



ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR PRÓXIMO A BANCO DE CAPACITORES

OBJETIVO

Este artigo proporciona uma descrição e análise do fenômeno ocorrido em uma indústria envolvendo a energização de transformadores em barramentos onde hajam outros transformadores com banco de capacitores em seu secundário. Este tipo de configuração de sistema pode acarretar problemas na operação do sistema de proteção instantânea dos bancos de capacitores e/ou transformadores.

1 - INTRODUÇÃO

A energização de transformadores podem acarretar oscilações de tensão nas barras onde estão conectados, isto devido a sua alta corrente de energização, que pode atingir até 14 vezes a sua corrente nominal [1]. Bancos de capacitores são fontes de energia armazenada e portanto capazes de contribuir para a corrente de energização dos transformadores ("inrush"), essa corrente pode alcançar valores 91 suficientes para fazer operar indevidamente os relés de proteção instantânea dos mesmos.

estrutura molecular que se assemelha a minúsculos ímãs contendo um pólo norte e sul. Estes estão dispostos de forma desordenada, conseqüentemente não produzindo um campo magnético resultante significativo. Quando estes materiais são submetidos a um campo magnético externo, uma bobina, por exemplo, os ímãs internos tendem a alinharem-se, produzindo um campo magnético intenso no interior do material ferromagnético a figura 1, mostra este conceito. À medida que se eleva a corrente na bobina, maior será a quantidade de ímãs internos alinhados e conseqüentemente maior será o campo magnético, até que, para acréscimos significativos de corrente, obtem-se pouco aumento do campo magnético. Nesta situação, diz-se então que

2 - CURVA DE SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES

Os materiais ferromagnéticos utilizados nos núcleos de transformadores apresentam em

**José Batista Siqueira
Filho**

Diretor Técnico da SE&IP
Professor e Membro do
GTCE da Universidade de
Fortaleza (UNIFOR)
Mestre EFEI- Escola
Federal de Engenharia de
Itajubá - MG

o material atingiu a região de saturação. A figura 2 mostra a curva normal de magnetização de

um material ferromagnético, esta curva é chamada de ciclo de histerese.

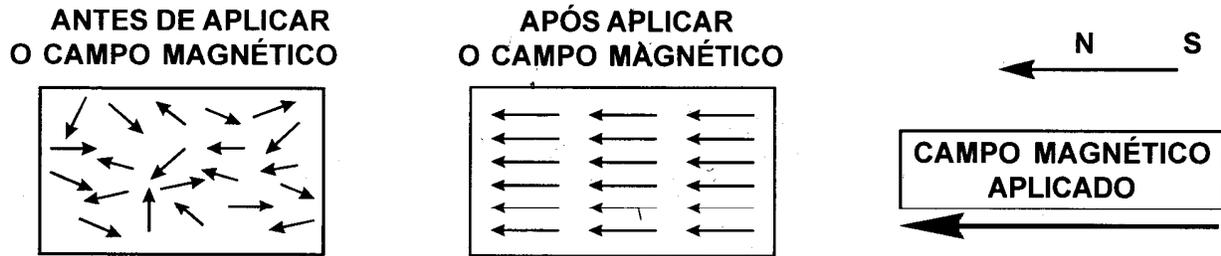


Figura 1- Efeito da aplicação do campo magnético em um material ferromagnético

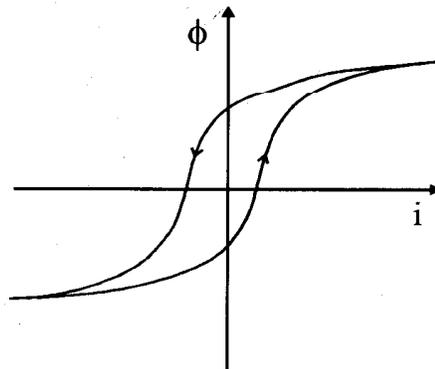


Figura - Curva de magnetização para um material ferromagnético (curva de histerese) [3]

No caso particular de um transformador o fluxo magnético que se desenvolve no seu núcleo (material ferromagnético) pode ser aproximadamente relacionado com a tensão aplicada conforme a equação 1.

$$\phi \cong \frac{U_{RMS}}{4,44.f.N} \quad (1)$$

onde:

- ϕ - Fluxo magnético [V.s];
- N - Número de espiras do enrolamento do transformador (bobina);
- U_{RMS} - Tensão aplicada ao enrolamento do transformador (valor eficaz) em [V];
- f - Frequência da tensão aplicada ao enrolamento do transformador, em [Hz];

Na equação 1, observa-se que o fluxo magnético é proporcional à tensão aplicada, com isso, pode-se obter a curva de saturação em função da tensão e corrente aplicada ao enrolamento do transformador.

À medida que a tensão varia de magnitude, a reatância de magnetização também varia, reduzindo-se de valor, à medida que o fluxo no núcleo do enrolamento do transformador entra na região de saturação. A figura 3, mostra a variação da reatância de magnetização em função da tensão aplicada. Logo, dependendo da amplitude da tensão aplicada ao transformador, este pode atingir a região de saturação, o valor da tensão que leva o transformador normalmente a trabalhar na região de saturação é de 105% a 110% da tensão nominal deste [1]. A figura 3 mostra a relação

da tensão com a curva de saturação do transformador. Observa-se que, uma

sobretensão nos terminais do transformador, pode levá-lo a operar na região de saturação.

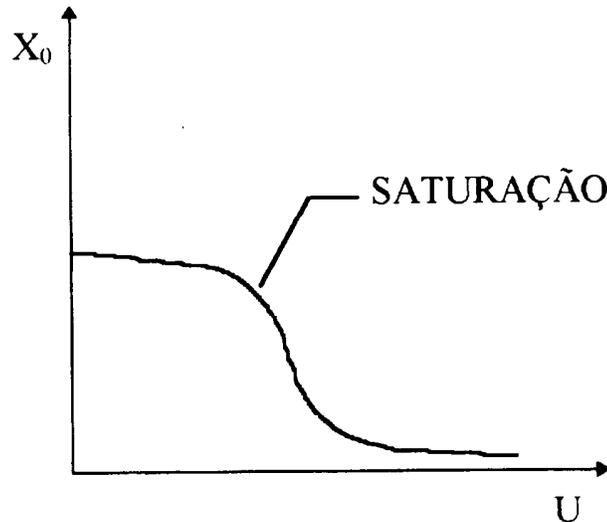


Figura 3 - Variação da reatância magnética de uma bobina em função da tensão [3]

Para fins de análise a curva de saturação da figura 2, pode ser representada por duas retas (figura 4-b) com um determinado grau de inclinação, uma determina a região não-saturada e a outra a região saturada.

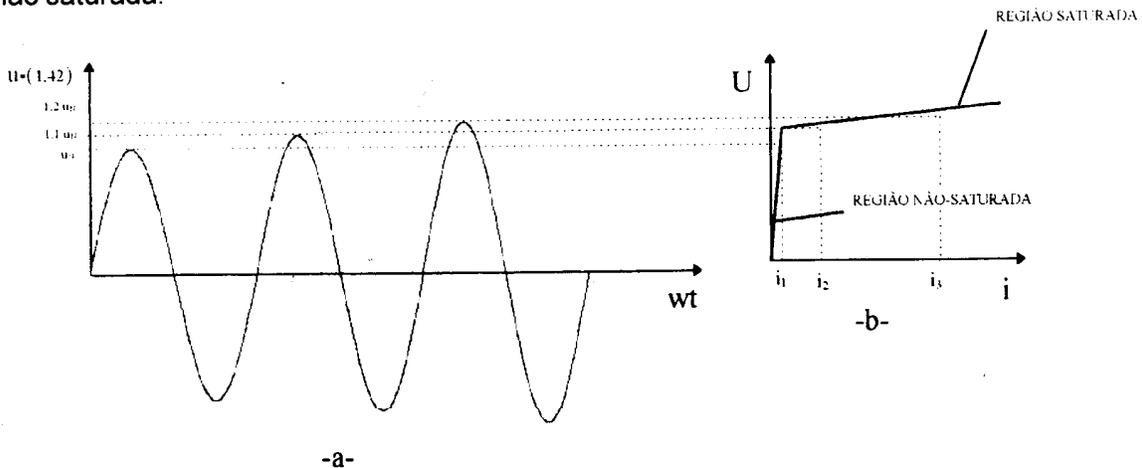


Figura 4 - Relação da tensão aplicada com a curva de saturação do transformador

3 - CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR ("INRUSH")

Os transformadores de potência são projetados de modo que a corrente necessária para manter, em regime permanente, a sua magnetização sob operação normal, é uma pequena fração da corrente nominal, porém no período transitório (energização), entre o instante da aplicação de tensão ao transformador e o estabelecimento, eventual, de uma condição de

regime permanente, a corrente atinge um valor de pico inicial denominado de corrente de "Inrush" que é várias vezes ao da corrente nominal do transformador, podendo atingir valores entre 10 a 14 vezes a sua corrente nominal [1]. Esta situação momentânea pode ocasionar oscilações de tensão nas barras do sistema e até a atuação indevida dos relés instantâneos. O valor atingido de regime transitório depende de:

- Ponto do ciclo da tensão, no qual a chave para o energizamento seria fechada;
- Condições iniciais magnéticas do núcleo, incluindo a intensidade e a polaridade do fluxo residual.

Vale salientar que, caso o sistema de alimentação do transformador esteja operando com níveis de tensão acima dos nominais do transformador, o valor da corrente de "Inrush" será ainda maior que em condições nominais, devido a condição de sobretensão levar o transformador para a região de saturação (ver figura 4).

4 - ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES PRÓXIMOS A BANCO DE CAPACITORES

A energização de transformadores próximos a outros transformadores possuindo banco de capacitores em seu secundário, fornece condição para a saída de operação deste banco de capacitores, através da atuação do relé de proteção instantâneo.

A figura 5 mostra o esquema utilizado para simular o problema. É observado que no momento do chaveamento do transformador T2 (fechamento da chave s_1), estando o transformador T1 operando em regime permanente com um banco de capacitores em seu secundário, aparece uma elevada corrente de energização ($i_2(t)$) que sofre contribuição do sistema e do banco de capacitores instalado no secundário do transformador T1 ($i_1(t)$), esta corrente de energização, provoca uma oscilação de tensão no barramento do transformador em energização. Esta oscilação de tensão (no caso sobretensão) pode levar o transformador a entrar na região dessa saturação com intensidade, elevando-se ainda mais a corrente de energização tanto em amplitude como em duração. A figura 6 ilustra o comportamento da onda de tensão obtidos a partir do sistema da figura 5. Com isto, a contribuição de corrente ($i_1(t)$) a partir do banco de capacitores para a energização do transformador T2, torna-se elevada, fazendo com que possa ocorrer a saída de operação do banco de capacitores do transformador T1, devido a atuação do sistema de proteção.

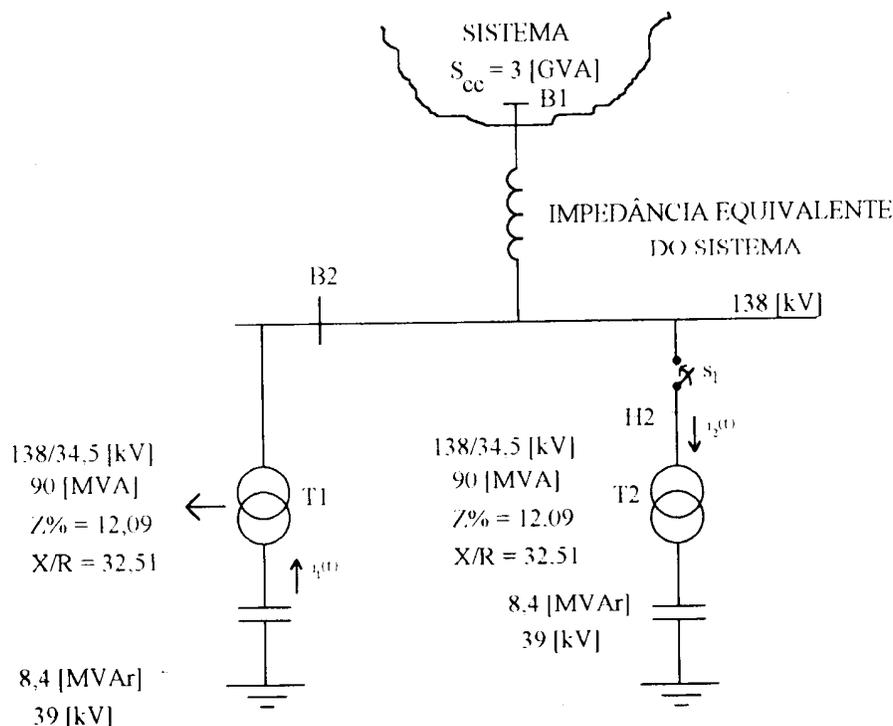


Figura 5 - Esquema utilizado na simulação

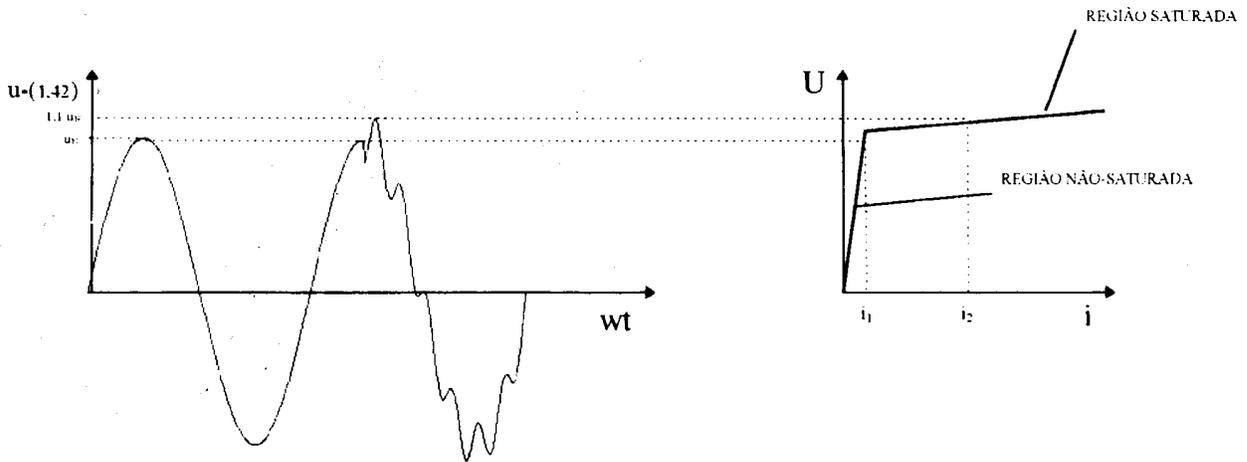
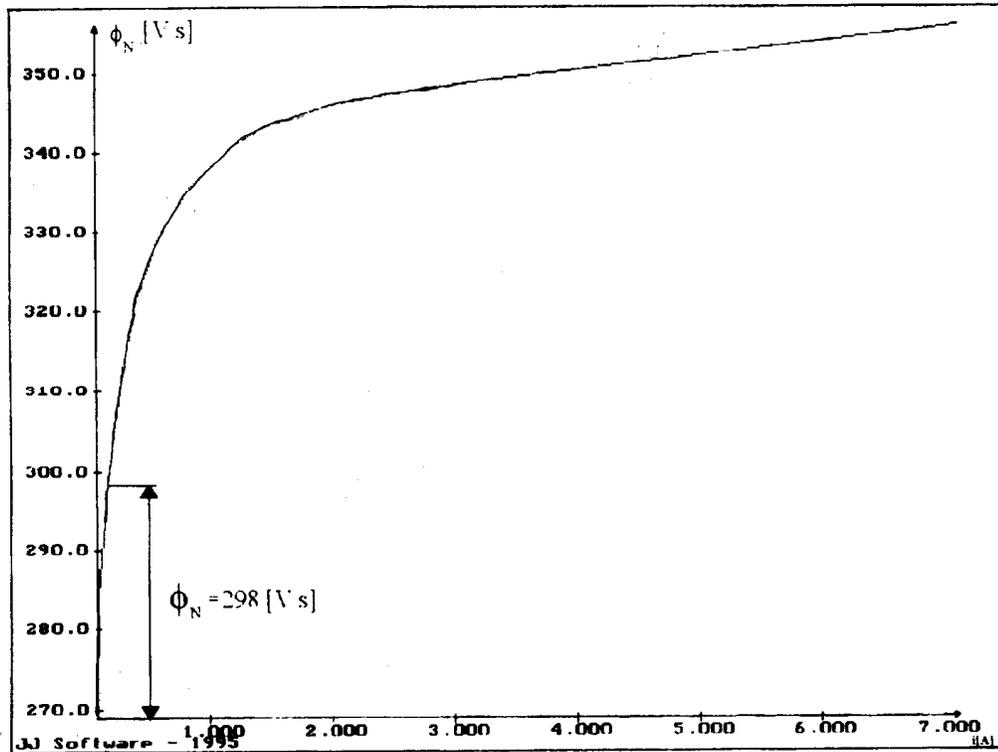


Figura 6 - Comportamento da tensão na energização do transformador T2, evidenciando o problema da tensão com acurva de aturação do transformador para o caso simulado da figura 25

Serão simuladas várias situações que envolvem o fenômeno, tais como, variação da tensão da fonte, magnetismo residual do transformador T2 e ângulo do ciclo da tensão da fonte, magnetismo residual do transformador T2. Estas situações

têm por objetivo observar a oscilação de tensão na barra onde está situado o transformador em energização e a corrente que atravessa o banco de capacitores, bem como a corrente de energização do transformador T2.



A Figura 7 - Curva de saturação do transformador T2, utilizado na simulação.

A tabela 1 mostra o resumo dos casos simulados, as figuras 8, 9 e 10 mostram a tensão no barramento B2, a corrente no banco de capacitores do transformador T1 ($i_1(t)$) e a corrente no transformador T2 ($i_2(t)$) respectiva-

mente, para o caso 8 da tabela 1. A figura 28 ilustra o comportamento da corrente $i_1(t)$ com o transformador T2 sem o banco de capacitores em seu secundário no momento de sua energização [2].

CASOS	TENSÃO EM [pu] DA TENSÃO NOMINAL	ÂNGULO DE CHAVEAMENTO DA ONDA DA TENSÃO	MAGNETISMO RESIDUAL (inicial)	TENSÃO (B2) EM [kV] (valor pico)	CORRENTE (L1-GROUND - $i_1(t)$) EM [A] (valor pico)	CORRENTE EM H2 - $i_2(t)$ EM [A] (valor pico)
1	1,00	30° (CICLO POSITIVO)	0	120,06	753,77	231,93
2	1,05	30° (CICLO POSITIVO)	0	126,89	782,06	21,73
3	1,10	30° (CICLO POSITIVO)	0	116,48	835,80	278,60
4	0,95	30° (CICLO POSITIVO)	0	126,79	683,06	200,81
5	1,00	0° (CICLO POSITIVO)	0	113,39	1493,4	359,21
6	1,00	90° (CICLO POSITIVO)	0	132,89	209,30	132,93
7	1,05	90° (CICLO POSITIVO)	0	133,99	1566,90	379,00
8	1,10	90° (CICLO POSITIVO)	0	136,99	1609,37	398,80
9	1,10	90° (CICLO POSITIVO)	$i=0,09$ [A] $\Phi=284$ [V.S]	136,99	1627,75	398,80
10	1,10	90° (CICLO POSITIVO)	$i=0,168$ [A] $\Phi=299$ [V.S]	136,99	1648,97	398,80
11	1,10	90° (CICLO POSITIVO)	$i=0,298$ [A] $\Phi=313$ [V.S]	136,99	1658,87	398,80

Tabela 1 - Resultados das simulações

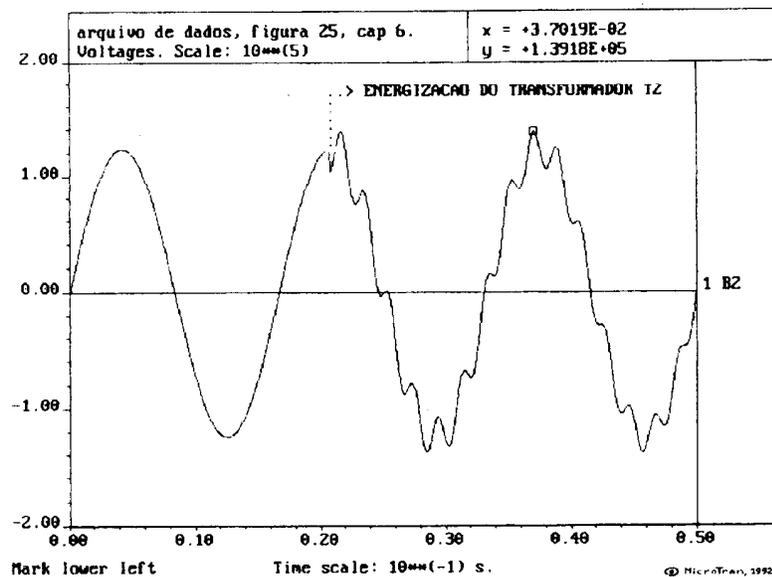


Figura 8 - Simulação do esquema da figura 5, mostrando a tensão na barra B2, para o caso 8 da tabela 1

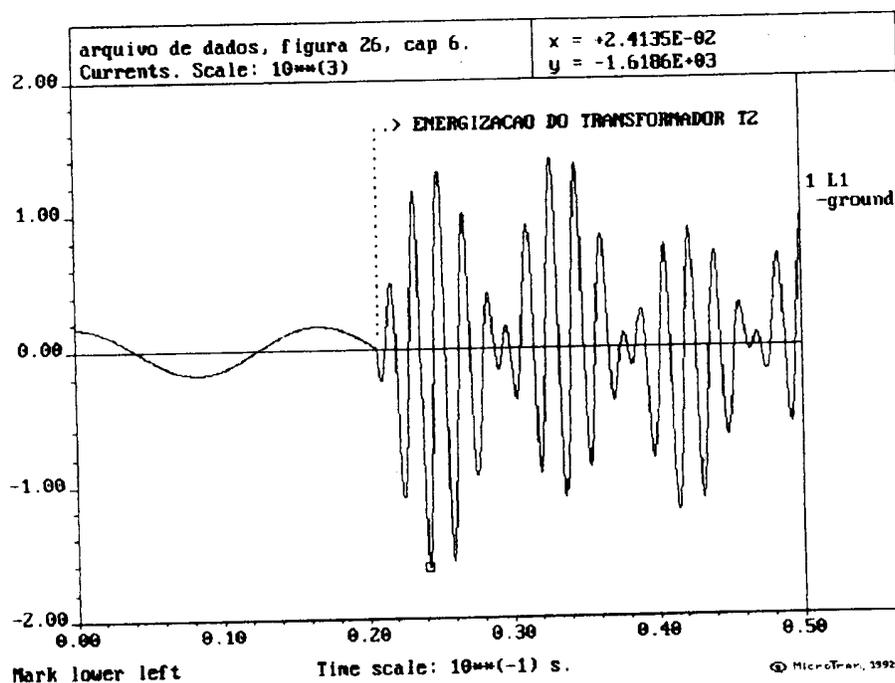


Figura 9 - Simulação do esquema da figura 5, mostrando a corrente na barra L1-GROUND (Banco de capacitores), para o caso 8 da tabela 1

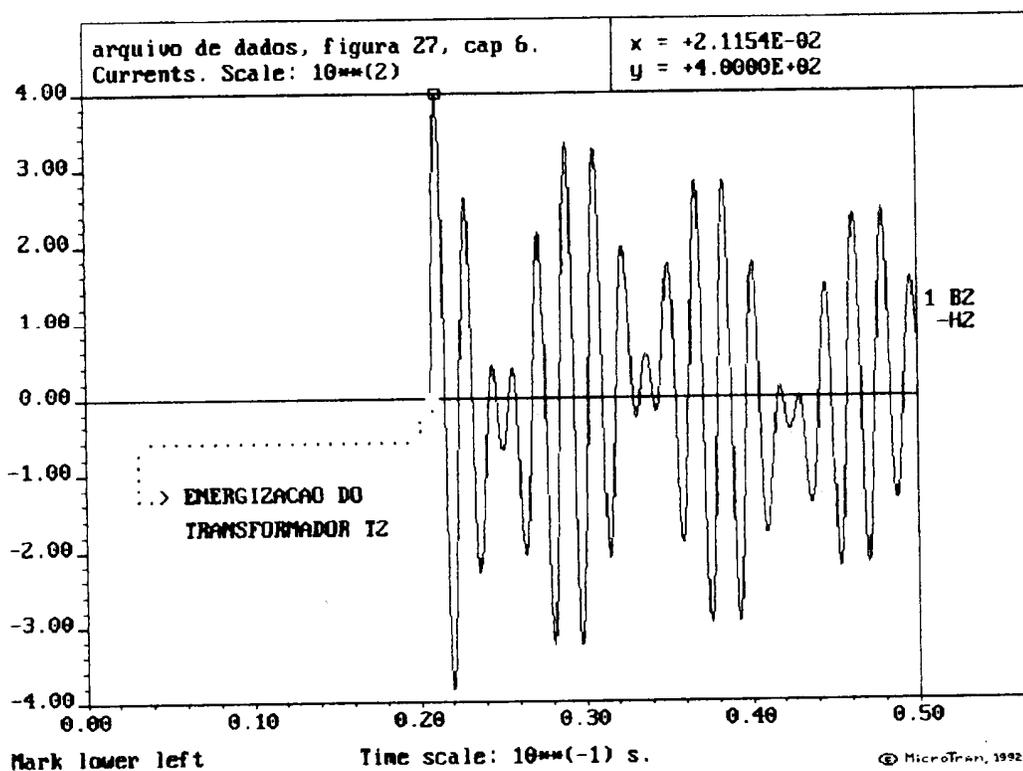


Figura 10 - Simulação do esquema da figura 5, mostrando a corrente na barra B2-H2 (Banco de capacitores), para o caso 8 da tabela 1

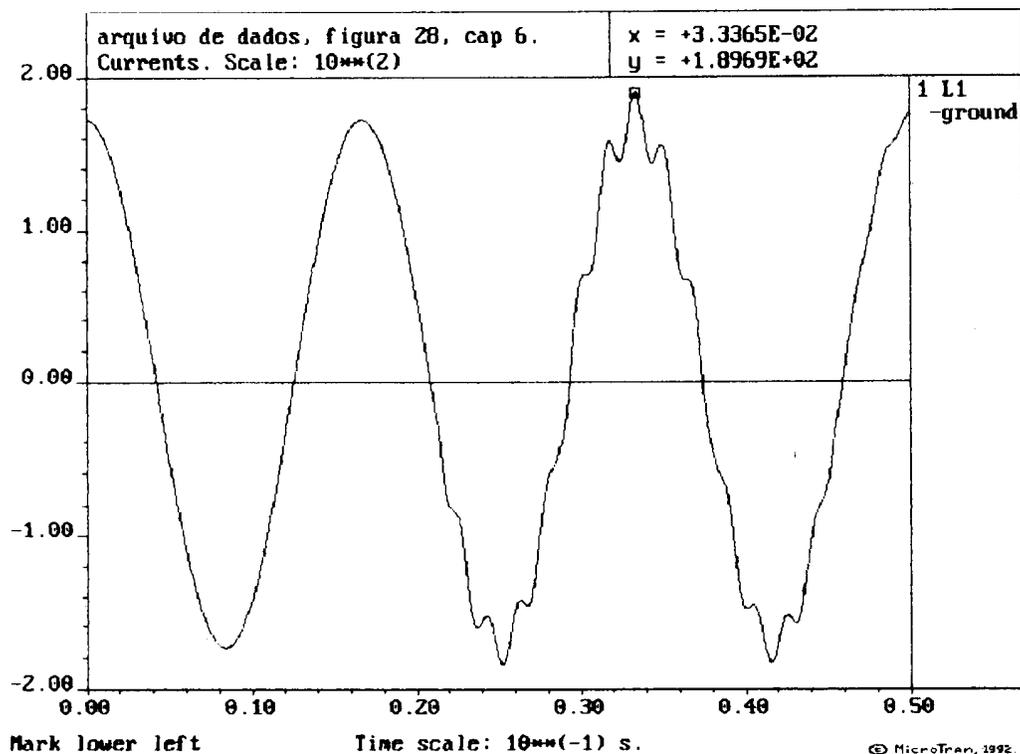


Figura 11 - Simulação do esquema da figura 5, mostrando a corrente na barra L1-GROUND (Banco de capacitores), sem o banco de capacitores no secundário do transformador T2, para o caso 8 da tabela 1

Na figura 11, observa-se uma elevada amplitude da corrente no banco de capacitores instalado no secundário do transformador T1 ($i_1(t)$) no momento da energização do transformador T2, o que implica em cuidados especiais no ajuste dos relés de proteção do banco de capacitores visando evitar a operação indevida.

5 - CONCLUSÃO

A energização de transformadores próximos a banco de capacitores, pode acarretar na atuação incorreta dos relés instantâneos dos bancos de capacitores e/ou de transformadores que possuam banco de capacitores em seu secundário, isto devido as altas correntes envolvidas provocarem oscilações de tensão nas barras onde o transformador está sendo energizado, fazendo com que este entre na região de saturação, e conseqüentemente envolvendo correntes de valores mais elevados do que o

previsto, onde parte desta corrente venha a ser fornecida pelos bancos de capacitores. No caso deste fenômeno vir a acontecer, deve-se retirar de operação no instante da energização do transformador, o banco de capacitores que está causando o surgimento do problema,

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COGO, J. Roberto, “**Correção do Fator de Potência**”, apostila do Curso da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos, pós-graduação, Itajubá, EFEI, 1995.
- BATISTA, José S. Filho, “**Banco de Capacitores na Presença de Harmônicos**”, Dissertação de Mestrado, Itajubá, EFEI, 1995.
- MAMEDE, J. F., “**Manual de Equipamentos Elétricos**”, Vol. I e II, Capacitores de Potência, Editora Livros Técnicos e Científicos LTDA, Rio de Janeiro, São Paulo, 1993.