

# Estudo de Causas e Medições de Correntes de Fuga em Transformadores de Potência

João P. Assumpção Bastos, Nelson Sadowski, Walter P. Carpes Jr., Patrick Kuo-Peng,  
Nelson Jhoe Batistela e Maurício Rigoni

GRUCAD – Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos - UFSC - www.grucad.ufsc.br

Pedro A. da Silva Jr. e Ademar E. Rosa  
CEFETSC – Unidade de São José – www.sj.cefetsc.edu.br

Rubens José Nascimento  
Tractebel Energia S.A – www.tractebelenergia.com.br

**Resumo** — Verificava-se que em certos transformadores de potência da usina hidrelétrica de Salto Osório existia uma corrente elétrica considerável fluindo através do cabo de aterramento da carcaça. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma metodologia de análise de transformadores de potência no que diz respeito às correntes de fuga, identificam-se suas causas e são propostas soluções. Equipamentos de medidas de corrente elétrica baseados na bobina de Chattock-Rogowski foram desenvolvidos especialmente para utilização no trabalho.

**Palavras chaves** — bobina de Chattock-Rogowski, corrente de fuga, métodos numéricos de cálculo de campo, transformador de potência.

## I. INTRODUÇÃO

Este artigo trata do estudo de correntes circulantes entre a carcaça de transformadores de potência e a malha de aterramento presente em usinas elétricas. Embora o fenômeno já tenha sido identificado em vários equipamentos, não se conhecia até o presente momento a origem desta corrente.

Tendo em vista que a carcaça é eletricamente isolada dos circuitos de trabalho dos transformadores, a corrente em questão, em condições normais de operação, não deveria estar presente, ou pelo menos, não constitui um dado definido em projeto. No entanto, em alguns transformadores da usina hidrelétrica de Salto Osório, esta corrente era significativa, chegando a valores da ordem de duas centenas de ampères quando o equipamento se encontrava funcionando em potência nominal.

Inicialmente suspeitou-se que esta corrente fluindo para a terra era originada pela corrente induzida na carcaça do transformador. Essas correntes, por sua vez, seriam induzidas pelos campos internos produzidos pelos enrolamentos, principalmente os de baixa tensão.

Após algumas reflexões, uma outra hipótese passou a ser também cogitada: os campos magnéticos criados por elementos situados externamente ao tanque do transformador também poderiam ser os geradores dessas correntes.

Desta forma, serão apresentados estudos relativos aos campos gerados interna e externamente ao transformador.

Como equipamento de referência foi tomado um transformador de potência instalado no nicho número 2 da usina hidrelétrica de Salto Osório.

Este trabalho foi financiado pela Tractebel Energia S.A., através do convênio nº CMS.NAJL.00.6387 celebrado em parceria com a Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina – FEESC e a Fundação do Ensino

Técnico de Santa Catarina – FETESC.

O transformador de referência é trifásico, tipo núcleo envolvido, com as seguintes características: Fabricante BBC – Brown Boveri, número de série: SP-3905, potência: 196.500kVA, tensão nominal: 218.500-241.500/13.800V, corrente nominal: 519-470/8.221A, espessura da chapa do tanque: 12mm (Figura. 1).

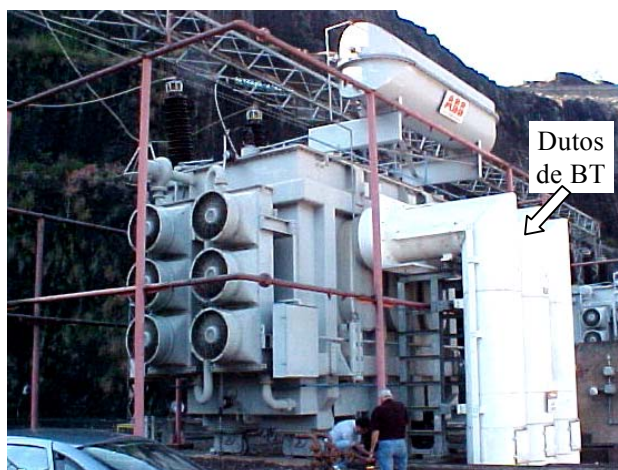


Figura 1. Foto do transformador de referência.

## II. ESTUDOS DE CAMPOS GERADOS INTERNAMENTE NO TRANSFORMADOR

A equação de Maxwell que rege o fenômeno de indução de tensões é a “lei de Faraday”, dada em sua forma local por (1), onde  $\mathbf{E}$  é o vetor campo elétrico,  $\mathbf{B}$  é o vetor indução magnética e  $t$  o tempo.

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1) \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2)$$

A lei de Ohm local (2) indica que uma corrente dita “induzida” é criada no meio condutor, onde  $\sigma$  é a condutividade elétrica do meio e  $\mathbf{J}$  é a densidade superficial de corrente.

Se a equação (1) for diferente de zero, criar-se-á uma densidade de corrente induzida na carcaça do transformador, não desejável em um transformador de potência, porém, em maior ou menor escala, inevitável. Nos transformadores trifásicos, os campos magnéticos são bastante intensos nas bobinas de fase que se situam próximas à carcaça. As bobinas criam campos dispersos, gerando um fluxo magnético que não é conduzido para o núcleo do transformador. Tais fluxos, sendo variáveis no tempo e incidindo no material condutor, irão criar correntes induzidas.

Entretanto, o aspecto mais complexo do problema é a questão relativa à corrente que flui para a terra através do cabo de aterramento da carcaça. De (3), o fluxo do vetor  $\vec{J}$  é conservativo.

$$\text{div } \vec{J} = 0 \quad (3)$$

Esta lei, conhecida como “equação da continuidade elétrica”, mostra que a corrente total que sai de um volume é igual à corrente que nele entra. Na exposição do problema em questão foi constatado inicialmente que uma corrente flui pelo condutor de aterramento da carcaça, não tendo sido identificado o seu caminho de “retorno”.

### A. Cálculo 3D de Correntes Induzidas na Carcaça

Para obter as correntes induzidas na carcaça pelos enrolamentos do transformador e concluir sobre a influência delas na corrente que flui para a terra foram efetuados cálculos em 3D, com formulação em termos de potencial vetor magnético complexo, utilizando o programa FEECAD, desenvolvido no GRUCAD-UFSC [1].

Devido ao efeito pelicular a penetração dos campos no ferro da carcaça, produzidos pelas correntes nela induzida, é muito pequena. A profundidade de penetração é calculada por (4), onde  $f$  é a frequência,  $\sigma$  é a condutividade elétrica e  $\mu$  é a permeabilidade absoluta do material ( $\mu = \mu_r \mu_0$ ).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

Para a frequência de 60Hz e considerando as características do ferro da carcaça, obtém-se  $\delta = 1,45\text{mm}$ .

Na Figura 2 é apresentada a geometria do equipamento sob análise, onde a metade do transformador (núcleo e enrolamentos) é mostrada.

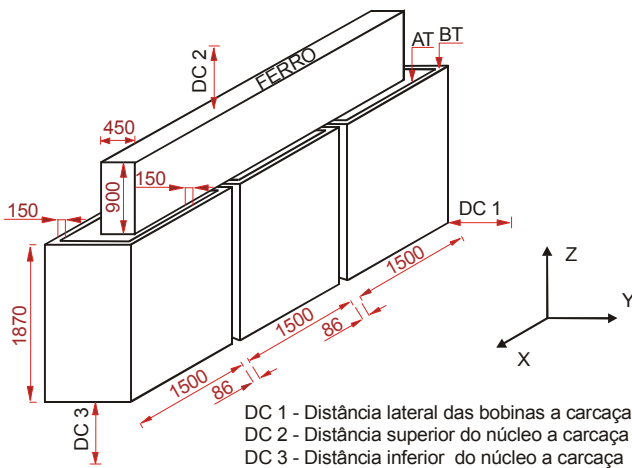


Figura 2. Domínio de cálculo (cotas em milímetros).

Os valores máximos encontrados de  $B$  são, para parte real, 0,270T no ponto (3210,5; 562,5; 2027) e, para a parte imaginária,  $B=0,233\text{T}$  no ponto (1624,5; 562,5; 2027).

Na Figura 3 é apresentada a distribuição de correntes induzidas na carcaça do transformador; o sentido e a intensidade das correntes é indicado pelas setas.

Os valores obtidos da corrente induzida na carcaça não excederam  $0,5\text{A/mm}^2$ . Como a profundidade de penetração é muito pequena, pode-se afirmar que os valores de  $\vec{B}$  e  $\vec{J}$  induzidos são bem maiores na parede interna da carcaça do

transformador do que na externa.

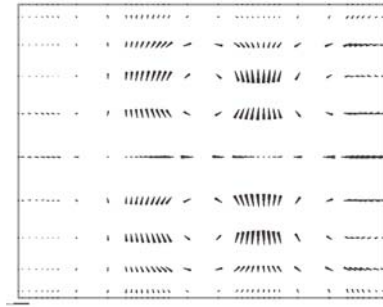


Figura 3. Distribuição de correntes induzidas (parte real) na carcaça, vista Oxz.

### B. Cálculo 2D de Correntes Induzidas na Carcaça

Este cálculo é empregado em um domínio geométrico tal que a corrente dos enrolamentos é perpendicular ao plano de estudo. O procedimento numérico utilizado é o método clássico de elementos finitos [2].

A hipótese adotada é que o domínio é infinito na direção perpendicular ao plano de estudo. Assim, o cálculo é efetuado num plano de corte transversal. Uma vez que é possível fazer a análise ao longo da profundidade de penetração, optou-se por um cálculo passo-a-passo no tempo. Desta forma, ao contrário de um cálculo em formulação complexa utilizado para o estudo 3D, pode-se levar em conta a saturação de campos.

A Figura 4 mostra o domínio de cálculo utilizado.

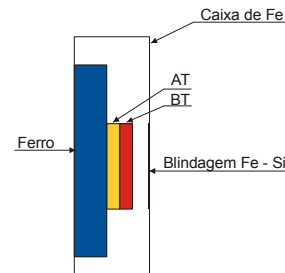


Figura 4. Domínio de cálculo em 2D.

A análise do funcionamento pode ser sintetizada escolhendo-se dois instantes de simulação. O primeiro é no momento onde temos um pico de corrente nos enrolamentos, o segundo é no momento onde a excitação passa pelo valor zero.

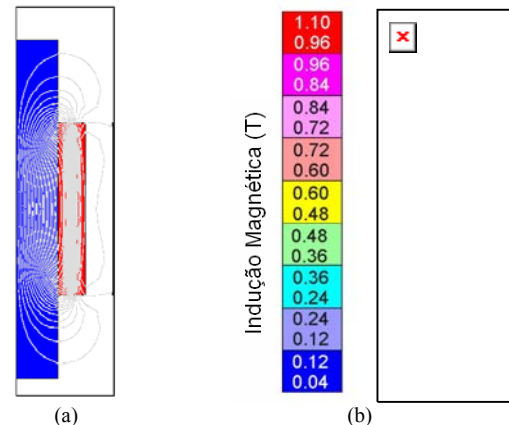


Figura 5 (a). Distribuição de campos de indução magnética.

Figura 5 (b). Indicação dos valores de indução magnética.

Na Figura 5(a) tem-se a distribuição de campos magnéticos na estrutura. Percebe-se a atração que os meios

de alta permeabilidade (ferro-silício da blindagem e ferro ordinário da carcaça) exercem no campo. Na Figura 5(b), têm-se os valores de indução que se estabelecem na estrutura. As densidades de correntes induzidas na blindagem e na carcaça possuem um valor máximo de  $5,9\text{A/mm}^2$ , insuficiente para gerar fortes aquecimentos.

### C. Conclusão Sobre os Cálculos de Campo no Interior do Transformador

Os dois cálculos numéricos anteriores permitiram concluir que os campos gerados exclusivamente pelos enrolamentos trifásicos não podiam ser a origem da corrente de fuga fluindo no cabo de aterramento para a malha de terra. Tal conclusão é baseada no seguinte:

- Os valores de campos que se estabelecem na blindagem e na carcaça são, em média, baixos. Estes campos são consideráveis numa zona muito estreita, devido ao pequeno valor da profundidade de penetração  $\delta$ .
- O cabo de conexão da carcaça para a malha de aterramento é mecânica e eletricamente ligado à parte externa da carcaça. Mas a atenuação natural do campo a partir da parede interna do tanque é muito forte (na profundidade de 4mm o campo e a corrente são praticamente nulos). Assim, qualquer corrente induzida a partir dos enrolamentos é virtualmente nula na zona onde é conectado o cabo (a 12mm da parede interna).

## III. CAMPOS NAS PARTES EXTERNAS DO TRANSFORMADOR

As correntes dos cabos de baixa tensão que alimentam os enrolamentos do transformador são muito intensas. Conseqüentemente, o campo gerado pelos cabos pode ser também intenso. Pela lei de Faraday, campos variáveis no tempo têm a propriedade de gerar correntes induzidas em circuitos que se situam na região onde estes campos se estabelecem.

### A. Cálculo Teórico de Correntes Induzidas na Blindagem de Alumínio dos Condutores de BT

Na Figura 6 é apresentada a configuração de um condutor de baixa tensão (BT) envolto por sua blindagem em alumínio (ver indicação da Figura 1). Para o transformador de referência a corrente fluindo por este cabo é de 8.221A eficazes. A frequência é de 60Hz e a blindagem de alumínio tem uma espessura de 6mm. Neste cálculo serão empregadas algumas aproximações, sendo que a principal delas é considerar que o comprimento da estrutura é infinito. No caso específico, esta aproximação é boa tendo em vista que a maior parte desta conexão se desenvolve, geometricamente, sem perturbações. Também será considerado que, para efeitos de cálculo de corrente induzida, os outros dois condutores (do sistema trifásico) não causam influências no condutor estudado.

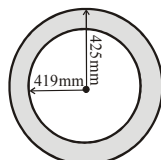


Figura 6. Geometria da blindagem do duto de BT.

Inicialmente, a indução magnética criada por um fio infinito é dada por

$$B(r, t) = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r} \cos \omega t \quad (5)$$

Empregando a equação de Maxwell em coordenadas cilíndricas

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$\vec{B}$  só tem componentes na direção azimutal  $\phi$ . Portanto, somente o componente de  $\text{rot } \vec{E}$  na direção  $\phi$  é utilizado. Sabe-se que  $\vec{E}$  só tem um componente que se estabelece na direção  $z$  (do mesmo modo que  $J$  induzido) e que não há variação das grandezas ao longo desta direção ( $\partial/\partial z = 0$ ).

Desta forma, em coordenadas cilíndricas (6) se transforma em:

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r} \cos \omega t \right) = -\frac{\mu_0 I_0 \omega}{2\pi r} \sin \omega t \quad (7)$$

É necessário lembrar que os componentes tangenciais de  $\vec{E}$  se conservam na fronteira entre o ar e o alumínio [2].

Como  $J = \sigma E$ , no alumínio, temos:

$$\frac{\partial J}{\partial r} = -\frac{\sigma \mu_0 I_0 \omega}{2\pi r} \sin \omega t \quad (\text{na direção } Oz) \quad (8)$$

A atenuação da amplitude desta densidade de corrente no alumínio obedece à lei:

$$\frac{\partial J}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left( J_0 e^{-(r-a)/\delta} \right) = -\frac{1}{\delta} J_0 e^{-(r-a)/\delta} \quad (9)$$

onde  $J_0$  é o valor de  $J$  na fronteira e  $a$  é o raio interno do condutor de alumínio (“ $r-a$ ” é a dimensão geométrica que caracteriza a penetração no alumínio a partir da sua fronteira interna com o ar). Nesta fronteira, onde  $r = a$ , tem-se:

$$\frac{\partial J}{\partial r} = -\frac{1}{\delta} J_0 = -\frac{\sigma \mu_0 I_0 \omega}{2\pi r} \sin \omega t \quad (10)$$

Assim, o valor de pico da densidade de corrente na fronteira ar/alumínio é:

$$J_0 = \frac{\delta \sigma \mu_0 I_0 \omega}{2\pi r} \quad (11)$$

Utilizando os valores de  $\delta=11\text{mm}$  (para  $f=60\text{ Hz}$ ),  $\sigma=3,55 \times 10^7\text{ S/m}$ ,  $r=419\text{mm}$ ,  $I_0=8221\sqrt{2}\text{A}$ , o valor de  $J_0$  será:  $J_0=0,817\text{A/mm}^2$

Finalmente, levando em conta a atenuação da corrente induzida na blindagem, calcula-se a corrente total. Como a espessura do tubo é muito menor que o seu raio, pode-se “retificar” o cabo de alumínio usando seu raio médio.

Tem-se então:

$$I = \int_0^{2\pi \times 203} \int_a^{a+6} J_0 e^{-(r-a)/\delta} dr dl \quad (12)$$

o que fornece  $I = 10.018\text{A}$  (de pico).

Deve-se observar que para a atenuação de  $J$  foram utilizadas as expressões clássicas calculadas em coordenadas cartesianas. No entanto, o problema é, na realidade, em coordenadas cilíndricas, cuja atenuação requer um cálculo bem mais complexo, fazendo uso de funções de Bessel. Mas cabe ressaltar que, tendo os raios que delimitam a blindagem valores muito próximos, esta aproximação é bastante razoável e fornece resultados realistas [3].

### B. Cálculo Numérico de Correntes Induzidas e dos Campos Externos Produzidos Pelos Condutores de BT

Uma das possíveis fontes de campos de dispersão é o

conjunto de condutores de baixa tensão que formam a ligação entre o gerador e o transformador de potência. Estes condutores estão alinhados num só plano e são envoltos por uma blindagem de alumínio (Figura 1). Estas blindagens se encontram curto-circuitadas nos seus extremos.

O cálculo numérico realizado em 2D possui como domínio um retângulo com dimensões 6.190mm × 2.000mm. Os dutos de blindagem (alumínio) possuem a espessura de 6mm e raio de 419mm (para a sua parte interna). Por simetria, somente metade da estrutura é considerada.

Na Figura 7 tem-se os traçados das linhas de campo magnético. Pode-se observar que elas se concentram entre a zona do cabo e a blindagem. No entanto, seus valores na região externa às blindagens não são desprezíveis.

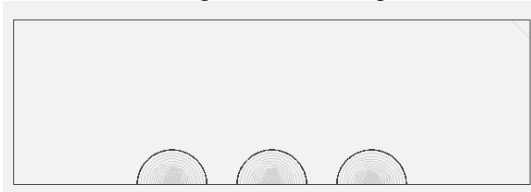


Figura 7. Distribuição de campos de indução na estrutura condutor-blindagem.

Na Figura 8 tem-se os valores de indução magnética. A densidade de corrente induzida na blindagem foi determinada numericamente. Seu valor se mantém praticamente constante e igual a 0,72A/mm<sup>2</sup> em toda a espessura da blindagem. Utilizando esta grandeza, pode-se calcular a corrente induzida efetuando o produto entre J e a seção transversal da blindagem. Isto fornece uma corrente de 11.454A de pico, bastante próxima à corrente no cabo de BT. Este valor também está razoavelmente em acordo com os 10.018A obtidos no cálculo analítico.

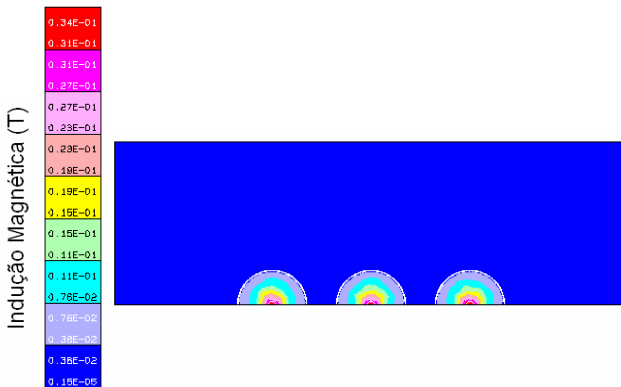


Figura 8. Distribuição de campos de indução na estrutura condutor-blindagem com indicação da intensidade.

No entanto, o cálculo mostra que a profundidade de penetração no alumínio é relativamente alta. Utilizando a fórmula:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (13)$$

obtem-se:  $\delta \approx 11$ mm.

Como a espessura da blindagem é de 6mm, a atenuação de campos e correntes induzidas é de aproximadamente 42% ( $e^{-6/11} \approx 0.58$ ). Ou seja, os campos e densidades de corrente induzida na parte externa da blindagem (raio maior) são próximos de 58% do que se estabelece na sua parede interna (raio menor). Para ser efetiva, geralmente uma blindagem deve ter espessura entre  $2\delta$  a  $3\delta$ . Pode-se afirmar que a

espessura de alumínio, para efeitos de atenuação de campos magnéticos, está subdimensionada. É possível que aspectos financeiros (e talvez também mecânicos) tenham sido levados em conta na concepção da blindagem.

### C. Conclusão Sobre os Campos Externos ao Transformador

As principais conclusões sobre os campos gerados na parte externa do transformador são:

- a) A espessura do duto de alumínio (6 mm) é bem menor do que a profundidade de penetração neste material para a frequência de 60Hz, fazendo com que a atenuação do campo não seja completa ou satisfatória.
- b) Uma corrente de fuga pode ser criada pelo fluxo externado pelo conjunto de condutores de baixa tensão e seu duto de blindagem de alumínio. Todavia, o nível desta corrente, para o caso estudado, não poderia ser superior a alguns poucos ampères.

## IV. MEDIÇÕES DE CORRENTES CIRCULANTES NO TRANSFORMADOR

Com a perspectiva que as correntes nos cabos de aterramento, nos nichos dos transformadores, são induzidas pelo campo magnético presente no ambiente, buscou-se elucidar a questão do elevado nível desta corrente em alguns transformadores.

Inicialmente, determinou-se o circuito elétrico fechado necessário para que haja a geração da corrente circulante no cabo de terra do transformador.

O cabo por onde flui a corrente para a malha de terra está, obviamente, conectado eletricamente à própria malha de terra da usina. Sabia-se também que este é o único cabo ligado à malha, porém o transformador repousa sobre um conjunto de “trilhos e rodas” também conectados à malha de terra. Conclui-se que existe um circuito fechado entre a carcaça e a malha de terra através do cabo e do conjunto “trilhos e rodas”, como mostra esquematicamente a Figura 9.

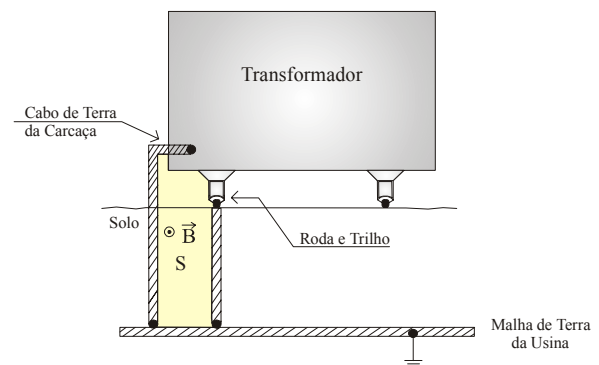


Figura 9. Circuito fechado dos condutores de aterramento.

Com o circuito fechado determinado, buscou-se encontrar um método eficaz para medir as correntes elétricas nas rodas de apoio do transformador. Paralelamente, este mesmo método poderia ser empregado na determinação das correntes elétrica “líquida” nos dutos de baixa tensão do transformador, comprovando a análise teórica da existência desta corrente.

Atualmente, não há no mercado equipamentos para medição de correntes fluindo em peças de grande volume, ou mais precisamente de seção transversal relativamente grande. Especificamente, pode-se citar como exemplo a circunferência dos dutos de baixa tensão (quase três metros)

e o menor perímetro para se envolver um conjunto de rodas de apoio do transformador sobre os trilhos (cerca de dois metros). Obviamente, não é viável, por exemplo, erguer o transformador para acrescentar amperímetros ou transformadores de corrente. Outra questão é como medir a corrente no duto de blindagem se ela é distribuída no alumínio, não restando pontos para se efetuar medições com a introdução de medidores convencionais. Assim, não restou alternativa para a medição diferente do desenvolvimento de sensores baseados na técnica da bobina de Chattock-Rogowski [4]. Construíram-se quatro bobinas com comprimento de três metros e vinte centímetros. Paralelamente, desenvolveu-se a parte eletrônica do sensor, adaptado em escalas para medições de 300 e 7000 ampères de pico.

A Figura 10 apresenta o posicionamento dos sensores e a Figura 11 os resultados obtidos com a medição simultânea das correntes nas quatro rodas de apoio do transformador e no seu cabo de aterramento da carcaça. Nesta última figura, observa-se que, no ponto de operação do transformador, além do cabo de terra com corrente de 170A de pico, somente na roda 3 aparece uma corrente significativa, da ordem de 30A de pico. Nas demais rodas as correntes ficaram na faixa de 2 a 3A de pico. Este resultado mostrou-se contrário às expectativas, já que se esperava que a corrente que fluía pelo cabo de terra circulasse em um circuito fechado incluindo as rodas do transformador e a malha de terra.



Figura 10. Medição das correntes nas rodas e no cabo de terra do transformador.

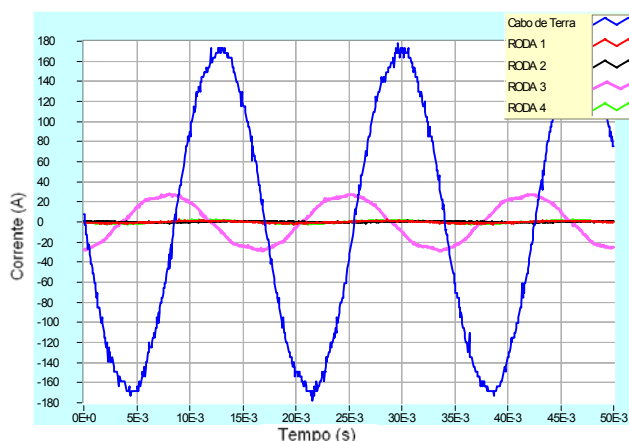


Figura 11. Correntes nas rodas e no cabo de terra do transformador.

Com o resultado obtido, buscaram-se outros contatos da

carcaça do transformador que pudessem formar um circuito elétrico com o cabo de terra. As conexões do sistema anti-incêndio com o transformador, em vários pontos medidos, não apresentaram correntes com amplitudes significativas que pudessem justificar o nível da corrente no cabo de aterramento da carcaça.

Após o aparente insucesso anterior, partiu-se para medição das correntes “líquidas” na blindagem. As bobinas de Rogowski foram posicionadas na base das blindagens de acordo com a Figura 12. Os dutos são curto-circuitados por uma placa de equalização próxima à conexão com o transformador e por uma outra placa junto ao solo, no nível do transformador.

Da medição da corrente “líquida” da blindagem observou-se que as amplitudes das correntes nos dutos são diferentes e que o somatório das correntes “líquidas” das blindagens das três fases é diferente de zero. As correntes de linha no interior dos dutos (cabos para corrente de entrada no primário do transformador) não poderiam estar desequilibradas, pois se tratava das correntes de saída do gerador. Certamente não havia diferenças significativas na forma construtiva dos dutos para ocasionar este fenômeno. Coube somente a possibilidade de haver um caminho alternativo para a circulação das correntes de blindagem no ponto de equalização.



Figura 12. Posicionamento das bobinas de Rogowski na base dos dutos.

Assim, foi levantada a suspeita que a corrente de desequilíbrio, que é o resultado não nulo da soma das três correntes “líquidas” fosse aquela circulante pelo cabo de aterramento da carcaça do transformador. Fez-se então uma nova aquisição simultânea das três correntes da blindagem e neste cabo. Somando-se as três correntes das blindagens através de um programa no ambiente *LabView* [5], observou-se que este somatório é muito próximo da corrente de aterramento do cabo da carcaça, como pode ser observado na Figura 13. A pequena diferença entre o somatório e a corrente do cabo de aterramento é devida a precisão (ajuste correto) das bobinas de Rogowski (note-se que os sensores eram ainda protótipos).

Como o resultado destas últimas medições indicaram o fechamento do circuito da corrente de aterramento da carcaça do transformador pelos dutos, ainda faltava encontrar o ponto de contato entre a carcaça e a blindagem dos dutos de BT, já que por especificação de projeto não deveria existir este contato. Inspeccionando-se o ponto de conexão entre o condutor de BT e o transformador se observou que existia contato elétrico entre as blindagens dos condutores e a carcaça do transformador, como pode ser visto nas figuras

14 e 15. Provavelmente, durante uma manutenção ou troca de transformador, estas peças acabaram entrando em contato, ocasionando o valor de corrente bem maior no cabo de aterramento da carcaça deste transformador do que em outros transformadores da mesma usina.

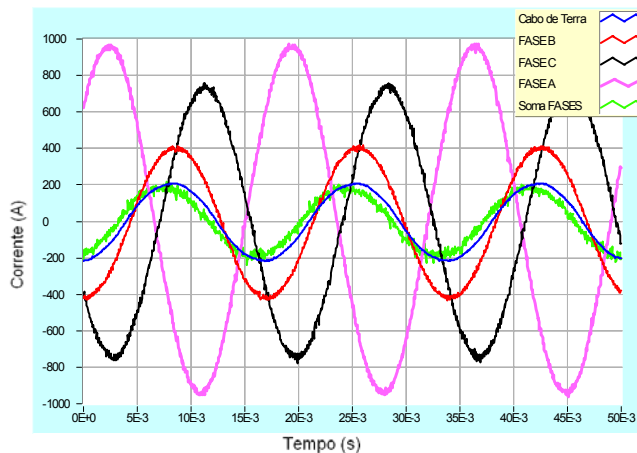


Figura 13. Correntes “líquidas” nas blindagens de alumínio dos cabos de BT, somatório destas correntes e corrente no cabo de terra.



Figura 14 – Ponto de Conexão dos condutores de BT com o transformador.

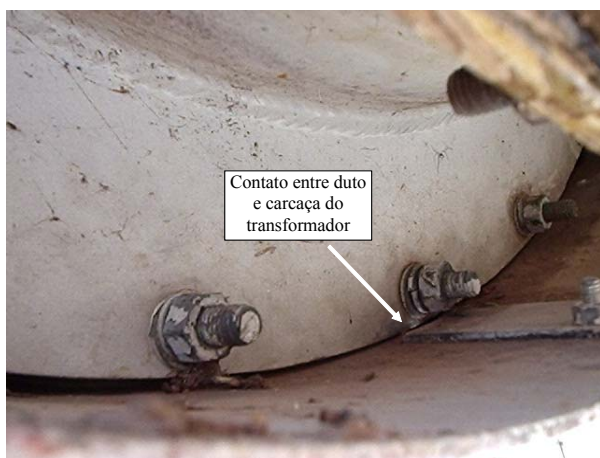


Figura 15 – Detalhe do contato elétrico entre a blindagem do duto de BT e a carcaça do transformador, visto por dentro do duto.

Uma vez informada a equipe de manutenção da Tractebel, e aproveitando uma situação de manutenção de rotina, as conexões dos dutos de BT no trafo 2 foram refeitas e novas medidas de corrente realizadas. Nesta nova situação as

correntes circulantes nas rodas do trafo ficaram abaixo de 1A. As correntes “líquidas” nos dutos de baixa tensão, apesar de continuarem desequilibradas, apresentaram um somatório zero. A corrente no cabo de terra, origem do estudo em questão, passou para 2,5A.

## V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi estudado o problema de correntes parasitas fluindo pelo cabo de aterramento de transformadores de potência. Este problema é verificado em inúmeros equipamentos produzidos por diversos fabricantes e instalados em várias regiões do Brasil e do mundo, muito embora para o caso em questão a corrente era da ordem de 200A. A pesquisa bibliográfica realizada praticamente não encontrou estudos sobre este tema.

Para abordar este problema, cálculos analíticos e numéricos 2D e 3D originais foram feitos, o que propiciou a obtenção de uma série de conclusões que foram decisivas para o entendimento do caso. Um equipamento para medição de correntes em peças de grande volume foi desenvolvido e testado em campo.

As principais conclusões deste estudo são:

- ◆ A corrente de fuga para a malha de terra em transformadores de potência não é devida à corrente induzida na carcaça pelos enrolamentos internos;
- ◆ A corrente de fuga é, sobretudo, criada pelo fluxo externado pelo conjunto de condutores de baixa tensão e seus dutos de blindagem de alumínio;
- ◆ A espessura do duto de alumínio (6 mm) é bem menor do que a profundidade de penetração neste material para a frequência de 60Hz fazendo com que a atenuação do campo não seja completa ou satisfatória;
- ◆ Propõe-se que a espessura deste duto seja aumentada através de alumínio ou de uma lâmina de ferro, sendo que esta deve ser calculada de forma a não criar aquecimento excessivo; adicionalmente, o ambiente seria magneticamente despoluído;
- ◆ Propõe-se que as rodas do transformador sejam isoladas dos trilhos, abrindo o circuito elétrico e eliminando a corrente de fuga; desta forma, o transformador estaria solidamente aterrado mas não haveria corrente parasita;
- ◆ A elevada corrente do cabo de aterramento da carcaça do transformador número 2 da usina de Salto Osório se tratou de um caso isolado. Porém, a origem do problema só foi elucidada por meio das análises teóricas e práticas do problema.

## REFERÊNCIAS

- [1] EFCAD.EXE. Programa para Simulação e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos. GRUCAD. Florianópolis.
- [2] Ida, N; Bastos, J. P. A. *Electromagnetics and Calculation of Fields*. 2ª Edição. Ed. Springer-Verlag. Nova York, 1997.
- [3] Chipman, R. A. *Linhas de Transmissão*. Ed. Mc Graw-Hill do Brasil Ltda. São Paulo, 1979.
- [4] Ward, D. A. Using Rogowski Coil for Transient Current Measurements. IEE Engineering and Science Journal, June, 1993, pp 105-113.
- [5] Labview.exe; 2004, Versão 7.1. Programa para bancos de ensaios com instrumentos virtuais. National Instruments Corporation.