

# Transformador de Distribuição de Classe 85°C Auto-protegido e de Menor Custo por kVA

Roberto de Vasconcellos Dias, Light – Rio de Janeiro - RJ, Diogo Kataoka, Adelfo Barnabé, Newton José Guaraldo e José Mak – B&M Pesquisa e Desenvolvimento – Campinas – SP.

**Resumo** – Inicialmente, desenvolveu-se 3 modelos de transformadores auto-protegidos, utilizando óleo isolante vegetal, nas configurações de disjuntor no lado AT, disjuntor no lado BT e com disjuntor lado BT externo.

Os três protótipos foram produzidos e submetidos a ensaios de laboratório de AT, ensaios de rotina junto ao fabricante e ensaios de curto-circuito no laboratório da IEE-USP.

Os ensaios de curto-circuito contemplam ensaio de curto, ensaio de defeito interno e ensaio de coordenação do disjuntor de baixa.

Após os ensaios, os protótipos retornaram à fábrica para inspeção visual e submetido aos ensaios de rotina para determinação de possíveis alterações das características de projeto.

A inspeção visual e resultados dos ensaios de rotina não constataram nenhuma não conformidade nos protótipos ensaiados.

Em função da possibilidade do transformador poder trabalhar com temperaturas do óleo de até 85°C, podendo fornecer uma potência adicional, a potência dos protótipos foi escolhida em 120kVA, após extensas discussões da equipe executora e da concessionária, com a seguinte visão: Estabelecer uma potência diferente das definidas em norma, que venha permitir a utilização do transformador como elemento “chave” para atendimento do sistema da concessionária, podendo vir a ser operado sem prejuízo de investimento, em potência menor. Além de, como se trata de um desenvolvimento com previsão de utilização de éster natural e com possibilidade de operação até 85°C, vir a estabelecer marco normativo específico para esta concepção técnica.

No projeto construtivo, para orientar os parâmetros de ensaios adotou-se como referência, o texto da norma técnica Light NTL-0179/01-R1 “Transformador de Distribuição Auto-Protegido (AP) Para Redes Aéreas Urbanas”.

Na etapa de reprojeto e construção final dos protótipos ficou decidido que seriam construídos 2 protótipos do tipo 1 e dois protótipos do tipo 2 das quais 3 protótipos seguiriam para ser instalados no campo e um protótipo permaneceria na fábrica para ser objeto de testes e experimentação adicionais visando melhorias técnicas, de materiais e/ou de geometria.

**Palavras-chave** – Distribuição, Eficiência Térmica, Redução de Custo, Transformador, Vida útil.

## I. INTRODUÇÃO

Os transformadores da rede de distribuição elétrica constituem a última etapa de transformação necessária para a adequada alimentação das cargas constituídas por residências, comércios, iluminação pública e indústrias.

Apresentam-se instalados normalmente em postes quando a distribuição é aérea ou em poços quando a distribuição é do tipo subterrâneo.

Pela pequena capacidade de transformação adequada ao circuito secundário, torna-se necessário aumentar a quantidade de transformadores para atender a demanda de uma região.

Os transformadores de distribuição aéreos estão instalados normalmente a um nível pouco abaixo do circuito primário de alimentação, estando sujeitos aos surtos atmosféricos incidentes neste e sobretensões de frequência industrial originadas por curto-circuitos ou manobras na rede.

Normalmente, os transformadores são protegidos contra surtos atmosféricos através de pára-raios e possuem também chaves fusíveis para proteção contra sobrecorrentes ou curto-circuitos.

Os pára-raios apresentam boa proteção, porém, estudos estatísticos têm apresentado elevada taxa de falha do mesmo, consequentes danos irreversíveis aos transformadores, provocando efetivo aumento de custos e do número de falhas, com conseqüente queda da disponibilidade e qualidade do fornecimento da energia elétrica.

Os elos fusíveis de proteção contra sobrecorrente ou curto-circuito atuam corretamente quando bem coordenados, mas ocasionando longas interrupções indesejáveis. Já transformadores auto-protegidos por disjuntores internos tem apresentado alto custo do componente principal de proteção, o disjuntor, importado e com comando de fácil acesso, levando aos consumidores a bloquearem a alavanca de rearme para impedir a atuação da proteção e consequentemente falta de energia.

Afim de solucionar estes problemas, foi desenvolvido projeto, especificação e construção de protótipo de novo dispositivo com o objetivo de proteger o transformador contra sobretensão, de menor custo de falha, custo reduzido e proteções de sobrecorrentes que diminuam o tempo de interrupção de energia.

Existe uma longa faixa de aplicações e configurações de dispositivos para tais fins, entretanto, o artigo procurou focalizar especificamente uma solução mais adequada e orientada para a proteção de transformadores de distribuição aéreos.

## II. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Tensão Primária: 13.2 kV  
 Tensão Secundária: 220/127 Volts  
 Numero de fases: 3  
 Nível de Isolamento AT: 15/95 kV  
 Frequência Industrial: 60 Hz  
 Potencia: 120 kVA  
 Grupo de Ligação: Dyn1  
 Elevação de Temperatura: 85°C  
 Impedância Percentual: 3,5 ± 7,5%  
 (referida a 55°C)

### III. APRESENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

#### A. Protótipo Tipo 1 (Disjuntor na AT)

- ◆ Para-raio 12 kv de instalação externa
- ◆ Fusível de alta-tensão: Modelo ELSP 65 A
- ◆ Interruptor Magnex Trifásico: MX3BN1MDE10
- ◆ Equipamento de sobrecarga incorporado ao interruptor
- ◆ Pára-raios de baixa tensão a ser definido
- ◆ Sinalizador de atuação

#### B. Protótipo Tipo 2 (Disjuntor na BT)

- ◆ Para-raio 12 kv de instalação externa
- ◆ Fusível de alta tensão: Modelo ELSP 65 A
- ◆ Termômetro de óleo, ajustado para desligar o disjuntor de BT
- ◆ Caixa de Fibra acoplada no transformador
- ◆ Disjuntor de baixa tensão
- ◆ Pára-raios de baixa tensão a ser definido
- ◆ Leds de sinalização de tensão por fase
- ◆ Led de sinalização de atuação do termômetro

#### C. Protótipo Tipo 3

- ◆ Pára-raios 12 kv de instalação externa
- ◆ Fusível de alta tensão: Modelo ELSP 65 A
- ◆ Caixa de baixa tensão (externo ao transformador)
- ◆ Disjuntor de baixa tensão a ser definido
- ◆ Pára-raios de baixa Tensão
- ◆ Leds de sinalização de tensão por fase

Foram definidas a construção dos protótipos:

Tipo 1 –Disjuntor AT+Fusível AT

Tipo 2 –Disjuntor BT+Fusível AT

Submetidos a ensaios de rotina, Impulso, ensaios de curto-circuito no IEE-USP.

#### D. SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO.

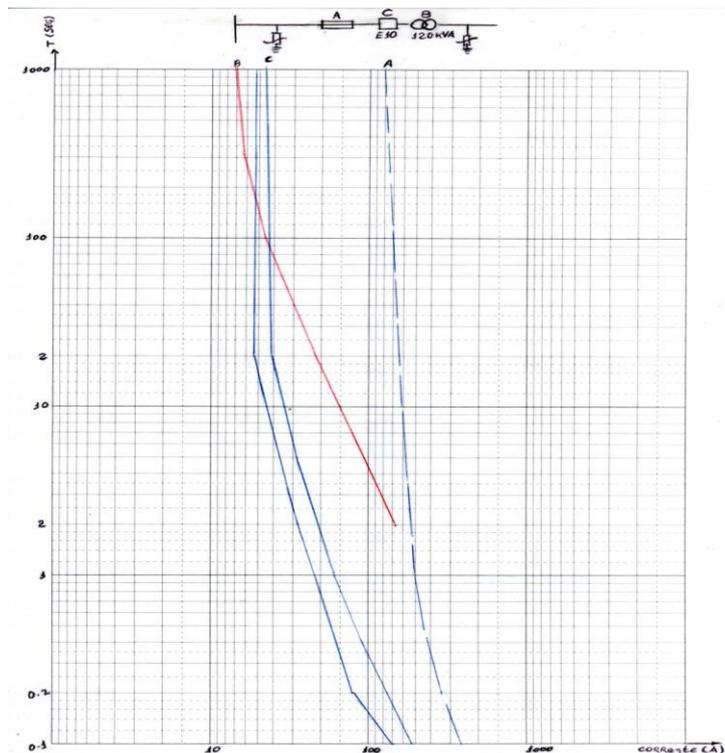


Figura 1. Seletividade de Proteção na AT.

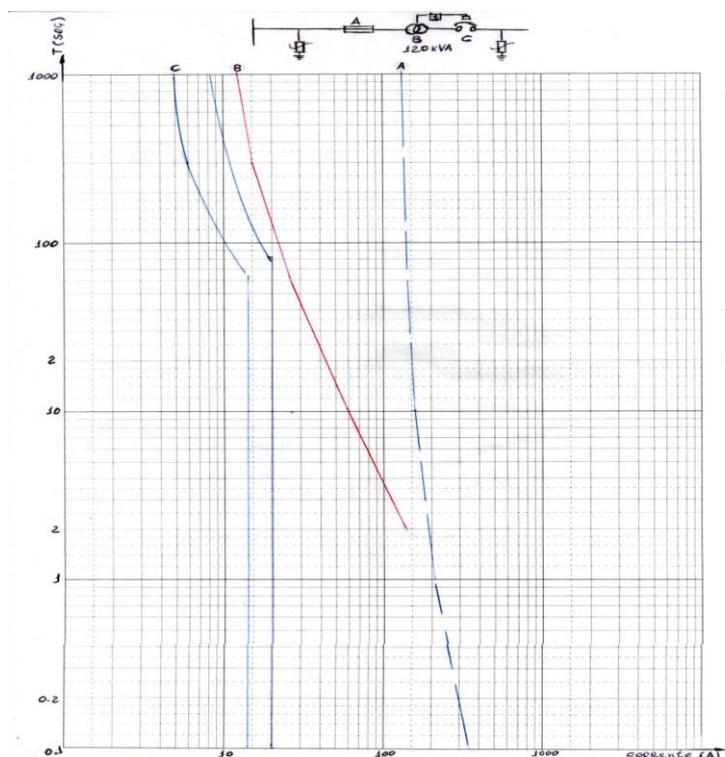


Figura 2. Seletividade de Proteção na BT.

#### E. TRAFÓ AUTO-PROTEGIDO COM DISJUNTOR NA AT



Figura 3. Foto do protótipo tipo 1



Figura 6. Foto do Fusível de AT

**F. TRAFOAUTO-PROTEGIDO COM DISJUNTOR NA BT**



Figura 4. Foto do protótipo tipo 2



Figura 7. Foto do Disjuntor de BT



Figura 5. Foto do Disjuntor de AT

**IV. ÓLEO VEGETAL**

- ◆ ● Fluido Dielétrico Resistente ao Fogo à Base de Éster Natural
- ◆ ● Formulado à Base Óleo de Sementes e Aditivos de Classe Comestível.
- ◆ ● Facilmente Biodegradável, Não Tóxico e Não Bio-acumulativo.
- ◆ ● Alto Ponto de Fulgor (330°C) e Combustão (360°C).
- ◆ ● Aumento da Vida do Transformador

**Fluidos à Base de Óleo Vegetal**

Existem muitas instituições envolvidas na

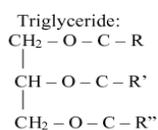
pesquisa de fluidos de transformador à base de óleo vegetal:

- Central Power Research Inst., Bangalore, Índia.
- ABB Power T & D Co Inc, Raleigh, NC, EEUU.
- ABB Secheron Sa, Genebra, Suíça.
- Lab. d'Electrostatique et de Materiaux Diélectriques, França Universidade de El Salvador.
- Institute of Electrical Energy Systems, Technical University, Berlim, manha.
- Institute of Materials for Electrical and Electronics Engineering , University ofKarlsruhe, Alemanha.

Os seguintes exemplos comerciais de fluidos dielétricos à base de óleo vegetal são os seguintes:

Éster polioli: **Envirotemp 200** feito de monoácido ramificado (C5 a C18) e o pentaeritritol alcoólico. A estrutura é  $C(CH_2CO_2R)_4$ , onde os grupos R são ramificados. Ésteres naturais: incluem gorduras líquidas ou óleos, ésteres carboxílicos derivados de glicerol, portanto, chamados de triglicerídeos. Os ácidos graxos possuem principalmente compostos de cadeia reta com um número par de carbonos.

A estrutura de um triglicerídeo aparece a seguir, onde os grupos (R, R', R'') consistem de cadeias C8 a C22. Um exemplo é: **Envirotemp FR3**, um triglicerídeo ou éster de ácido graxo consistindo de uma mistura de ácidos graxos saturados e não saturados, com cadeias C14 a C22 contendo de um a três ligações duplas. Uma alta porcentagem de ácidos graxos consiste do tipo não saturado que resulta em baixa viscosidade e melhores propriedades a baixa temperatura. A vantagem entre os tipos saturados e não saturados seria na melhoria de estabilidade à oxidação para os tipos mais saturados.



**Figura 1:** Triglicerídeo.

Um fluido isolante biodegradável proveniente de uma fonte de óleo vegetal altamente oléica foi desenvolvido e teve bom desempenho em ensaios de laboratório assim como de vida útil em transformadores de distribuição. [21,22] Além de alta biodegradabilidade, pontos de fulgor e de inflamação elevados, boa estabilidade a oxidação e durabilidade caracterizam o fluido durante os ensaios de vida útil. Os autores expressam o ponto de vista que futuros melhoramentos talvez sejam necessários

e citam como exemplo de tal propriedade o ponto de fluidez.

Entretanto, destacam que uma unidade resfriada a  $-35^\circ\text{C}$  teve desempenho satisfatório durante o aquecimento em um estudo preliminar. O fluido parece estar bem adequado como não agressivo ao meio ambiente em transformadores de distribuição. Para certas aplicações, o óleo deve ser feito como absorvente de gás. Para utilização em transformadores de potência de EAT, podem ser necessárias mudanças de projeto em relação às propriedades de transferência de calor e maior viscosidade em relação aos óleos minerais.

O equipamento elétrico onde o óleo pode ter uso imediato é o transformador de distribuição. O fluido está sendo estudado para uso em outros equipamentos elétricos tais como cabos, buchas, capacitores e comutadores. É comparável a fluidos de éster sintético, usados em transformadores de tração. Os produtos de decomposição, sob solicitação térmica e elétrica, deste fluido natural são semelhantes ao óleo tradicional de transformador, exceto pela formação de maiores quantidades de CO e CO<sub>2</sub>. Sob condições de arco, apenas um quarto da quantidade total de gás parece ter se formado fora do óleo mineral. Este fluido não é agressivo ao meio ambiente e é uma alternativa ao uso de óleos minerais. Sua aplicação depende, em grande parte, de recomendações e endossamentos favoráveis dados por agências reguladoras de diferentes países.

As propriedades de derivados de óleo de soja foram medidas em bandas de frequência de 105 a 107 Hz a diferentes temperaturas. [23] Tempos de relaxamento, entalpias de ativação e mudanças de entropia foram calculados quanto ao relaxamento dielétrico. A constante dielétrica e a perda dielétrica são consideradas ferramentas úteis para prever a deterioração durante o aquecimento de óleos.

O trabalho mostra que o tempo de relaxamento aumenta pela oxidação e alcança o valor máximo no caso de derivados formóxi-hidroxilados. A dependência da temperatura linear do tempo de relaxamento gera a entalpia de ativação e a mudança de entropia para o relaxamento dielétrico. Talvez um entendimento possa ser obtido para o desempenho dos óleos de transformador especialmente se estes forem à base de éster (sintético ou natural).

Alguns trabalhos publicados anteriormente demonstraram a praticidade de substituir óleo mineral por fluido dielétrico de éster natural em sistemas de isolamento líquido-papel [1,2,3]. Experiências anteriores mostraram diferença nas taxas de envelhecimento de papel em éster natural em relação a papel em óleo mineral. O

presente experimento foi executado para entender e quantificar melhor a vida térmica do isolamento do papel termoestabilizado envelhecido em éster natural.

A característica mais importante usada para avaliar o envelhecimento do transformador é a resistência mecânica do papel isolante [4-7,10]. Para determinar as taxas de envelhecimento durante um período prático de tempo, é utilizado o envelhecimento acelerado. De acordo com o Guia de Carregamento do IEEE, o envelhecimento acelerado em sistemas selados simula melhor o verdadeiro envelhecimento em transformadores selados modernos [13]. Foram publicados vários estudos sobre o envelhecimento acelerado de sistema selado [5,9-12].

O envelhecimento do papel depende basicamente da temperatura e do teor de água. Um dos primeiros estudos de envelhecimento do isolamento relatou uma taxa de envelhecimento térmico exponencial que basicamente dobrava para cada 8°C de elevação de temperatura [4]. Trabalho posterior aplicou a teoria da taxa de reação química ao envelhecimento do papel e refinou as estimativas de taxa [6,7]. Estudos sobre o teor de água mostram uma taxa de envelhecimento aproximadamente proporcional ao teor de água [5,8].

Em estudos anteriores sobre o envelhecimento do papel, um indicador comum da resistência mecânica foi a resistência à tração. Por várias décadas, o grau de polimerização (GP) foi também utilizado como meio de indicar o envelhecimento do papel e é uma das bases nas referências do guia IEEE de carga para envelhecimento [8,13].

Foram feitos ensaios de laboratório com os materiais a serem estudados. Os sistemas de envelhecimento continham materiais na mesma proporção de um transformador de 225 kVA. Cada recipiente de ensaio continha papel Kraft termoestabilizado de 0,255mm (26g), fluido dielétrico (350ml), tira de alumínio (106cm<sup>2</sup>), tira de cobre (76cm<sup>2</sup>) e a superfície interna de aço do recipiente de envelhecimento (323cm<sup>2</sup>). O espaço livre acima do nível do fluido ficou em 17% do volume interno à temperatura ambiente. Um recipiente de envelhecimento e os seus materiais de ensaio estão ilustrados na figura 2.



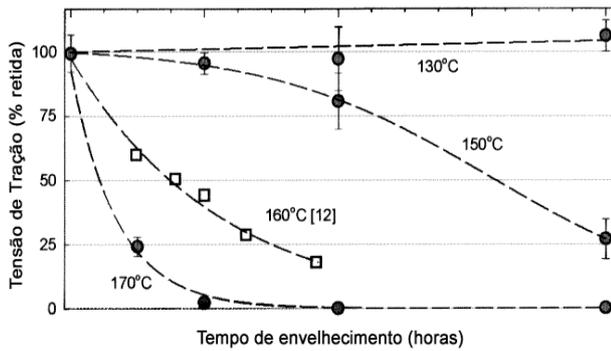
**Figura 2:** Componentes de um sistema de ensaio selado.

A umidade no papel foi ajustada a aproximadamente 0,5%, representando o teor de umidade nominal do papel em transformadores novos. Os sistemas abertos foram condicionados durante um mínimo de três dias a 22°C e 50% de umidade relativa, depois foram secos a 105°C durante 2,5 horas. O fluido dielétrico foi seco, desgaseificado e adicionado à pressão atmosférica após 30 minutos a 500µmHg.

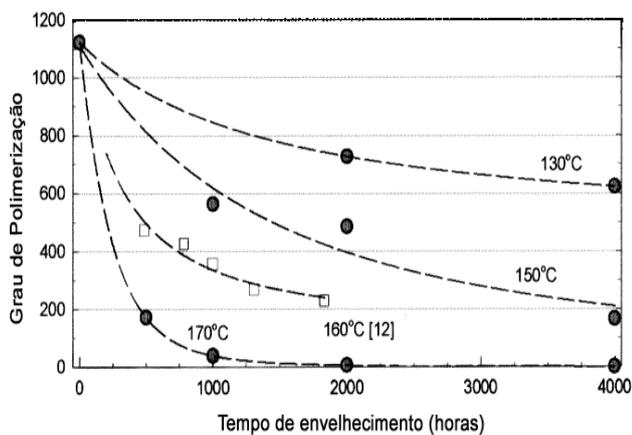
Os recipientes foram vedados, desgaseificados e pressurizados a oito atmosferas com nitrogênio seco para verificar vazamentos. A pressão foi reduzida a duas atmosferas à temperatura ambiente antes de iniciar o ensaio. Isto manteve a pressão do recipiente acima da pressão do vapor d'água a 170°C, replicando o limite de pressão esperado em transformadores em operação. Foram obtidos valores básicos nesta condição.

#### IV. Resultados dos Ensaios de Laboratório

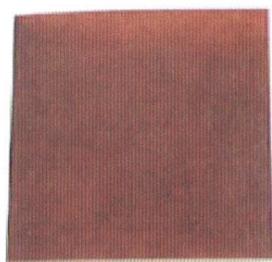
Os resultados da resistência à tração (figura 3) e o grau de polimerização (figura 4) para o papel envelhecido em óleo mineral correspondem àqueles de estudos já publicados [8,9,11,12]. A figura 5 mostra o papel depois de 4000 horas a 150 e 170°C. Visualmente, o papel em éster natural mostrou menos degradação do que o papel em óleo mineral. A manipulação de rotina de amostras mostrou que papéis envelhecidos em óleo mineral ficaram mais frágeis do que aqueles em óleos de éster.



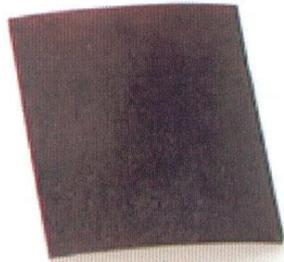
**Figura 3** Resistência à tração do papel termoestabilizado envelhecido em óleo mineral (recipientes selados a 130, 150, 170°C). Dados a 160°C incluídos para comparação.



**Figura 4:** Grau de polimerização do papel termoestabilizado envelhecido em óleo mineral (recipientes selados a 130, 150, 170°C). Dados a 160°C incluídos para comparação.



natural ester @ 150°C



mineral oil @ 150°C



natural ester @ 170°C



mineral oil @ 170°C

**Figura 5 :** Papel Kraft termoestabilizado após 4000 horas.

A temperaturas maiores e tempo mais prolongado, os recipientes contendo óleo mineral tiveram um acúmulo de borra e depósitos de partículas carbonizadas nas paredes. Os recipientes contendo éster natural permaneceram limpos.

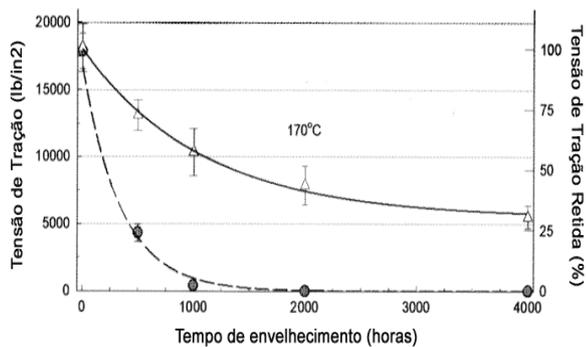
#### IV.1 Resistência à Tração

Os resultados da resistência à tração a 150 e 170°C estão ilustrados na figura 6 e 7, respectivamente. O papel envelhecido tanto no óleo mineral quanto no éster natural não exibe mudanças significativas da resistência à tração a 130°C. A 150°C, a resistência à tração de ambos os papéis cai levemente a 1000 e 2000 horas (figura 6).

A 4000 horas, a resistência à tração do papel no óleo mineral diminui a aproximadamente 25% da resistência inicial. A resistência à tração do papel no éster natural não apresenta mudança significativa entre 2000 e 4000 horas. A 170°C, a resistência à tração do papel em óleo mineral cai a aproximadamente 25% da resistência a 500 horas.

Tempo (h)	130°C		150°C		170°C	
	Óleo Mineral	Éster Natural	Óleo Mineral	Éster Natural	Óleo Mineral	Natural
0	0,46	0,51	0,46	0,51	0,46	0,51
500	-	-	-	-	1,46	0,15
1000	-	-	0,30	0,09	7,03	0,28
2000	0,03	0,10	0,23	0,08	3,28	0,26
4000	0,16	0,04	1,26	0,09	1,85	0,17

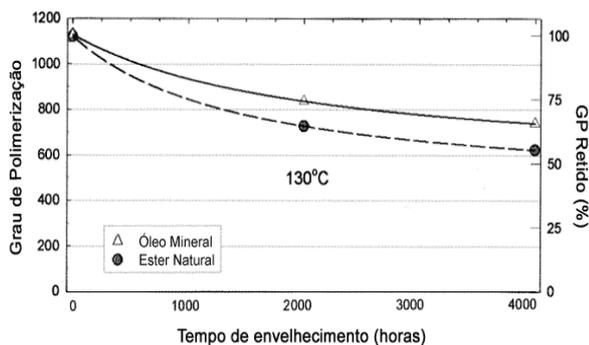
**Figura 6:** Resistência à tração do papel termoestabilizado envelhecido em óleo mineral e fluidos dielétricos de éster natural (recipientes selados a 150°C).



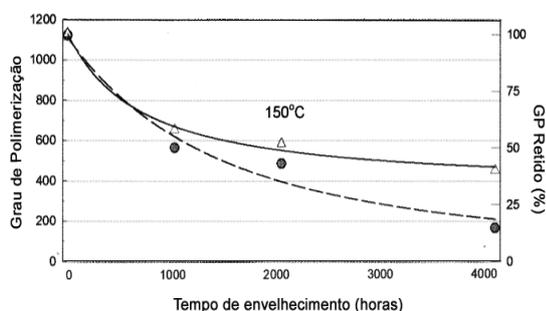
**Figura 7:** Resistência à tração do papel termoestabilizado envelhecido em óleo mineral e fluidos dielétricos de éster natural (recipientes selados a 170°C).

#### IV.1.2 Grau de Polimerização

Os dados de GP são apresentados nas figuras 8 e 9. Em todos os casos o GP do papel envelhecido em óleo mineral é menor do que aquele no éster natural. O papel envelhecido a 130°C em ambos fluidos não alcançou GP 200 (figura 8). O papel envelhecido a 150°C no óleo mineral diminuiu para GP 200 após 4000 horas (figura 9). O papel envelhecido no éster natural diminuiu para GP 450 no mesmo intervalo



**Figura 8:** Grau de polimerização do papel termoestabilizado envelhecido em óleo mineral e éster natural (recipientes selados a 130°C).



**Figura 9:** Grau de polimerização do papel termoestabilizado envelhecido em óleo mineral e éster natural (recipientes selados a 150°C).

#### IV.1.3 Teor de Água

O teor de água dos papéis (% em massa) e dos fluidos (porcentagem de saturação e teor absoluto) à temperatura ambiente são apresentados nas tabelas 5 e 6. A 130°C, os papéis em ambos os fluidos perdem água à medida que o envelhecimento progride (tabela 5), enquanto o teor de água de os ambos fluidos é praticamente constante (tabela 6).

**Tabela 5:** Teor de água do papel termoestabilizado (%) envelhecido em óleo mineral e éster natural.

Tempo (h)	130°C		150°C		170°C	
	Óleo Mineral	Éster Natural	Óleo Mineral	Éster Natural	Óleo Mineral	Natural
0	0,46	0,51	0,46	0,51	0,46	0,51
500	-	-	-	-	1,46	0,15
1000	-	-	0,30	0,09	7,03	0,28
2000	0,03	0,10	0,23	0,08	3,28	0,26
4000	0,16	0,04	1,26	0,09	1,85	0,17

**Tabela 6:** Teor de água do fluido dielétrico expresso em porcentagem de saturação a 20°C e em teor absoluto (mg/kg).

Tempo (h)	130°C		150°C		170°C	
	Óleo Mineral	Éster Natural	Óleo Mineral	Éster Natural	Óleo Mineral	Éster Natural
0	5(3)	3(27)	5(3)	3(27)	5(3)	3(27)
500	-	-	-	-	167(100)	2(22)
1000	-	-	25(15)	5(54)	114(69)	4(39)
2000	11(7)	1(7)	10(6)	1(11)	105(63)	10(109)
4000	2(1)	2(20)	50(30)	3(28)	145(87)	25(258)

#### IV.1.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os resultados obtidos para o papel em óleo mineral se correlacionam bem com trabalhos previamente publicados examinando envelhecimento acelerado de papel termoestabilizado em sistema selado.

Tanto a resistência à tração quanto o grau de polimerização são utilizados para definir “o fim de vida” do isolamento de papel [12]. O Guia de Carregamento do IEEE [13] sugere várias

definições para “o fim de vida”, incluindo 50% de resistência à tração inicial, 25% de resistência à tração inicial e GP 200. A tabela 7 compara os tempos para alcançar estes critérios de fim de vida entre o papel em óleo mineral e o papel em éster natural.

Os dados da tabela 7 mostram que o papel envelhecido a 170°C no éster natural leva de 5 a 8 vezes mais tempo para atingir o fim de vida do que o papel envelhecido no óleo mineral. O papel envelhecido a 150°C em óleo mineral chegou aos diferentes pontos de fim de vida. Entretanto, o papel envelhecido a 150°C em éster natural não atinge nenhum ponto de fim de vida, por isso o diferencial numérico não pode ser calculado.

**Tabela 7:** Tempo (h) para alcançar o “fim de vida” do isolamento de papel Kraft envelhecido em óleo mineral e fluido de éster natural. Tempo para atingir o fim de vida do isolamento calculado utilizando IEEE C57.91 para comparações.

Critério de fim de vida	150°C			170°C		
	Óleo Mineral	Éster Natural	IEEE C57.91	Óleo Mineral	Éster Natural	IEEE C57.91
<b>Tensão de Tração Retida</b>						
50%	3100	*	1602	240	1300	323
25%	4000	*	3327	490	4000	671
<b>Grau de Polimerização</b>						
200	3200	*	3697	480	3400	746

#### IV.1.5 MECANISMOS

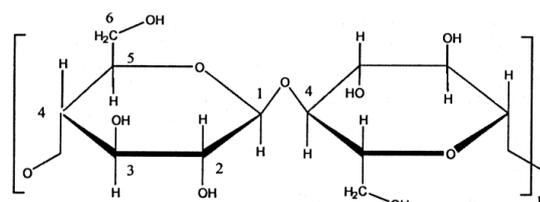
Os resultados não deixam dúvidas que o fluido de éster natural aumenta de modo significativo a estabilidade térmica do papel.

O papel é essencialmente celulose, um polissacarídeo linear consistindo de muitas unidades de anidro β-D-glicopiranoose ligadas uma à outra, via uma ligação glicosídica (1→4) (figura 10) para formar uma cadeia polimérica. Muitas cadeias longas alinhadas em paralelo uma da outra constituem as fibras que formam a estrutura do papel.

A degradação do papel em um estudo de envelhecimento térmico acelerado e selado é basicamente uma combinação de degradação hidrolítica e cisão térmica da ligação de glicosídica (1→4) [12,16]. A oxidação e outras reações secundárias das hidroxilas dos carbonos C-2, C-3 e C-6 também são um fator. Os

principais produtos da reação de degradação térmica são H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub> e, em menor extensão, compostos de furano. Este último resulta da cisão da cadeia, seguida de dissociação do anel. A geração de água contribui à degradação hidrolítica.

Propõe-se que o melhoramento das características do envelhecimento térmico da celulose envelhecida em éster natural seja o resultado de pelo menos dois modos de proteção fornecidos pelo éster natural: captura de água e barreira estérica da reação hidrolítica da celulose.



**Figura 10:** Unidades monômetro de anidro β-D-glicopiranoose

#### IV.1.6 Captura de Água

A captura de água funciona de duas maneiras diferentes.

1) A temperaturas elevadas, o éster natural pode se submeter à hidrólise, consumindo a água disponível na celulose e, portanto, reduzindo o dano potencial que a água representa.

O éster natural pode reter consideravelmente mais água do que o óleo mineral. A saturação de água à temperatura ambiente para o éster natural é de aproximadamente 1050mg/kg; a do óleo mineral é de aproximadamente 60mg/kg. Por causa da diferença nos níveis de saturação, o éster natural pode absorver mais água do que o óleo mineral e, portanto, permite maior secagem do papel. Estudos mostram que a remoção da água do papel, assim que esta é gerada, melhora as características de envelhecimento do papel [12,14,17].

#### IV.1.7 Proteção Hidrolítica

O éster natural pode interferir no processo de hidrólise da celulose provocado por solitação térmica. Isto se deve à reação do éster natural com os grupos OH no anel de glicose e nas terminações de cadeia. O mecanismo proposto é a trans-esterificação possibilitada pelas condições de temperatura do envelhecimento acelerado [17]. A esterificação dos sítios de OH reativos na celulose com grupos ésteres estabiliza a molécula e prolonga a vida térmica [18].



Figura 8 . Foto do Óleo Vegetal

### G. VANTAGENS AMBIENTAIS E DE SAÚDE

- Derivado de Recursos Renováveis e Naturais.
- 100% Ingredientes de Classe Comestível - Não Tóxico
- Biodegradação Rápida/Completa
- Reciclável , Recondicionável e Facilmente Descartável.

### H. TESTES DE TOXIDEZ

- Teste de Toxidez
  - Oral LD 50 em Ratos
  - Aquática Aguda em Alevinos de Trutas
- Mortalidade Zero

### V. TESTES DE VIDA ACELERADA DO ISOLAMENTO

- Envelhecimento Térmico conforme ANSI C57.100 “Método Lockie”.
  - Tempo Final de Vida (183°C HS)
    - Guia de Cargas: 400h
    - ANSI C57-100: 2000h
    - Tempo para Falha: 7800h
- Indicativo do Aumento de Vida do Papel
- Testes pelo Guia de Cargas IEEE C57



Figura 9 . Fotos amostras papel e óleo vegetal para testes

- O óleo vegetal possui rigidez dielétrica superior ao do óleo mineral na presença de umidade
- 7 a 8 vezes mais tempo para papel Termo-estabilizado alcançar final de vida. (2001 IEEE/PES)
- Mais de 10 vezes para Papel Kraft Normal. (2002 ICDL)

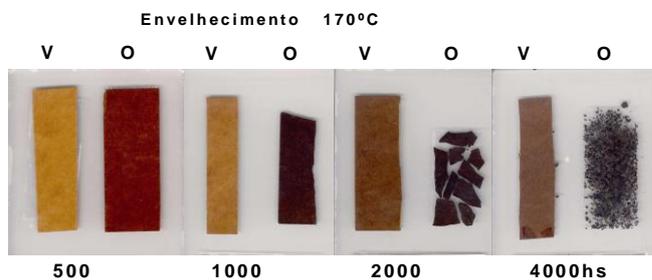


Figura 10. Fotos Envelhecimento do papel

### I. ENSAIOS DE LABORATÓRIOS

- Ensaios de impulso
- Ensaios de Rotina
- Ensaio de curto-circuito
  - Ensaio de defeito interno ao transformador
  - Ensaio de Coordenação do disjuntor de baixa-tensão
  - Ensaio de Coordenação do disjuntor de alta-tensão
- Ensaios de Rotina pós Ensaio de C.C

**TABELA I**

Comparação dos Ensaio de Rotina após C.C

TRAFO AP DISJUNTOR AT (120 kVA)						
TAP	Perdas no Cobre 75°C			Impedância 75°C %		
	Antes CC	Pós CC	Var. %	Antes CC	Pós CC	Var. %
13800	1738	1712	-1,5	3,79	3,79	0
13200	1785	1752	-1,85	3,82	3,81	-0,26
12600	1824	1796	-1,54	3,82	3,81	-0,26

TRAFO AP DISJUNTOR BT (120 kVA)						
TAP	Perdas no Cobre 75°C			Impedância 75°C %		
	Antes CC	Pós CC	Var. %	Antes CC	Pós CC	Var. %
13800	1770	1765	-0,28	3,82	3,81	-0,26
13200	1807	1800	-0,39	3,84	3,82	-0,52
12600	1853	1848	-0,27	3,84	3,83	-0,26



Figura 11. Foto da instalação do equipamento na rede de distribuição

## VI. VIABILIDADE ECONÔMICA

### J. PARÂMETROS

- Documento Técnico CODI 19.35 de 21/08/98;
- Documento Téc. CODI 3.2.18.16.0 de 11/94;
- Resolução Homologatório N° 391 de 6/11/06;
- Período de Capitalização:  $n = 20$  anos;
- Taxa anual de atualização:  $i = 12\%$  ao ano;
- Fator de carga:  $F_c = 0,55$ ;
- Constante:  $a = 0,15$ .

### K. CUSTOS APURADOS

- Perdas no Ferro
  - Custo anual: R\$ 2016,31 por kW.ano
  - Custo capitalizado: **R\$ 15.060,71 por kW**
- Perdas no Cobre
  - Custo anual: R\$ 1.043,79 por kW.ano
  - Custo Capitalizado: **7.791,36 por kW**

### L. CUSTOS TRAFO AP 120kVA

- Perdas
  - Perdas no Ferro: 0,485kW
  - Perdas no Cobre: 1,738 kW
- Custo total das perdas capitalizado: **R\$ 20.845,82**
- Custo de aquisição: **R\$13.500,00**
- **Custo final: R\$34.345,82**

### M. CUSTOS TRAFO CONVENCIONAL 120kVA

- Perdas
  - Perdas no Ferro: 0,467kW
  - Perdas no Cobre: 2,105 kW
- Custo total das perdas capitalizado: **R\$ 23.434,16**
- Custo de aquisição: **R\$7.900,00**
- **Custo final: R\$31.334,16**

### N. COSIDERAÇÕES:

- A diferença dos custos finais Trafo AP e Trafo Convencional é de apenas **R\$ 3.011,00 ( Valor capitalizado 20 anos)**
- Valor presente da diferença ( 20 anos, 12% aa FVP: 7,46944  
Valor presente: R\$ 403,11
- Custos adicionais a serem considerados:

**Cruzeta, sela, cinta de aço, Mão francesa, Suporte, conjunto Pára-raios AT e BT**

- **R\$ 1.700,00**
- **Diferença real: R\$ 403,11 – R\$ 1.700,00**

**- R\$ 1296,89**

O. **VANTAGENS FINANCEIRAS NÃO CONTABILIZADAS**

- **O Trafo AP 120 kVA admite carregamento (≈ 30%) maior ;**
- **O estudo adotou fator de carga de 0,55, sendo que o fator de carga existente do sistema é menor, conseqüentemente a diferença do custo final entre os transformadores se reduz.**
- **Ganhos ecológicos:**
  - **Não contamina o solo e lençol freático quando de seu derramamento;**
  - **Não contamina o meio ambiente, quando do descarte do líquido e dos sólidos.**
- **Índice de falhas menor do que o convencional.**

## VII. RESULTADOS.

- Melhoria do índice de qualidade de fornecimento (DEC/FEC/DIC/FIC);**
- Eliminação de chaves fusíveis, pára-raios e cruzetas no poste;**
- Possibilidade de maior carregamento;**
- Obtenção de patente;**
- Maior confiabilidade;**
- Ecologicamente correto, não contaminando meio ambiente.**

## VIII. REFERÊNCIAS

- [1] **BARSCH, A. J.; KOLCIO, N.** – “*Power Frequency AC Sparkover Voltage Measurements of Small Air Gaps*” – IEEE Transactions on Poer Delivery, Vo.14, N° 3, July 1999.
- [2] **HIZIROGLU, H. R.; SEBO, S. A.** – “*Calculation of Breakdown Voltages of Short Air Gaps*” - IEEE 2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [3] **ELLIS, F. M. et al.** - “*Low Breakdown Probabilities in Short Air Gaps*” – Proceedings of the 4 th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials July 3-8, 1994 Brisbane Australia.

[4] **ALLEN, N. L. and EL- NAILI, M.** - “*Impulse Breakdown of Insulators and Air Gaps of Similar Electrode Configurations*” - IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation , Vol. 1 N° 6, December 1994.

[5] **MICROPOULOS, P. N.; STASSINOPOULOS, C. A..** – “*Impulse Breakdown of Short Rod-Plane Gaps and the Influence of Humidity*” – IEE Proc. Sci. Meas. Technol. Vol. 145, N° 4, July 1998.

[6] **GIRALT, M. And BURET, F.** – “*Prediction of Breakdown Voltages of Air Gaps : Implementation of a Discharge Nodel Using Electric Field Computation Results*” – Hight Voltage Engeneering Symposium, 22-27 August 1999 Conference Publication N° 467, IEE 1999.

[7] **CHOWDHURI, P.; MISHRA, A. K.; McCONNELL, B. W.** – “*Volt-Time Characteristics of Short Air Gaps Under Nonstandard Lightning Voltage Waves*” - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, N° 1, January 1997.

[8] **SHATOH, H.; MORITA, K.; KIKKAWA, T.; KATO, K. and OKUBO, H.** – “*Impulse Partial Discharge and Breakdown Characteristics of Road-Plane Gaps in N2/SF6 Gas Mixtures*” - IEEE 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.

[9] **QURESHI, M. I.; AL-ARAINY, A. A. and MALIK, N. H.** - “*Performance of Protective Rod Gaps for Medium Voltage Networks in the Presence of Dust Particles Under Lightning Impulses.*” - IEEE Transaction on Power Delivery, Vopl. 14, N° 4, October 1999.

[10] **SEBO, S.; KAHLER, J.; HUTCHINSA, S.; MEYERS, C.; OSWIECINSKI, D.; EUSEBIO, A. and QUE, W.** – “*Breakdown Voltages of Varius Air Gaps in the Presence of Dielectric Sheets (Barriers).*” - IEEE 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena

[11] **KARSHAW, S. S.; GAIBROIS, G. L. And STUMP, K. B.** – “*Applying Metal Oxide Surge Arresters on Distribution Systems*” – IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4 ,N° 1, Janury 1989.

[12] **VIPPIN, P. M.; KISHORE, N. K. and JAYARAM, B. N.** – “*Degradation of Metal Oxide Surge Arresters Under Simulated Natural Conditions*” – Department of Hight Voltage Enginnering, Indian Institute of Sience, Bangalore 560 012.

[13] **PLATA, A. M.; PONCE, M. A.; RIOS, J. M.; DE LA ROSA, F.; CASTAÑO, V. M.** – “*Degradation of ZnO Based Surge Arresters Under Field Conditions*” – IEE Proc. Sci. Technol. Vol. 143, N° 3, September 1996.

[14] **GONZALES, D. A.; KERSHAW, S. S.; VASSILIOU, N.; VOUKELATOS, J.** – “*Gapped Metal Oxide Varigap Arrester Technology : Na Innovative Step that Advances Performance Characteristics of Distribution Class Surge Arresters and Improves Surge Protection.*” –

- IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference: Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems", Athens, Greece, Sept. 5-8, 1993.
- [15] **HADDAD, A.; FUENTES, J.; GERMAN, D. M.; WATERS, R.T.** – “*Characterisation of ZnO Surge Arrester Elements with Direct and Power Frequency Voltages*” – IEE Proceedings, Vol. 837,Nº 5, September 1996.
- [16] **IMAI, T.; UDAGAWA, T.; ANDO, H.; TANNO, Y.; KAYANO, Y.; KAN, M.** – “*Development of High Gradient Zinc Oxide Nonlinear Resistors.*” - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13 ,Nº 4,October 1998.
- [17] **MARDIRA, K. P.; DARVENIZA, M.; SAHA, T. K.** – “*Search for New Diagnostics for Metal Oxide Surge Arrester*” – Proceedings of The 6 th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 21-26, 2000, China.
- [18] **HAN, S. W.; CHO, H. G.; LEE, Y. J.; KANG, H.B.** – “*Modeling of Failure of MOV for High-Voltage Arresters by Veronoi Network Simulation*” – Proceedings of The 6 th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 21-26, 2000, China.
- [19] **HE, J. L.; ZENG, R.; TU, Y.P.; HAN, S. W.; CHO H. G.** – “*Aging Characteristics and Mechanisms of ZnO Nonlinear Varistors*” – Proceedings of The 6 th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials June 21-26, 2000, China.
- [20] **ANDOH, H.; NISHIWAKI, S.; SUZUKI, H.; BOGGS, S.; KUANG, J.** - “*Failure Mechanisms and Recent Improvements in ZnO Arrester Elements.*” – IEEE Vol. 16, Nº 1, January/February 2000.
- [21] **DARVENIZA, M.; SAHA, T. K.** – “*Comparisons of In-Service and Laboratory Failure Modes of Metal-Oxide Distribution Surge Arresters.*” - IEEE, 2000.
- [22] **DURBAK, D. W.** – “*Surge Arrester Modeling*” - IEEE, 2001.
- [23] **TSUGE, K.** – “*Design and Performance of External Gap Type Line Arrester*” -IEEE, 2002.
- [24] **SCHMIDT, W.; BRIZZI, M.; GRAMESPACHER, H.** – “*Towards the Overvoltage Protection by Modern ZnO Surge Arresters*” -IEEE, 2003 Bologna Power Tech Conference, June 23-26, Bologna, Italy.
- [25] **NARANCIC, V.; BRAUNOVIC, M.; WESTRON, A. C.** – “*The Composite Fuse – A New Technology for Current Limiting Fuses*” -7º IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 1-6, 1979.
- [26] **LIPSKI, T.** – “*Distribution Fuses of Nearest Future*” -Tecnical University of Gdansk, Poland.
- [27] **DEGNAN, J. H.** – “*Analytic Criteria for Fuses for Explosive Flux Compression Generators*” -High Energy Plasma Division Phillips Laboratory Kirtland Air Force Base, New Mexico.
- [28] **RANJAN, R.; KALKSTEIN, E. W.** – “*Design, Development and Application of Smart Fuses – Part 1*” - IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 30, Nº 1, January/February 1994.
- [29] **PFLANZ, H. N.; ACREE, J. A.; SCHAFFER, J. S.** – “*Development and Testing of Power Assisted Current Limiting Fuses to 600 Amperes and 38 kV.*” -IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, Nº 2, April 1988.
- [30] **PETIT, A.; ST-JEAN, G.; FECTEAU, G.** – “*Empirical Model of a Current-Limiting Fuse using EMTP*” - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 4, Nº 1, January 1989.
- [31] **MUENCH, F. J.; DUPONT, J. P.** – “*Coordination of MOV Type Lightning Arresters and Current Limiting Fuses*” - IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5 Nº 2 April 1990.
- [32] **BRECHTKEN, D.; KÖNIG, D.** – “*Time/Current Characteristics and Breaking Capacity of Experimental Vacuum Fuses.*” – IEEE Transaction on Electrical Insulation Vol. 28, Nº 4, August 1993.
- [33] **Fusivel + Vacuo** – “*Time/Current Characteristics and Breaking Capacity of Experimental Vacuum Fuses.*” – IEEE Transaction on Electrical Insulation Vol. 28, Nº 4, August 1993.
- [34] **FLETCHER, H.; LEIX, K.; VASSILIOU, N.; VOUKELATOS, J.** – “*The Lightning Protected Transformer: How to Improve Distribution Transformer Reliability, Safety and Economics Through a Coordinated Approach to Overcurrent and Overvoltage Protection.*” – IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference: Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems", Athens, Greece, Sept. 5-8, 1993.
- [35] **WOLNY, A.; STOKES, A. D.; KACPRZAK, B.** “*High-Voltage Fuse Behaviour with Varistor Commutation.*” – IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 141, Nº 1, January 1994.
- [36] **CHAO, T.** “*Electronically Controlled Current Limiting Fuses.*” – IEEE 1995.