

# Benefícios do uso de fluidos de ésteres naturais nos sistemas de isolamento

David Bingenheimer, Eugene Del Fiacco e Kevin Rapp, da Cooper Power Systems dos EUA; José Mak, da B&M Pesquisa e Desenvolvimento; Luiz Franchini, da Itaipu Transformadores; e Vagner Vasconcellos, da CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz

*Para uso como fluidos dielétricos, os ésteres naturais apresentam, em comparação com óleos minerais, maior vida útil e melhores características térmicas, o que permite fabricar transformadores menores, mais rentáveis e com maior segurança contra incêndios. Além disso, são extraídos de sementes, matéria-primas renováveis, recicláveis, atóxicas e biodegradáveis produzidas localmente, o que se traduz em vantagens ambientais e econômico-sociais.*

Originalmente desenvolvidos como fluidos dielétricos com alto ponto de ignição, os ésteres naturais, obtidos a partir de óleos vegetais extraídos de sementes, vêm sendo usados como alternativa aos óleos minerais em transformadores há mais de uma década. Testes de longa duração demonstram que os ésteres naturais são dielectricamente equivalentes aos óleos minerais em aplicações de alta tensão [1]. Mais de 350 mil transformadores novos e retropreenchidos (que anteriormente utilizavam óleo mineral) com

éster natural, de até 250 kV e 240 MVA, estão atualmente em operação em todo o mundo.

Por serem produzidos a partir de materiais sustentáveis, os óleos vegetais isolantes possuem propriedades ambientais que agregam valor para usuários com consciência ambiental e/ou localização sensível. A sustentabilidade do produto está baseada em duas contribuições básicas: por ser proveniente de uma cultura renovável, biodegradável, atóxica e neutra em carbono, e por ampliar o ciclo de vida útil

dos isolamentos celulósicos, ao utilizar a plena capacidade térmica dos sistemas em ésteres naturais e papel Kraft na redução do conteúdo de matéria-prima necessária para transformação de tensão.

Testes de envelhecimento acelerados revelam que os ésteres naturais não apenas funcionam efetivamente com materiais de isolamento comuns, como também melhoram o envelhecimento e a expectativa de vida resultante prevista para o papel de celulose em projetos vedados [2].



Transformador de 88 kVA, {85 K}, de éster natural (11,4 ou 13,8 kV – 127/220 V) atualmente em produção no Brasil: vista externa (a) e interna (b) [11]

## Sustentabilidade econômica

Ésteres naturais são materiais classificados como de alta temperatura. Aplicados em transformadores selados, aliviam as limitações de temperaturas de operação que atualmente embasam as normas de transformadores isolados em óleo mineral. Os transformadores resultantes, menores e mais leves, dão continuidade ao processo de uso de novas tecnologias para otimização de projetos, como a redução do uso de material, já mencionada.

## Limites dos sistemas de isolamento

Sistemas de isolamento compostos

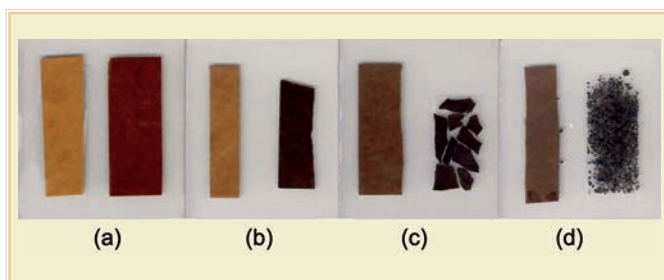


Fig. 1 – Envelhecimento relativo de papel termicamente melhorado em óleo mineral e éster natural depois de 500 h (a), 1000 h (b), 2000 h (c) e 4000 h (d), a 170°C [3]

Tab. I - Taxa de envelhecimento relativo V de papel termicamente tratado em óleo mineral [10] e éster natural a temperatura  $\theta_h$  do ponto mais quente

$\theta_h$ (°C)	Óleo mineral	Éster natural
100	0,35	0,05
105	0,60	0,09
110	1,0	0,14
115	1,66	0,24
120	2,71	0,39
125	4,38	0,63
130	6,98	1,0
135	11,0	1,58

de celulose sólida e ésteres naturais fluídos, aplicados em transformadores projetados para uso com os tradicionais limites operacionais, apresentam vida térmica muito mais longa quando comparados com sistemas de óleos minerais. Este prolongamento da vida útil do isolamento, e conseqüentemente, dos transformadores, resulta em custos de ciclo de vida mais baixos e adia a substituição de ativos. O retropreenchimento de transformadores existentes com fluido de ésteres naturais pode aumentar significativamente a capacidade de carregamento da base instalada sem acelerar a taxa de envelhecimento do isolamento. O fator limitador de carga pode deixar de ser o sistema de isolamento, passando a ser outro componente com sensibilidade ao calor usado em transformadores de distribuição.

### Capacidade térmica

As avaliações térmicas e os estudos de envelhecimento acelerado usados como padrão pela indústria demonstram que os sistemas de isolamento com papel Kraft e fluido de éster natural envelhecem a uma taxa consideravelmente mais lenta em comparação com os sistemas tradicionais a base de óleo mineral e papel Kraft [4, 5]. A figura 1 mostra exemplos de papel envelhecido com óleo mineral e fluido de éster natural.

O fluido de éster natural interage com a água produzida à medida que o papel envelhece, eliminando-a quimicamente por hidrólise [6-8]. Este mecanismo é o motivo para o envelhecimento mais lento e o prolongamento da vida térmica do sistema de isolamento operado a temperaturas normais de operação para óleo mineral/papel Kraft.

A taxa de envelhecimento pode ser reduzida em sistemas de isolamento de transformadores existentes [9], resultando em extensão da vida útil desses equipamentos.

A capacidade térmica de sistemas de isolamento é normalmente representada por uma curva de envelhecimento, plotada com a taxa de envelhecimento relativo *versus* a temperatura do ponto mais quente [10]. A taxa de envelhecimento relativo de sistemas de isolamento de óleo mineral/papel termicamente aprimorado (TUK) é dada pela equação (1), e a taxa relativa para os sistemas éster natural/TUK, derivada de estudos de envelhecimento, é dada pela equação (2). A tabela I compara as taxas de envelhecimento relativo para óleo mineral e éster natural a várias temperaturas.

$$V_{mo} = e^{\left( \frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\theta_h+273} \right)} \quad (1)$$

$$V_{ne} = e^{\left( \frac{15000}{130+273} - \frac{15000}{\theta_h+273} \right)} \quad (2)$$

onde:

$V_{mo}$  = taxa de envelhecimento relativo em óleo mineral;

$V_{ne}$  = taxa de envelhecimento relativo em éster natural; e

$\theta_h$  = temperatura do ponto mais quente (°C)

Usando esta abordagem, os ésteres naturais permitem aumentar a vida útil dos sistemas de isolamento em comparação com óleo mineral para a mesma temperatura de ponto mais quente, ou oferecem vida útil similar a uma temperatura de ponto mais quente aumentada, conforme mostrado na figura 2. A

capacidade de operar o transformador a temperaturas mais altas permite aumentar seu carregamento e, ao ser incorporada em novos projetos, resulta em equipamentos menores e com melhor custo-benefício, com perfis de segurança melhorados [11]. As normas internacionais para materiais de isolamento em altas temperaturas estão começando a reconhecer esta tecnologia [12].

### Segurança contra incêndio

O éster natural de uso mais comum é o dielétrico classe K. O fluido apresenta zero incidentes de incêndios em transformadores. Isto reduz os requisitos de mitigação e os custos associados. A não-ocorrência de incêndios representa redução de limpeza, tempo de parada e dos custos de substituição. Transformadores cheios com fluido de éster natural classe K facilitam a realização de instalações de menor custo e mais eficientes no interior de prédios, reduzindo ou eliminando completamente os requisitos de armários de segurança (*vaults*) e *sprinklers* [13]. Em instalações ao ar livre, o uso de fluido de éster natural pode também eliminar a necessidade de *sprinklers* e barreiras corta-fogo e reduzir significativamente as distâncias de separação entre o transformador e o prédio ou entre transformadores [13].

### Sustentabilidade ambiental e social

Óleos de ésteres naturais são produtos agrícolas e, portanto, recursos renováveis. Podem ser reciclados (em biodiesel, por exemplo), e “prontamente biodegradáveis” nos testes OECD

(figura 3). Como o crescimento de plantas sequestra dióxido de carbono da atmosfera, os ésteres naturais podem ser essencialmente neutros em carbono. Dependendo dos aditivos usados pelo fabricante, os testes de toxicidade aquática e oral severa mostram que o fluido de ésteres naturais pode ser atóxico e atende às exigências regulatórias para materiais não perigosos.

O maior impacto, porém, está em reduzir a necessidade de explorar, obter e refinar matérias-primas para a fabricação de transformadores. Ao otimizar os projetos de transformadores para temperaturas superiores, reduzindo o conteúdo de material, permite-se que o abastecimento atual dessa matéria-prima seja consumido em novas aplicações.

Muitos governos também têm encorajado o uso de produtos de base biológica para reduzir o consumo de recursos não-renováveis. O uso de fluidos dielétricos à base de ésteres naturais como substitutos diretos para óleos de transformadores reduz o consumo de petróleo, que, na maioria dos países, é importado. Os óleos vegetais, por sua vez, podem ser fabricados nas regiões produtoras de sementes, contribuindo para a geração de renda no meio rural e para as economias locais.

### Experiências globais

Em muitos nichos do mercado de transformadores especificam-se temperaturas nominais mais altas. Os geradores eólicos, por exemplo, têm usado materiais para altas temperaturas na construção de transformadores do tipo *slim* (mais finos), enfatizando as limitações físicas de tamanho que devem ser atendidas. Além disso, usuários de transformadores para aplicações internas, com limitações semelhantes em termos de tamanho, frequentemente se beneficiam de projetos compactos. À medida que a tecnologia de ésteres naturais for melhor entendida, o incentivo econômico para especificar projetos com temperaturas de operação mais altas, menores e mais leves ampliará as aplicações.

Nos EUA, um número crescente de coalizões de concessionárias está adotando tecnologias sustentáveis. Os transformadores com temperaturas no-

## SOLUÇÕES DE QUALIDADE PARA CONEXÕES COM CABOS INDUSTRIAIS



**ÖLFLEX®**  
Cabos de ligação e controle



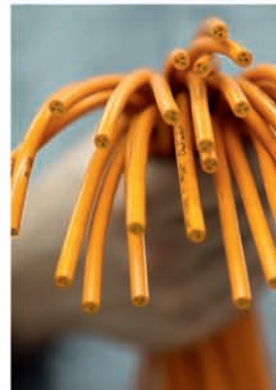
**SKINTOP®**  
Prensa-cabos



**UNITRONIC®**  
Cabos de dados e sinal



**EPIC®**  
Conectores industriais



**ETHERLINE®**  
Cabos industriais para rede ethernet



**HITRONIC®**  
Fibra ótica



**SILVYN®**  
Sistemas de proteção e guia para cabos



**FLEXIMARK®**  
Sistemas de identificação

- Tecnologia de última geração
- Apoio total ao cliente
- Referência mundial para o mercado
- Consulte também nossa linha de conectores e acessórios

www.lappbrasil.com.br  
atendimento@lappbrasil.com.br  
(11) 2166-4166



**LAPP GROUP**

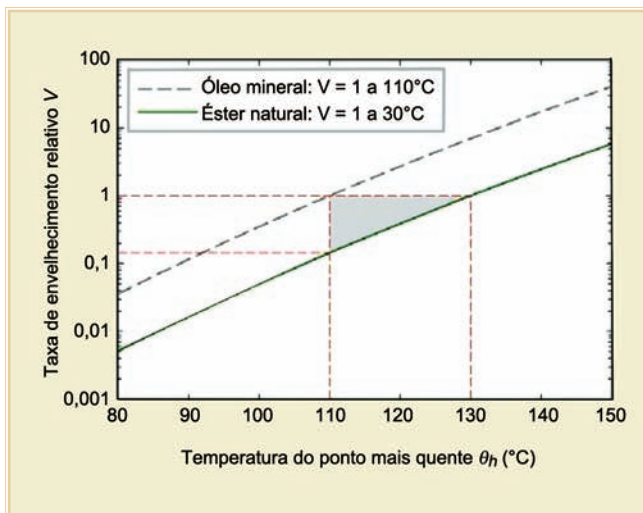


Fig. 2 – Taxa de envelhecimento relativo de papel termicamente tratado em óleo mineral [10] e éster natural. A área sombreada representa a capacidade térmica adicional dos sistemas de isolamento éster natural/papel termicamente tratado

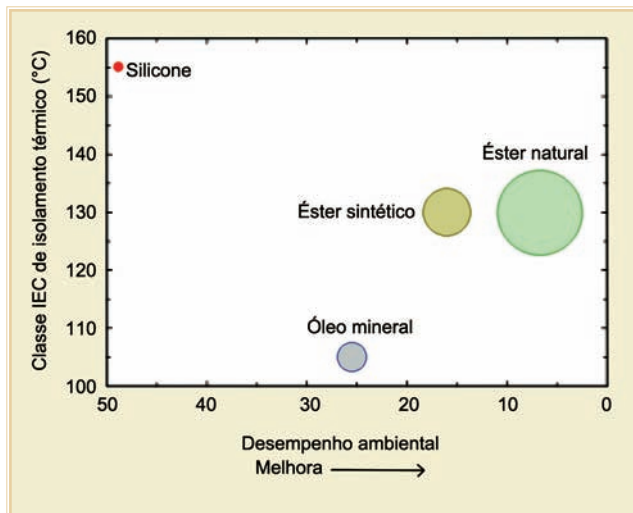


Fig. 3 – Desempenho ambiental [14] versus classe de isolamento térmico do líquido (igual à temperatura de operação máxima recomendada para obter vida útil aceitável para o líquido) [12]. O diâmetro do símbolo é proporcional ao percentual OECD 301 biodegradabilidade imediata

minais superiores devem trazer um impacto positivo nos custos anuais das empresas-membros, semelhante à experiência evidenciada na Ásia. Uma concessionária asiática, cuja base de clientes atendida é significativa, recentemente especificou transformadores menores e mais compactos usando tecnologia de ésteres naturais, prevendo uma economia de até 20% em seu orçamento anual para transformadores.

### A experiência brasileira

No Brasil, um projeto está desenvolvendo transformadores para tirar o máximo proveito dos sistemas de isolamento de éster natural e papel com tratamento térmico. Um transformador de distribuição de 88 kVA, {85 K} com éster natural foi projetado para substituir um equipamento padrão de 45 kVA, usando o mesmo tanque do transformador. Isto é, a capacidade aumentou em 95%, mesmo com a unidade de 88 kVA pesando 85 kg menos do que a original, reduzindo o esforço necessário para instalação e manutenção e a quantidade de ferragem para montagem. Comparado a um transformador convencional de 75 kVA (potência padrão mais próxima), que utiliza 102 litros de óleo mineral, o transformador de 88 kVA a éster natural usa 81 litros de fluido de éster natural com perdas mais baixas em

vazio. No projeto de substituição do equipamento de 45 kVA, o custo por kVA também foi reduzido em um terço, de € 36,75 para € 23,25. A figura 4 mostra o transformador original e o protótipo reprojetoado com éster natural. Na página 178, é mostrado um exemplar dos novos transformadores de produção a éster natural. Existem, atualmente, aproximadamente 2100 transformadores desse tipo, com mais de 50 milhões de horas de operação em redes de distribuição, com taxas de falha inferiores às de transformadores padrão. A concessionária tem planos para colocar em operação outras 900 unidades em 2011.

### Sustentabilidade brasileira

Todos os materiais usados na produção desses transformadores são produzidos e estão disponíveis no mercado nacional, o que reduz custos de transporte e beneficia a economia local. Isto inclui a cultura e esmagamento das sementes, refino do óleo e manufatura do fluido de éster natural. A biodegradabilidade e a natureza atóxica do óleo vegetal ajudam a evitar problemas com contaminação ambiental e minimizam o dano à flora e fauna. O fluido de éster usado pode ser facilmente descartado ou reciclado como biodiesel. Além dis-

so, como já mencionado, sua produção é essencialmente neutra em carbono.

### Conclusões

Os materiais para temperaturas mais elevadas têm sido utilizados em nichos de mercado para transformadores há muitos anos. A tecnologia a base de ésteres naturais está se tornando cada vez mais aplicável e viável economicamente, e as capacidades do material têm sido melhor compreendidas. Os sistemas de isolamento de transformadores compostos por papel isolante e líquido de arrefecimento dielétrico de éster natural, operados a temperatura do ponto mais quente de 130°C, envelhecem à mesma taxa que sistemas que utilizam papel isolante e óleo mineral operados a temperatura do ponto mais quente de 110°C. Projetos realizados segundo as normas atuais minimizam a importância do sistema de isolamento como fator limitante do carregamento. A aplicação dessa tecnologia resulta em transformadores menores e mais rentáveis com desempenho aprimorado em segurança contra incêndio.

Para os transformadores de distribuição brasileiros {de 85 K}, os novos projetos apresentam as mesmas dimensões e geometria externa com capacidade 95% superior em comparação com os transformadores padrão de 45 kVA. O

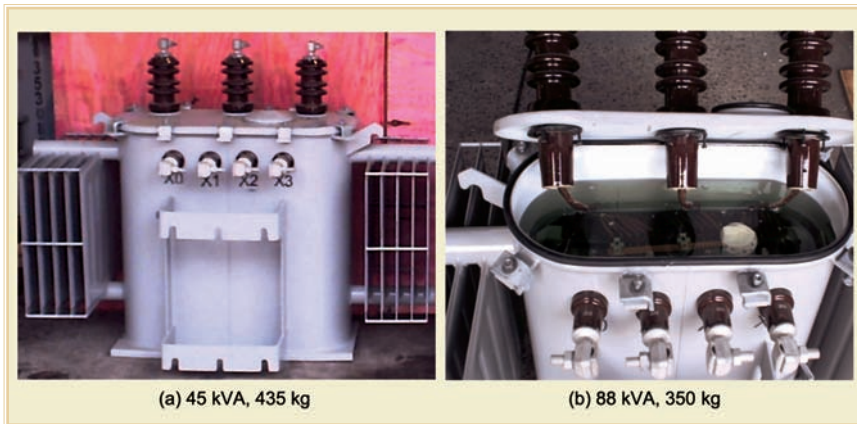


Fig. 4 – Potências nominais e pesos de transformadores (11,4 ou 13,8 kV – 127/220 V) usando o mesmo tanque: com óleo mineral (a) e com éster natural (b) [11]

projeto demonstra a compatibilidade e adequação dos materiais escolhidos, resultando em significativas reduções de peso, volume de fluido e custo por kVA.

#### Referências

[1] K. J. Rapp, J. Corkran, C. P. McShane, T. A. Prevost: *Lightning impulse testing of éster natural fluid gaps and insulation interfaces*. IEEE Trans. Dielectrics & Electrical Insulation, vol. 16, no. 6, 1595-1603. 2009.

[2] C. P. McShane, G.A. Gauger, J. Luksich: *Fire resistant éster natural dielectric fluid and novel insulation system for its use*. Proceedings Transmission and Distribution Conf., IEEE, vol. 2, 890-894, 1999.

[3] G. H. Brundtland: *Report of the World Commission on Environment and Development: our common future*. A/42/427 - Development and International Co-operation: Environment, UN, 1987.

[4] C. P. McShane, K. J. Rapp, J. L. Corkran, G. A. Gauger, J. Luksich: *Aging of paper insulation in natural éster dielectric fluid*. Proceedings Transmission and Distribution Conf., IEEE, vol. 2, 675-679, 2001.

[5] C. P. McShane, K. J. Rapp, J. L. Corkran, G. A. Gauger, J. Luksich: *Aging of plain Kraft paper in éster natural dielectric fluid*. Proceedings 14th Intl. Conf. on Dielectric Liquids, IEEE, 173-177, 2002.

[6] K. J. Rapp, C. P. McShane, J. Luksich: *Interaction mechanisms of éster natural dielectric fluid and Kraft paper*. Proceedings 15th Intl. Conf. on Dielectric Liquids, IEEE, 393-396, 2005.

[7] A. W. Lemm, K. J. Rapp, J. Luksich: *Effect of éster natural (vegetable oil) dielectric fluid on the water content of aged paper insulation*. Proceedings 10th Intl. Electrical Insulation Conf., EIA, 65-70, 2006.

[8] L. Yang, R. Liao, C. Sun, J. Yin, M. Zhu: *Influence of vegetable oil on the thermal aging rate of Kraft paper and its mechanism*. Proceedings Intl. Conf. on High Voltage Engineering and Application, IEEE, 381-384, 2010.

[9] C. P. McShane, J. L. Corkran, K. J. Rapp, J. Luksich: *Aging of paper insulation retrofilled with natural éster dielectric fluid*. Annual Report Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 124-127, 2003.

[10] IEC standard 60076-7, Ed. 1.0, 2005-12, Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers.

[11] V. Vasconcellos L. R. Franchini, J. Mak: *Transformador de distribuição de maior vida útil e menor agressividade ambiental*. XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, SENDI, 2010.

[12] IEC/TS technical standard 60076-14, Ed. 2.0, 2009-05. Power transformers - Part 14: Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials.

[13] FM Global Property Loss Prevention Data Sheets 5-4, 2010, Transformadores, Factory Mutual, Johnston, USA, 11-18.

**Reconhecimentos:** Os autores agradecem a Victor Gonzalez (Mastrafo) pelas críticas e sugestões.

Trabalho apresentado no 21º Cired - Congresso Internacional de Redes Elétricas de Distribuição, realizado de 6 a 9 de junho de 2011, em Frankfurt, Alemanha.



### Nova linha de Produtos

- Para-Raios
- Isoladores de Porcelana/ Poliméricos
- Chave Fusível
- Eletroferragens
- Pré-Formados (Alça, Laço e Emendas)
- Conectores
- Reatores de Iluminação



**Fornecedor Credenciado do Cartão BNDES**

**TRABALHE CONOSCO**  
Estamos contratando representantes em todo o Brasil

## Capacidade de Estocagem Organização e Logística Agilidade no Atendimento Disponibilidade de Produtos

- Cabos de Alumínio (CA/CAA/MULTIPLEXADOS/PROTEGIDOS DE 15 E 125KV E MÉDIA TENSÃO)
- Cabos de Cobre (NU/750V/0,6 1KV/ PROTEGIDOS 15KV E MÉDIA TENSÃO)
- Cordalhas de Aço

No mercado de cabos desde 2001, como um dos principais distribuidores de CABOS DE ALUMÍNIO NUS, MULTIPLEXADOS até 1KV e COBERTOS até 25KV, a Sulminas Fios e Cabos conta com uma grande disponibilidade de cabos em estoque e agilidade nas entregas.

Com atuação em todo o Brasil, a Sulminas transmite segurança e credibilidade no mercado de distribuidores de cabos de alumínio para o segmento de distribuição de energia elétrica.

Av. João Pinheiro, 3.555 - Ponte Preta  
Poços de Caldas - MG  
Tel.: (35) 3714-2660 - Fax: (35) 3714-4108

[www.sulminasfiosecabos.com.br](http://www.sulminasfiosecabos.com.br)