegetais derivam.

Referências

- [1] T. Oommen, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 18 (2002) 6.
- [2] E. Nogawa, A. Santos, “Óleo vegetal. Aplicação em transformador de 145kV, 100% a óleo vegetal”, XII ERIAC Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Pr. Brasil, 20-24 de Maio (2007).
- [3] Z. Wang, A. Darwin, M. Russel, *CIGRÉ A2-D1 Seminar, Brugge 2007, Paper CIGRÉ 29.*
- [4] G. Frimpong, T. Oommen, R. Asano, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 27 (2011) 36.
- [5] D. Martin, N. Lelekakis, W. Guo, Y. Odarenko, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 27 (2011) 6.
- [6] Y. Biçen, Y. Çilliyuz, F. Aras, G. Aydugan, *Elect. Electr Eng.* 2 (2012) 141.
- [7] K. Rapp, C. Mcshane, J. Luksich, *Proceedings of the IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Coimbra, Portugal, 393 (2005).*
- [8] M. Martins, “É o óleo vegetal, uma alternativa ao óleo mineral para uso em transformadores? Estudo da degradação térmica do sistema óleo/papel Kraft versus óleo mineral/papel Kraft”, XII ERIAC (Encontro Regional Ibero-Americano da CIGRÉ), Foz do Iguaçu Pr, Brasil 20-24 Maio (2007).
- [9] M. Martins, *Cienc. Tecnol. Mater.* 20 (2008) 15.
- [10] M. Martins, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 26 (2010) 7.
- [11] M. Martins, A. Gomes, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 28 (2012) 22.
- [12] Y. Bertrand, D. Laurichesse, *Mat. Post.* 07, Lyon, 15-16 November (2007).
- [13] S. Tenbohlen, M. Koch, *IEEE Trans. Power Deliv.* 25 (2010) 825.
- [14] S. Singha, J. Viertel, M. Unge, J. Karlsson, K. Johansson, H. Faleke, *IEEE International Conference on Liquid Dielectrics (ICDL), Bled (2014).*
- [15] S. Tenbohlen, M. Koch, D. Vukovic, A. Weinslader, J. Baum, J. Harthun, M. Schafer, S. Barker, R. Frotscher, D. Dohnal, P. Dyer, *Paper 2-102 CIGRÉ, Paris (2008).*
- [16] N. Gomez, R. Abonia, H. Cadavid, H. Inês, *J. Braz. Chem. Soc.* 22 (2011) 2292.
- [17] “Estudo comparativo da degradação térmica de um óleo vegetal com a de um óleo mineral (estudo interno da EDP Labellec), *Lab. Mat. Isol.* (2011).
- [18] I. Khan; Z. Wang, I. Cotton, S. Northcote, *DEIS - IEEE* 23 (2007) 5.

- [19] Z. Wang, X. Yi, J. Huang, J. Hinshaw, J. Noakhes, IEEE Electr. Insul. Mag 28 (2012) 45.
- [20] N. A. Gómez, H. M. Wilhelm, C. C. Santos, G. B. Stocco, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 21 (2014) 1071.
- [21] IEEE C57.147, IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers (2008).
- [22] ASTM D 6871-03, Standard Specification for natural (Vegetable oil) ester fluids used in Electrical Apparatus (2008).
- [23] CEI 62770 Ed.1, Fluids for electrotechnical applications Unused natural esters liquids for transformers and similar electrical equipment (2013).
- [24] G. Pukel, R. Eberhardt, H. Muhr, F. Baumann, W. Lick, Proc.16th International Symposium on High Voltage Engineering, Johannesburg 2 (2009).
- [25] Y. Bertrand, L. Hoang, CIGRÉ Session, Paris, 2004.
- [26] www.tdworld.com, Siemens unveils vegetable oil transformer”, Transmission & Distribution World, Setembro 12 (2013).
- [27] R. Liao, S. Liang, C. Sun, L. Yang, H. Sun, Euro. Trans. Electr. Power 20 (2010) 518.
- [28] H. Gasser, C. Krause, M. Lashbrook, R. Martin, “Aging of pressboard in different insulating liquids”, 2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Trondheim, 26-30 June (2011).
- [29] C. McShane, J. Luksich, K. Rapp, 2003 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference, Dallas (2003).
- [30] J. Viertel, K. Ohlsson, S. Singha, IEEE International Conference on Liquid Dielectrics (ICDL), Bled, (2014).
- [31] D. Navas, D. Echeverry-Ibarra, H. Cadavid-Ramírez. Ingeniare, Rev. Chil. Ing. 20 (2012) 185.
- [32] E. Walsh, T. Oommen, C. Claiborne, EPRI Dielectric Fluids Environmental Workshop, New York (1997).
- [33] H. M. Wilhelm, G. B. Stocco and S. G. Batista Jr, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 20 (2013) 128.