



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GSE - 17  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO VIII  
GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - GSE**

**TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA – UMA ANÁLISE ENTRE AS SOLICITAÇÕES ESPECIFICADAS E IMPOSTAS PELO SISTEMA ELÉTRICO**

**Angélica da Costa Oliveira Rocha**

**Luiz Henrique Silva Duarte \***

**CEMIG**

**RESUMO**

O artigo discute sobre a necessária interação entre fabricantes e usuários de transformadores de potência, tendo em vista adequar as respectivas especificações e projetos às solicitações reais impostas pelo sistema elétrico. Uma metodologia e tópicos de Design Review são apresentados, além de exemplos de solicitações elétricas não normalizadas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transformadores de Potência, Reatores de Potência, Design Review, Transitórios Elétricos.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os engenheiros envolvidos com a especificação técnica de transformadores de potência têm recentemente vivenciado a experiência de buscar compreender os fatores influenciadores de uma elevação da taxa de falhas maiores do parque instalado. Obviamente, uma parte das falhas possui causas particulares e razoavelmente compreendidas, por exemplo, aquelas relacionadas com surtos de manobra de alta frequência decorrentes de chaveamentos por equipamentos isolados a SF6. Por outro lado, é consenso que as denominadas aplicações não especiais compõem a maior parte dos casos de falhas, muitas vezes após poucos anos de vida operativa.

Pressões econômicas crescentes e o ambiente competitivo têm forçado as concessionárias a procurarem novas formas de gerenciar seus ativos visando não só os custos iniciais, mas também custos de operação incluindo perdas, manutenção e indisponibilidade. A necessidade de redução de custos também é uma realidade para os fabricantes tendo como consequência otimizações no projeto que implicam margens de segurança menores, densidades de fluxo e correntes maiores, unidades mais leves com menores espaçamentos e volume de óleo. Todos esses fatores não deveriam colocar em riscos a qualidade e confiabilidade dos transformadores.

Portanto, cabe levantar hipóteses que possam justificar o cenário de elevadas taxas de falha, desde a “demasiada” otimização dos projetos mais modernos os quais utilizam avançadas ferramentas computacionais, até a real representatividade das cláusulas normativas, especialmente aquelas relacionadas aos estresses dielétricos impostos aos transformadores de potência.

Por outro lado, antes mesmo de um melhor entendimento sobre os fenômenos envolvidos na maior parte das falhas, poder-se-ia tomar um primeiro passo no sentido de melhor entender o projeto dos transformadores de potência, e posteriormente a sua interação com o sistema elétrico.

Esse cenário sucintamente descrito e a necessidade de se garantir uma disponibilidade cada vez maior para os sistemas de transmissão sem custos excessivos, constituem a motivação para discutir a interação entre os

\*Av. Barbacena, 1200 –11º Andar - CEP 30190-131 – Belo Horizonte - MG - BRASIL  
Tel.: (031) 3299-3849 - Fax: (031) 3299-3791 - e-mail: lhduarte@cemig.com.br

projetos especificados para os transformadores de potência e as reais condições operativas. Portanto, o artigo quer ser instrumento motivador para o avanço nesse tema pelos engenheiros de fabricantes e concessionárias de energia elétrica.

## 2.0 - COOPERAÇÃO ENTRE CLIENTE E FABRICANTE

A confiabilidade dos transformadores pode estar estreitamente relacionada com grau de cooperação entre clientes e fabricantes em todas as fases da clássica curva da banheira. Essa curva indica um aumento significativo das taxas de falha no início da operação e final de vida desses equipamentos. Minimizar essas taxas de falha, com conseqüente elevação do índice "tempo médio entre falhas," implica a identificação dos principais fatores que poderão levar à redução da confiabilidade dos transformadores desde a entrada em operação. Dentro desse contexto, ações e responsabilidades compartilhadas entre clientes e fabricantes se tornam essenciais. Alguns pontos considerados relevantes serão discutidos a seguir [1,2].

### 2.1 Especificação

Não há dúvida que a confiabilidade de um transformador inicia com sua especificação. É de responsabilidade do cliente elaborar especificações com clareza de conteúdo para evitar interpretações contraditórias, sendo coerente com o ambiente elétrico no qual o transformador estará inserido. Deve ser permitido ao fabricante ofertar o melhor projeto. É de responsabilidade do fabricante estar apto a realizar alterações no projeto para adequá-lo à condições particulares especificadas de operação do sistema, fornecer modelos que possibilitem a elaboração de estudos que envolvam a interação do sistema elétricos com os transformadores e manter constante comunicação com o cliente para melhor conhecimento da especificação.

### 2.2 Design Review

As atividades de Design Review não suplantam a responsabilidade do fabricante no que se refere à adequabilidade da metodologia de projeto e respectivos limites. O escopo do Design Review deve ser especificado e/ou acordado previamente à adjudicação do contrato de fornecimento, e deve considerar a elaboração de um relatório específico das atividades desenvolvidas e resultados obtidos.

Design Reviews eficientes possibilitam a identificação de possíveis problemas evitando re-trabalhos e repetição de ensaio com conseqüente aumento da confiabilidade no início da vida do transformador. Clientes e fabricantes deverão dar prioridade a esse estágio do processo.

### 2.3 Projeto, Produção e Teste

Os fabricantes deverão estar continuamente aperfeiçoando técnicas de projetos visando a integridade dinâmica, térmica e dielétrica durante a operação do equipamento no sistema. Cálculos mais precisos deverão permitir sistemas de isolamento melhores com redução de descargas parciais. Equipamentos de ensaios mais modernos aliados às técnicas digitais de medição deverão ser utilizados para redução do tempo de ensaio e maior controle dos dados obtidos.

## 3.0 - SOLICITAÇÕES IMPOSTAS PELOS SISTEMAS ELÉTRICOS

As normas, em princípio, apresentam recomendações e ensaios visando avaliar os transformadores de potência quanto às principais solicitações sob condições operativas reais. Por exemplo, os ensaios dielétricos clássicos simulam as solicitações advindas de descargas atmosféricas, manobras do sistema, sobretensões temporárias, etc. Ainda sim, vale investigar, por exemplo, se o tipo de conexão projetado não comprometeria significativamente a representatividade da forma de onda utilizada para o ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico.

Outras solicitações advindas de condições especiais de operação e aspectos particulares da instalação não são contempladas nas normas técnicas pertinentes, e, usualmente, têm sido especificada pelos clientes. Isso pode ser exemplificado pelo requisito de suportabilidade a transitórios muito rápidos (*Very Fast Transients –VFT*), quando da proximidade elétrica de transformadores em relação a seccionadores instalados em dispositivos de manobras isolados a SF6 (*Gas Insulated Switchgear - GIS*). Essas solicitações necessariamente devem ser consideradas através de critérios de projeto e/ou ensaio representativos sob o risco de degradação precoce e falha do transformador.

Considerando as solicitações elétricas impostas aos sistemas de isolamento dos transformadores como as mais críticas e passíveis de maiores severidades em relação às normas, a seguir, dois exemplos reais de requisitos especiais são apresentados.

O primeiro exemplo se refere a manobra de estabelecimento de corrente em cargas indutivas, especificamente, reatores de potência. Quando o instante de estabelecimento ocorre na crista da forma de onda de tensão, tem-se uma solicitação severa imposta aos enrolamentos do equipamento com magnitude significativa, mas principalmente com taxas de crescimento muito elevadas. A Figura 1 apresenta uma forma de onda exemplo, que deveria ser considerada para o projeto do reator de potência.

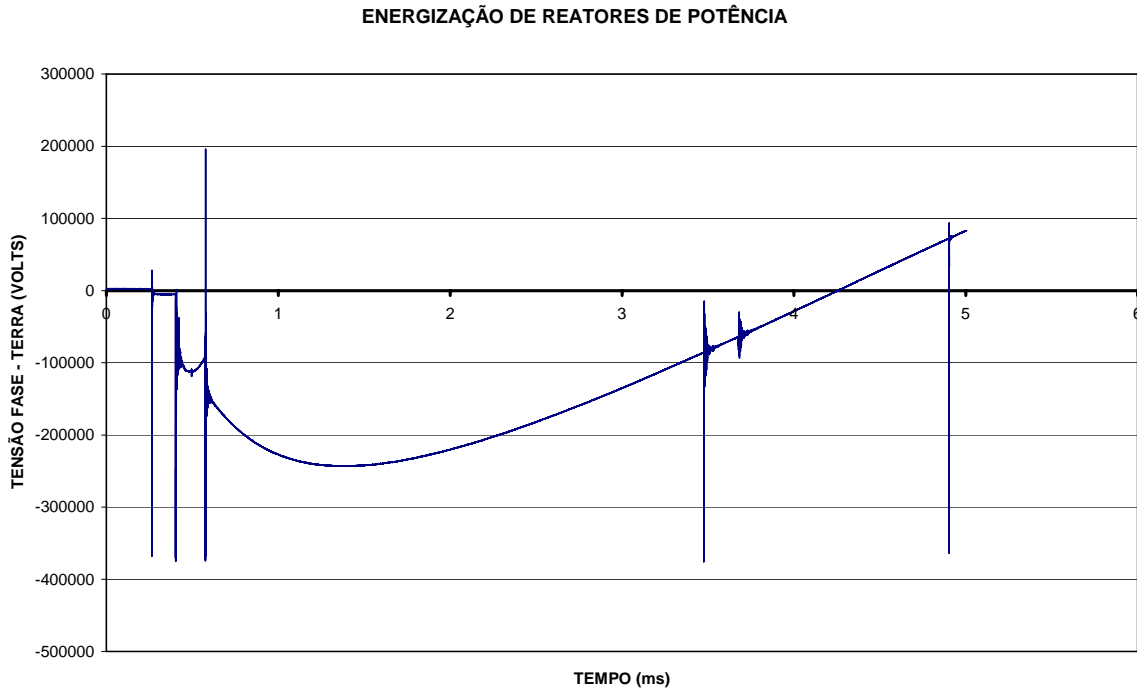


FIGURA 1 – Sobretensão típica imposta a reatores de potência durante o estabelecimento de corrente.

O segundo exemplo considera a condição de curtos-circuitos em LT's, quando solicitações elétricas não normalizadas, porém, significativas, são impostas aos enrolamentos de transformadores de potência instalados em subestações adjacentes. Esse tipo de solicitação elétrica pode resultar em sobretensões indesejáveis em trechos internos dos enrolamentos devido aos fenômenos de ressonância parcial e conseqüentes ampliações de tensão. As figuras 2 e 3 mostram formas de onda calculadas de sobretensões impostas a transformadores devidos a curtos-circuitos em LT's, e a Tabela 1 indica os valores calculados para as sobretensões e respectivas freqüências.

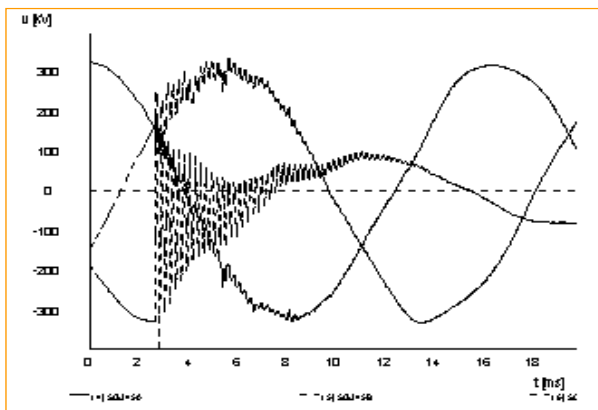


FIGURA 2 – Curva exemplo de sobretensões devido a curtos-circuitos em LT, localizados a 16 Km da subestação.

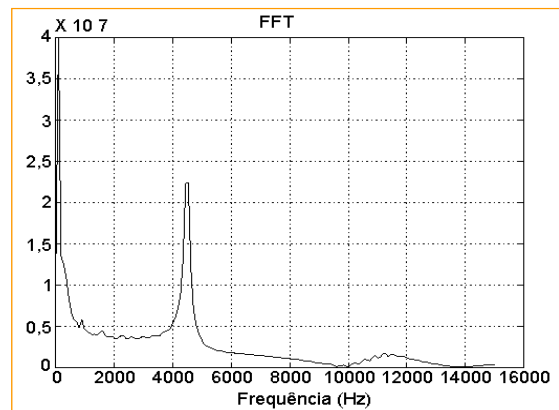


FIGURA 3 – Transformada rápida de Fourier da sobretensão mostrada na Figura 1 - Fase "c"

TABELA 1 – Tensões impostas aos transformadores para curtos-circuitos na LT.

Localização Curto-circuito [km]	Frequência [kHz]	Densidade Espectral Energia	Tensão [kV]
7	9,8	$0,61 \times 10^{13}$	10,80
12	6,5	$0,26 \times 10^{14}$	22,24
16	4,2	$0,13 \times 10^{13}$	15,50
26	2,8	$1,15 \times 10^{14}$	46,91
75	1,3	$0,30 \times 10^{14}$	24,14

Os curtos-circuitos localizados a 7 e 16 Km da subestação resultaram sobretensões com magnitudes, níveis de energia e frequências críticas para um transformador de potência de grande porte, ocasionando falhas dielétricas importantes e altos custos para recuperação desse equipamento.

Portanto, solicitações importantes não cobertas por cláusulas normativas devem ser criteriosamente analisadas e especificadas para se obter sucesso na aplicação de transformadores. A atividade de Design Review é uma grande oportunidade para certificar que o projeto do transformador considera tais solicitações.

#### 4.0 - DESIGN REVIEW DE TRANSFORMADORES

O denominado Design Review consiste numa atividade cuja finalidade principal é assegurar um entendimento comum entre fornecedor e cliente dos requisitos de normas e especificações aplicáveis, bem como é uma oportunidade para examinar criteriosamente o projeto do transformador no que refere ao atendimento aos requisitos pertinentes, utilizando-se da metodologia e projeto e matérias-primas certificadas pelo fabricante. O Design Review pode indicar aspectos que devem merecer especial atenção e/ou detalhamento, e ainda permitir identificar características particulares de projeto ou calcular a sua confiabilidade e taxas de riscos sob determinadas solicitações.

O Design Review deve ser coordenado pelo cliente a fim de assegurar uma investigação detalhada do transformador em aquisição, e deve preferencialmente ser iniciada após a conclusão do projeto elétrico, e dos desenhos dimensionais e de placa de características, bem como, por razões óbvias, antes das atividades de manufatura. A fábrica é o local mais indicado para o desenvolvimento do Design Review.

O escopo do Design Review deve considerar a análise dos dados ambientais e de sistema elétrico pertinentes, da especificação técnica e normas aplicáveis, critérios de projeto e manufatura do fabricante, plano de inspeção e ensaios, transporte e instalação, dentre outros. Dentre os aspectos analisados, o projeto do transformador é o objeto de maior investigação e importância para se obter uma aplicação bem sucedida. Alguns desses aspectos são pormenorizados ou exemplificados a seguir.

Os dados do sistema elétrico deveriam incluir as variações da tensão de regime permanente, eventuais presença de componentes harmônicas ou de corrente contínua, características de curto-circuito, equipamentos de manobra e sistema de proteção associados, condições de aterramento, meio de conexões ao sistema, por exemplo, dados dos cabos ou barramentos adjacentes ao transformador, e transitórios de alta frequência típicos ou passíveis de ocorrência e respectiva periodicidade.

Os dados do sistema elétrico após devidamente analisados podem significativamente alterar o projeto do transformador, por exemplo, nos aspectos:

- dielétricos, indicando adequações no sistema de isolamento para suportar transientes não normalizados,
- mecânicos, indicando reforços para suportar condições severas de curto-circuito, e
- inspeção, indicando procedimentos particulares para que os ensaios de fábrica representem adequadamente as condições da aplicação.

Os requisitos da especificação a serem observados no Design Review são principalmente aqueles específicos da aplicação incluindo, dentre outros, condições de carregamento incluindo eventuais sobrecargas, níveis de isolamento, impedâncias e tolerâncias, condições de refrigeração, níveis de ruído audível.

O Design Review pode envolver detalhamentos construtivos, memórias de cálculo, apresentação de matérias-primas, critérios de projeto e respectivos limites pertinentes ao núcleo, enrolamentos, conexões, peças estruturais,

etc. Ainda, pode incluir a análise dos processos de montagens do núcleo e bobinas, bem como das técnicas para controle do fluxo de dispersão e nível de ruído.

Outros aspectos relacionados ao processo fabril completo, ensaios, equipamentos auxiliares tais como buchas, transformadores de corrente, comutadores, pára-raios internos, sistema de controle, transporte, instalação em campo, sistema de monitoramento on-line, etc., podem ser agregados às atividades de Design Review.

## 5.0 - SOLICITAÇÕES ESPECIFICADAS X DESIGN REVIEW – EXPERIÊNCIA CEMIG

Nos últimos anos a CEMIG tem procurado especificar transformadores que atendam às condições operativas e suportem solicitações mais próximas possível daquelas que ocorreriam na prática, não se limitando às respectivas cláusulas normativas. Adicionalmente, tem havido um esforço para certificar que esses requisitos particulares e muito importantes sejam cumpridos ou, pelo menos, considerados pelos projetistas e fabricantes. Esse esforço pode ser traduzido em atividades tipicamente constituintes dos processos de Design Review.

Destacadamente, esses requisitos particulares têm afetado os projetos dos núcleos e enrolamentos dos transformadores. Alguns desses requisitos são citados a seguir, bem como a interação com os fabricantes para verificação do seu cumprimento.

Em alguns pontos da rede de transmissão CEMIG, verifica-se um perfil de tensão operativa que excede as condições de sobretensões determinadas pelas normas ABNT. A especificação dessas condições especiais normalmente resulta em núcleos de maiores dimensões, que, sob condições nominais, operam com um nível reduzido de densidade magnética.

A certificação do atendimento a esse requisito é normalmente desenvolvido através do detalhamento do projeto do núcleo onde são verificadas as suas dimensões, matéria-prima, método de montagem das lâminas, pontos e conexões de aterramento, etc. A densidade de fluxo é verificada para a tensão nominal, bem como para cada condição de sobreexcitação especificada. Da mesma forma, as perdas calculadas para o núcleo devem ser aferidas. Importância crescente tem sido dada à determinação do(s) ponto(s) de maiores temperaturas para subsidiar futuras decisões operativas e de manutenção, bem como uma eventual instalação de sensores. Outro ponto discutido envolve a solução dada pelo projetista para o controle de fluxo de dispersão e mitigação para pontos mais quentes.

No que refere aos transitórios elétricos, a CEMIG tem utilizado nos ensaios as formas de onda padronizadas para condições de surto atmosférico e de manobra. Porém, é prevista a realização de estudos específicos para determinação da suportabilidade aos transitórios elétricos especificados, além da análise para verificação da possibilidade de ocorrências de fenômenos de ressonância parcial interna dos enrolamentos.

A verificação do atendimento a esse requisito é iniciada pela apresentação do projeto de cada enrolamento ou bobina, indicando o(s) tipo(s) de enrolamento(s) e respectivos arranjos físicos e espaçadores, números de espiras totais e por discos, se aplicável, tipo dos condutores utilizados incluindo bitola, encordoamento e isolamento, e densidade de corrente adotada para o projeto.

O projetista deve apresentar ainda a estrutura de isolamento com detalhes da isolamento entre espiras, seções e/ou discos, fases, enrolamentos, blindagens e pontos de aterramento em relação a enrolamentos, enrolamentos externos em relação ao tanque, enrolamentos internos em relação ao núcleo, interconexões, etc. As técnicas para controle da distribuição de solicitações elétricas de alta frequência ao longo dos enrolamentos, majorando a capacitância série desses devem ser detalhadas, e a sua eficiência demonstrada. Por exemplo, pode-se citar o entrelaçamento de espiras e os turn-shields. A figura 3 ilustra a técnica de entrelaçamento de espiras.

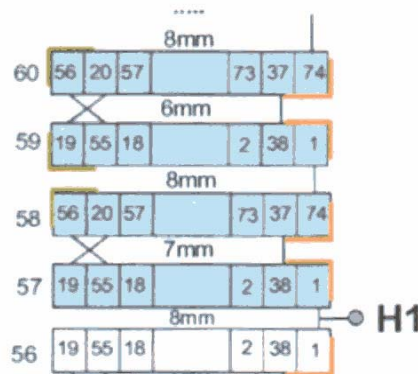


FIGURA 4 – Diagrama exemplo de enrolamento com espiras entrelaçadas.

Posteriormente, o projetista deve demonstrar como a estrutura de isolamento atende às solicitações de norma e respectivos ensaios associados, bem como às solicitações particulares associadas. As solicitações mais severas e respectivas regiões mais críticas da estrutura de isolamento devem ser apontadas com as margens de segurança em relação à sua suportabilidade. Essa suportabilidade deve ser demonstrada através de dados normalmente obtidos em investigações de desenvolvimento colecionados pelo fabricante.

As demonstrações de suportabilidade versus solicitações especificadas são normalmente obtidas através de softwares que possibilitam construir modelos com parâmetros elétricos (RLC) a partir do projeto construtivo da parte ativa do transformador. Tais modelos apresentam significativa complexidade e elevado número de parâmetros a fim de adequadamente representar cada trecho do enrolamento de maneira satisfatória. Dessa forma, torna-se possível utilizar programas clássicos de transitórios para avaliar as solicitações em cada trecho do enrolamento para qualquer solicitação elétrica que possa ser representada, por exemplo, por uma tabela magnitude versus tempo. Essa análise permite conhecer as distribuições de tensões ao longo dos enrolamentos, as eventuais amplificações em trechos específicos e as solicitações entre enrolamentos e à partes aterradas. Obviamente, medidas corretivas podem ser tomadas antes mesmo da conclusão do projeto elétrico do transformador. Destaca-se o procedimento adotado para os projetos de reatores de potência, onde a tensão transitória simulada de estabelecimento na crista da forma de onda foi obtida através de ensaios de campo.

O estudo relativo a possibilidade de ocorrência de ressonâncias parciais internas aos enrolamentos é realizado utilizando-se o mesmo modelo supra referido, aplicando-se um onda oscilatória senoidal amortecida variando-se a respectiva frequência de 10Hz a 3 MHz. Esse procedimento tem possibilitado obter as frequências críticas para cada trecho de enrolamento, ou seja, as eventuais amplificações que possam ocorrer devido a ressonâncias internas ao enrolamento. No caso de se verificar frequências denominadas críticas próximas daquelas relativas a fenômenos típicos do sistema elétrico pertinente, por exemplo, curtos-circuitos, manobra de bancos de capacitores, etc., pode-se eliminar essa condição ainda na fase de projeto.

Merece mencionar ainda como subproduto dessas atividades de Design Review a obtenção de modelos mais precisos dos transformadores de grande porte para utilização em estudos de transitórios, sem os quais não se poderia calcular satisfatoriamente, por exemplo, tensões de restabelecimento transitórias para as especificações de disjuntores associados.

## 6.0 - EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL – CASO AEP

Concessionárias americanas têm manifestado preocupação com a confiabilidade de seus transformadores tendo em vista a ênfase atual na obtenção de equipamentos com menor preço possível. Esse fato, aliado à diminuição de fabricantes no mercado americano, tem levado à aquisição desses equipamentos de fabricantes internacionais não muito conhecidos. Nesse contexto, há uma tendência das empresas em elaborar especificações com requisitos além dos da norma americana ANSI/IEEE] para garantir a confiabilidade dos transformadores. Como exemplo dessa prática, iremos citar algumas ações realizadas pela American Electric Power (AEP), a partir do final da década de 80, para aprimorar sua especificação de transformadores e os resultados alcançados [4].

Ensaio dielétricos:

- Inclusão de ensaio de surto de manobra com frente de onda rápida, onda 2 pu, 2/4200ms,
- Terminações especiais para ensaio de impulso atmosférico (ensaio com terminais não abertos ou com pára-raios),
- Medição de corrente de fuga para projetos com circulação forçada de óleo,
- Modificações de procedimentos normalizados de ensaios.

Carregamento:

- Solicitação de capacidade mínima de sobrecarga.

Design Review:

- Análise de aspectos construtivos,
- Análise de projeto quanto aos aspectos de solicitações térmicas, dielétricas e dinâmicas,
- Análise da distribuição da tensão no enrolamento. Comparação entre suportabilidade e solicitações específicas do sistema elétrico,
- Solicitação de modelos para estudos transitórios e de regime permanente.

Metodologia para revisão das especificações:

- Periodicidade de três anos,
- Fontes para revisões: comentários dos fabricantes; necessidades internas à empresa,
- Verificação de revisões nas normas.

Após a adoção dessas medidas, observou-se uma diminuição do número de falhas em comparação com o número de falhas esperado para os transformadores comprados com a nova especificação.

## 7.0 - CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS

Considerar a existência de solicitações reais impostas a transformadores de potência, diferentes e mais severas em relação às normas pertinentes pode parecer indesejável, e representar maiores responsabilidades que as habitualmente assumidas pelos engenheiros responsáveis com a especificação, manutenção, operação, projeto e manufatura desses equipamentos.

Entretanto, o aumento significativo das taxas de falha registradas para os transformadores de potência, sendo muitas delas, sem uma justificativa convincente, tem causado maiores impactos e são ainda mais indesejáveis para fornecedores e clientes.

Nesse cenário, e ainda considerando o novo ambiente, onde preço e qualidade são essenciais, clientes e fabricantes de transformadores não deveriam se portar apenas como compradores e fornecedores. Dentro dos seus respectivos limites de atuação, deveriam, sim, desenvolver atividades conjuntas cujo foco fosse a confiabilidade desses equipamentos.

Conclui-se, então, sobre a necessária evolução na interação entre os projetistas de transformadores e os engenheiros responsáveis pelas especificações nas concessionárias, a demanda por compreender melhor as reais solicitações impostas e a oportunidade de reduzir os riscos de engenharia através das atividades de análise de projeto de transformadores de potência.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Kachler, A. J. Power Transformer Reliability, A Cooperate Responsibility of Manufacturers and Customers, 3<sup>rd</sup> Cigre Workspot "Transformer Reliability" Florianópolis, Brasil, Nov. 2003

[2] Fyvie, J. Transformer Reliability "Technical Aspects", 3<sup>rd</sup> Cigre Workspot "Transformer Reliability" Florianópolis, Brasil, Nov. 2003

[3] Cigre Working group 12.22 Guidelines for Conducting Design reviews for Transformers 100 MVA and 123 Kv and Above, Paris, França, Agosto 2002

[4] Fleeman J., Wagenaar L. Transformer Specifications Beyond Standards, IEEE/PES Transformers Committee Fall 2002 Meeting, Oklahoma, USA, October 2002

[5] Rocha C. O. A., Gomes N. H., Mendes J. C., Varrichio S. L., Oliveira G. H. C. Análise das Falhas dos Autotransformadores da SE São Gotardo 2 Enfoque na Ressonância Parcial de Enrolamento, XV SNTPEE, Out. 2003