

GRUPO: VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES ADMISSÍVEIS DE
SOBRECARGAMENTO E DA PERDA DE VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES**

**Carlos J. Dupont^(*)
CEPEL**

**José A.M. Chaves
LIGHT**

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados finais de um projeto de pesquisa realizado pelo CEPEL em parceria com a LIGHT, que objetivou o desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação das condições admissíveis de carregamento e perda de vida e para a análise das condições de carregamento impostas aos transformadores dessa empresa. O programa computacional (TRAPOT versão 1.0) para o tratamento das informações foi disponibilizado como produto do projeto. Informações sobre o modelo matemático e as características e opções de cálculo implementadas no programa são apresentadas. Um exemplo de cálculo dos parâmetros para um transformador e de possíveis estudos de carregamento é realizado.

PALAVRAS-CHAVE:

Transformadores, Carregamento Admissível, Perda de Vida

1.0 - INTRODUÇÃO

No período compreendido entre 1996 e 1998, CEPEL e LIGHT realizaram o projeto “Sobrecarregamento e Perda de Vida Útil de Transformadores - Projeto 1362” que teve por objetivo avaliar, desenvolver e implementar em um programa computacional, uma metodologia para obtenção de parâmetros para a modelagem térmica, análise do carregamento e perda de vida percentual de transformadores, a partir de

dados monitorados ao longo do tempo e de ensaios de campo, em transformadores de potência.

As atividades realizadas envolveram a execução de monitoramentos em 10 transformadores da LIGHT, 5 com potência 20 MVA e 5 com potência 40 MVA, durante o período de inverno e de verão para avaliar as diferenças de comportamento dos transformadores e/ou limitações impostas pelos modelos quando utilizados em condições extremas de carregamento e temperatura ambiente.

Complementaram as atividades dois ensaios de sobrecarga em campo - transformador NIG#1 no inverno e transformador CBI#3 no verão, realizados sob os limites impostos nos procedimentos de carregamento da LIGHT, nos quais atingiu-se até 130% do carregamento nominal. Para estes transformadores realizaram-se também análises cromatográficas e do teor de 2-furfuraldeído para avaliar possíveis evoluções anormais durante períodos de sobrecarga temporária. Nenhuma anormalidade foi, porém, registrada.

O programa computacional desenvolvido recebeu o nome “TRAPOT versão 1.0”. Foi desenvolvido para permitir a obtenção dos parâmetros térmicos para o modelo utilizado na NBR 5416 e, adicionalmente, para a realização de estudos de carregamento onde o usuário pelo uso de parâmetros representativos, pode obter informações sobre os tempos máximos admissíveis de sobrecarga até o atingir de uma determinada temperatura ou perda de vida percentual, para os valores máximos de carregamento admissíveis

em função da temperatura ambiente, ou para uma simulação de monitoramento “On-Line”, com previsão da “produtividade do transformador”, “produtividade média do transformador no período”, e da sua expectativa de vida para um determinado ciclo imposto de carregamento.

2.0 – MODELO DE CARREGAMENTO ADOTADO

Várias referências (1, 2, 3, 4) apresentam modelos que podem ser utilizados para a representação térmica dos transformadores. A maior dificuldade desses modelos é a obtenção de parâmetros representativos a serem utilizados nas modelagens.

Considerando a análise dos resultados obtidos das medições de campo realizadas durante o projeto, que todo modelo sempre apresenta simplificações matemáticas, que existem dificuldades práticas para a obtenção dos dados necessários em alguns modelos mais complexos e que experiências anteriores (5, 6) indicavam resultados satisfatórios para o modelo da ABNT – NBR 5416 (1), optou-se pelo uso deste modelo no projeto. Buscou-se, porém, uma metodologia para a obtenção de parâmetros representativos de cada equipamento individualmente, a partir do monitoramento de cargas, temperaturas e da realização de ensaios em campo.

A análise realizada considerou apenas transformadores de 2 enrolamentos. As equações que regem os cálculos correspondem ao modelo de carregamento da NBR 5416 adaptado conforme as equações abaixo:

$$\theta_o(j) = [\delta_o - \theta_o(j-1) + \theta_a(j-1)] \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_o}}) + \theta_o(j-1) - \theta_a(j-1) + \theta_a(j)$$

$$\delta_o = \Delta\theta_{on} \cdot \left[\frac{R \cdot K(j-1)^2 + 1}{R + 1} \right]^n$$

$$\theta_e(j) = [\delta_e - \theta_e(j-1) + \theta_o(j-1)] \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_e}}) + \theta_e(j-1) - \theta_o(j-1) + \theta_o(j)$$

$$\delta_e = \Delta\theta_{en} \cdot K(j-1)^{2 \cdot n}$$

$$K(j-1) = \frac{S(j-1)}{S_{nom}}$$

$$PV\%(j) = PV\%(j-1) + 100 \cdot \Delta t \cdot 10^{-\left(A + \frac{B}{\theta_e(j) + 273}\right)}$$

Onde:

$j = 1$ até número de pontos aquisitados;

$e = 2,71828$ (base do logaritmo natural);

$A = -14,133$ (transformador classe 55°C) ou $-13,391$ (transformador classe 65°C);

$B = 6972,15$;

$\theta_o(j)$ - temperatura do topo do óleo medida no instante de tempo j (°C);

$\theta_o(j-1)$ - temperatura do topo do óleo medida no instante de tempo $j-1$ (°C);

$\theta_e(j)$ - temperatura do ponto quente do enrolamento medida no instante de tempo j (°C);

$\theta_e(j-1)$ - temperatura do ponto quente do enrolamento no instante de tempo $j-1$ (°C);

$\theta_a(j)$ - temperatura ambiente medida no instante de tempo j (°C);

$\theta_a(j-1)$ - temperatura ambiente medida no instante de tempo $j-1$ (°C);

$S(j-1)$ - carregamento do transformador medido no instante $j-1$ (MVA);

S_{nom} - potência nominal do transformador (MVA);

Δt - intervalo de tempo entre aquisições sucessivas (minutos);

$PV\%(j)$ - perda de vida percentual acumulada até o instante de tempo j (%);

$PV\%(j-1)$ - perda de vida percentual acumulada até o instante de tempo $j-1$ (%);

$\Delta\theta_{on}$ - elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente sob carregamento nominal (°C);

τ_o - constante de tempo térmica do transformador, para qualquer carga e para qualquer diferença de temperatura, entre a elevação final e a inicial do topo do óleo (minutos);

R - relação entre as perdas em carga sob carga nominal e a perda em vazio;

n - expoente utilizado para o cálculo da elevação de temperatura;

$\Delta\theta_{en}$ - elevação de temperatura do ponto quente do enrolamento sobre a temperatura do topo do óleo sob carregamento nominal (°C);

τ_e - constante de tempo térmica do enrolamento do transformador (minutos).

A metodologia desenvolvida para a obtenção dos parâmetros térmicos ($\Delta\theta_{on}$, τ_o , R , n , $\Delta\theta_{en}$, τ_e), fez uso da técnica de Algoritmos Genéticos. Considerou-se que os parâmetros representativos de cada transformador seriam aqueles que conduzissem ao menor erro médio quadrático de ajuste, respectivamente entre as temperaturas medidas e simuladas de óleo e de enrolamento, para as condições de carga e temperatura ambiente medidas.

3.0 – PRODUTIVIDADE DO TRANSFORMADOR

Os conceitos “produtividade do transformador” e “produtividade média do transformador no período”, introduzidos no programa TRAPOT, propõe um enfoque onde o transformador deve ser visto como um equipamento para “transformação de energia”, devendo ter seu regime de operação associado a critérios de rentabilidade econômica, expectativa de vida e qualidade de serviço, os quais, devem ser restringidos pelas especificações técnicas. Admite-se, desta forma, que por um determinado período de tempo o transformador opere acima de suas características nominais (condicionado a máximas temperaturas admissíveis, máximas correntes ou a máximas perdas de vida admissíveis no período e previamente definidas), desde que a expectativa de vida referencial definida pelo retorno financeiro não seja reduzida. A períodos com produtividade acima da nominal (>100%), devem ser contrapostos períodos com produtividade reduzida (<100%), de tal forma que idealmente mantenha-se o transformador operando com produtividade média próxima de 100%, otimizando-se assim o retorno financeiro.

As equações implementadas no programa e referentes ao conceito acima são apresentadas a seguir:

$$\text{Prod}\%(j) = 100 \cdot \frac{10^{-\left(A + \frac{B}{\theta_{e(j)} + 273}\right)}}{10^{-\left(A + \frac{B}{\theta_{\text{ref}} + 273}\right)}}$$

$$\text{Prod}\% \text{ media} = \frac{100}{T} \cdot \frac{\sum_{j=1}^T 10^{-\left(A + \frac{B}{\theta_{e(j)} + 273}\right)}}{10^{-\left(A + \frac{B}{\theta_{\text{ref}} + 273}\right)}}$$

$$\theta_{\text{ref}} = \frac{B}{\log_{10}(\text{EV}) - A} - 273$$

Onde:

$j = 1$ até número de pontos no período considerado;

Prod%(j) - produtividade no instante j;

Prod%media - produtividade média no período T;

T - período de carregamento imposto sob um ciclo de carga qualquer (número de temperaturas j consideradas);

$\theta_{e(j)}$ - temperatura do ponto quente do enrolamento no instante de tempo j (°C);

EV - expectativa de vida referencial para retorno do investimento (horas);

θ_{ref} - temperatura do ponto quente do enrolamento em regime constante, que conduz a uma expectativa de vida EV (°C).

As Figuras 1, 2, 3 e 4 procuram esclarecer a questão da produtividade média do transformador em um período.

As Figuras 1 e 2 apresentam um ciclo típico de temperaturas do ambiente (°C) e de carregamento (%) aos quais assume-se estar submetido um transformador. O ciclo de 30 dias exemplificado corresponde a um ciclo semanal repetido quatro vezes. A máxima temperatura ambiente e o máximo carregamento no ciclo são respectivamente de 34,8 °C e 134 %.

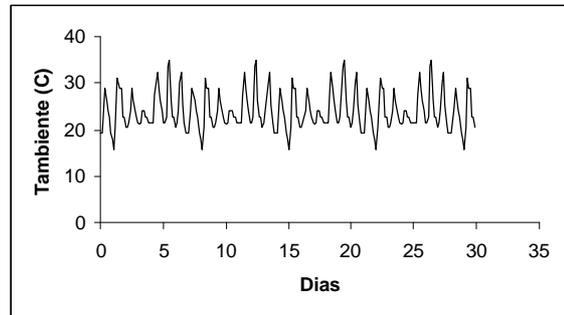


FIGURA 1 – Ciclo típico mensal de variação da temperatura ambiente de um transformador submetido a um carregamento variável.

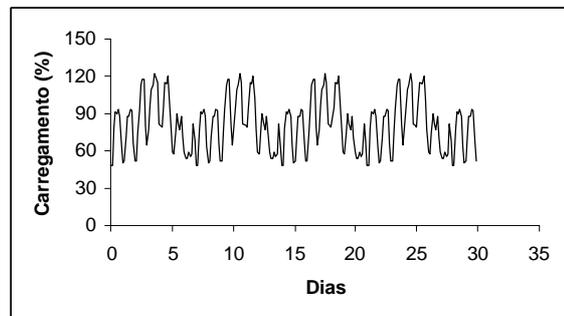


FIGURA 2 – Ciclo típico mensal de carregamento (%) de um transformador.

Na Figura 3 apresenta-se o ciclo de temperaturas calculadas de enrolamento que resulta da aplicação dos ciclos das Figuras 1 e 2. A máxima temperatura atingida pelo enrolamento no ciclo é de 110,87 °C.

Na Figura 4 apresenta-se a evolução calculada da perda de vida percentual PV% acumulada no tempo. Nesta figura a reta representa a PV% acumulada para uma temperatura de referência fixa de 83,69 °C (EV=30 anos). A curva oscilante, apresenta como

seria a evolução da perda de vida acumulada em um regime com temperatura de operação variável conforme a Figura 3.

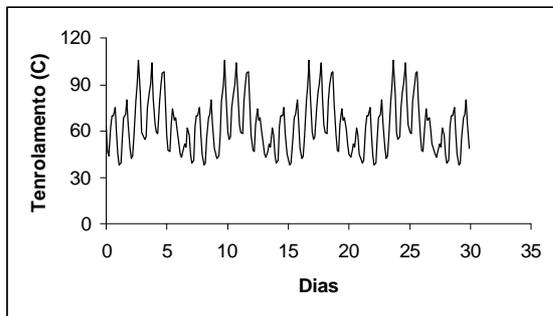


FIGURA 3 – Ciclo calculado de variação da temperatura de enrolamento para os ciclos impostos conforme Figuras 1 e 2.

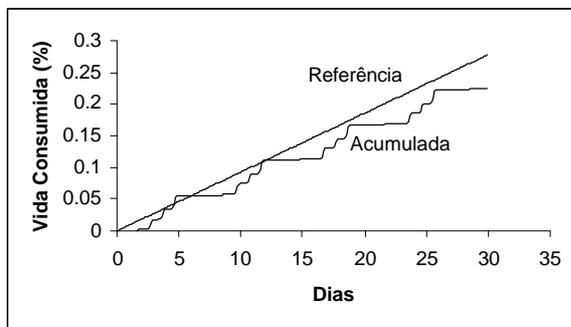


FIGURA 4 – Evolução da Vida referencial e da Vida consumida acumulada para o ciclo da Figura 3.

Observa-se que em determinados períodos do seu ciclo de carregamento o transformador operou com temperatura maior que a de referência (produtividade instantânea maior que 100%), estando portanto sacrificando sua vida mais rapidamente que o admitido para a temperatura de referência, porém com o tempo (por operar também com temperaturas inferiores à de referência) a PV% real acumulada manteve-se abaixo da reta referencial, indicando que o ciclo de carregamento aplicado é admissível, pois a produtividade média no período resulta menor que 100%. No caso mostrado a produtividade média no período de 1 mês considerado foi de 81,2 % e a estimativa de vida mantido este ciclo de carga é de aproximadamente 37 anos, maior portanto, que os 30 anos tomados para referência.

Com o uso de monitoramento contínuo e das variáveis “Produtividade do Transformador”, elimina-se em parte o sempre existente receio de operar o transformador acima de sua corrente nominal, pois a cada instante o operador pode saber como está a evolução da PV% e qual a sua tendência no tempo.

Outra vantagem é a compreensão e associação imediata que o uso do termo “Produtividade” embute. O transformador que face a um referencial estabelecido produz menos que 100% pode ser, compreensivelmente (respeitados também outros limites técnicos/operacionais), mais exigido.

Outra implicação relaciona-se diretamente com uma possível mudança de postura, quando da compra de um transformador novo.

Por norma, exige-se atualmente que o transformador apresente resultados no ensaio de elevação de temperatura abaixo de determinados valores de referência. Se a elevação for maior que o tolerado o transformador é rejeitado, devendo o fabricante fazer modificações para adequação. Isto pode envolver sérias dificuldades em se tratando de transformadores de grande potência e sempre tem um custo e tempo de execução envolvidos. Com a adoção do conceito de produtividade, assume-se que o transformador é uma máquina que transforma energia e que ao longo de toda sua vida deve fornecer uma determinada quantidade de MVAh, operando em uma determinada temperatura de referência, definida pela expectativa de vida em anos (que por sua vez é determinada pelo retorno financeiro da empresa).

Assim, se o transformador foi reprovado no ensaio, isto equivale a dizer que seu MVAh real é menor que o especificado. Descontos no custo do transformador podem então ser calculados em função da diferença de MVAh existentes, podendo-se até vir a aceitar o transformador. De fato, este tipo de procedimento não é novo sendo já praticado em algumas empresas, como pode ser visto em (7).

4.0 – RESULTADOS DE CAMPO

Dos resultados obtidos para os 10 transformadores monitorados durante o Projeto 1362 (8, 9, 10, 11, 12), selecionou-se aqui aqueles do transformador CBI#3 de 40 MVA / 138kV para mostrar as diferenças que existem nas simulações fazendo-se uso de parâmetros térmicos individualizados e obtidos a partir de resultados de campo, ou parâmetros típicos de norma.

Foram utilizados os dados de carregamento medido no lado de BT (13,8 kV) do transformador.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros térmicos utilizados para a confecção das Figuras 6 e 7.

TABELA 1 – Parâmetros da NBR5416 e para CBI#3

$\Delta\theta_{on}$	τ_o			$\Delta\theta_{en}$	τ_e
---------------------	----------	--	--	---------------------	----------

	(°C)	(min)	R	n	(°C)	(min)
CBI#3	40	162	5	0.8	25	4.8
NBR	42	144.2	5.46	0.97	10.6	10

A Figura 5 mostra a temperatura ambiente e o carregamento % atingido durante o ensaio realizado no verão. O tempo de aquisição foi de 5 minutos e, através da transferência de cargas na SE, chegou-se a aproximadamente 110% do carregamento nominal.

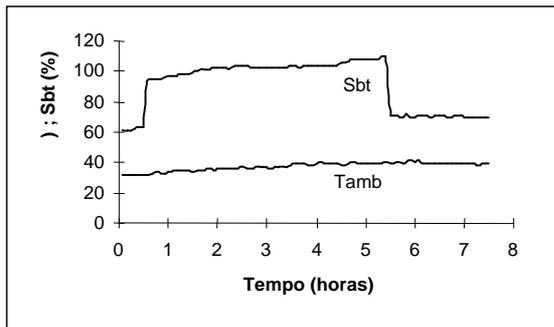


FIGURA 5 – Temperatura Ambiente (°C) e Carregamento BT (%) – CBI#3 – Ensaio de Verão

A Figura 6 mostra as temperaturas de enrolamento medida e calculada a partir do uso dos parâmetros da Tabela 1 para o transformador CBI#3.

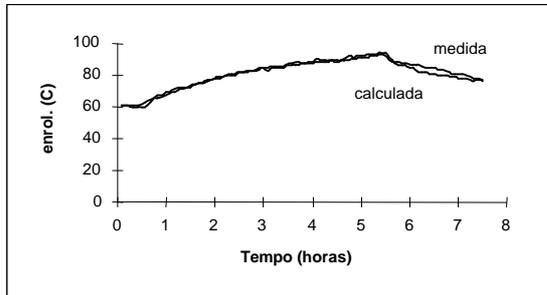


FIGURA 6 – Temperaturas medidas e calculadas - Parâmetros individuais para CBI#3

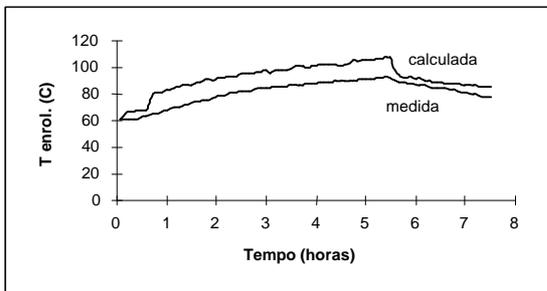


FIGURA 7 – Temperaturas medidas e calculadas - Parâmetros típicos NBR 5416

A Figura 7 mostra as temperaturas de enrolamento medidas e calculadas com o uso dos parâmetros típicos

da NBR 5416 para Transformador ONAN classe 55°C, conforme Tabela 1.

Percebe-se que as diferenças podem ser bastante elevadas (da ordem de até 20 °C) quando não são usados os parâmetros adequados.

5.0 – ESTUDOS DE CARREGAMENTO

A modelagem térmica é especialmente útil quando é necessário saber quais os limites de carregamento que podem ser aplicados em caso dos transformadores serem submetidos a regimes de emergência. Estes limites dependem basicamente da temperatura ambiente, do quanto admira-se perder de vida no período considerado e dos parâmetros térmicos que representam o transformador.

Na Figura 8 apresentam-se os resultados de simulação para o transformador CBI#3, utilizando os parâmetros térmicos indicados na Tabela 1. Assume-se para cálculo a condição de que a produtividade instantânea e a produtividade média sejam sempre de 100%, ou seja, que a perda de vida diária real (em 24 horas) deve ser igual à perda de vida referencial diária. Assume-se ainda que a expectativa de vida do transformador seja de 30 anos.

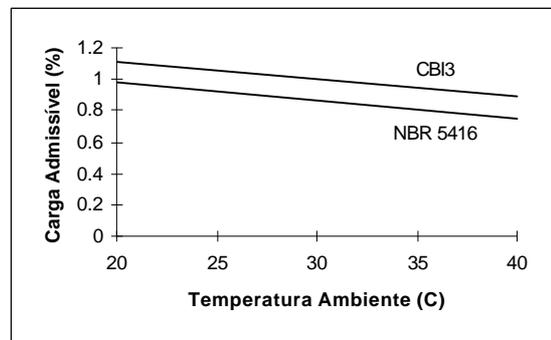


FIGURA 8 – Comparação do Carregamento Máximo Admissível em Regime Permanente para os parâmetros térmicos da Tabela 1.

Podem ser identificadas claramente as diferenças obtidas com o uso dos parâmetros específicos calculados para o transformador, frente aos parâmetros típicos da NBR.

No caso demonstrado, utilizando os parâmetros térmicos obtidos pela metodologia desenvolvida, conclui-se que o transformador pode assumir entre 13 e 14% a mais de carga do que assumiria se fosse representado pelos parâmetros da NBR 5416, sem comprometimento de sua expectativa de vida.

6.0 - CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida para cálculo dos parâmetros térmicos do transformador a partir de resultados de monitoramento em campo efetivamente conduz a melhores ajustes do que o uso de parâmetros típicos como os da NBR 5416. O uso de parâmetros individuais para cada transformador é recomendável na execução de estudos em que seja necessário determinar os limites máximos de carregamento admissíveis em situações de emergência.

O uso do termo “Produtividade do Transformador”, baseado em uma relação entre perdas de vida percentual reais e referenciais tomadas em um determinado período de tempo, como a proposta pelas equações do item 3, traduz efetivamente os objetivos da NBR 5416, facilitando a compreensão a aplicação dos princípios do carregamento admissível nos transformadores.

Ficou evidente, pela experiência adquirida no projeto, a viabilidade de aplicar-se carregamentos acima do nominal nos transformadores. Análises criteriosas sobre os resultados apresentados que levem em conta também outros aspectos, como por exemplo, informações sobre análises físico-químicas e gás-cromatográficas do óleo, ciclos de carregamento emergenciais anteriormente impostos, tempo em operação, histórico de ocorrências e grau de risco das unidades, devem entretanto, delimitar as decisões operativas tomadas nesse sentido.

A modelagem térmica não deve ser utilizada como única ferramenta de análise. Modelagens de carregamento como as realizadas no programa TRAPOT devem ser correlacionadas com outras técnicas para a realização de diagnósticos integrados. Tanto a LIGHT quanto o CEPEL, trabalham atualmente nessa direção.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimento – NBR 5416. Brasil.

(2) CRONIN, J.H. Rate Substation Equipment for Short-Time Overloads, *Electrical World*, April 15, pp. 44-47, (1972).

(3) GIVELBERG, M. Monitoring Transformer Age, *Transmission & Distribution International*, pp. 22-25, Fourth Quarter (1994).

(4) LESIEUTRE, B.C., HAGMAN, W.H., KIRTLEY Jr. J.L. An Improved Transformer Top Oil Temperature Model for Use in An On-Line Monitoring and Diagnostic System, *IEEE - Trans. Power Delivery*, vol 12, No. 1, pp. 249-256, January (1997) USA.

(5) FANTINATTI, J.R., AIRES, J.C., ZAIDEN, J., DUPONT, C.J. Ensaios de Carregamento / Aquecimento no Campo, em Transformadores de Potência; V Semel - Seminário de Materiais no Setor Elétrico, pgs. 610 - 619, 18 a 21/ago. (1996). Brasil.

(6) DUPONT, C.J., FANTINATTI, J.R., AIRES, J.C.O, M.L., ZAIDEN Transformadores de Potência: Ensaios de Aquecimento no Campo e Modelagem de Características Térmicas, CE 12, VII ERLAC, (1997) Puerto Iguazu – Argentina.

(7) BARRAGÁN, H. A. Industria de Transformación (em espanhol), BRACIER – CIERTEC/SOPEM, out/97 (1997) RJ, Brasil.

(8) DUPONT, C.J. Sobrecarregamento e Perda de Vida Útil de Transformadores, Rel. Téc. CEPEL DPP/TEQ – 865/97, (1997) Brasil.

(9) DUPONT, C.J. Sobrecarregamento e Perda de Vida Útil de Transformadores – Etapa 2, Rel. Téc. CEPEL DPP/TEQ – 1173/97, (1997) Brasil.

(10) DUPONT, C.J., VERDOLIN, R.T., Sobrecarregamento e Perda de Vida Útil de Transformadores – Etapa 3, Rel. Téc. CEPEL DPP/TEQ – 173/98, (1998) Brasil.

(11) DUPONT, C.J. Sobrecarregamento e Perda de Vida Útil de Transformadores – Etapa 4, Rel. Téc. CEPEL DPP/TEQ – 175/98, (1998) Brasil.

(12) DUPONT, C.J. Sobrecarregamento e Perda de Vida Útil de Transformadores – Relatório Final, Rel. Téc. CEPEL DPP/TEQ – 213/98, (1998) Brasil.