XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO XIII

GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES,
MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM

CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DE MARGENS DE SEGURANÇA NA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO DE TRANSFORMADORES E REATORES

Roberto Asano Junior (*) — **ABB**
Antonio Roseval F. Freire — **CHESF**
José Francisco L. de Oliveira — **AREVA**

RESUMO

Nos estudos de coordenação de isolamento de transformadores e reatores são consideradas margens de segurança, previstas em normas técnicas, entre as sobretensões máximas esperadas em serviço e as tensões de ensaio com as formas de onda padronizadas. Apresenta-se neste trabalho uma análise dos efeitos da dispersão estatística da suportabilidade da isolação na margem de segurança, partindo de modelos matemáticos com parâmetros típicos que caracterizam as distribuições de probabilidade das tensões de descarga. Esta análise mostra que a margem de segurança necessária pode ser maior que a prevista, dependendo do número de aplicações das solicitações e da propensão ao risco permitida.

PALAVRAS-CHAVE

Transformadores e Reatores, Coordenação de Isolamento, Margem de Segurança, Suportabilidade da Isolação, Dispersão Estatística

1.0 - INTRODUÇÃO

Os estudos de coordenação de isolamento, utilizados principalmente para subsidiar a especificação de materiais e equipamentos, são normalmente realizados na fase de planejamento e projeto das instalações elétricas com o objetivo fundamental de minimizar, a um nível econômico e operacionalmente aceitável, a probabilidade de falhas nos equipamentos considerando as solicitações que podem ocorrer no sistema e as características dos isolamentos e dos dispositivos de proteção. Nesses estudos e, também, nas análises dos efeitos das tensões transitórias de alta freqüência aplicadas nos terminais dos transformadores e reatores, normalmente são considerados limites de amplitude da sobretensão e, adicionalmente em algumas empresas, de densidade espectral para avaliação da margem de segurança (1), (2). Em princípio, esta margem de segurança deveria ser selcionada para considerar os efeitos combinados das modificações das condições da isolação e do número de aplicações das solicitações ao longo da vida útil do equipamento (3), (4).

Por outro lado, os ensaios dielétricos são realizados em laboratório com a isolação em condições bem específicas e controladas. Estas condições podem se bem diferentes das condições encontradas em serviço, como resultado dos efeitos combinados de vários fatores tais como contaminação do óleo e ou da isolação sólida, sobretensões recorrentes, etc. Assim, ao longo da vida útil do equipamento, determinadas condições de operação e manutenção (O&M) podem gradualmente reduzir a tensão suportável pela isolação (4).

Para a isolação não auto-regenerativa, as normas técnicas de coordenação de isolamento, como a IEC (5), definem um fator de segurança mínimo igual a 1,15 para levar em conta os efeitos dos vários fatores que podem reduzir a suportabilidade da isolação em serviço e as incertezas estatísticas dos ensaios em laboratório, de tal modo que a tensão suportável requerida pela aplicação seja atendida durante a vida útil do equipamento.

(*) Av. Monteiro Lobato, n° 3411 – CEP 07190-9904 Guarulhos, SP – Brasil
Email: roberto.asano@br.abb.com

Portanto, tais guias recomendam que a tensão de ensaio deva ser maior ou igual a 1,15 vezes o valor máximo da sobretensão transitória esperada em serviço.

As normas técnicas de coordenação de isolamento também assumem, para a isolação não auto-regenerativa, que as tensões de ensaio com as formas de onda padronizadas correspondem a uma probabilidade de 100% de suportar uma aplicação, ou seja, não existe possibilidade de descarga com esse nível de tensão aplicada. Na realidade, mesmo em condições bem definidas e constantes, quer do estado da isolação quer da forma de onda e polaridade da sobretensão aplicada (3), a suportabilidade da isolação é uma variável aleatória, ou seja, as tensões aplicadas nos ensaios dielétricos com as formas de onda padronizadas estão associadas a uma dada probabilidade de falha.

Os efeitos da dispersão estatística da suportabilidade da isolação na margem de segurança, a ser aplicada na coordenação de isolamento de transformadores e reatores, são analisados neste trabalho através de modelos matemáticos com parâmetros estimados a partir das faixas de variação típicas dos parâmetros que caracterizam as distribuições de probabilidade da tensão de descarga da isolação.

2.0 - EFEITOS DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (O&M)

As condições de operação e manutenção podem afetar as condições da isolação ao longo da vida útil do equipamento (4), ou seja, as condições de serviço podem ser bem diferentes das condições específicas e controladas dos ensaios dielétricos realizados em laboratório. O estado da isolação é função dos efeitos combinados de vários fatores tais como práticas de manutenção, variações de temperatura, sobrecargas, circulação de sobrecorrentes transitórias nos enrolamentos, circulação do óleo, etc., que podem afetar o envelhecimento e as condições (contaminação) da isolação com reflexos importantes na suportabilidade dielétrica.

Para a isolação não auto-regenerativa, as normas técnicas de coordenação de isolamento (5), definem um fator de segurança mínimo igual a 1,15 para levar em conta os fatores que podem reduzir a suportabilidade da isolação em serviço e as incertezas estatísticas dos ensaios em laboratório, de tal modo que a tensão suportável requerida pela aplicação seja atendida durante a vida útil do equipamento. Portanto, a tensão de ensaio deve ser maior ou igual a 1,15 vezes o valor máximo da sobretensão transitória esperada em serviço.

3.0 - EFEITOS DA DISPERSÃO ESTATÍSTICA DA TENSÃO DE DESCARGA

3.1 Dispersão Estatística

Para a isolação não auto-regenerativa, as normas de coordenação de isolamento (5) assumem que as tensões de ensaio com as formas de onda padronizadas correspondem a uma probabilidade de 100% de suportar uma aplicação, ou seja, não existe possibilidade de falha com este nível de tensão aplicada. Entretanto, mesmo em condições bem definidas e constantes, a suportabilidade da isolação não é um valor determinístico, mas uma variável aleatória que tem diferentes probabilidades de descarga para diferentes valores de tensão.

A distribuição de probabilidade real da tensão suportável de um transformador é difícil de ser determinada. De forma simplificada é assumido que a isolação do transformador pode ser caracterizada pelas propriedades de seu ponto mais estressado (6). Com base em ensaios de amostras que simulam as partes críticas da isolação, a distribuição de probabilidade da tensão de descarga é levantada experimentalmente e utilizada para estimar os parâmetros de um modelo matemático. Este modelo é então considerado como representativo da suportabilidade dielétrica do transformador. A experiência baseada em resultados de ensaios em amostras indica que a distribuição de probabilidade da tensão de descarga da isolação pode ser adequadamente descrita pela distribuição de Weibull (3), (5).

3.2 Distribuicão de Probabilidade de Weibull

A distribuição de Weibull representa de forma satisfatória, e bem melhor que a distribuição Normal, a relação entre a amplitude da tensão U e a probabilidade de descarga $P(U)$, principalmente para probabilidades de descarga muito pequenas ou muito próximas da unidade (3).

Sendo U a amplitude da tensão para determinada forma de onda, determinada polaridade e condições bem definidas e constantes, a probabilidade acumulada de descarga $P(U)$ é dada pela equação 1, onde Uo é o valor de tensão abaixo do qual não há possibilidade de descarga, $Uo+a$ é o valor de tensão correspondente a uma probabilidade de 63,2% e m é o parâmetro de forma que é uma medida da dispersão da distribuição de probabilidade.

$$P(U) = 0 \qquad , U \leq U_o$$

$$P(U) = 1 - e^{-\left(\frac{U - U_o}{a}\right)^m} \qquad , U > U_o \qquad (1)$$

Este modelo matemático pode aproximar distribuições de probabilidade não simétricas, ou seja, onde a moda não coincide com o valor médio. Para valores de m na faixa de 3 a 4 e para valores intermediários de probabilidade, a distribuição de Weibull se aproxima da distribuição Normal.

3.3 Estimativa dos Parâmetros da Distribuicão de Weibull

A experiência baseada em resultados de ensaios em amostras indica que a distribuição de probabilidade da tensão de descarga da isolação pode ser adequadamente descrita pela distribuição de Weibull com um parâmetro m igual a 3,5 e uma relação entre o desvio padrão (S) e o valor médio (U_{50}) na faixa de 10% a 15% (4), (6), (7), (8), (9). Conhecendo esses parâmetros e a tensão de referência U_t, com uma probabilidade de descarga correspondente $P(U_t)$, é possível estimar os parâmetros U_o e a utilizando as equações 2 e 3.

$$\frac{U_o}{U_t} = \frac{\frac{\gamma}{\sigma} - k_2}{\frac{\gamma}{\sigma} + k_1 - k_2} \qquad (2)$$

$$\frac{a}{U_t} = \frac{1}{\frac{\gamma}{\sigma} + k_1 - k_2} \qquad (3)$$

$$\sigma = \frac{S}{U_{50}} \qquad k_2 = (\ln(2))^{\frac{1}{m}} \qquad k_1 = \left(\ln\left(\frac{1}{1 - P(U_t)}\right)\right)^{\frac{1}{m}}$$

$$\gamma = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)^2} \qquad \Gamma(p) = \int_0^\infty x^{p-1} e^{-x} dx$$

A Figura 1 mostra a probabilidade de descarga em função da relação entre a tensão aplicada e a tensão U_t com uma probabilidade de descarga de 2%, para a distribuição de Weibull com m igual a 3,5 e S/U_{50} igual a 12%. Com esses parâmetros, a tensão com uma probabilidade de descarga igual a 0,1% é cerca de 90% da tensão com uma probabilidade de descarga de 2%. A curva apresentada nesta figura está compatível com a curva apresentada na figura 5.114 da referência (6), validando o método utilizado para a estimativa dos parâmetros.

3.4 Influência do Número de Aplicações

Sendo a distribuição de Weibull aplicável à probabilidade de ocorrência de descarga numa aplicação de tensão, também é aplicável à probabilidade de ocorrência de pelo menos uma descarga em n aplicações independentes de tensão se não houver efeitos cumulativos. Nestas condições, a equação 4 mostra a probabilidade Pn(U) de ocorrer descarga em pelo menos uma das n aplicações da tensão U.

$$Pn(U) = 0 \qquad , U \leq U_o$$

$$Pn(U) = 1 - e^{-n.\left(\frac{U - U_o}{a}\right)^m} \qquad , U > U_o \qquad (4)$$

Para uma dada probabilidade de falha existe um valor limite de tensão que depende do número de aplicações. A Figura 2 mostra esta relação para uma probabilidade de falha Pn igual a 90%, para m igual a 3,5 e S/U_{50} igual a

12%. Comparando esta figura com a figura 5.115 da referência (6) pode ser constatada a exata correspondência entre as duas curvas, validando o método utilizado para a estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull.

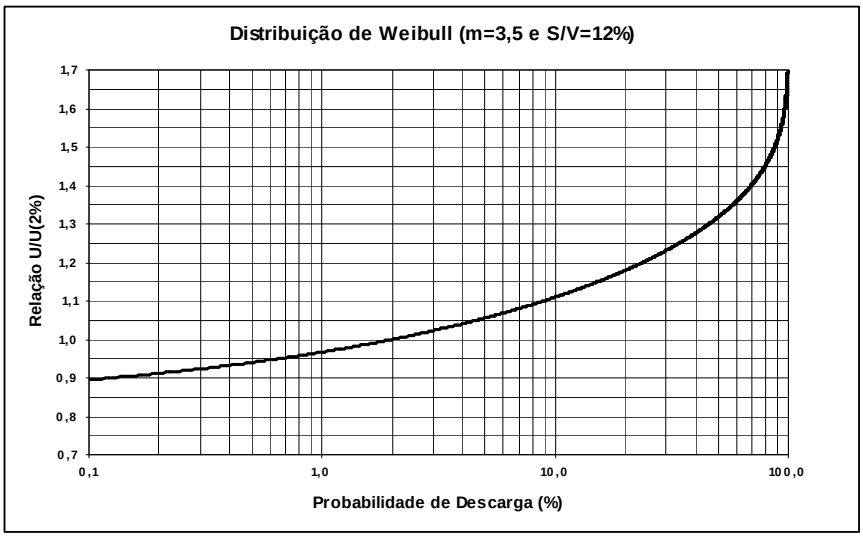

FIGURA 1 – Relação entre a tensão aplicada e a probabilidade de descarga

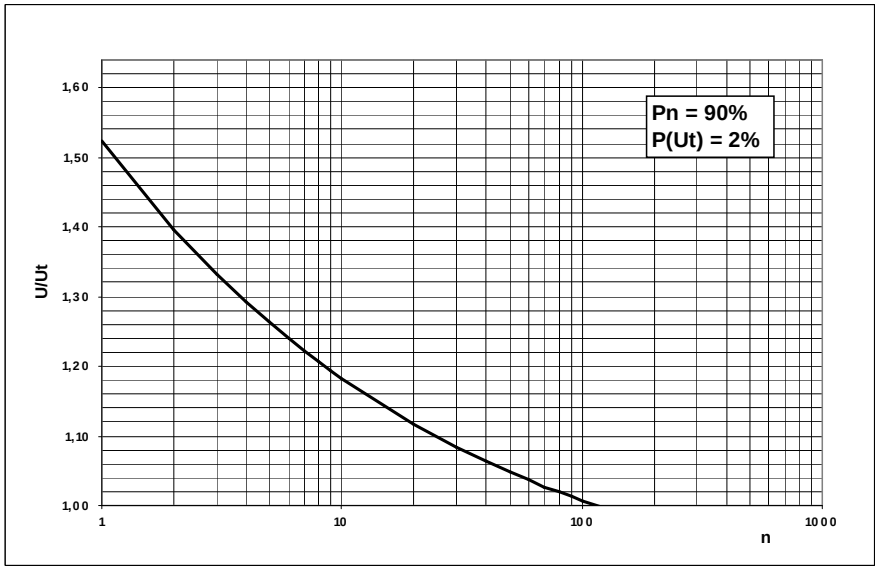

FIGURA 2 – Relação U/U_t em função de n para m=3,5 e S/U_{50}=12%

4.0 - MARGENS DE SEGURANÇA NA COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

As tensões de ensaio com as formas de onda padronizadas definem o nível de suportabilidade da isolação que está associado a uma dada probabilidade de falha. Esta probabilidade é uma função da experiência e esta associada à tecnologia de cada fabricante. Nos exemplos deste trabalho adotou-se como referência, uma probabilidade de falha $P(U_t)$ igual a 0,1%, ou seja, uma falha em 1000 aplicações (4), (7). A Tabela 1 apresenta os valores calculados dos parâmetros a e Uo para diferentes valores do parâmetro m e da relação S/U_{50}, considerando a tensão aplicada U_t correspondente a uma probabilidade $P(U_t)$ igual a 0,1%.

TABELA 1 – Parâmetros da Distribuição de Weibull

m	Uo/Ut			a/Ut		
	S/U_{50} = 0,10	S/U_{50} = 0,12	S/U_{50} = 0,15	S/U_{50} = 0,10	S/U_{50} = 0,12	S/U_{50} = 0,15
3,0	0,9594	0,9479	0,9274	0,4064	0,5209	0,7253
3,5	0,9334	0,9137	0,8777	0,4794	0,6207	0,8798
4,0	0,9016	0,8715	0,8149	0,5530	0,7223	1,0410

Para valores do parâmetro m na faixa de 3 a 4 e para valores da relação S/U_{50} na faixa de 10% a 15%, a relação U_o/U_t varia de 0,80 a 0,95, ou seja, a tensão abaixo da qual não existe possibilidade de descarga pode variar na faixa de 80% a 95% da tensão com uma probabilidade de descarga de 0,1%, dependendo do desvio padrão e do parâmetro de forma.

A Figura 3 mostra a probabilidade de ocorrer pelo menos uma falha em função do número de aplicações n, tendo como parâmetro a tensão aplicada. Os valores de probabilidade foram calculados considerando m igual a 3,5 e S/U_{50} igual a 12%, com $P(U_t)$ igual a 0,1%. Com esta distribuição de probabilidade, para 1000 aplicações de uma tensão correspondente a 95% da tensão de ensaio, o risco de falha é cerca de 50 vezes a probabilidade de falha para uma aplicação da tensão de ensaio U_t.

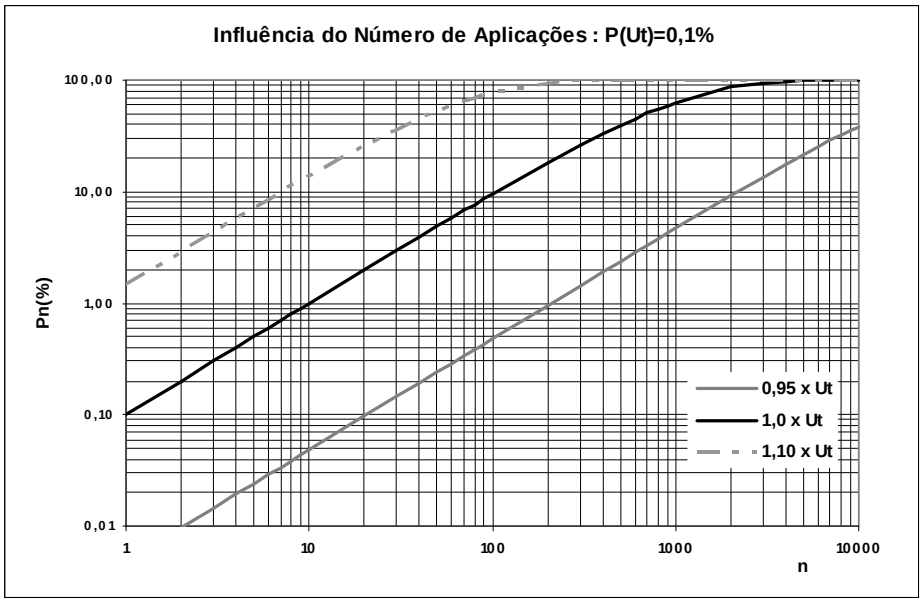

FIGURA 3 – Pn(U) em função do número de aplicações para m=3,5 e S/U_{50}=12%

As Figuras 4 e 5 mostram o valor limite de tensão em função do número de aplicações, tendo como parâmetro a probabilidade de falha, para diferentes valores dos parâmetros m e S/U_{50}. Considerando m igual a 3,5 e S/U_{50} igual a 12%, para manter uma probabilidade de falha de 0,1% em 1000 aplicações, a tensão aplicada deve ser igual a 92% da tensão de ensaio U_t.

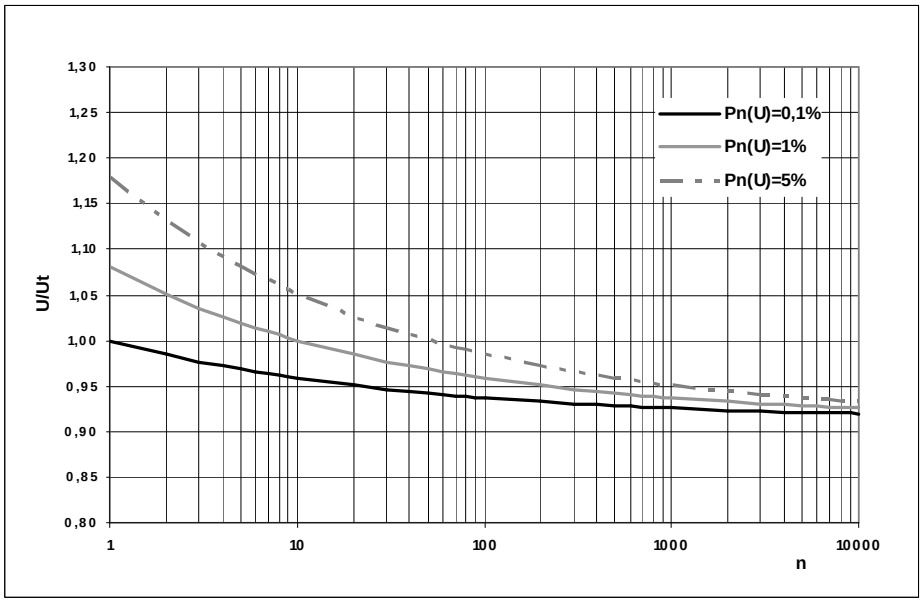

FIGURA 4 – Relação U/U_t em função de n para m=3,5 e S/U_{50}=12%

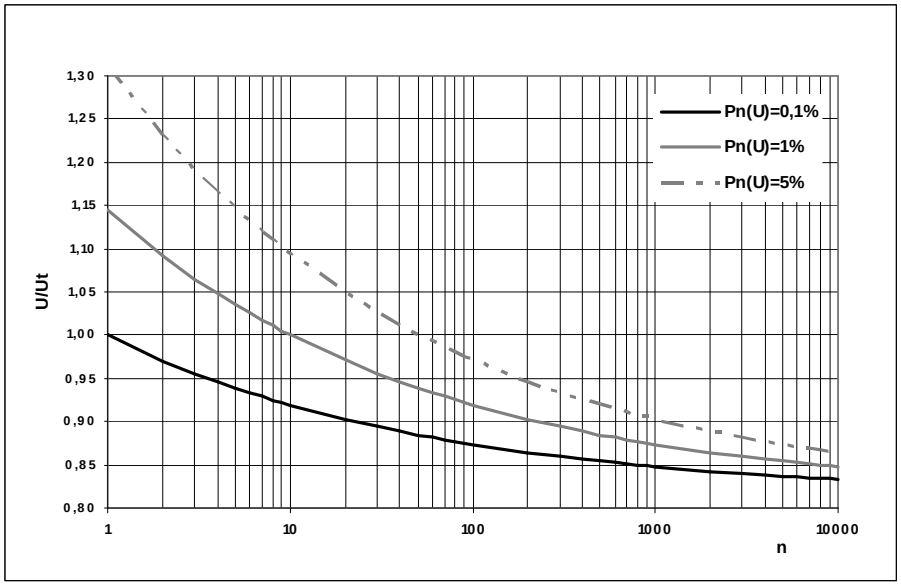

FIGURA 5 – Relação U/U_t em função de n para m=4 e S/U_{50}=15%

A Tabela 2 mostra os valores limites da relação U/U_t em função do número de aplicações e da probabilidade de falha, para diferentes valores dos parâmetros m e S/U_{50}, considerando $P(U_t)$ igual a 0,1%. Este resultado mostra que quando o número de aplicações é muito elevado, e ou quando a probabilidade de falha é muito reduzida, o valor limite da relação U/U_t tende para U_o/U_t.

TABELA 2 – Limites para a relação U/U_t

N	m=3,5; S/U_{50}=12%			m=4; S/U_{50}=15%		
	Pn = 0,1%	Pn = 1%	Pn = 5%	Pn = 0,1%	Pn = 1%	Pn = 5%
1	1,0000	1,0805	1,1794	1,0000	1,1445	1,3103
10	0,9584	1,0001	1,0513	0,9190	1,0003	1,0935
100	0,9369	0,9585	0,9850	0,8734	0,9191	0,9716
1000	0,9257	0,9369	0,9507	0,8478	0,8735	0,9030
10000	0,9200	0,9257	0,9329	0,8334	0,8479	0,8644

Utilizando os parâmetros da Tabela 1 e a equação 4 podem ser estimados valores limites conservativos para a relação U/U_t em função do número de aplicações e da probabilidade de falha desejada. A Tabela 3 apresenta alguns exemplos de limites calculados para que a probabilidade de falha nas n aplicações não ultrapasse a probabilidade inicial, no caso, 0,1%.

TABELA 3 – Limites de tensão em função do número de aplicações

n	Limite U/U_t
$1 \leq n < 100$	0,90
$100 \leq n < 10000$	0,85
$n \geq 10000$	0,80

O limite da relação U/Ut depende dos parâmetros m, S/U_{50}, P(Ut) e do risco de falha assumido. Em um exercício matemático, para m e S/U_{50} iguais a 4 e 15%, respectivamente, e considerando P(Ut) igual a 2%, seria obtida uma relação Uo/Ut igual a 0,67, ou seja, o limite U/Ut tenderia a 0,67 para um número elevado de aplicações.

5.0 - CONCLUSÃO

Nos estudos de coordenação de isolamento e nas análises das tensões transitórias de alta freqüência nos terminais dos equipamentos, devem ser adotadas margens de segurança adequadas considerando os efeitos das modificações das condições da isolação e da quantidade de incidências (número de aplicações) que o equipamento observará ao longo de sua vida útil. Esta margem deve ser adotada tanto na limitação da amplitude da sobretensão máxima em relação à amplitude dos níveis de ensaio, como também na comparação da densidade espectral das sobretensões transitórias com a envoltória da densidade espectral das ondas de ensaio

em fábrica do transformador.

As análises realizadas neste trabalho demonstram que a margem de segurança a ser aplicada na coordenação do isolamento e na envoltória da densidade espectral deve levar em conta, além dos efeitos das condições de operação e manutenção, a dispersão estatística da tensão suportável pela isolação e o número de aplicações esperado ao longo da vida útil do equipamento. Considerando o fator 1,15 previsto nas normas técnicas e os valores típicos dos parâmetros das distribuições de probabilidade que representam a tensão suportável pela isolação, a margem de segurança adequada pode ser calculada, e resultar num valor bem inferior a 80% da tensão de ensaio, dependendo do número de aplicações e da propensão ao risco permitida.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) A. C. O. Rocha, “Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System”, CIGRE Bienal Session, Paper C4-104, Paris, France, August 2008.

(2) R. Asano, A. C. O. Rocha e G. M. Bastos, “Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System”, CIGRE A2 Colloquium, Paper 33, Bruges, Bélgica, October 2007.

(3) PORTELA, C. M. J. C. M., “Sobretensões e Coordenação de Isolamento”, Vol. 1 a 3, COPPE/UFRJ, 1982.

(4) BALMA, P. M., DEGENEFF, R. C., MOORE, H. R., WAGENAAR, L. B., “The Efects of Long Term Operation and System Conditions on the Dielectric Capability and Insulation Coordination of Large Power Transformers”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999.

(5) IEC 60071, “Insulation Coordination Part 1: Definitions, Principles and Rules and Part 2: Application Guide”.

(6) KARSAI, K., KERENYI, D., KISS, L., “Large Power Transformers”, New York: Elsevier, 1987.

(7) IEEE Std Draft PC57.142, “A Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformer and Breaker Interaction”, 2004.

(8) YAKOV, S., “Considerations about the Impulse Test Procedure for Power Transformers”, CIGRE ELECTRA No. 55, December 1977.

(9) YAKOV, S., “Statistical Analysis of Dielectric Test Results”, CIGRE Report No. 66, 1991.