



**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

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

**AValiação dos Estudos de Energização de Transformadores em Função dos Resultados
de Medições em Campo**

Ângela C. S. L. Guimarães (*)

Janaina M. S. C. Costa

Ladário M. Casado

RESUMO

Para aperfeiçoar o processo dos pré-operacionais para transformadores de potência, a Chesf vem acompanhando a entrada em operação destes equipamentos através da instalação de oscilógrafos nas subestações. A partir das grandezas elétricas monitoradas são comparados os resultados esperados com os medidos e assim, são tomadas decisões sobre a operação dos equipamentos e até mesmo sobre a metodologia dos processos.

Neste trabalho será apresentada a experiência da Chesf na monitoração da entrada em operação de transformadores, os resultados encontrados e as principais recomendações geradas para os pré-operacionais.

PALAVRAS-CHAVE

Estudos pré-operacionais, Transformadores de potência, Medições em campo, Transitórios Eletromagnéticos, Ferrorressonância

1.0 INTRODUÇÃO

Nos estudos pré-operacionais para a entrada em operação de novos transformadores no sistema de transmissão da Chesf são feitas análises de regime permanente e de transitórios eletromagnéticos, além de estudos de superação de equipamentos.

Nos estudos de regime permanente (fluxo de potência) são avaliadas as máximas variações de tensão esperadas sobre os barramentos durante as manobras de energização e desenergização do novo transformador. Com os resultados encontrados, são definidos os procedimentos operacionais a serem adotados durante as manobras do novo transformador, nos processos de recomposição geral e parcial desta subestação, inclusive definindo os TAPS de OPERAÇÃO e de ENERGIZAÇÃO dos transformadores.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos são realizados para verificar os impactos da manobra de energização de transformadores em vazio, no próprio transformador e nos demais equipamentos das instalações afetados pela manobra. Definem as diretrizes operativas para a instalação e geram informações para subsidiar os ajustes de proteções.[1]

Nos estudos de superação de equipamentos é verificada a adequabilidade dos demais equipamentos da subestação quanto a curtos-circuitos, à tensão de restabelecimento transitória (TRT) e à corrente nominal, diante da modificação da topologia devido a entrada do novo empreendimento[2].

Após a realização dos estudos pré-operacionais para novos transformadores, a Chesf têm medido em campo as tensões primárias e secundárias e as correntes dos transformadores durante sua energização, assim como também as de outros transformadores em operação conectados ao mesmo barramento. Esta prática de “energização assistida” tem mostrado que os fenômenos verificados em campo têm sido reproduzidos com aceitável precisão nas simulações, e de certa forma, validam os modelos computacionais e procedimentos utilizados.

Além da “energização assistida”, a Operação da Chesf vem analisando através de registros feitos pelo seu sistema de oscilografia, presente na maioria de suas subestações, fenômenos relacionados às manobras de seus transformadores em operação, o que tem criado a necessidade de acrescentar nos estudos a avaliação dos fenômenos observados [1].

O esquema da Figura 1 apresenta um fluxograma com as principais etapas do processo dos pré-operacionais para a entrada em operação de transformadores:

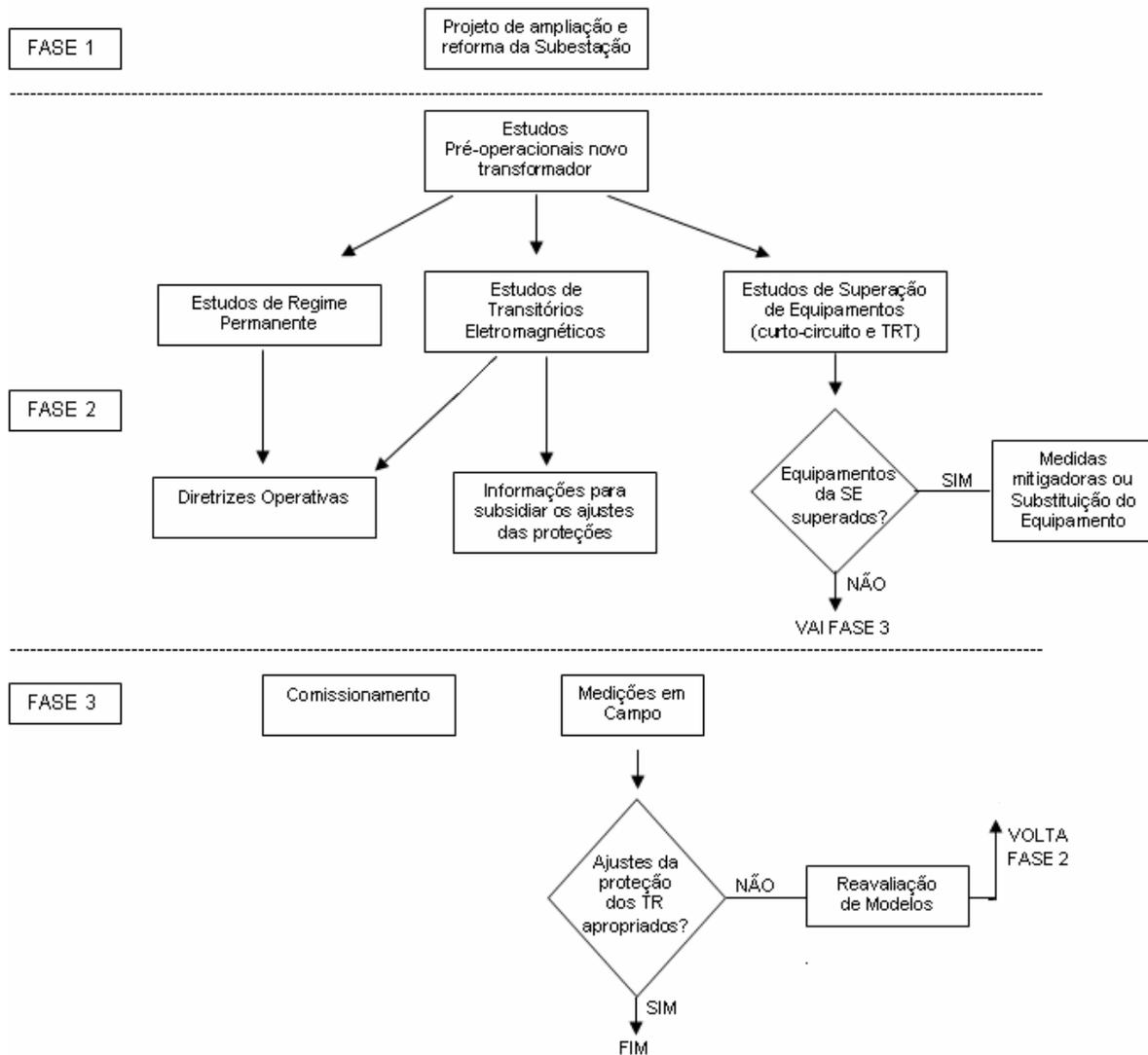


FIGURA 1 – Fluxograma com as principais etapas dos pré-operacionais de transformadores de potência na Chesf

Neste trabalho será apresentada a experiência da Chesf a partir das medições em campo da energização de transformadores de potência, os resultados encontrados e destacadas as principais recomendações geradas para os estudos pré-operacionais de transitórios eletromagnéticos.

2.0 ESTUDOS PRÉ-OPERACIONAIS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS PARA TRANSFORMADORES

Para entender as análises feitas sobre os resultados encontrados em campo durante a manobra dos transformadores e os estudos realizados, torna-se necessário esclarecer a metodologia adotada para os pré-operacionais da entrada em operação de transformadores de potência.

Durante os pré-operacionais, para cada tipo de estudo - regime permanente, transitórios eletromagnéticos ou curto-circuito, são feitas simulações em programas computacionais adotados pelas empresas do Setor Elétrico Brasileiro, tais como: ANAREDE, ATP e ANAFAS [3], [4], [5]. Utilizando modelos matemáticos dos equipamentos, esses programas são capazes de reproduzir os fenômenos envolvidos, de maneira compatível com as faixas de frequência típicas do tipo de estudo em análise. Sendo assim, a qualidade dos estudos dependerá diretamente da fidelidade dos modelos computacionais, utilizados nas simulações.

O equacionamento dos transitórios eletromagnéticos da energização de transformadores envolve muitas não-linearidades. Durante a manobra, podem aparecer sobretensões e sobrecorrentes nos equipamentos da própria subestação, assim como em instalações vizinhas. A severidade do transitório dependerá principalmente dos instantes de fechamento dos pólos do disjuntor, da tensão de pré-manobra, da resposta em frequência no ponto de conexão (Z_w) e das características dos equipamentos envolvidos no circuito da manobra.

As manobras de energização em vazio de transformadores 230/69kV com ligação estrela-triângulo que possuem TPI na CT de 69kV podem provocar sobretensões elevadas e sustentadas na baixa tensão devido a ferrorressonância no circuito de seqüência zero [6], [7].

A fim de evitar atuações indesejadas da proteção, os estudos subsidiam os ajustes dos relés associados e as recomendações operativas para os equipamentos envolvidos, definindo limites de tensão pré-manobra, seqüência de energização dos transformadores em recomposição, carga mínima a ser mantida nos transformadores em paralelo e demais medidas necessárias.

Os estudos de Transitórios Eletromagnéticos para energização de transformadores de potência são realizados utilizando o programa ATP (EMTP) [4], obedecendo as diretrizes estabelecidas nos Procedimentos de Rede – ONS - Submódulo 23.3 [8]. São realizados estudos estatísticos, nos quais o disjuntor do lado de alta tensão do transformador energizado é submetido a 200 manobras. Destes resultados, são extraídos os tempos de fechamento do disjuntor que geram as mais elevadas tensões, correntes de fase e correntes de neutro nos equipamentos monitorados. Então são preparados estudos determinísticos, nos quais os instantes de fechamento do disjuntor que maximizam as grandezas de interesse são reproduzidos, e são obtidas as formas de onda que possibilitam analisar o comportamento das grandezas ao longo do tempo.

Para realimentar o processo dos estudos pré-operacionais, buscando a sua melhoria contínua, foi realizada na Chesf medições em campo durante a entrada em operação de um lote de transformadores, acompanhando a manobra de energização, através de medições de transitórios eletromagnéticos e de regime permanente. Nesta etapa os modelos e procedimentos foram verificados, e avaliadas, na prática, as diretrizes operativas geradas pelos estudos.

3.0 MONITORAÇÃO DA ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES EM CAMPO

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram selecionados transformadores de potência 230/69kV de até 100MVA, dentro de um lote adquirido pela Chesf, com a entrada em operação dentro dos últimos dois anos. Foram instalados oscilógrafos nos secundários dos transformadores de corrente e de tensão da proteção da subestação, a fim de monitorar as correntes de fase e neutro do lado de AT dos transformadores energizados e daqueles em operação, as tensões dos barramentos de 230 e 69kV, e dos terminais de BT do equipamento manobrado. Em campo, foram levantadas as condições do sistema e da instalação no instante da manobra, reproduzidas em simulação e comparados aos fenômenos encontrados.

Nas medições foram observados fenômenos típicos da manobra, como correntes de *inrush* e sobretensões transitórias de AT e também foram identificadas sobretensões na CT de 69kV dos transformadores, devido ao fenômeno da ferrorressonância [6],[7].

Com os registros de campo, a partir das análises dos resultados de regime permanente e de transitórios eletromagnéticos, foram identificadas melhorias e apresentadas sugestões no processo dos pré-operacionais.

Na Figura 2 pode ser observada a instalação feita para a monitoração de uma das subestações na Chesf durante a manobra assistida de um transformador 230/69kV – 100 MVA.

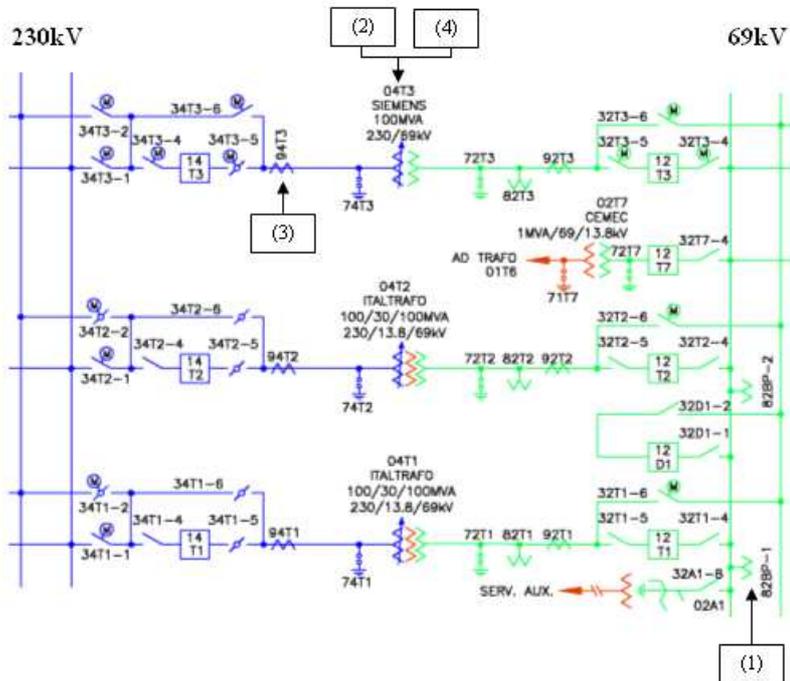


FIGURA 2 - Diagrama unifilar de pontos monitorados por oscilógrafos em subestação Chesf, durante energização assistida de transformador 100 MVA

Na Tabela 1 estão relacionadas as grandezas elétricas monitoradas na subestação durante a manobra de energização dos transformadores 230/69kV.

Tabela 1 – Grandezas elétricas monitoradas durante a energização assistida do transformador

Pontos	Grandezas
(1)	Tensões fase-terra de 69 kV das fases A, B e C (sinais dos TP da barra).
(2)	Correntes no neutro do transformador (sinais dos TC da bucha H0).
(3)	Correntes nas fases A, B e C dos enrolamentos de 230 kV do TR (TC externos das fases).
(4)	Tensões fase-terra das fases A, B e C da CT de 69 kV do TR energizado (sinais dos TPI 82T2).

3.1 Medições em Campo:

A fim de impor as condições mais severas às quais os equipamentos manobrados ficam submetidos, nos estudos pré-operacionais as simulações são realizadas com o sistema em carga mínima, a subestação em recomposição e com máxima tensão operativa de pré-manobra. Já durante as energizações em campo, a condição do sistema está associada à configuração do sistema no momento programado para a manobra.

Para comparar as medições efetuadas em campo com os resultados esperados pelos estudos, é simulada no ATP a manobra real realizada, representando todas as condições do sistema às quais o transformador ficou submetido, ou seja: o TAP do equipamento manobrado e dos transformadores presentes, a condição de carga, a configuração da subestação e do sistema e os instantes de fechamento dos pólos do disjuntor, estes últimos determinados a

partir da medição das tensões de fase-terra do lado de 230kV da subestação e das tensões fase-fase na CT de 69kV dos transformadores.

3.1.1 Alguns Resultados

Caso 1 - Nos estudos pré-operacionais para a entrada em operação de um transformador 230/69kV-50MVA, as simulações estatísticas estimaram que o máximo valor de tensão fase – neutro esperado para a barra de 230kV da subestação, durante a manobra de energização do transformador em vazio, era de 1,2 pu e a máxima sobrecorrente de fase de 818A. Os estudos também previram 92% de probabilidade de ocorrer ferorrressonância.

Sabendo que os estudos se baseiam em premissas conservativas, foi simulado um caso estatístico reproduzindo as condições de pré-manobra da energização assistida e observados os valores de corrente e tensão no equipamento (TABELA 2).

Tabela 2 – Resultados das grandezas elétricas encontradas durante a simulação da manobra assistida de energização do TR 50MVA

Grandeza Elétrica	Simulação Estatística
Valor da tensão na barra de 230kV (kV – fn pico)	Vmax = 219,0kV Vmed =214,0 kV $\sigma=3,14\%$
Valor da tensão na barra de 69kV (kV – fn pico)	Vmax = 132kV Vmed = 115kV $\sigma=21,3\%$
Valor da corrente de fase no lado de 230kV (A pico)	I _{max} = 767A I _{med} = 566A $\sigma=23\%$

Observa-se que as sobretensões e sobrecorrentes simuladas nos estudos pré-operacionais estão abaixo dos limites de suportabilidade do equipamento e não provocaram atuação indesejada da proteção. Verificou-se que, para os fins aos quais os estudos pré-operacionais se propõem, tantos os modelos computacionais utilizados, como a metodologia utilizada proporcionaram resultados satisfatórios.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as formas de onda das tensões fase-terra medidas e calculadas na CT de 69kV do TR 50MVA.

Verifica-se a previsão acertada da presença de sobretensões fase-terra elevadas na CT de 69kV do transformador, decorrente do fenômeno da ferorrressonância.

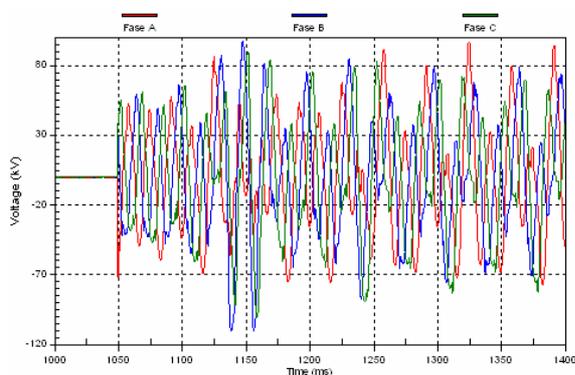


FIGURA 3 – Tensão fase-terra MEDIDA na CT de 69kV do TR 50MVA durante a energização assistida

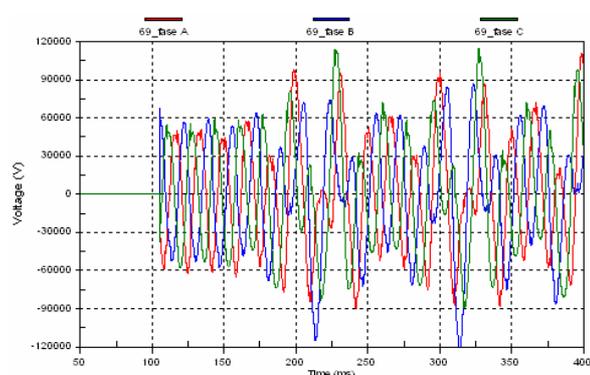


FIGURA 4 – Tensão fase-terra SIMULADA na CT de 69kV do TR 50MVA encontrada no caso ATP

Nas análises feitas na comparação dos estudos realizados e os resultados encontrados em campo torna-se necessário esclarecer as premissas adotadas para a modelagem de cada equipamento envolvido.

Neste caso, não foi detalhado o modelo completo de um compensador estático em operação próximo à subestação em manobra. Com isso, excluiu-se da simulação o aparecimento de oscilações de baixa frequência nas formas de onda da corrente de *inrush*, introduzidos pelos chaveamentos de reativos desses equipamentos. Além disso, embora as curvas de saturação dos TPI instalados sejam representadas no caso, muitas vezes existe uma dispersão entre os equipamentos do mesmo tipo e fabricante, podendo haver uma pequena variação da reatância de núcleo de ar (XAC) e alterar os resultados.

Caso 2 - Os estudos pré-operacionais sobre a entrada em operação de um transformador 230/69kV – 100MVA previram que a máxima corrente de fase a qual o equipamento ficaria submetido seria de 1303 A. Nas premissas dos estudos, para impor condições mais restritivas à manobra, o novo transformador (T2) foi energizado com máxima tensão operativa e na presença do primeiro transformador (T1) em vazio. No campo, o transformador foi manobrado com uma tensão de 234kV e com carga de 29 MW no transformador T1.

A partir dos dados levantados em campo, foi simulado em ATP os valores esperados durante a manobra. A Tabela 3 apresenta a análise feita sobre a energização assistida desse equipamento.

Tabela 3 – Resultados das grandezas elétricas encontradas durante a simulação e a energização assistida do TR 100MVA

Grandeza Elétrica	Simulação Estatística	Simulação Manobra	Medido
Valor máximo da corrente de fase no lado de 230kV (A pico)	$I_{max} = 1276A(3,60I_n)$ $I_{med} = 896A(2,52I_n)$ $\sigma = 18,6\%$	966A (2,72 I_n)	472A (1,33 I_n)
Valor máximo da corrente de neutro no lado de 230kV (A pico)	$I_{max} = 530A(1,49I_n)$ $I_{med} = 381A(1,07I_n)$ $\sigma = 17,8\%$	415 (1,17 I_n)	446A (1,26 I_n)

Sejam as Figuras 5 e 6, as correntes de neutro encontradas no transformador 230/69kV – 100MVA (T2) no caso real modelado em ATP e as medições feitas no TC da bucha H0 do equipamento.

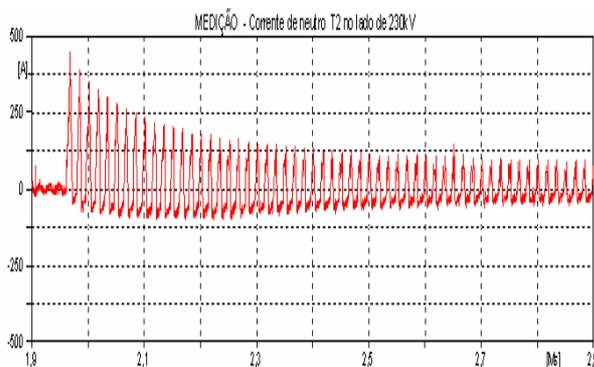


FIGURA 5 – Corrente de neutro MEDIDA no lado de 230kV do TR 100MVA(Caso 2) durante a energização assistida

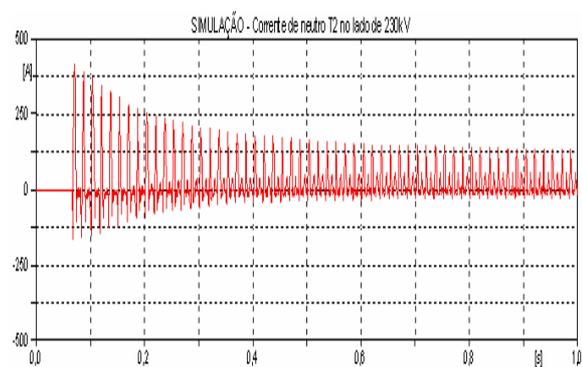


FIGURA 6 – Corrente de neutro no lado de 230kV do TR 100MVA (Caso2) encontrada no caso SIMULADO em ATP

Nos casos em ATP, já com as condições da energização assistida, foram identificadas algumas diferenças. No caso do transformador de 100 MVA, o valor máximo (1,26 I_n), a forma de onda e o amortecimento da corrente de neutro medida estão mais próximos dos obtidos na simulação. As diferenças podem indicar possíveis efeitos de

saturação dos TC do T2, não considerados nas simulações, erros de parametrização do registrador digital ou até imprecisões na determinação dos instantes de fechamento dos pólos do disjuntor.

Caso 3 - Nas Figuras 7 e 8 são apresentadas as correntes de inrush encontradas numa outra subestação na qual foi instalado um transformador 230/69kV – 100MVA, idêntico ao da subestação do Caso 2, sendo agora instalado como o terceiro transformador.

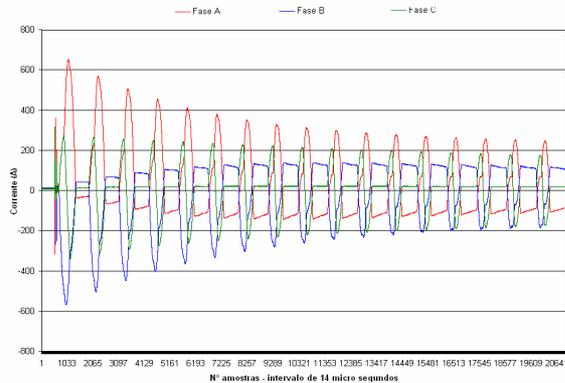


FIGURA 7 – Corrente de inrush MEDIDA no lado de 230kV do TR 100MVA(Caso3) durante a energização Assistida

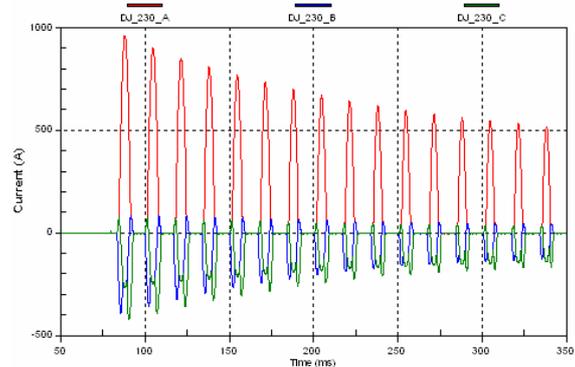


FIGURA 8 – Corrente de inrush no lado de 230kV do TR 100MVA (Caso 3) encontrada no caso SIMULADO em ATP

Coincidentemente, no Caso 3 é utilizado um transformador idêntico ao Caso 2, produzido pelo mesmo fabricante e com mesma especificação técnica. Observa-se que, embora as diretrizes operativas determinadas pelos estudos operacionais não tenham sido afetadas, foram encontradas diferenças mais acentuadas entre as formas de onda do caso modificado em ATP e os resultados monitorados. Estas diferenças podem ser justificadas pelas diferenças entre a potência de curto-circuito e a característica Z_w das barras de 230kV das duas subestações.

Observa-se que, dependendo do propósito dos estudos, como análise de ocorrências, na qual os fenômenos encontrados em campo precisam ser fielmente representados, para cada caso estudado deve ser avaliado o detalhamento dos modelos a ser considerado.

4.0 CONCLUSÃO

Os estudos pré-operacionais de energização de transformadores de potência têm o objetivo de avaliar o impacto da manobra sobre os equipamentos envolvidos, além de estabelecer as diretrizes operativas a serem adotados pelas equipes de operação e de subsidiar os ajustes de proteções.

O equacionamento dos transitórios eletromagnéticos na energização de transformadores envolve muitas não-linearidades e por isso os modelos computacionais utilizados nas simulações devem ser capazes de reproduzir os fenômenos envolvidos, compatíveis com as faixas de frequência típicas da manobra e também o caso modelado deverá conter elementos suficientes para a análise.

Verificou-se que para os fins aos quais os estudos pré-operacionais se propõem, tantos os modelos computacionais utilizados, como a metodologia utilizada, proporcionaram resultados satisfatórios.

Nas medições em campo, diante das diferenças encontradas, observou-se que, dependendo da necessidade da reprodução dos fenômenos transitórios, para cada caso estudado, deverá ser avaliado o detalhamento dos modelos a ser considerado, como por exemplo, as curvas de saturação dos transformadores para instrumentos (TPI e TC).

Com a experiência adquirida, a Chesf pretende incorporar as considerações aos estudos e estender a metodologia aos pré-operacionais de outros equipamentos, como por exemplo, de linhas de transmissão.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COSTA, J.M.C.; FREIRE, A.R.F; BARROS, S.A.; GUIMARÃES, A.C.S.L.; CASADO, L.M.; SILVA, R.F. – “Metodologia e Critérios Para Estudos De Energização De Transformadores De Potência: Experiência Da Chesf”, XIII ERIAC, Puerto Iguazú – Argentina - 24 a 28 de Maio de 2009
- (2) CARVALHO, A.C.; SINDER, D.; MUNIZ, M.; MONTEIRO, A.M. SILVA, B. A. – “ Superação de Equipamentos de Alta Tensão: Critérios de Análise e Processo de Indicações de Substituições na Rede Básica e Demais Instalações da Transmissão” – XX SNTPEE – Rio de Janeiro – RJ – Brasil – 14 a 17 de Outubro de 2007
- (3) ANAREDE – Programa de Análise de Redes – CEPEL – Manual do Usuário, 2008
- (4) ATP – Alternative Transients Program – RULE BOOK, 1987
- (5) ANAFAS – Programa de Análise de Falhas Simultâneas – CEPEL – Manual do Usuário, 2008
- (6) FREIRE, A. R. F., LINS, L. R., CAMPOS, A. J. S., “Ferroressonância Durante Manobras de Energização em Vazio do Transformador Abaixador do Compensador Estático da Subestação Funil”, X ERLAC, CE 33, Foz do Iguaçu – PR - Brasil, Maio de 2003.
- (7) FREIRE, A.R.F; PINTO, S.O.;DIAS,F.P.; BARROS, S.A.; SILVA, GUIMARÃES, A.C.S. L.;CARVALHO JR, A.V. – “ Sobretensões Temporárias e Ferroressonância Sustentada em Sistemas de 69kV que Operam com o Neutro Isolado” – XX SNTPEE – Recife – PE - Brasil – 22 a 25 de Novembro de 2009
- (8) “Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos” - Procedimentos de Rede – Súbmodulo 23.3 - Autorizada a utilização em caráter provisório pela Resolução nº 1051, de 25/09/2007 da Agência Nacional de Energia Elétrica - Brasil