

SERÁ O ÓLEO VEGETAL UM POSSÍVEL SUBSTITUTO DO ÓLEO MINERAL PARA TRANSFORMADORES ?

COMPARAÇÃO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO SISTEMA ÓLEO VEGETAL /PAPEL KRAFT COM A DO ÓLEO MINERAL/ PAPEL KRAFT

M. AUGUSTA G. MARTINS

LABELEC–Grupo EDP - Departamento de Materiais Isolantes
Rua Cidade de Goa nº4, 2685-039 Sacavém, Portugal
maria.augusta@edp.pt

ABSTRACT: Uses of natural esters (vegetable oil) as insulating fluid have been reported, recently. This fluid has high biodegradability and high flash point what for safety reasons is attracting some attention in electrical industry. As insulating fluid is used for cooling, insulation and protection of the solid insulating paper, it is important to have some knowledge about the paper ageing in such fluid. It is reported here, a study of paper ageing in vegetable oil, under laboratory experimental condition, at a dynamic temperature increase in the range 70°C-190°C. The experiment was conducted in sealed glass reaction vessels, for both oil (blank) and oil/paper heated inside an oven. The paper used for this study is kraft paper. Moisture formation at different temperatures, in oil and in oil/paper system, is reported together with generated gases. Changes of degree of polymerization of paper and formation of furanic compounds with changes of temperature are also reported. Paper degradation in vegetable oil is compared with paper degradation in mineral oil. Both degradation rates are similar, at the same temperature. At temperatures under 130°C the ageing of paper in vegetable oil is only a little bit quicker, than in mineral oil. However, for temperatures higher than 130°C, the rate of paper degradation in vegetable oil is even a little bit lower than in mineral oil.

Finally, are also presented the degradation models, developed to calculate the average viscosimetric polymerization degree of paper, based on 2FAL concentration dissolved in insulating oil, in both cases.

Key Words: Vegetable insulating oil. Thermal degradation. Transformer. Kraft paper. Biotemp. Polymerization degree. DP_v . Furanic compounds. 2-furfuraldehyde. 2FAL.

RESUMO: Tendo em conta que a vida útil dum transformador é dada pela vida útil do seu isolamento sólido, é importante adquirir informação sobre o envelhecimento do papel isolante, imerso em óleo vegetal.

É aqui relatada uma experiência para caracterização da degradação do papel isolante mergulhado em óleo vegetal, efectuada numa gama de temperaturas de 70°C a 190°C, em condições laboratoriais,

Os resultados obtidos foram comparados com os produzidos na experiência levada a cabo em simultâneo, em condições experimentais idênticas, mas com um óleo mineral.

O papel isolante utilizado foi papel Kraft, enquanto o óleo vegetal usado foi o Biotemp, desenvolvido pela ABB T&D, para uso em transformadores.

Para caracterização do processo de degradação do papel e também dos óleos, foram efectuadas várias análises designadamente:

O teor de humidade e de gases dissolvidos no óleo, o grau de polimerização viscosimétrico médio do papel e a concentração de produtos furânicos dissolvidos no óleo e absorvidos no papel.

Dos resultados obtidos, concluiu-se que, a velocidade de degradação do papel, em óleo vegetal, embora seja um pouco superior, até 130°C, à que ocorre em óleo mineral, nas mesmas condições experimentais, é até um pouco inferior a esta (para temperaturas superiores a 130°C).

Finalmente, com base nos resultados desta experiência foram estabelecidas equações matemáticas, que relacionam o valor do grau de polimerização do papel, com a concentração de 2FAL no óleo onde este se encontra imerso, para ambos os óleos (vegetal e mineral).

Palavras Chave: Óleo isolante vegetal. Óleo Biotemp. Degradação térmica. Transformador. Papel Kraft. Grau de polimerização. DP_v . Compostos furânicos. Furfuraldeído. 2FAL.

1. INTRODUÇÃO

O óleo mineral, produzido por destilação do petróleo é, até ao momento, o líquido mais utilizado como dielétrico, em transformadores e outros equipamentos eléctricos.

Para além de dielétrico, o óleo desempenha ainda outras funções, tais como a de fluido arrefecedor, e de protector do isolamento sólido, possuindo ainda propriedades de extinção do arco eléctrico.

Contudo, a existência de limitadas reservas de crude e as crescentes preocupações ambientais, levantadas, por exemplo, pela presença de componentes aromáticos nos óleos minerais, para além da sua muito baixa biodegradabilidade, fizeram com que a comunidade científica começasse a encarar os óleos vegetais, como uma eventual alternativa aos óleos minerais, para uso em transformadores.

Estes fluidos, para além de não tóxicos e biodegradáveis, ao contrário dos óleos minerais, não só não apresentam qualquer problema ambiental associado ao seu derrame, ou desperdício, como podem produzir-se sem quaisquer limitações.

Por estas razões, vários estudos de investigação tem vindo a ser realizados neste domínio [1] [2], no sentido de caracterizar o comportamento destes fluidos, do ponto de vista físico-químico e dielétrico [3] [4], ao mesmo tempo que se tem tentado melhorar algumas das suas propriedades (por exemplo, a estabilidade à oxidação, a viscosidade e o ponto de fluxão), com vista à sua aplicação na indústria eléctrica, concretamente em transformadores, como substitutos dos óleos minerais.

Assim, torna-se importante caracterizar também o comportamento do óleo vegetal, em termos do seu envelhecimento térmico, e principalmente conhecer as características de degradação do papel isolante, mergulhado neste fluido.

O presente trabalho reporta os resultados obtidos numa experiência de simulação laboratorial do envelhecimento térmico do sistema papel Kraft/óleo vegetal e faz a comparação, com os correspondentes resultados obtidos para o sistema papel Kraft/óleo mineral, nas mesmas condições experimentais.

2. ÓLEOS VEGETAIS. ÓLEO BIOTEMP

Os principais componentes dos óleos vegetais são triglicéridos, ou seja, ésteres de glicerol e ácidos gordos.

A composição e o grau de insaturação dependem da origem do óleo, variando significativamente as propriedades físico-químicas, com a composição, [4].

De referir que as múltiplas ligações duplas e o grupo “ β -CH” do glicerol, nos triglicéridos, oxidam facilmente, provocando um aumento de polaridade e de viscosidade do óleo, ao longo do tempo, o que conseqüentemente faz com que estes óleos, na forma pura, sejam inadequados para a sua utilização como fluidos dielétricos.

Para melhorar a viscosidade e o ponto de fluxão e obter óleos com propriedades mais adequadas ao seu uso como fluidos dielétricos, os óleos vegetais são normalmente transesterificados com alcoóis.

Quanto ao BIOTEMP, é um óleo de origem vegetal, não tóxico, com elevada biodegradabilidade, (cerca de 97%, contra 30% nos óleos minerais) [5] e elevada estabilidade química (elevado ponto de inflamação), [6].

É constituído principalmente por ácido oleico, mono-insaturado que lhe confere uma maior estabilidade química e um mais baixo ponto de escoamento [3], que a maioria dos óleos vegetais, sendo caracterizado por ter um grupo carbonilo (C=O) por cada 18 átomos de carbono [3], na cadeia de hidrocarboneto.

O óleo BIOTEMP foi desenvolvido pela ABB Power T&D, para uso em pequenos transformadores de distribuição, embora a sua utilização, em transformadores de mais elevadas tensão e potência, seja encarada com bastante interesse [3], pelo que se torna relevante o conhecimento do comportamento do sistema óleo BIOTEMP/papel isolante, em termos da respectiva degradação térmica.

3. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

3.1 Materiais utilizados

Neste estudo foi efectuada uma comparação entre o comportamento de um óleo vegetal (no caso, óleo BIOTEMP) e o de um óleo mineral (óleo nafténico não inibido – Nynas Nytro 11 EN, ao qual foi adicionado 0,3% de inibidor DBPC^(*) e 25 mg de BTA^(**) / kg óleo), em termos do seu envelhecimento térmico e principalmente da sua influência sobre o envelhecimento de papel isolante, mergulhado nestes óleos.

O papel usado foi o papel Kraft, igual ao utilizado nos enrolamentos dos transformadores e amavelmente fornecido pela ABB Sécheron S.A (Suíça).

A experiência de envelhecimento foi efectuada em ampolas cilíndricas, de vidro borossilicato, de cerca de 3,8 cm de diâmetro e 20 cm de altura, munidas de um gargalo de 4 cm de altura e 1 cm de diâmetro.

Todas as ampolas foram previamente preparadas, por lavagem com água, seguida de acetona e secagem a 100°C.

3.2 Preparação das amostras

O óleo foi previamente seco (até um teor de água ≤ 5 ppm) por aquecimento a 60°C sob vácuo, seguido de saturação com ar.

O papel kraft usado nesta experiência foi previamente seco, por aquecimento a 80°C, sob vácuo (até um teor de água $< 0,5\%$).

Foram usados, dentro de algumas ampolas, 2 provetes de condutor de cobre (5x0,5x0,1 cm), cada um revestido com 3 camadas de papel Kraft.

(*) DBPC – Di-ter-butil-para-cresol

(**) BTA – Benzotriazole – Passivador do cobre

3.3 Procedimento de envelhecimento

Após enchimento, as ampolas, com a amostra de 150 ml de óleo, ou a amostra de óleo mais os provetes de cobre envolvidos com papel, foram fechadas de forma estanque, com auxílio dum maçarico oxi-acetilénico e a seguir aquecidas numa estufa, à temperatura de 70°C.

Após permanecerem 24 horas a esta temperatura, foram retiradas as primeiras ampolas e a seguir foram incrementados 10°C na temperatura da estufa, tendo as ampolas permanecido 24 horas a esta nova temperatura, antes de serem retiradas e assim sucessivamente até 190°C, temperatura à qual também as ampolas remanescentes permaneceram 24 horas.

Para cada temperatura, foi preparada e analisada 1 ampola com 150 ml de óleo vegetal contendo 2 provetes de cobre revestidos de papel, imersos no óleo, 1 ampola de 150 ml de óleo mineral com os referidos aditivos e igualmente com 2 provetes de cobre imersos no óleo e 1 ampola de branco vegetal (óleo vegetal sem papel) e 1 outra ampola de branco mineral (óleo mineral sem papel).

Após retirar da estufa, deixaram-se arrefecer as ampolas no escuro, até à temperatura ambiente, tendo a seguir sido realizadas as seguintes análises: análise dos gases dissolvidos no óleo (CEI 60567) [7], análise do teor de água no óleo (CEI 60814) [8], análise dos compostos furânicos dissolvidos no óleo (CEI 61198) [9] e dos compostos furânicos absorvidos no papel [10] e finalmente o grau de polimerização viscosimétrico médio do papel isolante (DP_v) (CEI 60450) [11].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teor de água no óleo

À medida que a temperatura sobe, o teor de água dissolvida no óleo aumenta, não sómente no caso do óleo BIOTEMP, mas também no óleo mineral.

Contudo, a quantidade de água analisada no óleo vegetal é muito superior à analisada no óleo mineral, à mesma temperatura, em toda a gama de temperaturas.

Uma vez que a solubilidade da água no óleo vegetal é maior que no óleo mineral, então a maior concentração de água no óleo BIOTEMP e que é devida à sua natureza hidrofílica, não significará uma maior concentração de água no papel, mas sim o contrário, visto que, a água terá mais tendência a passar do papel para o óleo vegetal, do que deste para o óleo mineral. Da comparação entre o teor de água no óleo mineral com os provetes de papel imersos, e o teor de água no óleo sem papel, vê-se que só a partir de 130°C, ocorre a produção de água, por degradação do papel imerso no óleo mineral.

4.2 Gases dissolvidos no óleo

4.2.1 Oxigénio

No caso do óleo mineral, a concentração de oxigénio mantém-se mais ou menos constante, até cerca de 130°C, temperatura a partir da qual se começa a verificar um

significativo decréscimo da concentração, o que significa que as reacções de oxidação no sistema óleo mineral/papel Kraft ocorrem essencialmente a partir desta temperatura, tanto para o óleo, como para o papel, nele imerso.

No óleo vegetal, a concentração de oxigénio dissolvido é, para todas as temperaturas ensaiadas, inferior à que se verifica no caso do óleo mineral e decresce pouco, ao longo de toda a gama de temperaturas.

4.2.2 Hidrocarbonetos, hidrogénio e óxidos de carbono

O **metano**, o **etano** e o **etileno** dissolvidos no óleo, são produzidos principalmente por degradação do óleo (mineral ou vegetal), embora nas ampolas com papel se verifique um acréscimo da concentração destes gases em relação às amostras só com óleo, o que permite concluir que estes gases são também provenientes da degradação do papel.

Para temperaturas inferiores a 130°C, não há produção significativa de qualquer daqueles gases, nem por degradação do óleo, nem do papel.

Para temperaturas superiores a 130°C, há um significativo acréscimo destes 3 gases, nas ampolas com papel e óleo mineral, em relação às ampolas sem papel, o que significa que estes gases são provenientes da degradação do papel, imerso no óleo mineral. Em relação ao papel imerso no óleo vegetal, a degradação daquele só começa a produzir **metano** a partir de **180°C**, **não se formando etano e o etileno** em concentrações significativas.

O **acetileno** não foi produzido por nenhum dos 2 óleos, nem pelo papel neles imerso, em toda a gama de temperaturas estudada.

Relativamente ao **hidrogénio**, enquanto no óleo vegetal as concentrações deste gás são significativas em toda a gama de temperaturas e sempre superiores às concentrações no óleo mineral para cada temperatura, este gás só começa a aparecer no óleo mineral em concentrações significativas, para temperaturas superiores a 130°C. Nas ampolas contendo provetes de papel, para temperaturas inferiores a 150°C, o óleo vegetal produz uma concentração mais elevada de hidrogénio, que no óleo mineral (hidrogénio esse proveniente exclusivamente da degradação do óleo vegetal) enquanto que para temperaturas superiores a 150°C a situação se inverte o que está de acordo com o facto da degradação do papel ser superior no óleo mineral em relação ao óleo vegetal, para temperaturas mais elevadas.

Para além disso, não se verifica qualquer acréscimo de hidrogénio nas ampolas de óleo vegetal com papel imerso, em relação às ampolas sem papel, ao contrário do que se passa no caso do óleo mineral, a partir de 130°C, o que está de acordo com os resultados obtidos para os hidrocarbonetos.

No caso do **monóxido de carbono**, nota-se uma maior concentração deste gás no óleo vegetal, até à temperatura de 130°C, enquanto que para temperaturas superiores a esta, a concentração de CO no óleo mineral é superior à concentração no óleo vegetal, o que está de acordo com os restantes resultados obtidos.

Isto é muito provavelmente devido ao facto dos grupos carbonilo, presentes no ácido oleico do óleo BIOTEMP, começarem a produzir monóxido de carbono, a temperaturas inferiores às de produção de CO, pelo óleo mineral.

No caso do óleo mineral, que apresenta uma estabilidade térmica superior ao óleo vegetal, só se verifica a produção de CO, em quantidades significativas a partir de 130°C.

Comparando agora os resultados obtidos nas amostras com papel imerso em óleo vegetal e papel imerso em óleo mineral podemos concluir que:

- **Para temperaturas inferiores a 130°C**, a concentração do CO, proveniente da degradação do papel imerso no óleo vegetal, é superior à concentração deste gás também proveniente da degradação do papel, imerso no óleo mineral, o que significa que, para **temperaturas inferiores a 130°C, é maior a degradação do papel no óleo vegetal.**
- **Para temperaturas superiores a 130°C** a concentração de CO no óleo vegetal é bastante inferior à concentração de CO no óleo mineral, o que está de acordo com os resultados de DP apresentados no gráfico da Figura 3 e que permitem concluir que **a degradação do papel é menor no óleo vegetal, para estas temperaturas.**

Quanto ao **dióxido de carbono**, as conclusões são semelhantes, à excepção do facto do teor deste gás no óleo mineral, ser superior ao teor do gás no óleo vegetal, em toda a gama de temperaturas, tanto comparando os dois óleos sem papel, como comparando os dois óleos, com papel imerso.

4.3 Compostos furânicos

Os únicos compostos furânicos detectados, tanto no óleo BIOTEMP como no óleo mineral, foram o furfuraldeído (2FAL) e o 5-hidroxi-metil-2-furfuraldeído (5HMF). Os restantes compostos não foram encontrados, nem dissolvidos no óleo, nem sequer absorvidos no papel.

Até cerca de 130°C não há produção de compostos furânicos, uma vez que estes não são encontrados nem no óleo, nem no papel (tanto para o óleo vegetal, como para o óleo mineral), o que é para o 2FAL, visível nas Fig. 1 e 2 que apresentam respectivamente a variação com a temperatura, do 2FAL dissolvido no óleo e absorvido no papel.

Acima de 150°C, a concentração, tanto de 2FAL como de 5HMF, dissolvidos no óleo mineral, é superior à concentração de cada um destes compostos dissolvidos no óleo vegetal, verificando-se o mesmo para uma temperatura superior a 130°C, para ambos os compostos absorvidos no papel. Conclui-se assim que o 2FAL e 5HMF que se produzem no papel desde 130°C, só começam a exsudar para o óleo a partir de 150°C.

De facto, o tipo de óleo influencia a concentração de compostos furânicos, dissolvidos no óleo e absorvidos no papel, designadamente a sua solubilidade e estabilidade, de acordo com o já reportado por outros investigadores, [12]. De referir que, a concentração de 2FAL absorvido no papel aumenta com a subida de temperatura, a partir de 130°C e até 160°C, tanto no papel imerso em óleo mineral, como no papel imerso no óleo vegetal, verificando-se, em ambos os óleos, um decréscimo de 2FAL absorvido no papel, com a subida da temperatura, a partir de 160°C.

No caso do 5HMF, a subida de concentração deste no papel, ocorre em ambos os óleos, desde 130°C até 180°C, temperatura a partir da qual se verifica o decréscimo da concentração de 5HMF.

De referir que, estes decréscimos da concentração de 2FAL e 5HMF no papel, correspondem a uma subida nos acréscimos das concentrações destes dois produtos dissolvidos no óleo, para estas mesmas temperaturas.

Isto permite concluir que, à temperatura de 160°C para o 2FAL e 180°C para o 5 HMF, o equilíbrio destes produtos, que se estabelece para cada temperatura, entre a fracção que permanece no papel e a que se dissolve no óleo, é deslocado no sentido da passagem destes produtos furânicos, do papel para o óleo.

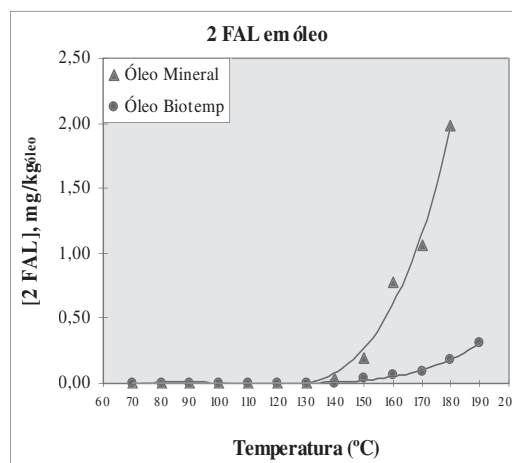


Fig. 1. Valores de [2 FAL] no óleo, para diferentes temperaturas

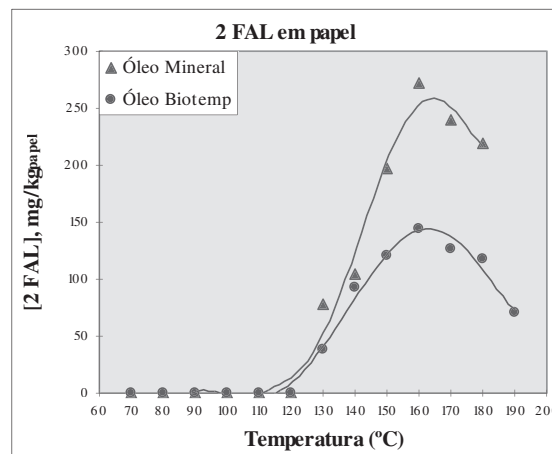


Fig. 2. Valores de [2 FAL] no papel, para diferentes temperaturas

4.4 Grau de polimerização (DP_v)

Até 130°C verifica-se que, para uma mesma temperatura, o valor de DP_v do papel mergulhado em óleo vegetal, é menor que o valor de DP_v do papel mergulhado em óleo mineral, observando-se o inverso para temperaturas superiores a 130°C, de acordo com o gráfico apresentado na Figura 3.

Assim, pode afirmar-se que, a velocidade de degradação do papel em óleo vegetal, é maior que em óleo mineral, para temperaturas inferiores a 130°C, ocorrendo o inverso para temperaturas superiores.

Os resultados obtidos nestas análises são consistentes com o facto da degradação inicial do papel consistir somente em algumas cisões de ligações fracas, unicamente com produção de uma muito pequena quantidade de 2FAL (inferior ao limite de detecção), o que aliás está de acordo com os resultados apresentados nos gráficos 1 e 2, assim como com os reportados por outros investigadores [12].

4.5 Relação DP_v versus [2FAL]

Dos resultados obtidos para a concentração de 2 FAL dissolvido no óleo e para o grau de polimerização viscosimétrico médio do papel, (DP_v), para as diversas temperaturas, extraíram-se as seguintes relações, respectivamente para o óleo vegetal e mineral, representadas graficamente na Figura 4.

Para o sistema papel kraft/óleo vegetal :

$\text{Log}_{10} [2\text{FAL}] = -0,0032 DP_v + 3,3732$ (coeficiente de regressão = 0,864)

Para o sistema papel kraft/óleo mineral :

$\text{Log}_{10} [2\text{FAL}] = -0,0046 DP_v + 4,4394$ (coeficiente de regressão = 0,997)

Estas relações são muito importantes por permitirem calcular, através da determinação de furfuraldeído dissolvido no óleo, o nível médio de degradação do papel dos enrolamentos de um transformador de uma forma muito simples, não invasiva, nem perturbadora do normal funcionamento do transformador, o qual se pode manter em serviço durante a recolha das amostras de óleo para análise. No entanto, a sua utilização, na prática, carece de alguns cuidados.

Idênticas relações foram estabelecidas para o 5HMF, mas optámos por só apresentar as relativas ao 2FAL, uma vez que, é este o produto furânico que aparece mais frequentemente no óleo, (em transformadores com papel kraft) e como tal, é o mais usado no cálculo do DP_v do papel, o qual é uma medida directa do estado de degradação deste.

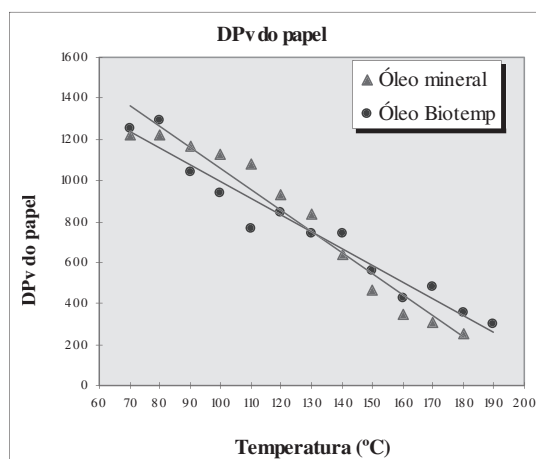


Fig. 3. Variação de DP_v com a temperatura

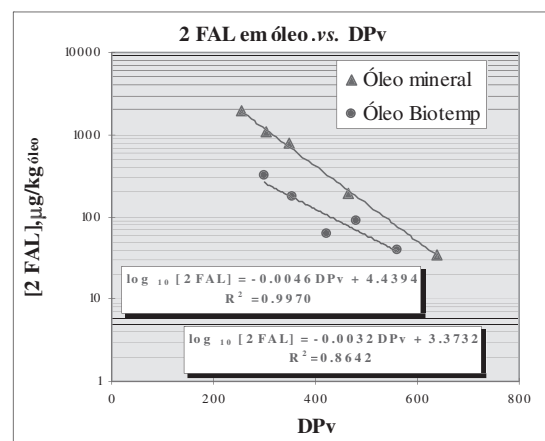


Fig. 4. Relação [2FAL] no óleo vs DP_v do papel nos casos de papel kraft imerso no óleo vegetal e imerso no óleo mineral

A degradação do papel em óleo vegetal, ser um pouco inferior à ocorrida em óleo mineral, a temperaturas acima dos 130°C, está de acordo com os resultados obtidos por Rapp e colaboradores [13] e pode ser explicada por dois mecanismos:

1 - Uma **reação de hidrólise dos triglicéridos** constituintes do óleo vegetal, com produção de ácidos gordos de cadeia longa.

Nesta reacção consome-se água dissolvida, o que por sua vez provoca a passagem de mais água do papel para o óleo, até se restabelecer o equilíbrio. Isto foi confirmado experimentalmente neste estudo, pela variação do teor de água no óleo Biotemp, em função da temperatura. O resultado é uma significativa diminuição do teor de humidade do papel, com uma consequente redução da degradação térmica deste, por hidrólise.

2 - Um **segundo mecanismo** consiste numa **transesterificação**.

Os ácidos gordos produzidos por hidrólise são esterificados, por reacção destes com os grupos hidroxilo reactivos na molécula de celulose, impedindo portanto as reacções de degradação da celulose, (despolimerização por abertura dos anéis de glucose constituintes da celulose).

Os locais activos da celulose ficam assim protegidos por impedimento estereoquímico. Esta reacção ocorre a velocidades inferiores para temperaturas mais baixas, mas torna-se cada vez mais importante, à medida que a temperatura sobe.

O facto da concentração de oxigénio dissolvido no óleo vegetal não diminuir significativamente com a subida da temperatura está também de acordo com a tese, defendida por Rapp e colaboradores [13], de que a reacção predominante de envelhecimento do óleo vegetal a elevadas temperaturas, é a hidrólise e não a oxidação, o que, por seu turno, mantém o nível de moléculas insaturadas no fluido, tornando portanto a transesterificação do papel, uma reacção mais favorável.

A reacção de transesterificação do papel foi aliás anteriormente confirmada [13], por Infravermelhos com transformada de Fourier (FTIR) como a reacção que ocorre no sistema óleo vegetal/papel Kraft a 170°C.

5. CONCLUSÃO

Da comparação efectuada entre os resultados obtidos para a degradação do sistema papel/óleo vegetal, com os obtidos para o sistema papel/óleo mineral, conclui-se que, para cada temperatura (na gama estudada), **a velocidade da degradação do papel, no óleo vegetal é muito semelhante à que ocorre no óleo mineral.** De facto, constatou-se o seguinte:

Na gama de temperaturas 70°C–130°C, a velocidade de degradação do papel é um pouco superior no óleo vegetal, em relação à verificada, no óleo mineral.

Para temperaturas superiores a 130°C/140°C, a velocidade de degradação do papel no óleo vegetal é, por sua vez, um pouco inferior a que ocorre no óleo mineral. Isto é visível, através do seguinte:

- A concentração de 2FAL e 5HMF dissolvidos no óleo vegetal é inferior aos respectivos valores medidos no óleo mineral, para toda a gama de temperaturas em que as concentrações destes produtos são mensuráveis no óleo (140°C–190°C) e o mesmo se passa com a concentração destes produtos retidos no papel.
- O grau de polimerização do papel mergulhado no óleo vegetal é maior que o grau de polimerização do papel mergulhado em óleo mineral, para a mesma temperatura, na gama de 130°C-180°C.
- A mais baixa concentração de CO₂ e a muito mais baixa concentração de CO, no óleo vegetal com papel imerso, em relação ao óleo mineral com idêntico papel imerso.

Estas observações, relativas à degradação do papel num e noutro tipo de óleo, permitem assim considerar, deste ponto de vista, o óleo vegetal, como um possível competidor do óleo mineral, não só para os muito pequenos transformadores de distribuição, mas também para transformadores de maior potência, que normalmente funcionam com cargas e consequentemente com temperaturas mais elevadas.

Portanto, embora seja bastante desejável e até imprescindível, a melhoria das propriedades dos óleos vegetais, referidas anteriormente como piores que as dos óleos minerais, nomeadamente a sua baixa estabilidade, elevada viscosidade e elevado ponto de fluxão, podemos dizer que, os resultados aqui apresentados levam a considerar o óleo vegetal, como um sério candidato a futuro substituto do óleo mineral, para a utilização como dieléctrico, em transformadores de potência.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Oommen, T.V. and Claiborne, C.C. – “Biodegradable insulating fluid from high oleic vegetable oils” – CIGRÉ, Paper 15-302, Paris, 1998.
- [2] Oommen, T.V.; Claiborne, C.C.; Walsh, E.J and Baker, J.P. – “Biodegradable transformer fluid from high oleic vegetable oils” – Proceedings of the Sixty-Sixth Annual International Conference of Doble Clients, 1999, Section 5-3.
- [3] Lewand, L.R. – Report of the Doble Oil Committee Meeting, April 14, 1999.
- [4] Kapila, S.; Seemamahannop, R.; Shi, H.; Kittiratanapiboon, K; Koneni, V.; Kolli, Ranjith; Flanigan, V.; Tumiatti, V. – “Assessment of relative oxidative stability and physical properties of biogenic insulating oils” - My Transfo Conference, Torino, 2004.
- [5] Bertrand, Y.; Hoang, L. C.; Valagro – “Vegetable oil as substitute for mineral insulating oils in medium-voltage equipments”- CIGRÉ, Paper D1–202, Paris, 2004.
- [6] Oommen, T.V.; Claiborne, C. C.; Mullen, J. T. – “Biodegradable electrical insulating fluids” – IEEE Electrical Insulation Conference, Chicago, Illinois, Sept. 22-25, 1997.
- [7] Norma CEI 60567 – “Oil-filled electrical equipment – Sampling of gases and of oil for analysis of free and dissolved gases – Guidance– 3rd edition, June 2005.
- [8] Norma CEI 60814 – “Insulating liquids – Oil-impregnated paper and pressboard – Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration” – 2nd edition, August 1997.
- [9] Norma CEI 61198 – “Mineral insulating oils – Methods for the determination of 2-furfural and related compounds” – 1st edition, September 1993.
- [10] Pablo A. – CIGRÉ TF 15-01-03 – Documento interno – 2001.
- [11] Norma CEI 60450 – “Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic insulating materials” – 2nd edition, April 2004.
- [12] Mulej, M.; Varl, A; Končan-Gradnik, M. – “Up-to-date experience on furans for transformers diagnostics” (Documento interno EIMV), 2005.
- [13] Rapp, K.J.; Mcshane, C.P; Luksich, J. – “Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and kraft paper” – IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Coimbra, Portugal, 2005.