



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

GSC-07
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**ANÁLISE DA QUEIMA DE PÁRA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO (ZNO) DURANTE FENÔMENOS DE
FERRORESSONÂNCIA EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

**Nelson C. de Jesus*
João A. M. Neto
Edson L. Batista
LAQUEE/DETEC/UNIJUÍ**

**Marcos Eidt
Nélio Koch
COPREL**

**João R. Cogo
GSI**

**Hermann W. Dommel
UBC**

RESUMO

Este informe técnico apresenta a análise de problemas ocorridos em pára-raios de óxido de zinco instalados ao longo de um sistema de distribuição. A investigação foi realizada por meio de monitoramentos utilizando analisadores de qualidade de energia durante testes em campo, onde se verificou que as sobretensões responsáveis pelas falhas e queimas acentuadas eram decorrentes do fenômeno de ferroressonância. Resultados de simulações obtidos em programas de transitórios eletromagnéticos também são apresentados, bem como recomendações propostas e sugestões para a mitigação dos problemas relatados.

PALAVRAS-CHAVE

Sobretensões. Pára-raios. Transformadores a vazio. Ferroressonância. Monitoramento. Simulações.

1.0 - INTRODUÇÃO

Diversos problemas foram relatados com a operação de pára-raios instalados em um alimentador de distribuição em 23 kV, no município de Cruz Alta/RS, pertencente ao sistema elétrico de distribuição da COPREL - Cooperativa de Energia e Desenvolvimento Rural Coprel Ltda. As ocorrências foram verificadas durante o incremento de carga no alimentador, no período da instalação gradativa de 46 transformadores de distribuição, com potências nominais entre 112,5 e 300 kVA, totalizando hoje em torno de 9 MVA, visando atender a demanda de irrigação em lavouras de culturas diversificadas. A peculiaridade de operação das cargas, provocada pela tarifa incentivada para os irrigantes (desligamento da carga no horário de ponta),

e característica sazonal, fez com que, a partir de determinada data, durante o incremento, mais de 100 pára-raios de 21 kV (tensão nominal), 10 kA, de óxido de zinco (ZNO), poliméricos, sofressem danos, ocorrendo explosões devido aos efeitos de sobretensões em regime permanente. Por isso, foram instalados cerca de 70 pára-raios com tensão nominal superior (27 kV) no lugar dos danificados, alguns dos quais também sofreram as mesmas conseqüências. Dessa forma, procurando encontrar a causa destes problemas, foram realizados monitoramentos através da instalação de analisadores da qualidade de energia, com o objetivo de registrar os modos de ocorrência das sobretensões, observando em detalhes as características das formas de onda durante a ocorrência dos distúrbios. Pelas conseqüências verificadas nos componentes de proteção contra descargas atmosféricas instalados nos transformadores e características gerais observadas, constatou-se que as causas principais eram as sobretensões decorrentes do fenômeno de ferroressonância, em conseqüência da operação desequilibrada do sistema de distribuição, na condição de chaveamentos monopolares e abertura de elos-fusíveis quando da ocorrência de faltas no sistema. Neste trabalho, apresenta-se os principais resultados das medições obtidas durante testes de manobra em campo sob condições desbalanceadas. Após a verificação dos resultados das medições, concluiu-se que em determinados instantes, sobretensões de grande magnitude ocorriam após as manobras, conjuntamente com a operação a vazio dos transformadores. Para uma análise completa, modelou-se o sistema em programas de transitórios eletromagnéticos, cujos resultados das simulações são também apresentados e discutidos. Nas simulações, utilizou-se a curva de saturação real (de uma unidade)

* Rua São Francisco, 501 - CEP 98700-000 - CP 560 - Ijuí - RS - BRASIL
Tel.: (0xx-55) 3332-0200, R: 256 - Fax: (0xx-55) 3332-9100 - E-mail: nelson@detec.unijui.tche.br

no modelo equivalente do transformador. Além disso, era de fundamental importância a verificação da possível influência de capacitâncias de seqüência zero na ocorrência do fenômeno, uma vez que o sistema não continha bancos de capacitores shunt conectados no lado de média tensão. Portanto, para verificação dos fatores predominantes nas sobretensões registradas, foram analisados tanto os resultados das medições durante os testes executados, como os vários casos simulados, visando obter as melhores formas de mitigação dos problemas relatados. Após a análise de inúmeras alternativas para eliminação dos problemas das avarias dos pára-raios, recomendações foram propostas para adequação do sistema, visando obter a melhor relação custo-benefício e também a manutenção do nível de proteção do sistema contra descargas atmosféricas. Sendo assim, este trabalho é um relato de um caso importante na medida em que foi possível conhecer o problema com maiores detalhes, fornecendo subsídios para a proposição de medidas de cunho prático visando a solução dos problemas.

2.0 - CONCEITUAÇÃO DE FERRORESSONÂNCIA

Ferrossonância é um termo geral aplicado a uma série de interações ressonantes envolvendo capacitores e indutores saturáveis. Portanto, é um fenômeno de ressonância não-linear que pode afetar significativamente os sistemas elétricos de potência. Em geral, ocorrem em sistemas desbalanceados, durante chaveamentos que resultam em uma capacitância série com a indutância de magnetização de transformadores. As respostas podem ser elevadas sobretensões e/ou sobrecorrentes, contribuindo às falhas em transformadores, cabos, pára-raios, etc. As diferenças entre um circuito ferrossonante e um circuito com ressonância linear para uma dada frequência é que existe possibilidade de ressonância em uma ampla faixa de valores de capacitância, a frequência das tensões e correntes podem ser diferentes da fonte principal e também há possibilidade de várias respostas estáveis em regime permanente para uma mesma configuração e valores dos parâmetros do sistema. Um outro fator peculiar correspondente a ferrossonância é a dependência das condições iniciais e a mudança repentina do modo de ocorrência (1). Historicamente, quando a tensão permanece acima de 125% da nominal se diz que o sistema está em estado de ferrossonância, mas os valores típicos destas sobretensões são geralmente de 2 a 3 pu, suficientes para colocar em colapso térmico as pastilhas de óxido de zinco que formam os pára-raios. Dependendo do ponto de intersecção, os modos de ferrossonância podem ser do tipo fundamental, subharmônico, quase periódico ou caótico, de acordo com o respectivo espectro de frequência (1). Outros aspectos relacionados a este fenômeno são os intensos ruídos audíveis devido a saturação do núcleo, sobreaquecimento nas diversas partes do transformador, fator este dependente do modo de ocorrência e da energia envolvida. Uma característica perceptível na ocorrência do fenômeno são as flutuações de tensão em consumidores, causando o efeito "flicker" (3), (4). Quando a ferrossonância é acompanhada de sobretensões e alta densidade de energia a primeira vítima, normalmente, são os pára-

raios, principalmente os de óxido de zinco. Saliencia-se que este fenômeno praticamente não ocorre quando da utilização de chaveamentos tripolares ou quando o transformador está com carregamento mínimo em torno de 15 a 20% do nominal ($FP = 1$). As condições básicas que podem iniciar a ferrossonância são a atuação de elos-fusíveis ou a energização manual de transformadores, ficando o mesmo num trecho de cabo isolado com uma ou duas fases abertas. Duas condições adicionais são importantes na ocorrência destas sobretensões, ou seja, o comprimento do cabo entre o transformador e a chave aberta deve ter capacitância suficiente para causar a ferrossonância e as perdas no circuito e carga resistiva do transformador devem ser desprezíveis. Um circuito simples para estudo de oscilações e conceituação básica do comportamento do fenômeno de ressonância não-linear é dado na figura 1, onde representa-se de maneira simplificada a curva de saturação do indutor não-linear, desprezando-se as perdas no circuito. Em função destas aproximações, as formas de onda correspondentes mostradas na figura 2, apresentam comportamento tipicamente periódico (1).

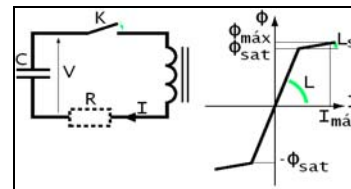


Figura 1 - Circuito não-linear

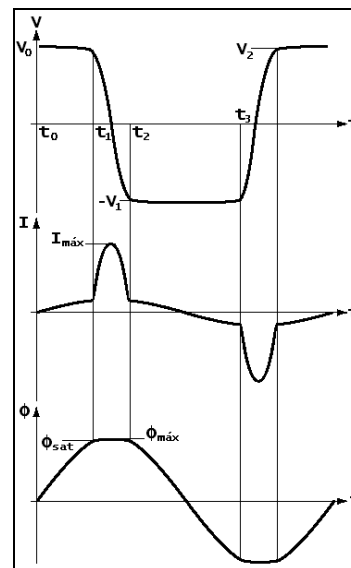


Figura 2 - Oscilações no circuito série ferrossonante

Considerando o fechamento da chave no instante t_0 e que a tensão inicial no capacitor seja V_0 , o resultado é a circulação da corrente que oscila na frequência

$\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$. Se o fluxo no instante t_1 atinge o valor de saturação, a indutância equivalente torna-se a saturada (L_s), com valor bem inferior ao da indutância não saturada (L). Neste caso, ocorre uma oscilação em função da descarga do capacitor na frequência

$\omega_2 = 1/\sqrt{L_s C}$. No instante t_2 , o fluxo retorna ao valor ϕ_{sat} , a indutância reassume o valor normal e a

tensão no capacitor torna-se a máxima negativa $-V_1$. No instante t_3 , o fluxo atinge $-\phi_{sat}$ e a tensão se iguala a $-V_2$, confirmando a permanência da oscilação, o que resulta em uma onda do tipo quadrada no capacitor. Salienta-se que a tensão do capacitor será no sistema real, a tensão fase-terra do cabo em um caso de ferressonância. Dependendo das condições do sistema, existirá um ponto de intersecção entre a capacitância equivalente e a indutância de magnetização, o qual corresponde a solução gráfica do circuito série não-linear (figura 3). Neste caso, o ponto de intersecção 2 é o único ponto de operação instável e a solução nesta condição não permanece em regime permanente (4). O ponto de operação 1 estabelece níveis de tensão normais no capacitor. Obviamente, se a solução for o ponto 3, ambas as grandezas, tensões e correntes serão de valores consideráveis, podendo afetar drasticamente os componentes do sistema.

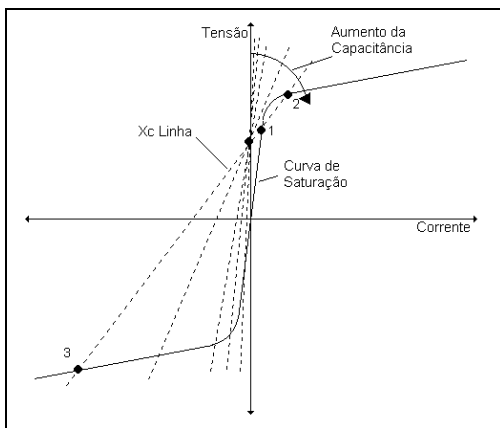


Figura 3 - Solução gráfica

3.0 - FERRORESSONÂNCIA EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

Ferressonância em sistemas trifásicos podem envolver grandes transformadores, transformadores de distribuição ou transformadores de instrumentos (TP's). Os requisitos gerais para ocorrência de ferressonância são uma fonte de tensão aplicada (ou induzida), uma indutância de magnetização do transformador (saturável), uma capacitância e pequeno amortecimento do sistema (2), (4). A capacitância pode ser apresentada em forma de capacitância de cabos subterrâneos ou longas linhas de transmissão, bancos de capacitores, acoplamento capacitivo entre linhas de circuitos duplos ou sistemas temporariamente isolados, capacitância de seqüência zero em sistemas de distribuição e capacitância de disjuntores em extra-alta tensão (5). Devido a variedade de configurações dos enrolamentos e núcleos de transformadores, conexões dos sistemas, várias fontes de capacitâncias e aspectos não-lineares, os cenários em que a ferressonância pode ocorrer são ilimitados. Distúrbios e eventos que podem iniciar a ocorrência da ferressonância são chaveamentos monopolares ou atuação de elos-fusíveis, além de perda do sistema de aterramento. As configurações mais usuais em sistemas de distribuição que podem resultar em sobretensões ferressonantes são dadas na figura 4. Observa-se, portanto, que os enrolamentos primários dos transformadores conectados tanto em delta como

em estrela podem apresentar condições propícias a ferressonância durante condições desequilibradas e operação a vazio dos transformadores.

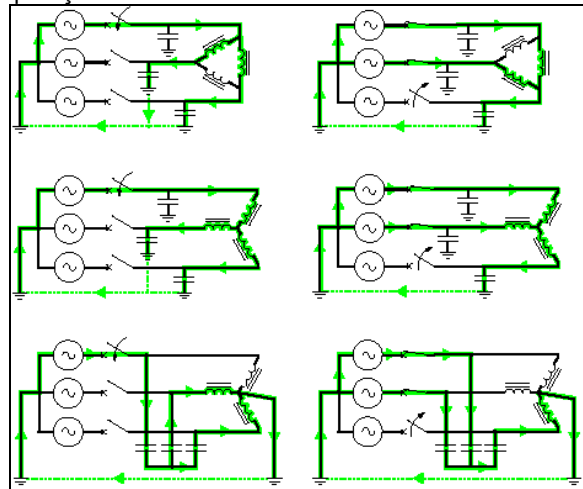


Figura 4 - Configurações típicas de ferressonância

Das configurações mostradas anteriormente, as que apresentam o primário com neutro isolado são mais susceptíveis a ferressonância (1), (5). Em relação a este aspecto, o alimentador em estudo apresenta na maioria dos seus transformadores de grande porte, a conexão em estrela isolada, ou seja, uma das mais propícias a ocorrência de ferressonância quando em operação desequilibrada. Além disso, a característica do núcleo dos transformadores (núcleo envolvido trifásico/tipo core), favorece a condição de sobretensões sustentadas e saturação dos transformadores. Considerando o tipo de conexão em estrela e se uma ou duas fases estão abertas, existirá um caminho série entre a indutância de magnetização e a capacitância de seqüência zero, tornando possível a existência da ferressonância. Se ambos os neutros, da capacitância equivalente e do transformador estiverem aterrados ou isolados, não existirá caminho em série, eliminando assim a possibilidade de ocorrência da ferressonância. Entretanto, dependendo do tipo de núcleo do transformador, a ferressonância pode ocorrer até mesmo quando não se tem nenhum caminho obvio em série, através da tensão aplicada, capacitância e reatância de magnetização. Isto é possível com certos tipos de núcleos trifásicos, os quais fornecem acoplamento direto entre as fases, onde tensões são naturalmente induzidas na fase aberta do transformador. Deve-se salientar que a ferressonância pode ocorrer em qualquer tipo de núcleo (envolvente ou envolvido), inclusive para bancos de transformadores trifásicos ou núcleo triplex, mas nestes casos, com uma probabilidade bem menor. Apesar do tipo de conexão do transformador não afetar o modelo do núcleo, as várias configurações dos enrolamentos definem o comportamento durante a ferressonância. Desta maneira, fica evidente que a ferressonância é um fenômeno complexo, dependente de inúmeras variáveis e que a identificação de configurações de risco devem ser realizadas em fase de projeto, observando as principais características do sistema. Neste caso, o fator de amortecimento próprio dos transformadores (perdas a vazio), em função de sua modernização, otimização e

melhoria das condições construtivas, favorecem o surgimento deste fenômeno, particularmente em transformadores que utilizam liga amorfo (4).
4.0 - RESULTADOS DE MONITORAMENTOS

Foram realizados diversos testes e manobras em campo, sendo monitorados dois pontos distintos, conforme mostrado no diagrama unifilar da figura 5.

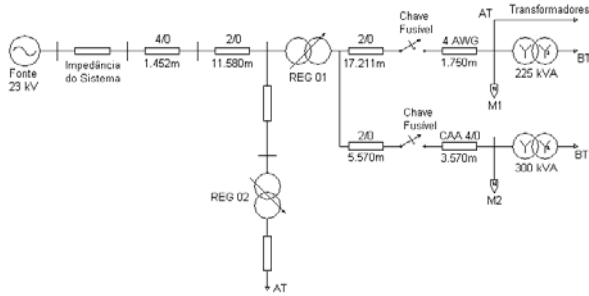


Figura 5 - Diagrama unifilar do sistema em análise

4.1 Medição 1: M1

Os resultados desta medição referem-se ao ponto M1, onde tem-se vários transformadores e carga instalada de aproximadamente 1MW. Sob condições a vazio foram realizadas aberturas monopolares, quando registrou-se severas sobretensões. A figura 6 mostra as tensões RMS durante abertura e subsequente fechamento da fase B, sendo que a respectiva tensão apresentou valores de 2 pu, incluindo assimetria na forma de onda, como ilustra a figura 7. As correntes instantâneas no mesmo ciclo são dadas na figura 8, relativamente com baixas magnitudes.

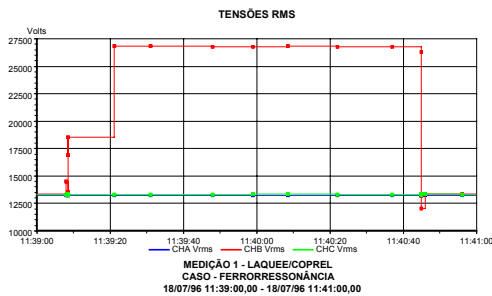


Figura 6 - Tensões RMS durante manobras

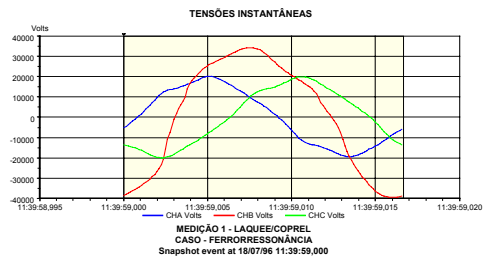


Figura 7 - Tensões durante ferroressonância

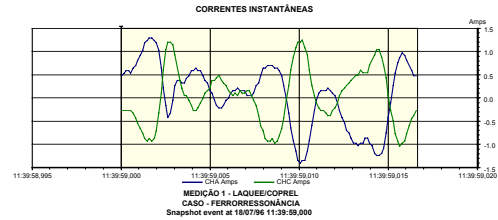


Figura 8 - Correntes durante ferroressonância
 Medições adicionais neste ponto do sistema foram executadas, obtendo-se comportamentos diferentes, onde o transformador operava em um modo mais saturado durante a ocorrência da ferroressonância, como ilustram as figuras a seguir.

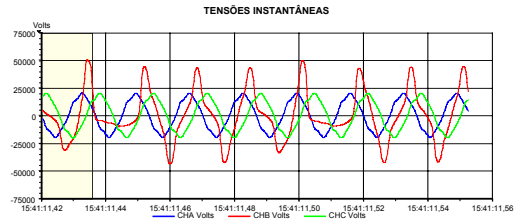


Figura 9 - Tensões durante ferroressonância

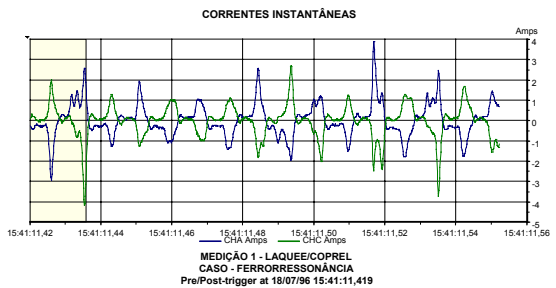


Figura 10 - Correntes durante ferroressonância

4.2 Medição 2: M2 - Conexão (Y/Y_Δ)

Neste ponto de medição, o qual será utilizado como base nas simulações, tem-se um único transformador instalado com potência de 300 kVA. Durante os primeiros testes de manobra já foram verificadas as sobretensões características. As figuras 11 e 12 ilustram as tensões e correntes durante os testes.

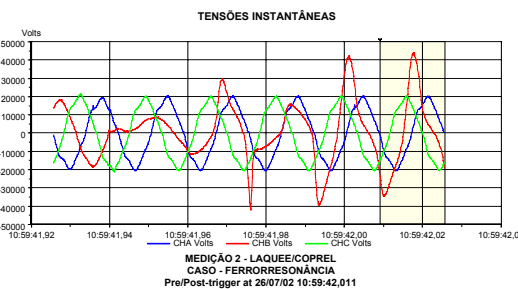


Figura 11 - Tensões durante ferroressonância

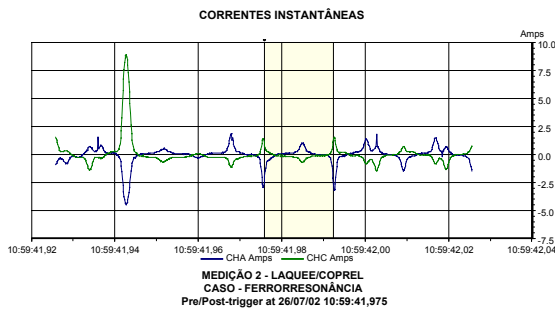


Figura 12 - Correntes durante ferorrressonância

A figura 13 ilustra um instante no qual ocorreu naturalmente um amortecimento momentâneo.

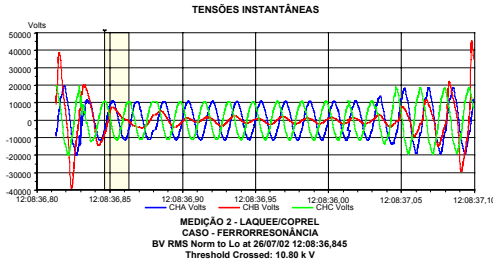


Figura 13 - Tensões durante amortecimento

4.3 Medição 3: M2 - Conexão (Δ/Y_2)

Após a substituição do transformador por um outro com conexão primária em delta, foram realizados testes similares, sendo que as sobretensões também se manifestaram nas manobras, conforme a figura 14. Neste caso, além do comportamento das correntes com forte saturação somente na fase A (figura 15), o ruído audível também apresentou características distintas durante a ocorrência da ferorrressonância.

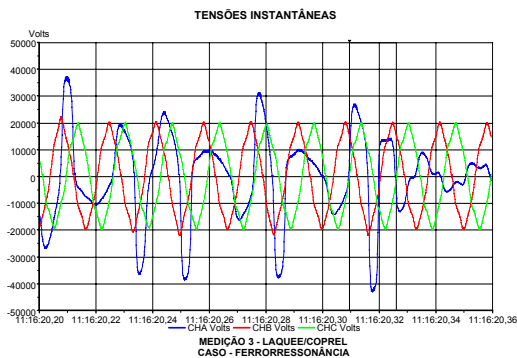


Figura 14 - Tensões durante ferorrressonância

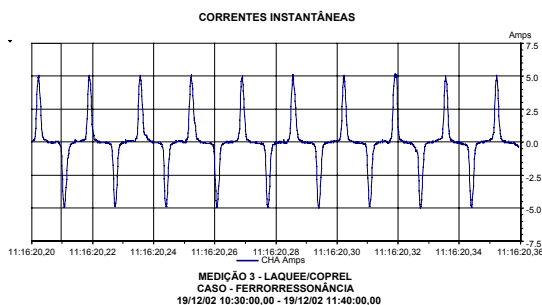


Figura 15 - Correntes durante ferorrressonância

5.0 - RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

A seguir, demonstra-se através da modelagem e dos resultados preliminares das simulações, o real risco da ferorrressonância considerando as configurações atuais do alimentador. Para avaliar as sobretensões foram realizadas simulações utilizando o Programa de Transitórios Eletromagnéticos (ATP/EMTP) (6). Os dados utilizados na representação e modelagem do sistema foram os seguintes:

Sistema: COPREL - Alimentador Cruz Alta (M2- 300 kVA);

Tensões: $U_1 = 22 \text{ kV}$; $U_2 = 380/220 \text{ V}$;

Conexões: Estrela/Estrela aterrada;

Parâmetros percentuais: $R\% = 1,24\%$, $X\% = 4,61\%$;

Corrente a vazio: $I_0\% = 2,05\%$;

Capacitância típica = 3 nF/Km .

O diagrama unifilar utilizado na modelagem e simulação do caso de ferorrressonância é mostrado na figura 16. A curva de saturação típica utilizada no modelo do transformador é apresentada na figura 17. Para tensão nominal e sistema sob condições a vazio, simulou-se a abertura da fase B no instante de 700 ms, considerando os transformadores com núcleo envolvente (tipo shell) e com núcleo trifásico envolvido (tipo core), cujos resultados são apresentados, respectivamente, para os casos A e B.

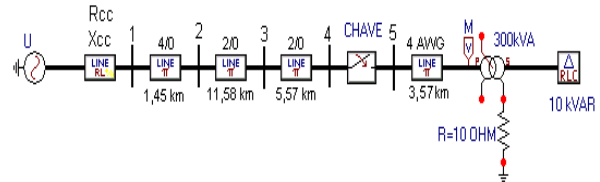


Figura 16 - Modelagem do caso base para simulação

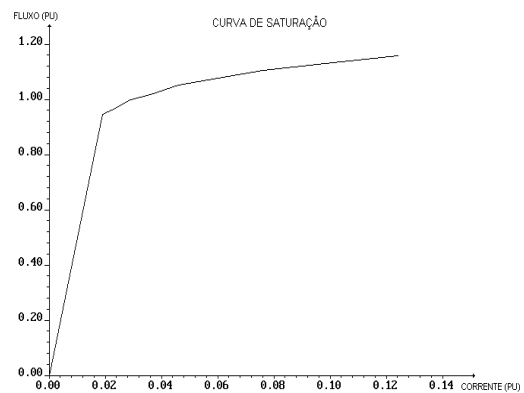


Figura 17 - Curva de saturação típica do transformador

5.1 Caso A (Núcleo Envolvente)

A figura 18 mostra como se comporta a tensão na fase desenergizada para um transformador com núcleo do tipo envolvente, o qual providencia um caminho para o fluxo de seqüência zero e apresenta características mais próximas a um banco de transformadores monofásicos. Verifica-se um amortecimento e a tensão da fase isolada permanece com valores reduzidos. Nesta simulação, o transformador de 300 kVA com o referido tipo de configuração do núcleo não apresentou sobretensões significativas, portanto, não verificou-se o fenômeno de ferorrressonância.

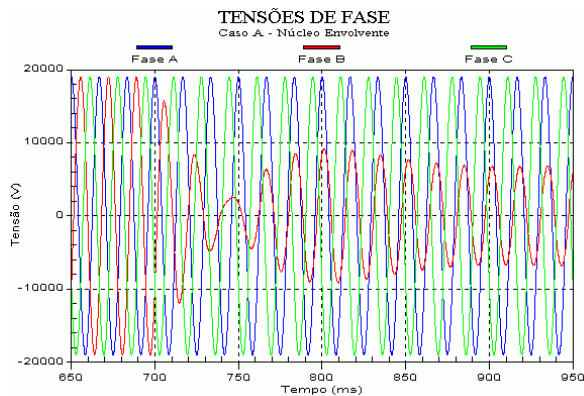


Figura 18 - Tensões simuladas (Caso A)

5.2 Caso B (Núcleo Envolvido)

Diferentemente do caso anterior, onde a operação desequilibrada não implicou em sobretensões, o mesmo modelo do transformador de 300 kVA, exceto que neste caso, o núcleo é configurado como trifásico de acordo com a instalação real (tipo core - 3 pernas), observou-se a ocorrência da ferorrressonância para as mesmas condições de simulação, resultando em sobretensões sustentadas com valores significativos. Os resultados das tensões na simulação deste caso são apresentados na figura 19, onde comprova-se pelo formato das ondas, que existe interação entre a capacitância do sistema e a indutância de magnetização não-linear do transformador, caracterizando-se assim como um caso típico de ferorrressonância.

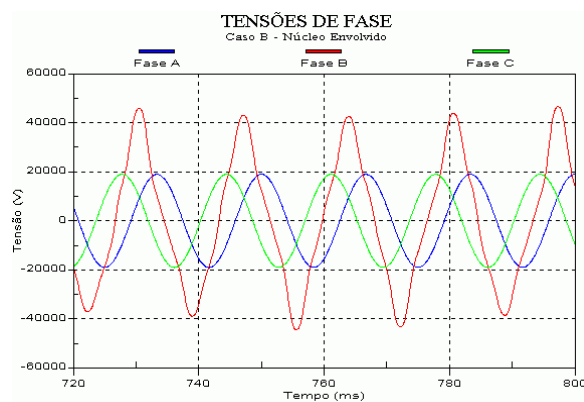


Figura 19 - Tensões simuladas (Caso B)

4.0 - 6.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou os resultados das medições realizadas em dois consumidores do alimentador de distribuição de Cruz Alta/RS, objetivando diagnosticar os problemas relativos as inúmeras queimas de pára-raios de óxido de zinco (ZNO) instalados ao longo do sistema, principalmente nos transformadores que atendem os pivôs de irrigação. Em ambos os pontos registrou-se severas sobretensões durante condições desequilibradas, quando os testes em campo mostraram que o fenômeno de ferorrressonância era o responsável pelas avarias dos pára-raios, excedendo o limite de suportabilidade na condição de sobretensão sustentada (Curva TOV).

Resultados preliminares de simulações mostraram a susceptibilidade do referido sistema frente as ocorrências das sobretensões ferorrressonantes, principalmente devido a características do sistema e conexões empregadas. Fundamentado nos resultados de campo e simulações, a análise realizada permite estabelecer sugestões e recomendações sobre o referido problema:

↗ Utilização de chaves e religamentos tripolares junto às instalações com transformadores que alimentam os levantes de irrigação, evitando assim a possibilidade de sobretensões ferorrressonantes. Devido ao custo significativo envolvido nesta solução, alternativas são ponderadas;

↗ Substituição dos pára-raios atuais pelo tipo com centelhador, considerando as mesmas características de especificação. Apesar dos pára-raios com centelhador suportarem maiores sobretensões, os transformadores ainda serão solicitados;

↗ Estudo da possibilidade de conexão estrela aterrada em ambos os enrolamentos dos transformadores, avaliando os possíveis inconvenientes frente às solicitações de descargas atmosféricas e problemas de operação do comutador junto aos fabricantes;

↗ Especificação de bancos monofásicos ou utilização de transformadores trifásicos do tipo núcleo envolvido com cinco pernas;

↗ Utilização de disjuntores e proteção de alta nos consumidores com transformadores que apresentam possibilidade de operação a vazio com conseqüente risco de ferorrressonância;

↗ Recomposição e utilização do cabo de cobertura em todo o alimentador, diminuindo assim o efeito capacitivo do sistema em condições desequilibradas.

Finalmente, salienta-se que o referido tema, apesar de sua complexidade, é de grande relevância e deve ser analisado em instalações semelhantes, pois o problema de ferorrressonância afeta significativamente a operação dos sistema elétricos, devendo ser objeto de pesquisas quanto a análise das causas, efeitos e propostas adicionais para evitar a ocorrência deste fenômeno.

5.0 - 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) P. Ferracci. Ferroresonance; Cahier Technique n° 190, Groupe Schneider, 1998.
- (2) IEEE Slow Transients Task Force. Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients - Part III: The Study of Ferroresonance; IEEE Transactions on Power Delivery, vol.15, n°1, 2000.
- (3) S. Santoso, R.C. Dugan, T.E. Grebe, P. Nedwick. Modeling Ferroresonance Phenomena in an Underground Distribution Systems; IPST, 2001.
- (4) R. Dugan. Contribution for Ferroresonance

Section; Electrotek Concepts Inc., 2002.

- (5) M.P. Pereira. Ressonância e Ferrorressonância em Sistemas Elétricos; Revista Iberoamericana do ATP, vol. 2, nº 4, 2000.
- (6) H.W. Dommel, S. Bhattacharya, V. Brandwajn, H.K. Lauw, L. Marti. EMTP Theory Book; Vancouver, BC, Canadá: Microtran Power Systems Analysis Corporation, 1992.