



**XIV SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FL/ GEM / 22  
BELÉM - PA / BRASIL / 1997

**GRUPO XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E MATERIAIS DE SUBESTAÇÕES (GEM)**

**AValiação DO GRAU DE POLIMERIZAÇÃO ANTES E APÓS SECAGEM DE  
TRANSFORMADORES EM FÁBRICA**

André Luiz Cardoso R. de Sá  
CENTRAIS ELÉTRICAS DE GOIÁS S/A

Paulo Roberto Nepomuceno\*  
CENTRAIS ELÉTRICAS DE GOIÁS S/A

**RESUMO**

Este trabalho apresenta os estudos desenvolvidos pela Celg, sobre aspectos práticos de degradação do papel isolante, no processo de secagem aplicado a transformadores novos em fábrica. Ele é fruto de uma tendência que se verifica hoje, a nível nacional, de busca de técnicas que propiciem aumento de vida útil de transformadores.

**PALAVRAS-CHAVE**

Grau de polimerização - Secagem de transformadores - Secagem em fábrica - Envelhecimento de transformadores.

**1.0 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS**

Transformadores são máquinas elétricas de concepção relativamente simples. A transformação não envolve partes mecânicas, e, *teoricamente*, um transformador poderia operar eternamente sem sofrer qualquer tipo de desgaste mecânico, se não fosse submetido a esforços. Entretanto, na prática, o comportamento destas máquinas é outro.

Na fabricação de transformadores uma série de materiais são aplicados, como por exemplo aço, cobre, verniz, tintas, borrachas, resinas, madeira, papel e outros. O sistema isolante principal utilizado em transformadores de grande porte (potência), normalmente é o papel Kraft isolante impregnado com óleo mineral isolante. Com o passar do tempo, e influenciados por algumas variáveis, os materiais construtivos podem sofrer uma

degradação, verificada pela alteração de algumas propriedades físico-químicas. Este processo é denominado envelhecimento.

São vários os fatores que podem promover o envelhecimento de transformadores. Entre eles podemos destacar :

- Temperatura
- Umidade
- Teor de oxigênio
- “Stress” elétrico
- “Stress” mecânico
- Outros

Estes fatores atuam diretamente na velocidade de envelhecimento, acelerando a degradação física e química dos materiais. O envelhecimento é um processo contínuo que pode ter sua velocidade aumentada ou diminuída através do controle de algumas destas variáveis.

A degradação do sistema isolante é o que determina o fim de vida de um transformador. O papel isolante quando perde suas propriedades mecânicas fica vulnerável ao rompimento, quando o equipamento é submetido a esforços decorrentes de curtos-circuitos. Conceitualmente considera-se que um transformador chega ao seu fim de vida, quando a resistência mecânica à tração do papel se reduz à metade do valor do papel kraft novo.

**1.1 - Mecanismo de degradação do papel Kraft**

\* Av. Mutirão, 545 - Setor Coimbra - Goiânia - GO - CEP 74533-010 - Tel:(062)235.1218 - Fax:(062)235.1300

O papel isolante é formado por longas fibras cujo principal constituinte é a celulose, embora ainda encontremos, em pequenas quantidades, a lignina. Podemos dizer que a celulose é um polímero linear formado por uma sequência de anéis de glicose, ligados por ligações químicas denominadas glicosídicas. O número de anéis de glicose encontrados por fibra de celulose no papel kraft novo, é da ordem de 1000 a 1300 unidades, medidos através do ensaio de grau de polimerização, utilizando o método viscosimétrico.

À medida que o papel envelhece, ocorre o rompimento dos anéis de glicose diminuindo o tamanho das fibras. Esta degradação inicia-se provavelmente pela hidrólise e oxidação da glicose. Como consequência desta quebra das ligações, temos a liberação de uma certa quantidade de água, a produção de subprodutos da glicose, denominados compostos furanóicos, e principalmente a diminuição da resistência mecânica do papel isolante.

A Figura 1 correlaciona o tamanho da fibra, através do grau de polimerização, com a resistência mecânica do papel, medido pelo ensaio de resistência a tração. (1).

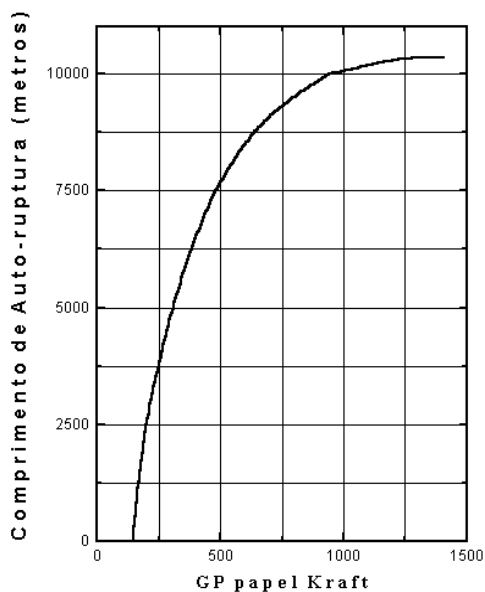


FIGURA 1

Os principais fatores que aceleram a degradação da celulose são:

- Presença de água
- Temperatura elevada de operação
- Presença de oxigênio em grandes quantidades
- Presença de agentes oxidantes como peróxidos e ácidos

A ação conjunta desses fatores produz um efeito de envelhecimento muito maior do que seria o resultante de cada um deles em etapas isoladas. Estudos realizados na Europa e Brasil, demonstram que o grau de polimerização do papel isolante, decresce da ordem de 1300 unidades, denominadas monômeros, até aproximadamente 100 unidades, no estado mais degradado. (2), (5).

Embora neste estado de degradação o papel ainda mantenha suas propriedades isolantes, a confiabilidade deste fica sensivelmente reduzida. Podemos verificar na Figura 1 que, para um valor de GP (grau de polimerização) em torno de 250, a sua resistência à tração, expressa como comprimento de auto-ruptura, já está reduzida a menos da metade do valor referente ao papel kraft novo.

### 1.2 - Fases de envelhecimento

Em uma análise inicial podem ser identificadas três etapas distintas de envelhecimento, sendo:

- envelhecimento em fábrica, durante o processo de fabricação;
- envelhecimento durante estocagem e
- envelhecimento durante a operação do equipamento.

Normalmente dá-se maior importância à fase que ocorre durante a operação, por ser na realidade onde se manifestam as consequências desse envelhecimento. Todavia verifica-se que uma parcela significativa de degradação do papel pode ocorrer nos estágios anteriores, caso não sejam tomados alguns cuidados que visem o controle de algumas variáveis responsáveis pela aceleração do envelhecimento.

Vale ressaltar que durante o processo de secagem, e principalmente em sua fase inicial, temos a presença de todas as variáveis atuando conjuntamente, e com um agravante: temos grande quantidade de água, temos oxigênio em quantidade significativa, além da ação da temperatura. Se considerarmos que muitas vezes são utilizadas estufas de pré-secagem, onde existem condições favoráveis ao envelhecimento, é de se esperar que a ação dessas variáveis em conjunto acabe por representar redução considerável nas características mecânicas do papel.

### 2.0 - CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

A preocupação com a vida útil de transformadores há muito tem sido motivo de discussões na engenharia de manutenção. Destas discussões sempre resultaram

questões que acabaram por direcionar as ações da manutenção no sentido de eliminar variáveis responsáveis pelo envelhecimento desses equipamentos.

Tratou-se pois de identificar tais variáveis, buscando meios de eliminá-las ou minimizá-las. Uma vez identificadas, tornou-se necessário situá-las no tempo, para que as ações pudessem, a seu tempo, e no momento certo, ser eficazes e trouxessem resultados que as justificassem. Tomando-se como principais responsáveis pelo envelhecimento do papel o oxigênio, a umidade, a temperatura e produtos de decomposição, passou-se a analisar as ações dessas variáveis, considerando-se transformadores já em operação, novos e velhos, bem como transformadores em estoque e mesmo em fabricação. Deve ser ressaltado que, em todo esse trabalho, os verbos no passado não significam etapas já solucionadas, mas apenas identificadas. E que há muito ainda que se fazer para que os objetivos sejam atingidos. Da mesma forma, as soluções adotadas não são exclusivas e nem mesmo consideradas suficientes.

No que diz respeito aos transformadores em operação iniciou-se um processo de avaliação de suas condições operativas, o que evidentemente já se fazia, mas não através do prisma de envelhecimento e preservação de vida útil. Um dos primeiros procedimentos adotados foi a alteração na pintura dos transformadores, quando se alterou a cor desses equipamentos, utilizando-se pigmentação que tivesse melhor desempenho do ponto de vista de reflexão, visto que a incidência dos raios solares na região Centro-Oeste é bastante relevante, principalmente no período compreendido entre 11 e 16 horas. Neste período, por características do nosso sistema, temos cargas médias, o que nos garante entrar no pico de carga tendo os transformadores temperaturas de operação relativamente mais baixas. Ganham maior importância, os resultados de análise cromatográfica, tensão interfacial, acidez e valores de carregamento. Iniciou-se a realização de ensaios de grau de polimerização, teor de furfuraldeídos, sendo ainda revistos valores limites de alguns ensaios determinantes de necessidade de intervenção.

Com relação aos transformadores novos, foram tomadas algumas medidas no sentido de alterar a própria concepção construtiva do equipamento, visando minimizar as ações dos agentes de envelhecimento. É o caso da adoção das bolsas ou membranas de borracha nitrílica no conservador, que, mesmo sabendo não serem totalmente eficientes do ponto de vista de eliminação de contaminação por oxigênio, reduzem significativamente a contaminação por umidade e consequentemente o envelhecimento do transformador. Paralelamente a estas medidas, passou-se a analisar as diversas etapas de envelhecimento, visando implementar ações

que pudessem reduzir a deterioração do papel. A CELG introduziu então em suas especificações o ensaio de grau de polimerização do papel isolante em fábrica, para que fosse possível o acompanhamento da degradação do papel desde o início do funcionamento do transformador. Além desse objetivo, pretendia-se levantar dados que permitissem avaliar os processos de secagem utilizados. Os resultados obtidos foram surpreendentes, na medida em que, para transformadores de mesmo lote de fabricação, e nos quais, supostamente, foram utilizados materiais de mesma origem, foram encontrados resultados completamente diferentes. (Cf. Tabela 1).

Começaram a surgir questionamentos sobre os processos de secagem dos transformadores, sabidamente uma das etapas de envelhecimento. Ou seja:

- qual o processo de secagem utilizado?
- quais as etapas do processo?
- quais os limites de temperatura utilizados?
- quais os tempos de cada etapa do processo?
- qual o principal objetivo (para o fabricante) da atividade secagem? —seria apenas a consecução de um bom desempenho do equipamento nos ensaios dielétricos?
- qual a preocupação do fabricante com o aspecto envelhecimento?

Com base nesses questionamentos, foram feitas consultas aos vários fabricantes sobre seus processos de secagem, sobre as taxas máximas de envelhecimento impostas ao transformador pelos processos de secagem utilizados e por eles admitidas. Com relação a estas consultas houve uma quase unanimidade de manifestações dos fabricantes: os processos de secagem utilizados deveriam impor ao transformador, ou mais especificamente ao papel, uma variação máxima de 10% no grau de polimerização, ao se relacionar valor inicial (no início do processo de secagem), com valor final (ao término do processo de secagem). Estas manifestações, ou seja a definição do limite de 10%, reforçam as afirmações de Yue Wang quando ele diz que no processo de secagem “...uma queda de 5 a 10% no grau de polimerização é aceitável...”(6). Com base nestas informações a CELG introduziu alterações em suas especificações de transformadores, no que diz respeito aos ensaios de rotina, onde “...Para transformadores de 69 kV e acima, [seriam] colhidas amostras do papel nos condutores de acesso às buchas, antes e após o processo de secagem e submetidas a ensaio de grau de polimerização, não podendo haver variações maiores do que 10% entre os valores encontrados.” (3).

Essa medida atendeu em parte as pretensões da CELG. Não totalmente, porque, dependendo do valor inicial

do grau de polimerização, mesmo havendo uma variação máxima de apenas 10%, poderíamos estar recebendo um transformador já degradado. Quer seja pela qualidade inicial do papel, ou mesmo por processos inadequados de estocagem deste na fábrica. Foi o caso de alguns transformadores recebidos em fábrica, onde os valores iniciais e finais de grau de polimerização não apresentavam variações maiores do que 10%, mas os valores absolutos foram considerados baixos para transformadores novos.

Partindo do pressuposto de que o fabricante deveria ter um bom sistema de controle de qualidade para aquisição de materiais e que ele adquiriria materiais de boa qualidade, seria plausível se imaginar que o papel utilizado tivesse, ao ser adquirido, grau de polimerização entre 1200 e 1300, que são valores concebidos como determinantes de papel novo de boa qualidade. Partindo dessa nova premissa, outra alteração foi introduzida nas especificações, ainda no que se refere a ensaios, onde “...*Para transformadores de 69 kV e acima, [seriam] colhidas amostras do papel nos condutores de acesso às buchas, antes e após o processo de secagem e submetidas a ensaio de grau de polimerização, não podendo haver variações maiores do que 10% entre os valores encontrados, sendo que o valor mínimo admitido após secagem não [deveria] ser inferior a 1000 (mil)*”. (4)

A partir desta alteração nas especificações, foi possível identificar casos em que os equipamentos fabricados para a CELG haviam sido submetidos a processos agressivos de secagem, ou os programas de controle de qualidade do fabricante não observavam normas importantes de aquisição e controle do papel.

Como resultados práticos dessas ações, já tivemos caso de o transformador ter que ser totalmente reisolado, ou seja totalmente reconstruído pelo fabricante. É o caso, por exemplo de dois transformadores de 33 MVA, 138/13,8 kV, os quais apresentaram variações excessivas de grau de polimerização entre os resultados (início e fim do processo de secagem), sendo totalmente reenrolados, tendo o fabricante assumido todos os ônus. Os resultados iniciais e finais destes transformadores, são mostrados na Tabela 1, itens 16 e 17. Após negociações com o fabricante, e após retrabalho os transformadores apresentaram os resultados mostrados nos itens 18 e 19 da Tabela 1. A Tabela 1 mostra resultados de grau de polimerização de papel de vários transformadores, com as respectivas variações entre os valores iniciais (papel novo) e finais (após secagem e impregnação).

Os resultados foram obtidos através de ensaios em amostras de sacrifício que foram colocadas na presença

de inspetores da CELG, sendo por ele identificadas e assinadas. Sua retirada para ensaios foi feita após a realização de todos os ensaios de recebimento em fábrica. Os ensaios foram feitos no laboratório da CELG, com análises em contra-provas feitas pelo fabricante em laboratórios por ele escolhidos. Nota-se que, após as alterações nas especificações, e principalmente após a recusa de dois transformadores do fabricante 3, houve também mudança nos resultados, com variações menores e com valores iniciais mais altos. (Cf. Tabela 1, itens 16 a 22).

### 3.0 - CONCLUSÕES

Pudemos constatar que, pelo menos nos casos analisados, houve redução significativa do grau de polimerização dos papéis utilizados. Por outro lado, ainda a partir dos dados, pudemos verificar que é possível conseguir realizar secagem de transformadores sem necessariamente provocar esta redução. Evidentemente o fabricante tomará medidas, definirá novos tempos para as diversas etapas, ou até mesmo introduzirá novas técnicas de secagem. Verificamos ainda, que após a recusa de dois transformadores do fabricante 3, foram introduzidas modificações em seus processos de secagem, passando a atender as especificações da CELG.

Da análise dos resultados podemos inferir que este tipo de controle, o do envelhecimento do transformador no processo de fabricação, normalmente não é feito (ou não era) por alguns fabricantes. Talvez por falta de exigência das próprias concessionárias. Essa falta de controle toma características ainda de falta de critério no gerenciamento do processo, uma vez que na diversidade de resultados encontrados pode estar retratada uma certa aleatoriedade na atividade secagem. Pelo menos no que diz respeito a três dos quatro fabricantes analisados, e para o caso específico desses transformadores. É o que dizem os dados.

### 4.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) FABRE.J. e PICHON, A. *Processus et agents de dégradation du papier dans l'huile. Application aux transformateurs*. Rapport n° 137 - CIGRÉ, juin, 1960.
- (2) FALLOU, B. *Synthèse de travaux effectués au L.C.I.E. sur le complexe papier-huile*. In.: Rev. Electr., 1970.
- (3) ET.TR02.CELG. *Especificação Técnica de Transformadores e Autotransformadores de Potência.*, p.38

- (4) ET.TR04.CELG *Especificação Técnica de Transformadores e Autotransformadores de Potência.*, p.38.
- (5) MAK, J. e BASSETTO, A. *Enfoque prático sobre as técnicas atuais para avaliação da vida útil de transformadores de potência.* 5º Seminário de manutenção com a Doble Engineering, maio, 1993.
- (6) SHROFF, D.H. et alli, *A review of paper aging in power transformers.* In.: IEE Proceedings, nov. 1985.
- (7) YUE, Wang et alli. *Expediting cellulose insulation aging evaluation and life prediction through degree of polymerization measurements.*

## 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

### 5.1 - André Luiz Cardoso Rodrigues de Sá

Nasceu em Lins, SP, em 1962. Graduou-se em Ciências Químicas pela UNIMEP em 1987. Trabalhou na CPFL no Departamento de Operação e Manutenção e na Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento. Trabalhou ainda na TUSA no Laboratório de Pesquisa de Materiais. É professor de Química Analítica nas Faculdades Objetivo. Desde 1989 é responsável pelo Laboratório de Físico-Química da CELG.

### 5.2 - Paulo Roberto Nepomuceno

Nasceu em Cruzeiro da Fortaleza, MG, em 1950. Graduou-se em Engenharia Elétrica em 1974, pela UFG. Trabalha na CELG desde 1975, onde desenvolveu trabalhos na Divisão de Manutenção de Subestações e no Departamento de Apoio Técnico. É representante da CELG no GTMS, entidade que coordenou no biênio 82/83. Atualmente é gerente da Divisão de Engenharia de Manutenção.

TABELA 1 - VARIAÇÃO DO GRAU DE POLIMERIZAÇÃO NO PROCESSO DE SECAGEM EM FÁBRICA

Item	Fabricante	Potência MVA	Tensão kV	Transformador	GP inicial	GP final	Variação %
Fabricante 1							
01		12,5	69	TC 0108	1223	1002	18,07
02		12,5	69	TC 0109	1214	1008	16,97
03		12,5	69	TC 0110	1175	794	32,43
04		12,5	69	TC 0107	1151	1009	12,34
05		20	138	TD 0059	1102	946	14,16
06		20	138	TD 0060	1058	904	14,56
07		20	138	TD 0061	1051	909	13,51
08		20	138	TD 0058	1122	925	17,56
09		50	138	TD 0062	1113	934	16,08
10		50	230	TE 0051	1195	981	17,91
11		50	138	TD 0063	1141	810	29,01
Fabricante 2							
12		20	69	TC 0111	1130	943	16,55
13		9,37	69	TC 0114	1154	981	14,99
Fabricante 3							
14		50	138	TD 0055	1308	765	41,51
15		50	138	TD 0056	1308	808	38,23
16		33,3	138	TD 0067	753	721	4,42
17		33,3	138	TD 0068	900	715	20,56
18		33,3	138	TD 0067	1272	1225	3,69
19		33,3	138	TD 0068	1227	1171	4,56
20		33,3	138	TD 0065	1260	1190	5,55
21		33,3	138	TD 0066	1260	1229	2,46
22		50	230	TE 0050	1173	1153	1,71
Fabricante 4							
23		20	69	TC 0121	1322	1212	8,32
24		20	69	TC 0118	1244	1122	9,81
25		20	69	TC 0119	1332	1211	9,08
26		20	69	TC 0117	1268	1214	4,26
27		20	69	TC 0115	1237	1201	2,91
28		20	69	TC 0124	1314	1237	5,86
29		20	69	TC 0122	1314	1109	15,60