

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo inicialmente, serão discutidos alguns conceitos referentes à Qualidade de Energia destacando-se um dos itens de qualidade, qual seja desequilíbrios. As normas nacionais e internacionais fornecem elementos para o cálculo de desequilíbrio e índices de conformidade.

Os ensaios experimentais foram realizados no laboratório de transformadores da Universidade Federal de Uberlândia cujo objetivo principal é comprovar a existência de corrente de neutro nas ligações dos enrolamentos secundários dos TC's em estrela, mesmo quando no primário estas não existem por falta de caminho para sua circulação.

Finalmente, são feitos alguns comentários que a respeito dos ensaios experimentais, destacando-se, os efeitos das operações sobre as, correntes transitórias de magnetização dos transformadores e correntes de neutro dos TC's.

4.2 - DESEQUILÍBRIO

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as três fases não apresentam os mesmos valores de tensão ou corrente em módulo ou defasagens angulares entre as fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente [25].

Logo, um sistema trifásico equilibrado, admitindo-se como referência a fase A e seqüência de fase positiva, é dado em pu por:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{V}}_A &= 1,0 \angle 0^\circ \\ \dot{\bar{V}}_B &= 1,0 \angle -120^\circ \\ \dot{\bar{V}}_C &= 1,0 \angle +120^\circ\end{aligned}\tag{4.1}$$

onde está caracterizado, a barra e o ponto indicam um valor por unidade e um fasor, respectivamente.

Como se sabe, as tensões, por vezes, não são perfeitamente equilibradas, isto acontece devido aos desbalanceamentos que aparecem internamente, como o tipo de carga instalada e o tipo da configuração adotada no sistema elétrico tanto nas concessionárias de energia elétrica quanto nos consumidores.

Cargas do tipo monofásicas necessitam ser distribuídas nas três fases de forma que no ponto comum a corrente resultante, ou seja, o somatório das correntes das fases seja igual a zero. O que se tem é uma associação destas, tornando-se impossível prever quais cargas e em que instante estarão em operação. Isto demonstra o grau de complexidade que o sistema pode apresentar e a dificuldade no trabalho de balanceamento ao longo das suas três fases. Este fato faz com que, durante muito tempo, toda a atenção fosse concentrada em solucionar os problemas de quedas de tensão, convivendo-se, então, conscientemente, com os desequilíbrios do sistema. Isto pode ser comprovado pelo fato dos próprios engenheiros de planejamento das concessionárias

trabalharem com um limite de até 2% de desequilíbrio de tensão nos níveis de transmissão (tensões iguais ou superiores a 13,8 kV) em seus estudos. Dessa forma, no ponto de acoplamento comum entre a concessionária e os consumidores, já se considera certo grau de desequilíbrio, com origem nos equipamentos instalados - geradores, transformadores e linhas - respectivamente, nos setores de geração, transmissão e distribuição.

Neste contexto, convém ressaltar que queda de tensão refere-se à condição na qual as tensões apresentam valores em módulo diferentes de 1,0 pu, mantendo-se, porém, a defasagem angular de 120° entre as fases sucessivas.

4.2.1 - MÉTODOS DE CÁLCULO DE DESEQUILÍBRIO

A caracterização de desequilíbrios em sistemas elétricos pode ser feita através de diferentes métodos, conforme a seguir:

4.2.1.1 - COMPONENTES SIMÉTRICAS

Para esta definição, o grau de desequilíbrio é a relação entre os módulos da tensão de seqüência negativa pela tensão de seqüência positiva, como vista na equação (4.2). Este entendimento está baseado no fato de que um conjunto trifásico de tensões equilibradas possui apenas componentes de seqüência positiva, enquanto que na situação desequilibrada, componentes de seqüência negativa e zero se fazem presentes. Para a definição do fator de desequilíbrio utilizando componentes simétricas são considerados apenas os valores das componentes de seqüência negativa e positiva.

$$K = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (4.2)$$

onde

K - Fator de Desequilíbrio

V- - Módulo da tensão de seqüência negativa;

V+ - Módulo da tensão de seqüência positiva.

4.2.1.2 - NORMAS

As normas e recomendações do ONS (*Operador Nacional do Sistema*), NRS 048 (*Norma Sul Africana*) e CIGRÉ (*Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*), aplicam os mesmos métodos de cálculo de desequilíbrios, onde, o fator de desequilíbrio de tensão (K), para fins do estabelecimento de limites, é definido como a relação entre as componentes de seqüência negativa (V-) e positiva (V+) da tensão, expressa em porcentagem desta última componente, como mostra a equação a seguir:

$$K = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (4.3)$$

onde

K - Fator de Desequilíbrio

V- - Módulo da tensão de seqüência negativa;

V+ - Módulo da tensão de seqüência positiva;

Muito embora as recomendações em questão tenham se referido ao desequilíbrio na forma da relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva, ou também, pela expressão:

$$K = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\gamma}}{1 + \sqrt{3 - 6\gamma}}} \quad (4.4)$$

onde:

$$\gamma = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (4.5)$$

e

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} - Módulo das tensões fase-fase

4.2.1.3 - NEMA (National Electrical Manufactures Associantion)

A NEMA estabelece valores nominais e tolerâncias operacionais para as tensões de fornecimento em sistemas elétricos de potência.

Este documento estipula o limite para desequilíbrios de tensão, o fator de desequilíbrio de tensão é definido pela a razão entre o máximo desvio das tensões em relação ao valor médio pela a média aritmética dos módulos das tensões trifásicas, tomando-se como referência às tensões de linha, como mostra a expressão a seguir.

$$FDV\% = \frac{\Delta V_{Máx}}{V_{médio}} \times 100 \quad (4.6)$$

onde

FDV% - Fator de desequilíbrio de tensão, expresso em porcentagem da tensão média.

$\Delta V_{Máx}$ - Maior desvio entre as tensões trifásicas e o valor médio (V_{Med}), expresso em Volt.

$V_{médio}$ - Tensão calculada pela média aritmética das tensões trifásicas, expressa em Volt.

4.2.1.4 – IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

Por fim, o IEEE recomenda que o desequilíbrio trifásico pode ser obtido por uma relação que expressa a maior diferença entre as tensões medidas e a média.

$$FDV\% = \frac{3 \cdot (V_{\max} - V_{\min})}{V_a + V_b + V_c} \cdot 100 \quad (4.7)$$

onde

FDV% - Fator de Desequilíbrio

$V_{\max}$ - Maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

$V_{\min}$ - Menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

V_a , V_b e V_c - Módulo das tensões trifásicas;

O levantamento bibliográfico efetuado, a respeito da metodologia para se calcular o fator de desequilíbrio de tensão, teve como resultado o quadro comparativo mostrado na Tabela 4.1 [37].

Tabela 4.1 – Expressões para o cálculo de desequilíbrio de tensão.

MÉTODO	EXPRESSÕES
COMPONENTES SIMÉTRICAS	$K = \frac{V_-}{V_+} \times 100$
ONS	$K = \frac{V_-}{V_+} \times 100$ ou
CIGRÉ	
NRS 048	$K = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\gamma}}{1 + \sqrt{3 - 6\gamma}}}$ sendo $\gamma = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$
NEMA	$FDV\% = \frac{DV_{Max}}{V_{Med}} \times 100$
IEEE	$FDV\% = \frac{3 \cdot (V_{\max} - V_{\min})}{V_a + V_b + V_c} \times 100$

Dentre todas as expressões encontradas a mais apropriada é o Método de Componentes Simétricas, que consiste da relação entre as componentes de sequência negativa e positiva das tensões trifásicas. Diante disso, surgem as demais expressões alternativas, as quais consideram apenas os módulos das tensões trifásicas. Entretanto, de forma a antever eventuais discrepâncias entre os valores encontrados para os desequilíbrios, conforme a expressão empregada

há a necessidade de maiores investigações para a fundamentação de qualquer sugestão além daquela que emprega a relação entre as componentes simétricas.

Para tanto, foram executadas algumas simulações onde, em um sistema trifásico típico, foram impostos desequilíbrios os quais, utilizando o método das componentes simétricas, resultariam em níveis de 0 a 10%. A partir das várias expressões mostradas na tabela 4.1, foram calculados os índices de fator de desequilíbrio de tensão, para cada desequilíbrio imposto. Tais resultados encontram-se ilustrados na figura 4.1 e seus respectivos valores encontram-se na tabela 4.2.

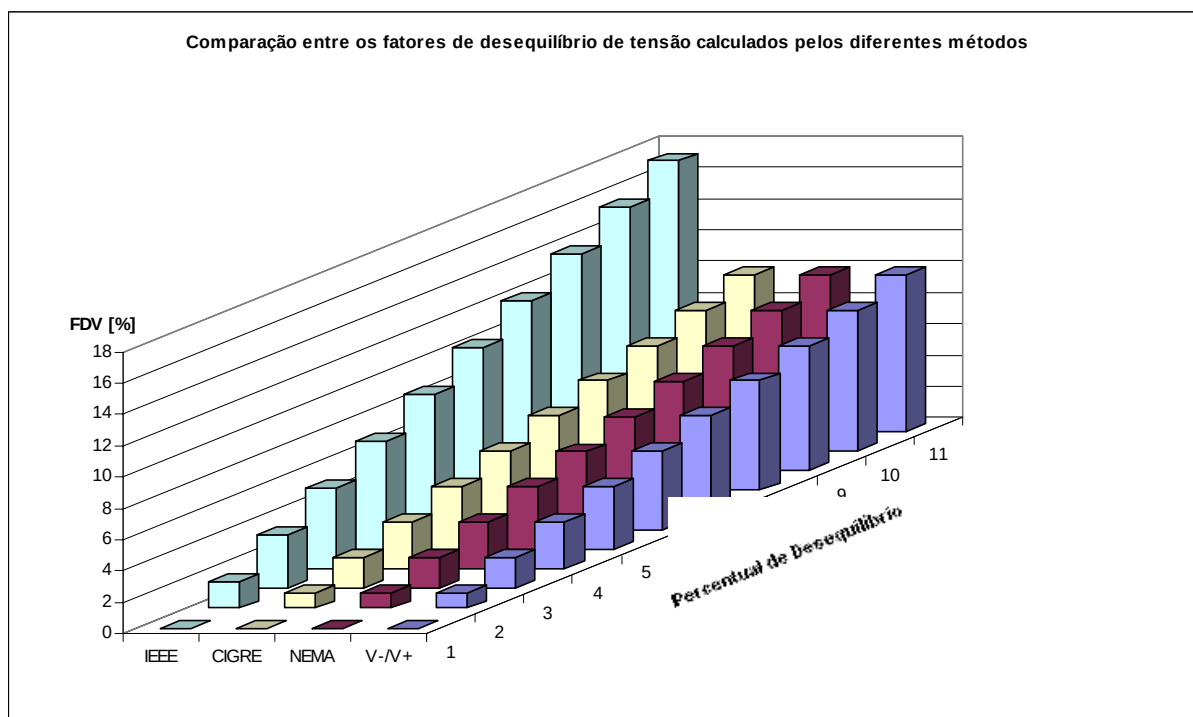


Figura 4.1 - Comparação entre os fatores de desequilíbrio de tensão calculados pelos diferentes métodos.

Tabela 4.2 – Valores de níveis de desequilíbrio
FATOR DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO (%)

V-/V+	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00
NEMA	0,001	0,985	1,984	2,985	3,982	4,985	5,978	6,972	7,985	8,983	9,982
CIGRE	0,001	1,001	2,001	3,001	4,001	5,001	6,001	7,001	8,001	9,001	10,001
IEEE	0,002	1,734	3,466	5,197	6,926	8,654	10,380	12,104	13,825	15,543	17,258

Através da Figura 4.1 pode-se observar que, a expressão cujo resultado mais se aproxima para o cálculo do fator de desequilíbrio, definida pelas componentes simétricas, corresponde à proposta oriunda da CIGRÉ e utilizada pelas recomendações/normas ONS e NRS-048. A expressão recomendada pela NEMA é aquela que indica um FDV% um pouco menor, uma vez que considera o maior desvio em relação à média. Por outro lado, a equação fornecida pelo IEEE [38] amplifica o referido índice de desequilíbrio, já que leva em conta o desvio entre os valores máximos e mínimos.

Portanto, após esses comentários a respeito dos possíveis métodos de cálculos de fatores de desequilíbrios, apesar de não ter uma norma ou recomendação para cálculo de desequilíbrio de impedâncias optou-se, entre eles, pela técnica recomendada pela norma NEMA, para ser empregada nesta dissertação o cálculo do grau de desequilíbrio das impedâncias conectadas ao secundário dos TC's. Ou seja, o grau de desequilíbrio das impedâncias é estimado com base no desvio máximo em relação a da média aritmética das impedâncias das três fases dividido pela média aritmética das impedâncias nas três fases, expresso em porcentagem.

$$\text{Grau de Desequilíbrio(\%)} = \left(\frac{\text{Desvio Médio da Média das Impedâncias}}{\text{Média das Impedâncias}} \right) \times 100 \quad (4.8)$$

4.3 - ENSAIOS

Os ensaios tiveram por objetivo analisar uma possibilidade de operação indevida da proteção de corrente de seqüência zero (fuga para terra), apresenta-se a seguir, situação criada em laboratório nas quais a corrente de retorno pela terra, ou corrente residual, podem aparecer. Tal situação corresponde ao instante da energização de transformadores quando a corrente de *inrush* pode levar ou

não a saturação dos TC's. Neste caso, o erro de relação pode apresentar uma situação de corrente no secundário dos TC's não correspondendo à devida proporção no primário. As alternativas que poderão conduzir a erros nos TC's e distorções nas correntes do secundário são:

- Elevado pico de corrente em uma das fases, fazendo com que o TC atinja a tensão de saturação;
- Desbalanceamento da carga no secundário dos TC's, originando correntes desequilibradas.

4.3.1 - DESCRIÇÃO DOS TESTES

Os testes foram realizados no Laboratório de Transformadores da Universidade Federal de Uberlândia.

Os ensaios foram realizados conforme é demonstrado pela figura 4.2.

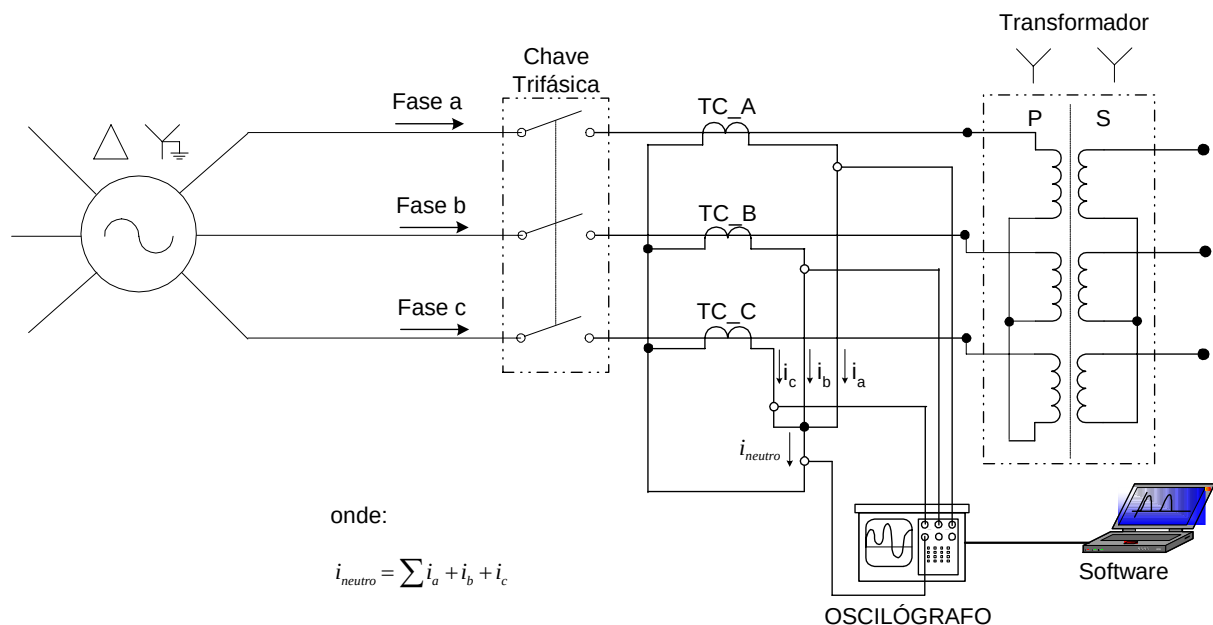


Figura 4.2 - Diagrama do sistema em estudo.

O esquema da figura 4.2, o transformador de potência é conectado ao sistema de tensão através de cabos, por sua vez os mesmos são conectados em série com o enrolamento primário dos TC's em cada fase e por si, ligados a uma chave trifásica. Essa chave é fechada e depois da energização do transformador está em regime permanente, o oscilógrafo é “trigado” manualmente, de forma que as correntes medidas (i_a , i_b , i_c e i_{neutro}) possam ser adquiridas. Depois de realizado o primeiro ensaio, foi aplicado nos terminais secundários dos TC's um desequilíbrio em suas cargas de 10%, 20%, 30%, 50% e 70%. Assim constatando a presença da corrente de neutro, responsável pela má atuação dos relés de proteção. É de se ficar bem claro, que a ordem dos valores de impedâncias apresentados nas fases dos transformadores de corrente, são os mesmos utilizados durante os ensaios.

Os equipamentos utilizados para os ensaios experimentais são os seguintes:

- Bancada como fonte de alimentação, de 220/220V ou 127/127V;
- Transformador trifásico de um nível de tensão de 127V e de potência nominal de 15 [kVA], e seus enrolamentos podem ser ligados em estrela ou triângulo;
- Chave faca trifásica;
- Três transformadores de corrente de relação de 10:1A, 15VA e relação de exatidão de 0,2% do fabricante YOKOGAWA ELETRIC WORKS LTDA;
- Oscilógrafo fabricado pela REASON, é um registrador de perturbações portátil que permite a aquisição de sinais de tensão e corrente alternadas, sinais de corrente contínua (típico - 4 a 20 mA de transdutores de potência, e outros), frequência e tempo, sendo ideal para tarefas de oscilografia, como registro de formas de onda. Os registros de forma de onda são usados para registros de transitórios rápidos como: curto-circuitos energização de

transformadores, chaveamento de linhas, banco de capacitores, e entre outros;

- Cabo de transmissão dados, um par trançado sem blindagem do tipo UTP (*Unshielded Twisted Pear*) da categoria 3. Essa categoria especifica a taxa de transmissão, compatibilidade eletromagnética e etc;
- Microcomputador, onde está instalado o software, responsável pela plotagem das formas de onda, pela comunicação e configuração do equipamento.

4.3.2 - CASOS

Caso Base

Consiste na energização do transformador de potência operando a vazio, e com as cargas no enrolamento secundário dos TC's equilibradas. A seguir é apresentado o método de cálculo de desequilíbrio.

Carga nominal em seu secundário é de:

$$Z_a = Z_b = Z_c = 0,100 \, \Omega$$

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,100 + 0,100 + 0,100}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,100 \, \Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0 \, \Omega}{0,100 \, \Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 0,00 \, \%$$

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.3 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

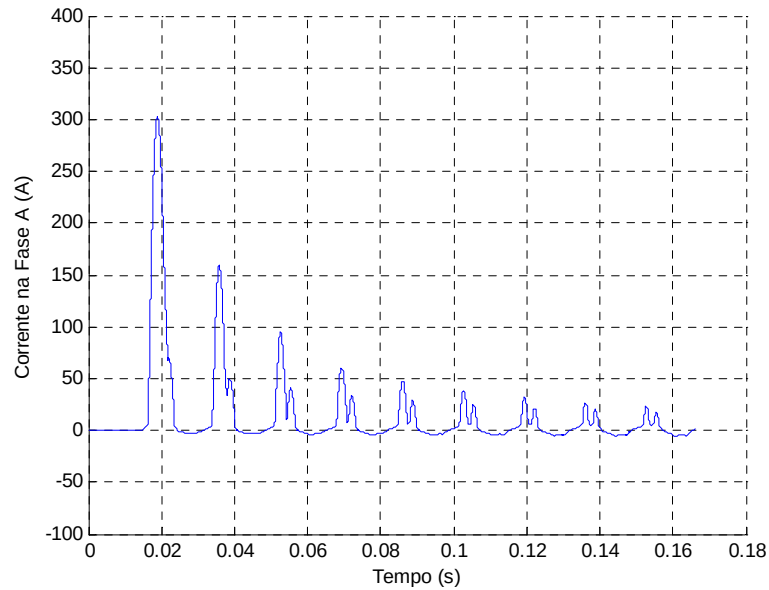


Figura 4.3 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Pode-se observar que na fase A do lado de alta, obteve-se uma corrente de *inrush* com um pico de 303,84 A e logo depois sofreu um amortecimento gerado pela impedância do sistema ao qual o transformador de potência foi conectado.

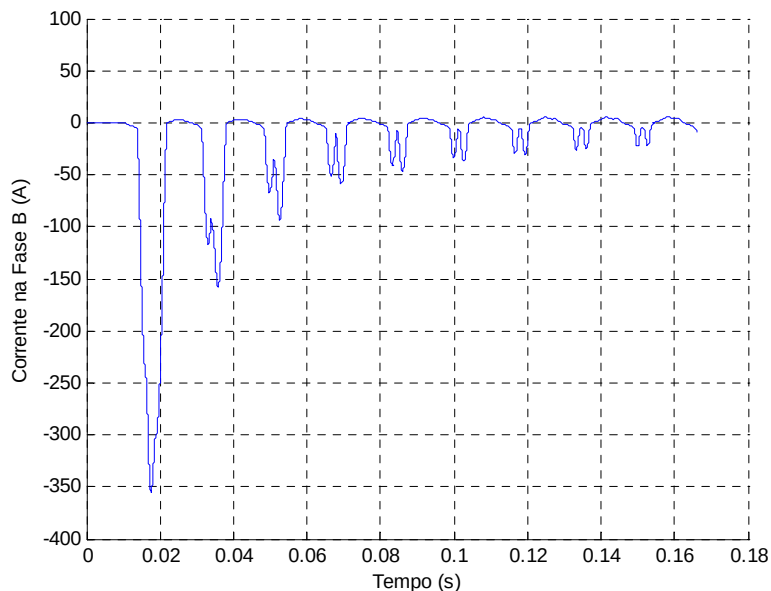


Figura 4.3 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

Na figura 4.3 (b), ilustra a forma de onda durante a energização do transformador de potência da fase B do lado de alta, porém sua corrente de pico foi de -355,620 A.

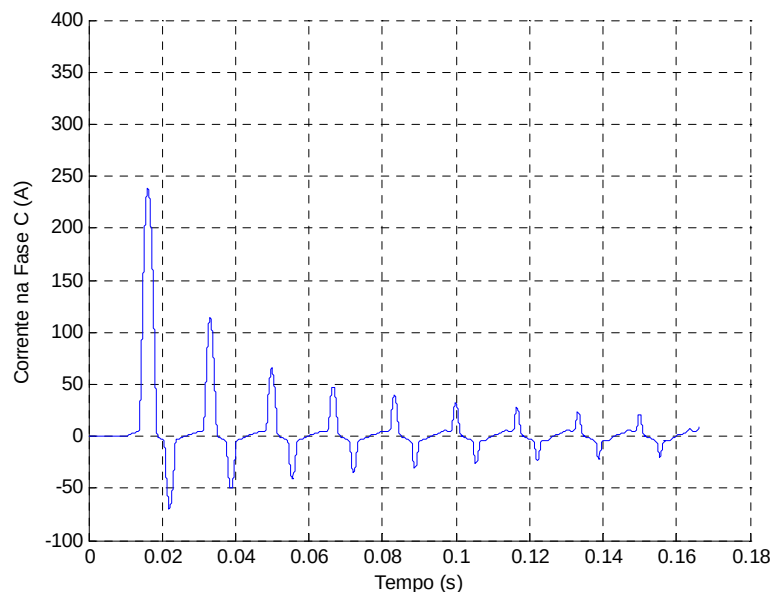


Figura 4.3 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

Como se observa, a figura 4.3 (c) corresponde à forma de onda da corrente de *inrush* da fase C do lado de alta. Essa forma de onda foi originada devido a um possível acoplamento magnético nos enrolamentos do transformador de potência, com uma corrente de pico de 239,70 A.

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.4 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

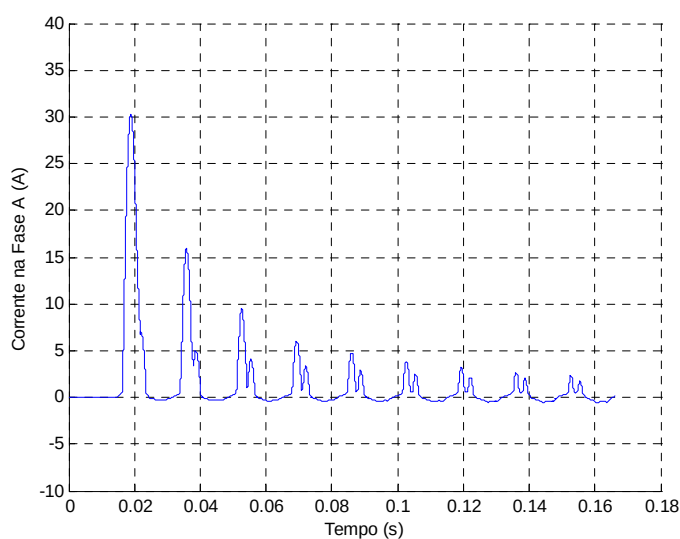


Figura 4.4 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

A figura 4.4 (a) ilustra a forma de onda da fase A no enrolamento secundário do TC, onde se atingiu um valor de corrente de pico de 30,326 A.

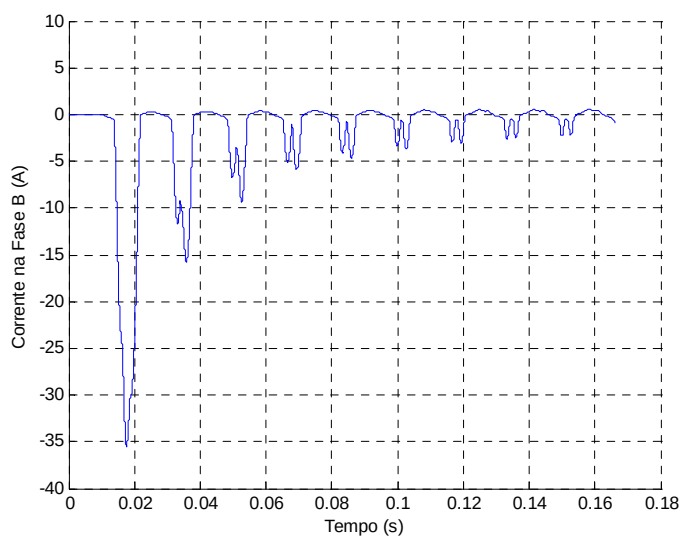


Figura 4.4 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A figura 4.4(b) mostra a corrente de energização no secundário do TC de -35,493 A na fase B, sua forma de onda sofre um amortecimento atribuído pela parte resistiva do condutor que sai da subestação e alimenta o laboratório onde foram realizados os ensaios.

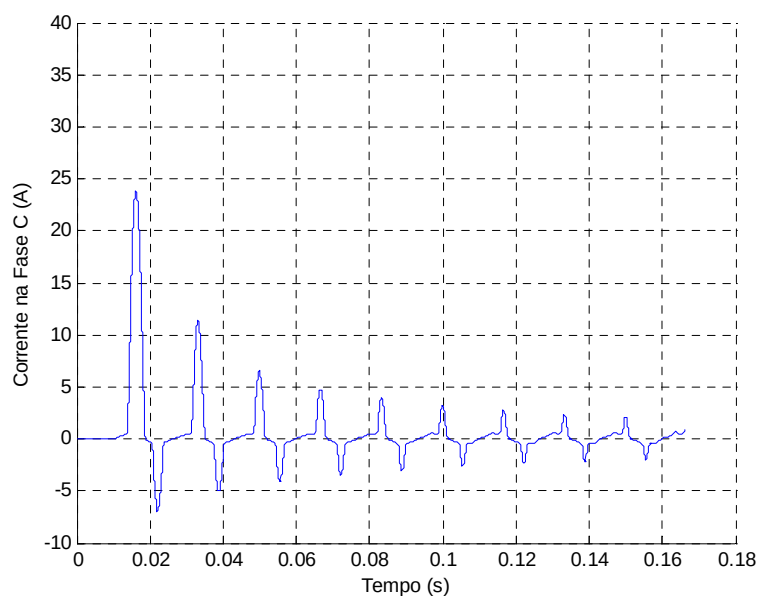


Figura 4.4 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A figura 4.4 (c) ilustra a forma de onda da corrente de *inrush* no enrolamento secundário do TC correspondente à fase C, apresentas assim como no enrolamento do primário, um possível acoplamento interno nos enrolamentos do transformador de potência 23,937 A.

A figura 4.5 mostra a corrente de seqüência zero ou corrente residual, como para este caso não foi aplicado nenhum desequilíbrio em suas impedância no secundário dos TC's, por isso o oscilógrafo não registrou a forma de onda.

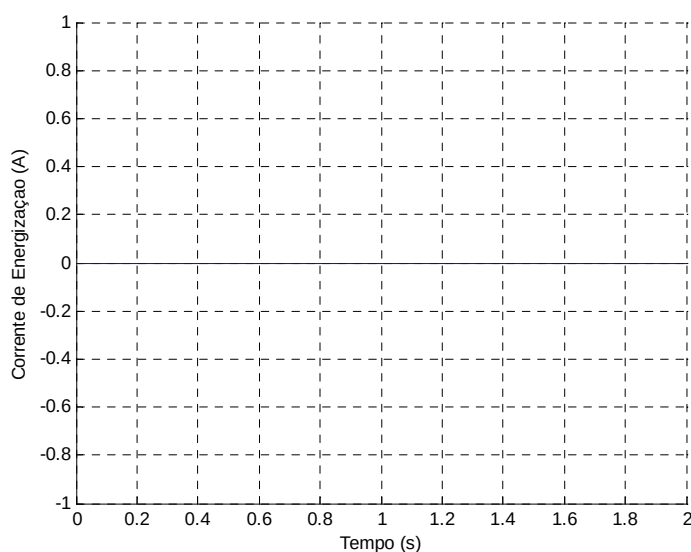


Figura 4.5 - Corrente transitória de magnetização - neutro.

O gráfico da figura 4.6, mostra a diferença percentual entre o enrolamento primário em relação ao enrolamento secundário dos três TC's.

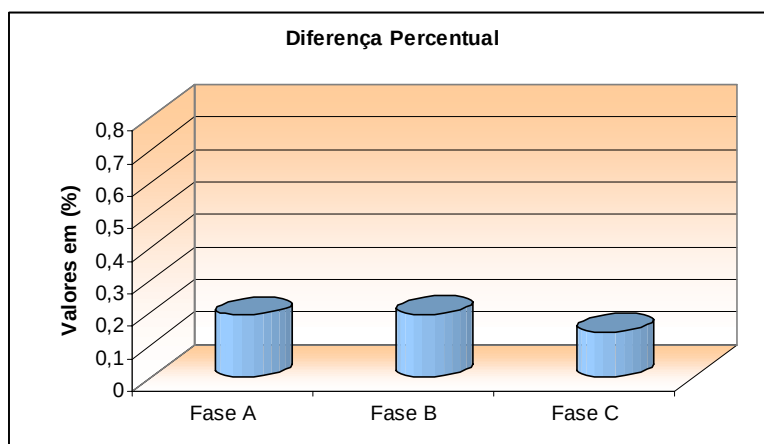


Figura 4.6 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de *inrush*. Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A).

Caso A

Assim como o caso base, o Caso a consiste na energização de um transformador de potência com operação a vazio, porém, com as cargas no enrolamento secundário dos TC's desequilibradas em 10 % como é apresentado a seguir.

Carga nominal em seu secundário de:

$$Z_a = 0,180 \, \Omega$$

$$Z_b = 0,220 \, \Omega$$

$$Z_c = 0,200 \, \Omega$$

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,180 + 0,220 + 0,200}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,2 \, \Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,02 \, \Omega}{0,2 \, \Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 10,00 \, \%$$

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.7 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

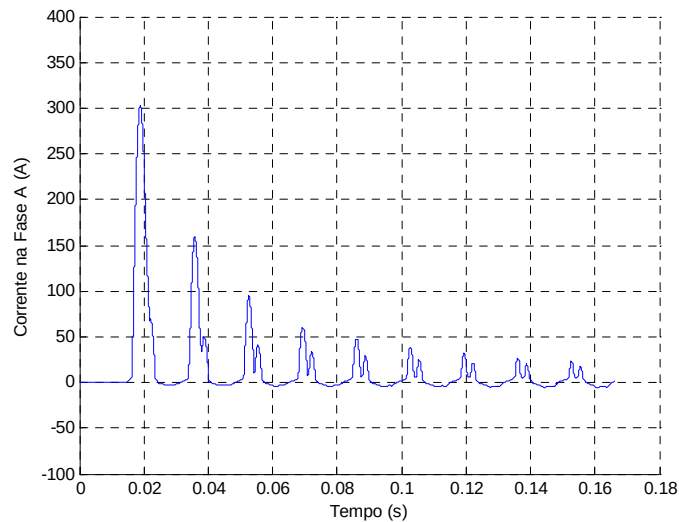


Figura 4.7 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Na figura 4.7 (a), pode-se observar que na fase A do lado de alta, obteve-se uma corrente de *inrush* com um pico de 303,170 A e logo depois sofreu um

amortecimento gerado pela impedância do sistema ao qual o transformador de potência foi conectado.

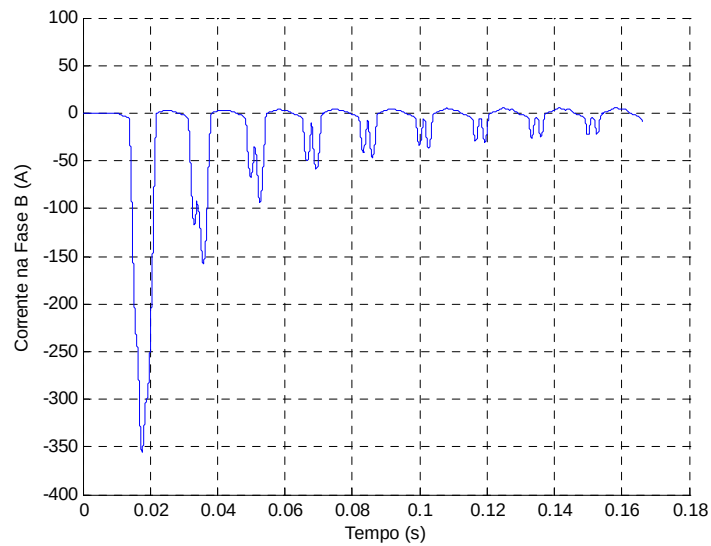


Figura 4.7 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

Na figura 4.7 (b), é visto também a forma de onda durante a energização do transformador de potência da fase B do lado de alta, porém sua corrente de pico foi de -355,860 A.

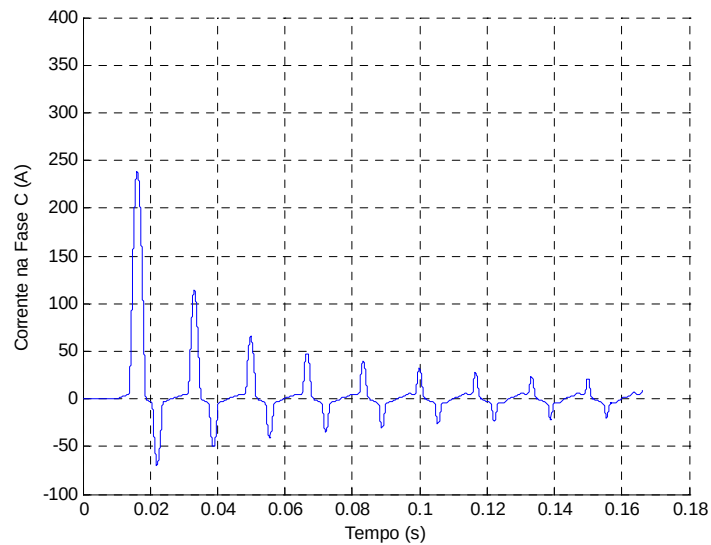


Figura 4.7 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

Como se observa, a figura 4.7 (c) corresponde à forma de onda da corrente de *inrush* da fase C do lado de alta, com uma corrente de pico de 238,270 A.

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.8 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

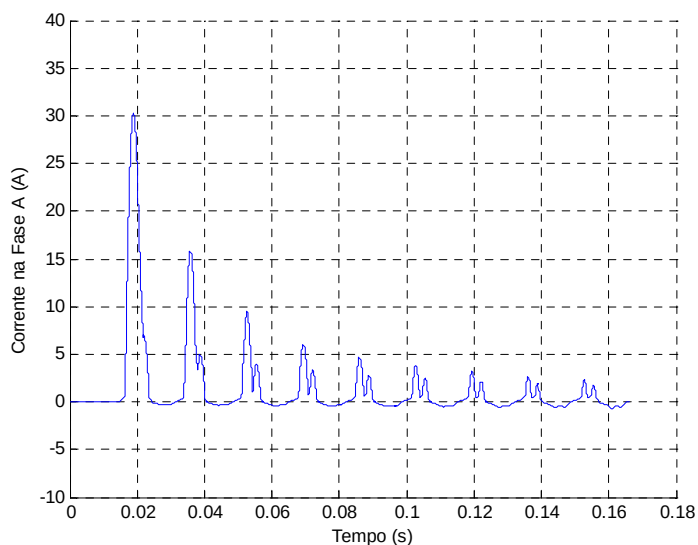


Figura 4.8 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

A figura 4.8 (a) mostra a forma de onda da fase A no enrolamento secundário do TC, onde se atingiu um valor de corrente de pico de 30,218 A.

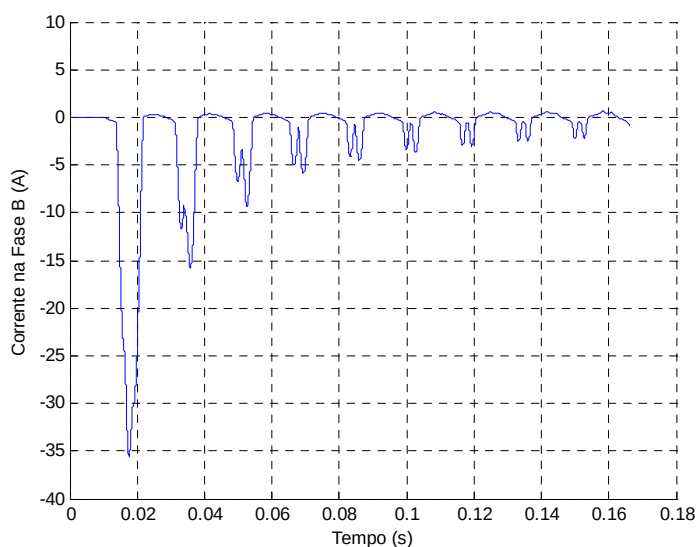


Figura 4.8 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A figura 4.8 (b) ilustra a corrente de energização no secundário do TC de -35,512 A na fase B, sua forma de onda sofre um amortecimento atribuído à parte resistiva do condutor que sai da subestação e alimenta o laboratório de transformadores.

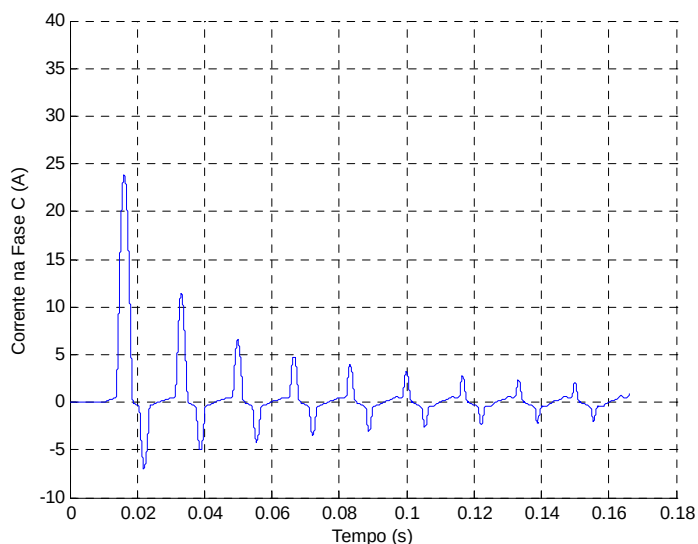


Figura 4.8 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A figura 4.8 (c) mostra também a forma de onda da corrente de *inrush* no enrolamento secundário do TC correspondente à fase C com o primeiro pico de 23,712 A.

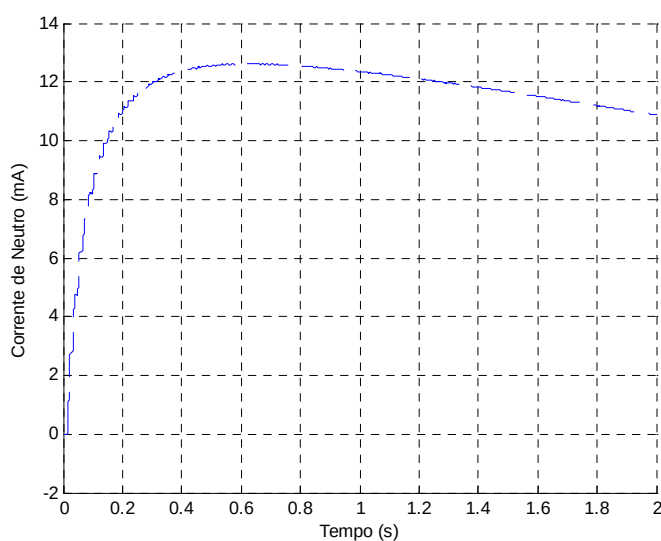


Figura 4.9 - Corrente transitória de magnetização em mA - neutro.

Nesta situação, a figura 4.9 mostra o surgimento de uma corrente transitória de neutro com um valor máximo 12,630 mA, que está relacionada com o desequilíbrio percentual das cargas nominais dos TC's e também pelo processo de energização do transformador, que neste caso opera a vazio e é alimentado pela linha 127 V.

A figura 4.10, ilustra a diferença percentual dos enrolamentos primário e secundário dos TC's levando como referência o enrolamento secundário.

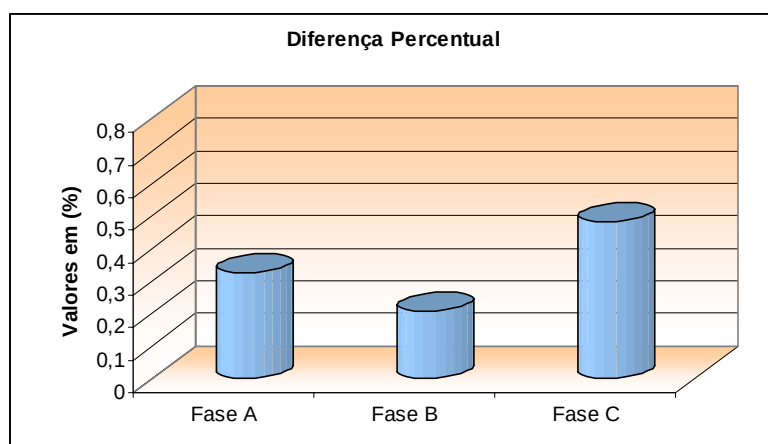


Figura 4.10 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de *inrush*. Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A).

Caso B

Foi aplicado desequilíbrio de 20 % entre as cargas no enrolamento secundário dos TC's e energizado o transformador de potência a vazio.

Carga nominal em seu secundário de:

$$Z_a = 0,160 \, \Omega$$

$$Z_b = 0,240 \, \Omega$$

$$Z_c = 0,200 \, \Omega$$

Cálculo do desequilíbrio percentual

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,160 + 0,240 + 0,200}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,2 \, \Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,04 \, \Omega}{0,2 \, \Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 20,00 \, \%$$

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.11 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

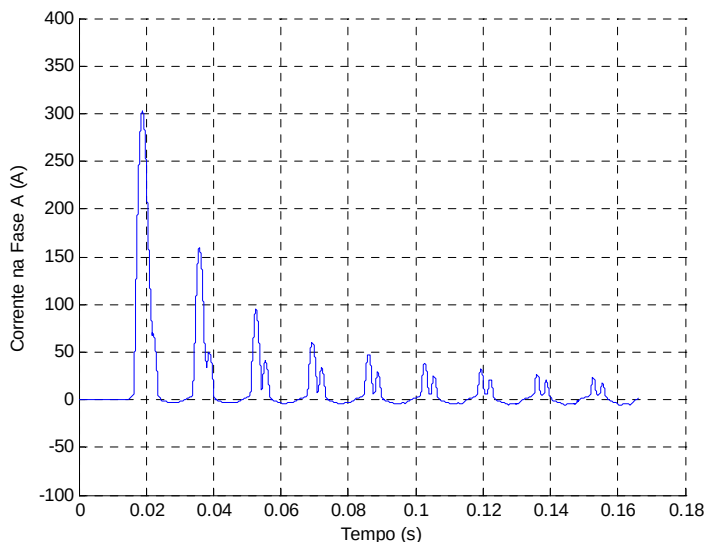


Figura 4.11 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Na figura 4.11 (a), pode-se observar que na fase A do lado de alta, obteve-se uma corrente de *inrush* com um pico de 302,420 A e logo depois sofreu um amortecimento gerado pela impedância do sistema ao qual o transformador de potência foi conectado.

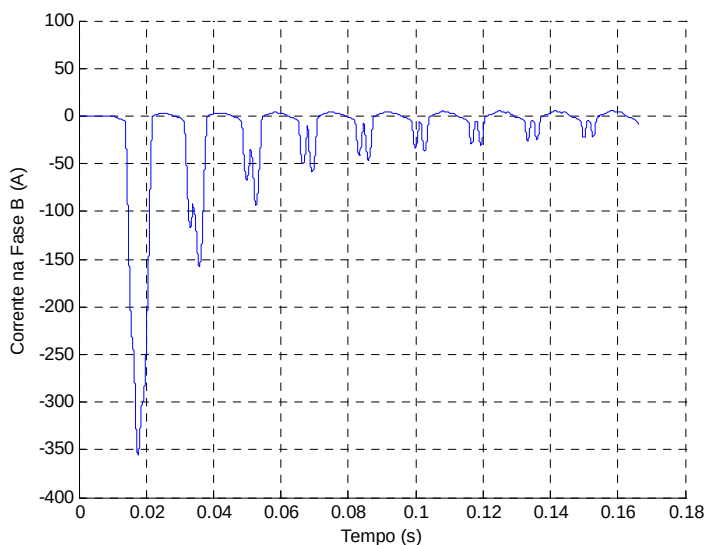


Figura 4.11 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

Na figura 4.11 (b), a forma de onda de energização do transformador de potência da fase B do lado de alta, sua corrente de pico foi de -356,230 A.

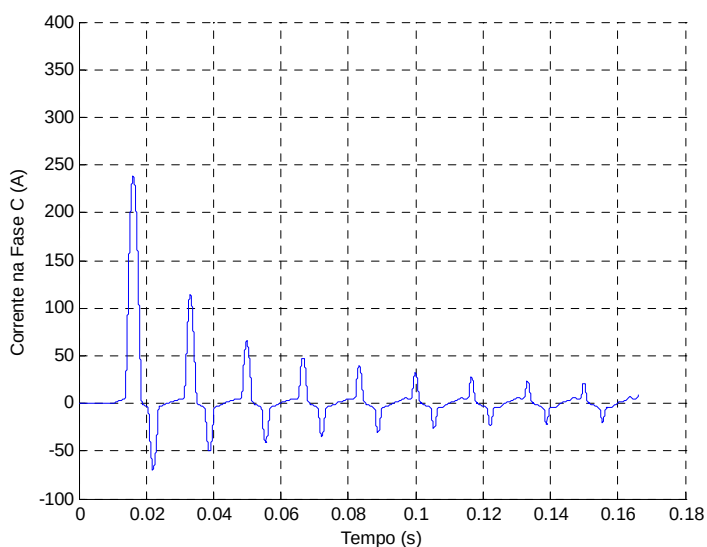


Figura 4.11 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

Como se observa, a figura 4.11 (c) corresponde à forma de onda da corrente de *inrush* da fase C do lado de alta, corrente de pico de 237,840 A.

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.12 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

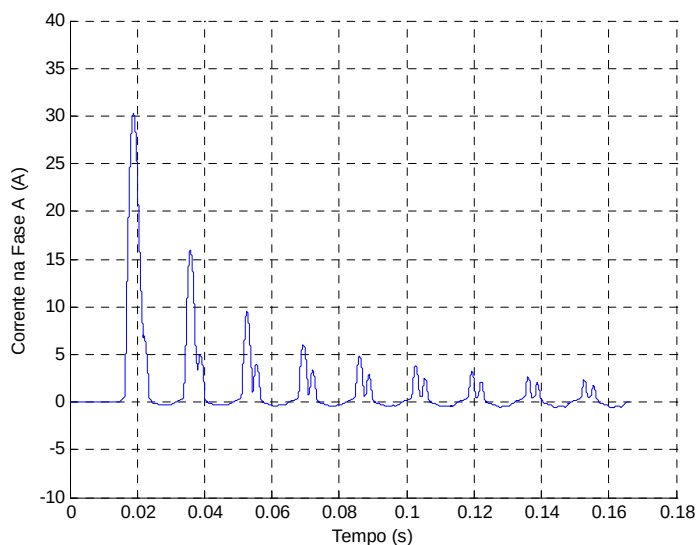


Figura 4.12 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

A figura 4.12 (a) mostra a forma de onda da fase A no enrolamento secundário do TC, onde se atingiu um valor de corrente de pico de 30,156 A.

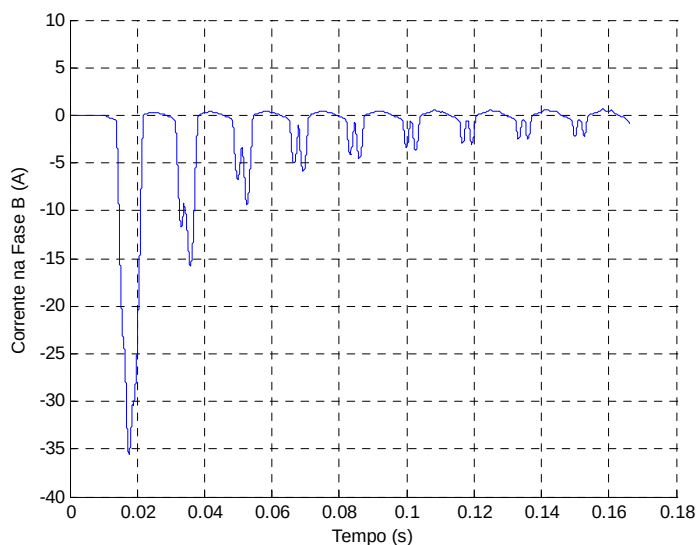


Figura 4.12 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A figura 4.12 (b) ilustra a corrente de energização no secundário do TC de -35,523 A na fase B, assim como as demais, sua forma de onda sofre um amortecimento devido à parte resistiva do cabo que alimenta o transformador.

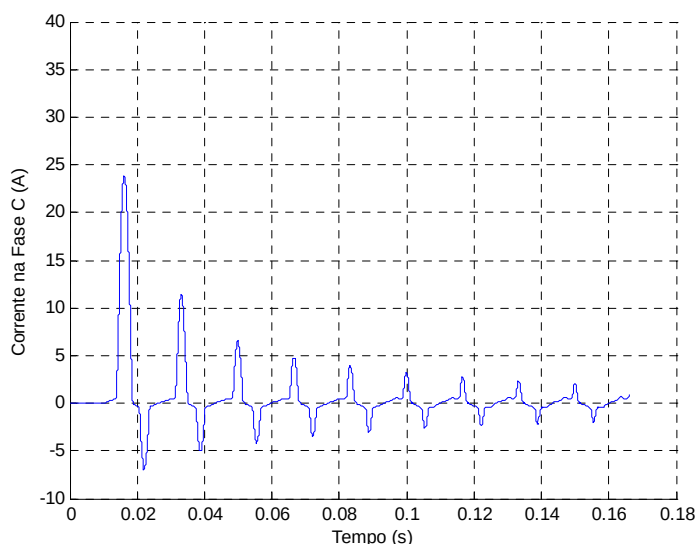


Figura 4.12 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A figura 4.12 (c) mostra também a forma de onda da corrente de *inrush* no enrolamento secundário do TC correspondente à fase C, com um valor de pico de 23,682 A.

Nesta situação, a figura 4.13 mostra o surgimento de uma corrente transitória de neutro com um valor máximo de 25,290 mA, que também assim como o caso anterior está relacionado com o desequilíbrio percentual das cargas nominais dos TC's e pelo processo de energização do transformador, que neste caso opera a vazio e é alimentado pela linha 127 V.

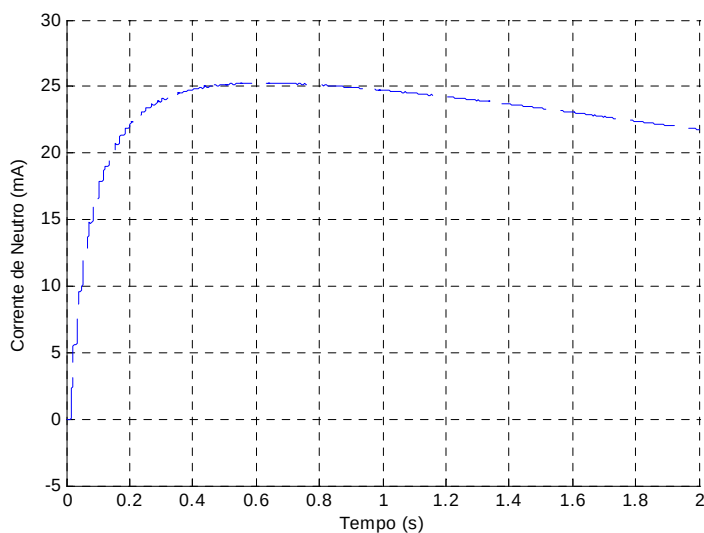


Figura 4.13 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

O gráfico da figura 4.14, mostra a diferença percentual dos enrolamentos primário e secundário dos TC's levando como referência o enrolamento secundário.

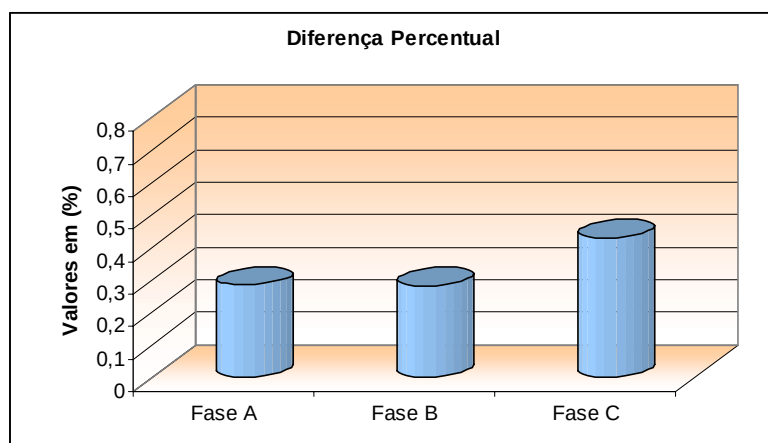


Figura 4.14 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de *inrush*. Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A).

Caso C

O método de ensaio é o mesmo aplicado nos ensaios anteriores, o que difere é o nível de desequilíbrio aplicado nos terminais dos enrolamentos secundários dos TC's que neste caso é da ordem de 30%.

Carga nominal em seu secundário de:

$$Z_a = 0,140 \, \Omega$$

$$Z_b = 0,260 \, \Omega$$

$$Z_c = 0,200 \, \Omega$$

Cálculo do desequilíbrio percentual

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,140 + 0,260 + 0,200}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,2 \, \Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,06 \, \Omega}{0,2 \, \Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 30,00 \, \%$$

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.15 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

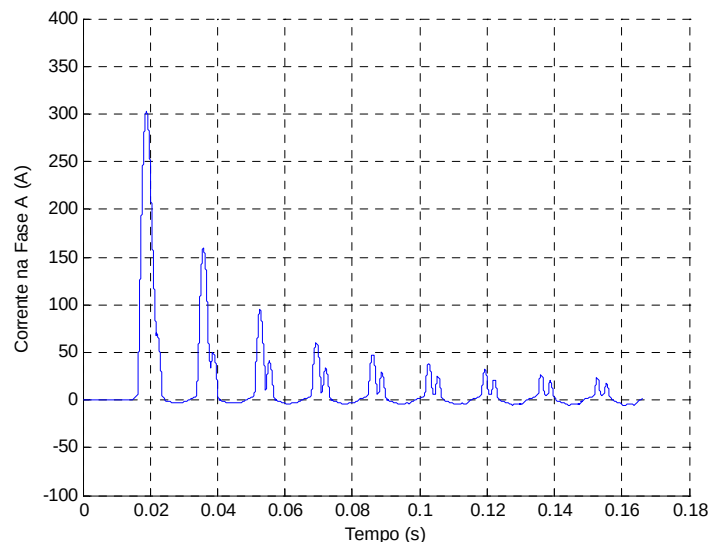


Figura 4.15 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Pode-se observar que na fase A do lado de alta, obteve-se uma corrente de *inrush* com um pico de 302,580 A.

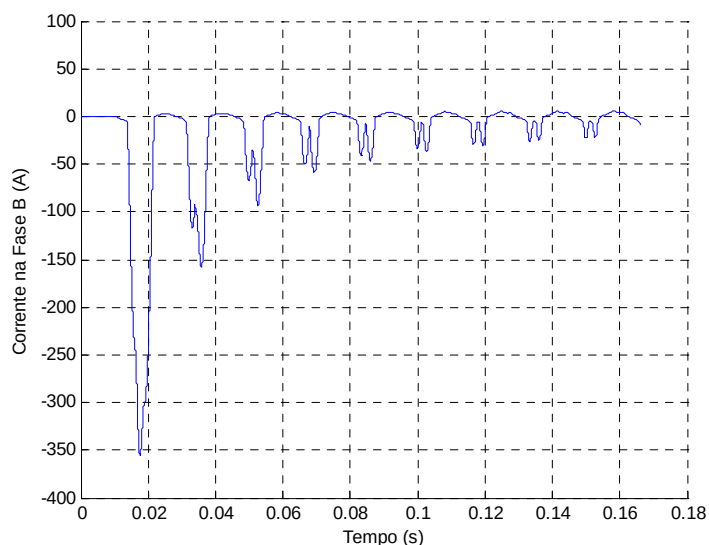


Figura 4.15 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

Na figura 4.15(b), é visto também a forma de onda durante a energização do transformador de potência da fase B do lado de alta, porém sua corrente de pico foi de -354,830 A.

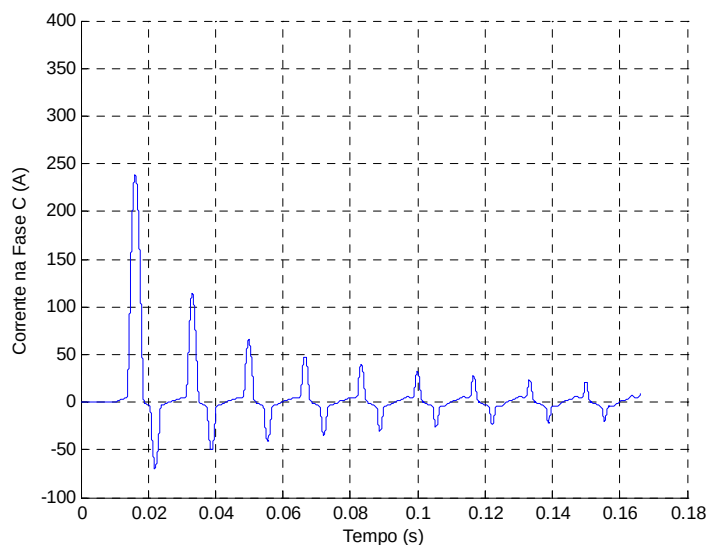


Figura 4.15 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

Como se observa, a figura 4.15 (c) corresponde a forma de onda da corrente de *inrush* da fase C do lado de alta. Essa forma de onda foi originada devido a um possível acoplamento magnético em seus enrolamentos, com uma corrente de pico de 238,780 A.

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.16 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

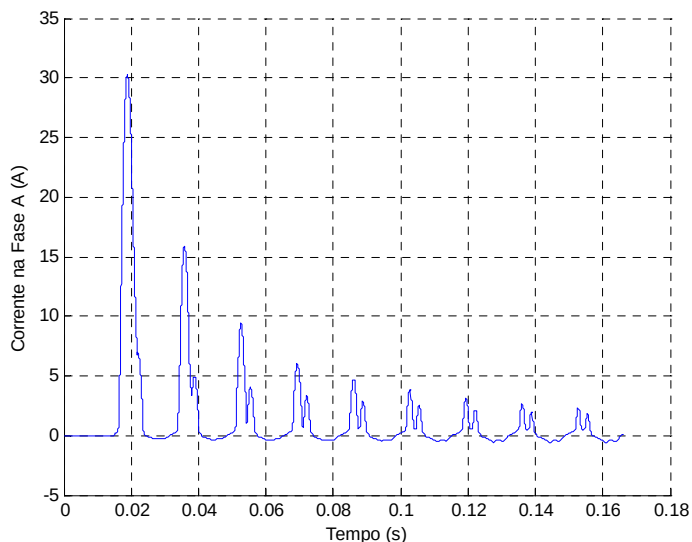


Figura 4.16 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

A figura 4.16 (a) mostra a forma de onda da fase A no enrolamento secundário do TC, onde se atingiu um valor de corrente de pico de 30,172 [A].

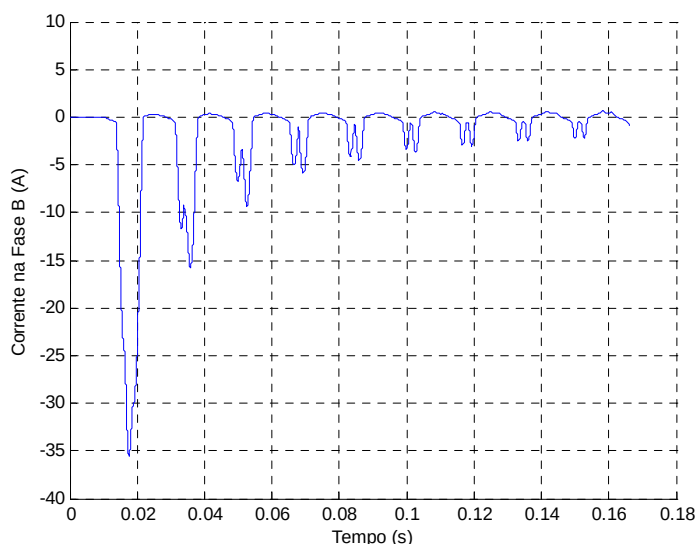


Figura 4.16 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A figura 4.16 (b) ilustra a corrente de energização no secundário do TC de -35,412 A na fase B.

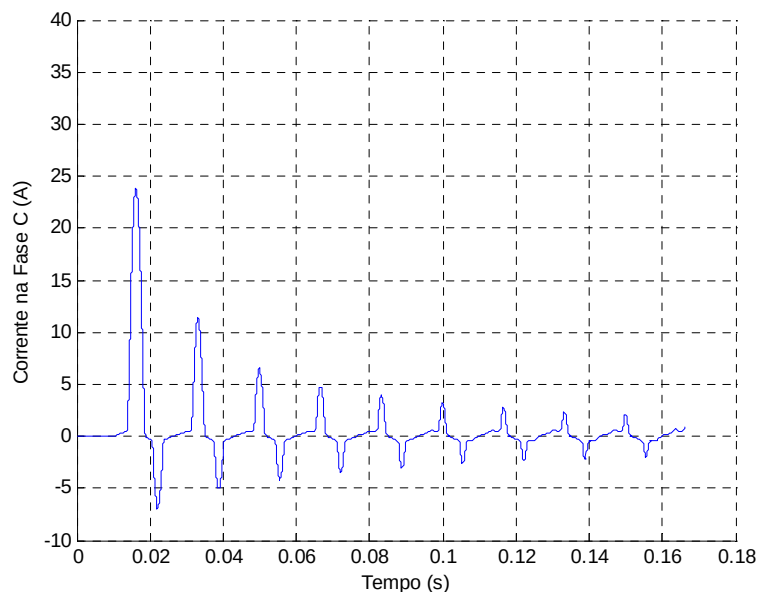


Figura 4.16 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A figura 4.16(b) mostra também a forma de onda da corrente de *inrush* no enrolamento secundário do TC correspondente à fase C, com um valor de pico de 23,783 A.

Nesta situação, a figura 4.17 mostra o surgimento de uma corrente transitória de neutro, atingindo seu valor máximo em 37,950 mA, que também assim como o caso anterior está relacionado com o desequilíbrio percentual das cargas nominais dos TC's e pelo processo de energização do transformador de potência, que neste caso opera a vazio.

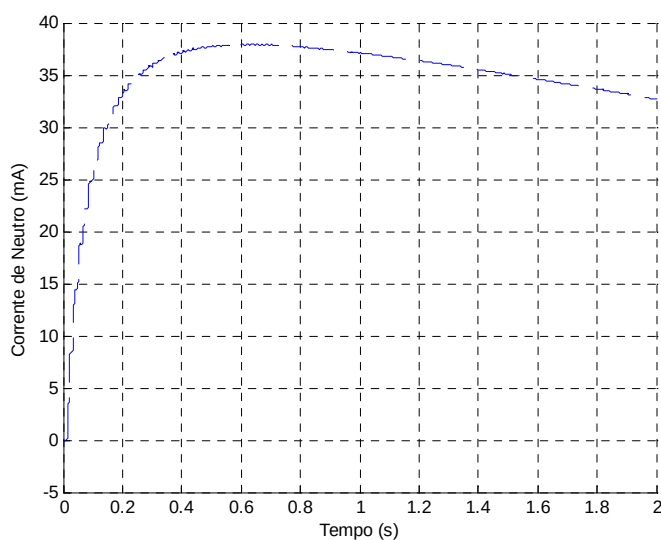


Figura 4.17 - Corrente transitória de magnetização em mA - neutro.

A diferença percentual para o caso c é representada pela figura 4.18, onde mostra a relação entre os enrolamentos primário e secundário dos TC's levando como referência o enrolamento secundário.

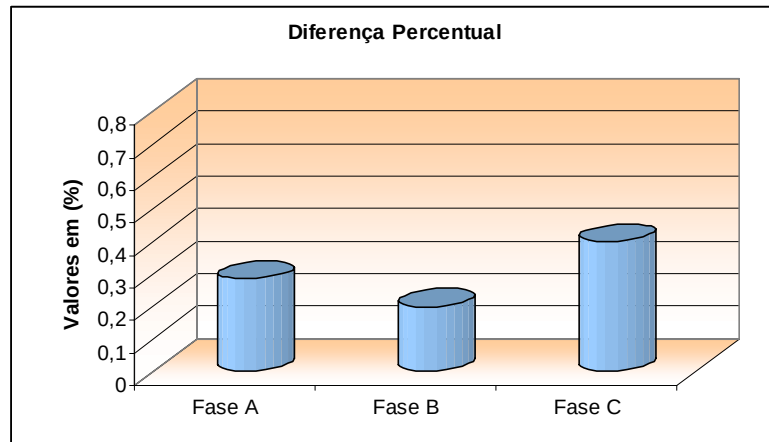


Figura 4.18 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de *inrush*. Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A).

Caso D

Ensaio de energização de um transformador de potência com os enrolamentos secundários operando a vazio e nos enrolamentos secundários dos TC's é aplicado um desequilíbrio de 50%

Carga nominal em seu secundário de:

$$Z_a = 0,100 \, \Omega$$

$$Z_b = 0,300 \, \Omega$$

$$Z_c = 0,200 \, \Omega$$

Cálculo do desequilíbrio percentual

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,100 + 0,300 + 0,200}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,2 \, \Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,1 \, \Omega}{0,2 \, \Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 50,00 \, \%$$

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.19 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

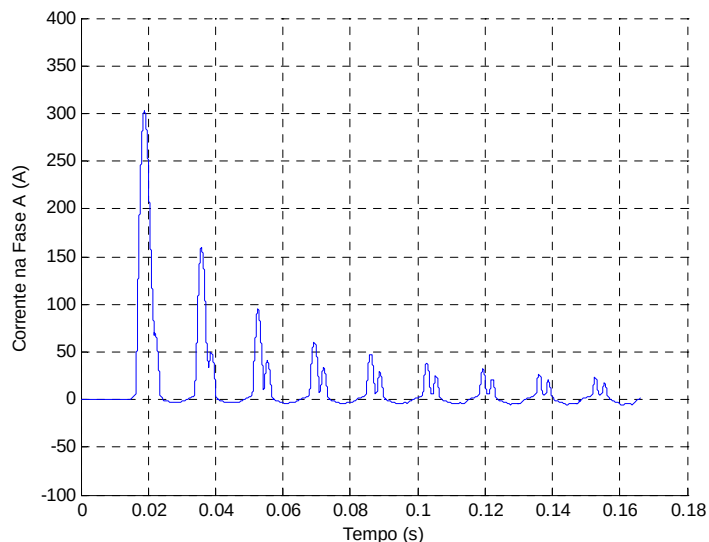


Figura 4.19 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Pode-se observar que na fase A do lado de alta, obteve-se uma corrente de *inrush* com um pico de 302,670 A e logo depois sofreu um amortecimento gerado pela impedância do sistema ao qual o transformador de potência foi conectado.

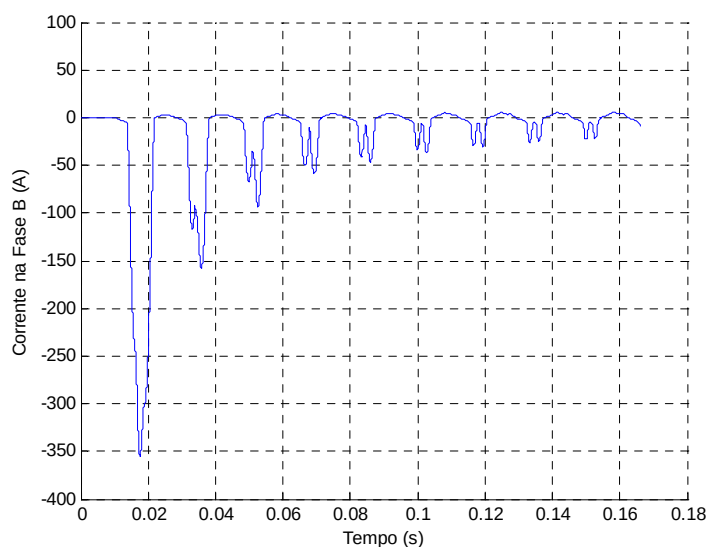


Figura 4.19 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

Na figura 4.19 (b), é visto também a forma de onda durante a energização do transformador de potência da fase B do lado de alta, porém sua corrente de pico foi de -354,540 A.

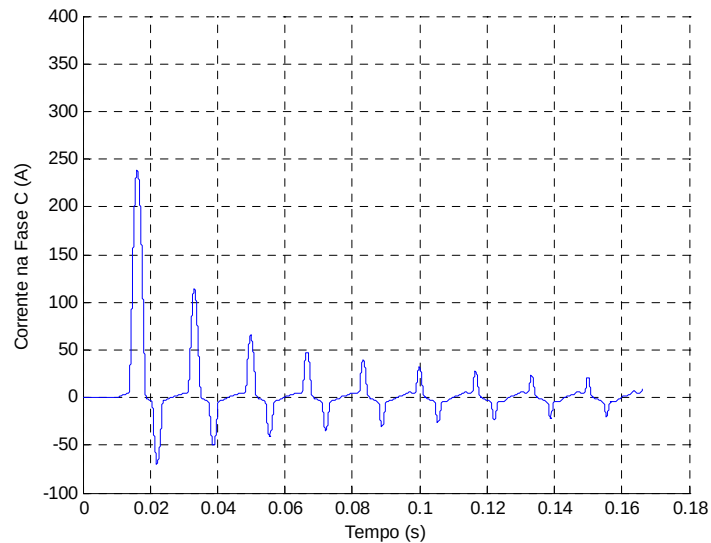


Figura 4.19 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

Como se observa, a figura 4.19(c) corresponde à forma de onda da corrente de *inrush* da fase C do lado de alta, com uma corrente de pico de 238,940 A.

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.20 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

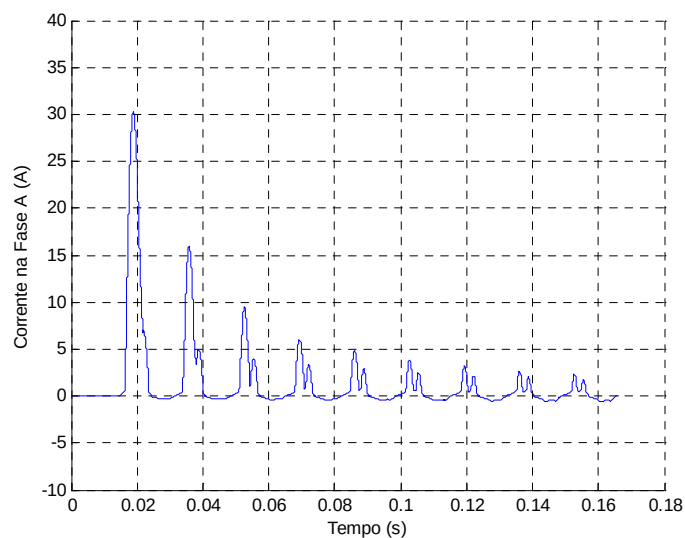


Figura 4.20 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

A figura 4.20 (a) mostra a forma de onda da fase A no enrolamento secundário do TC, onde se atingiu um valor de corrente de pico de 30,205 A.

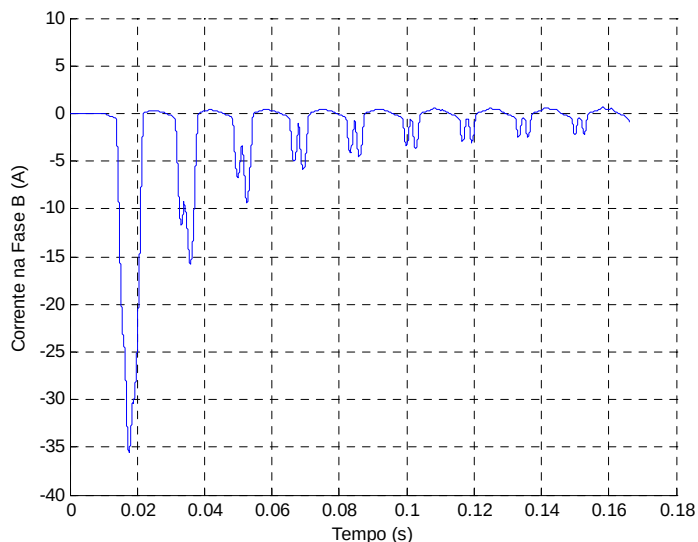


Figura 4.20 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A figura 4.20(b) ilustra forma de onda da corrente de energização do enrolamento secundário do TC, a corrente de pico realizado foi de -35,382 A.

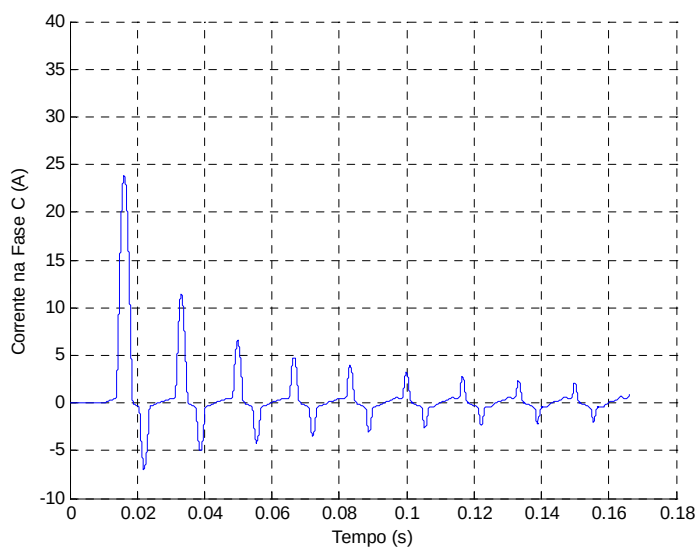


Figura 4.20 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A figura 4.20, mostra também a forma de onda da corrente de *inrush* no enrolamento secundário do TC correspondente à fase C, com um valor de pico de 23,813 A.

A forma de onda da corrente transitória de magnetização do neutro pode ser visto na figura 4.21, que varia com o desequilíbrio percentual das cargas nominais dos TC's, atingindo um valor máximo da corrente 63,250 mA.

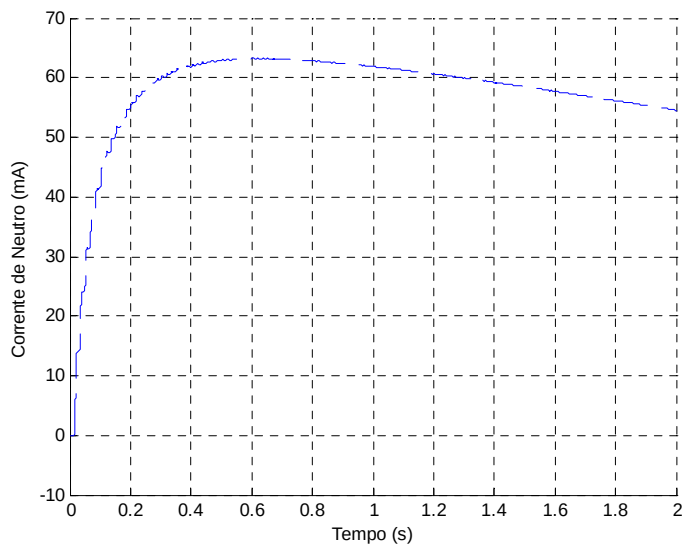


Figura 4.21 - Corrente transitória de magnetização em mA - neutro.

A figura 4.22, ilustra a diferença percentual da relação entre o enrolamento primário e secundário, como referência o enrolamento secundário para a fase A fase B e Fase C.

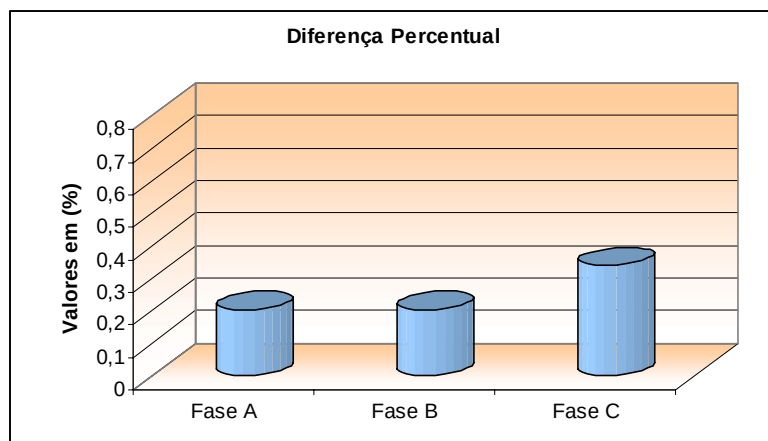


Figura 4.22 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de *inrush*. Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A).

Caso E

Energização do transformador de potência operando com o enrolamento secundário em aberto e com as cargas conectadas no enrolamento secundário dos TC's desbalanceadas em 70%.

Carga nominal em seu secundário de:

$$Z_a = 0,450 \, \Omega$$

$$Z_b = 0,120 \, \Omega$$

$$Z_c = 0,220 \, \Omega$$

Cálculo do desequilíbrio percentual

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,450 + 0,120 + 0,220}{3} \therefore Z_{\text{médio}} = 0,2633 \Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,18667 \Omega}{0,2633 \Omega} \times 100 \therefore D(\%) = 70,89\%$$

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.23 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

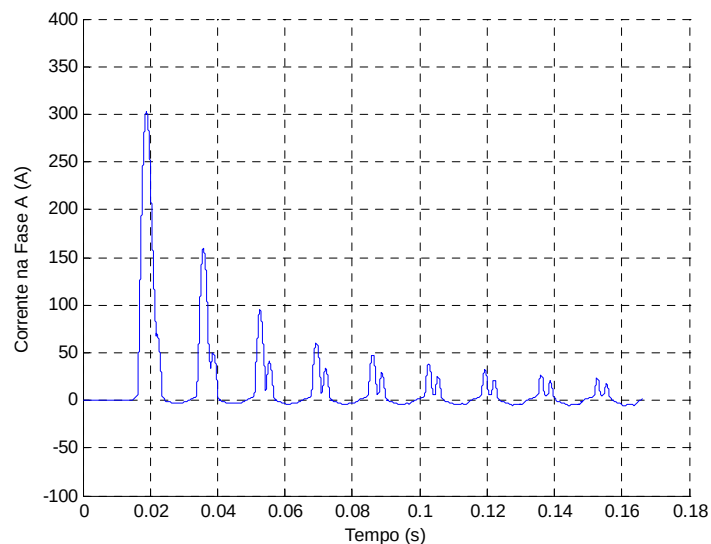


Figura 4.23 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Pode-se observar que na fase A do lado de alta, obteve-se uma corrente de *inrush* com um pico de 303,560 A e logo depois sofreu um amortecimento gerado pela impedância do sistema ao qual o transformador de potência foi conectado.

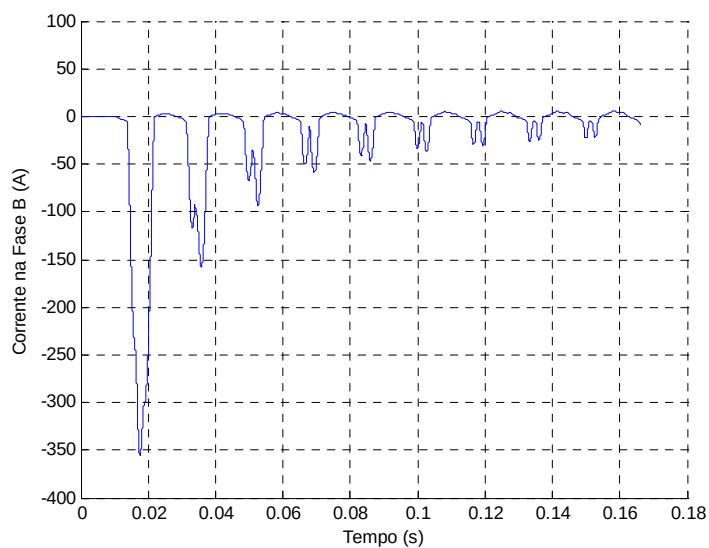


Figura 4.23 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

Na figura 4.23 (b), é visto também a forma de onda durante a energização do transformador de potência da fase B do lado de alta, porém sua corrente de pico foi de -355,510 A.

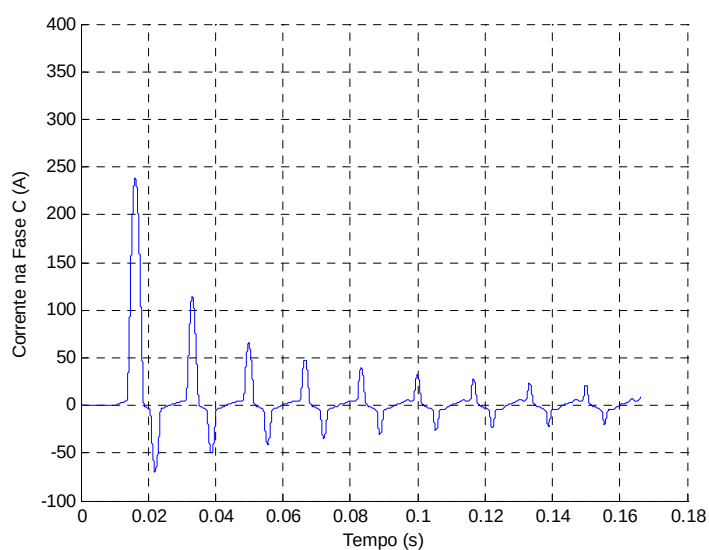


Figura 4.23 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

Como se observa, a figura 4.23(c) corresponde à forma de onda da corrente de *inrush* da fase C do lado de alta, com uma corrente de pico de 239,920 A.

As formas de onda mostradas a seguir, figura 4.24 (a), (b) e (c) correspondem as correntes de energização do transformador de potência no enrolamento secundário dos TC's nas fases A, B e C, respectivamente.

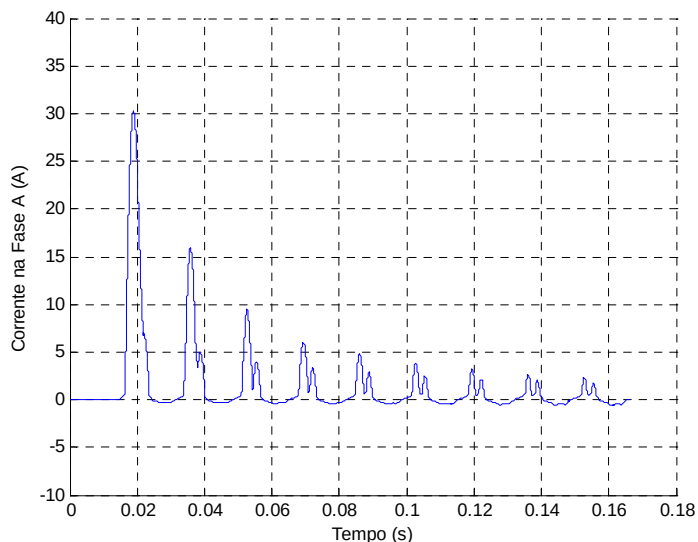


Figura 4.24 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

A figura 4.24 (a) mostra a forma de onda da fase A no enrolamento secundário do TC, onde se atingiu um valor de corrente de pico de 30,244 A.

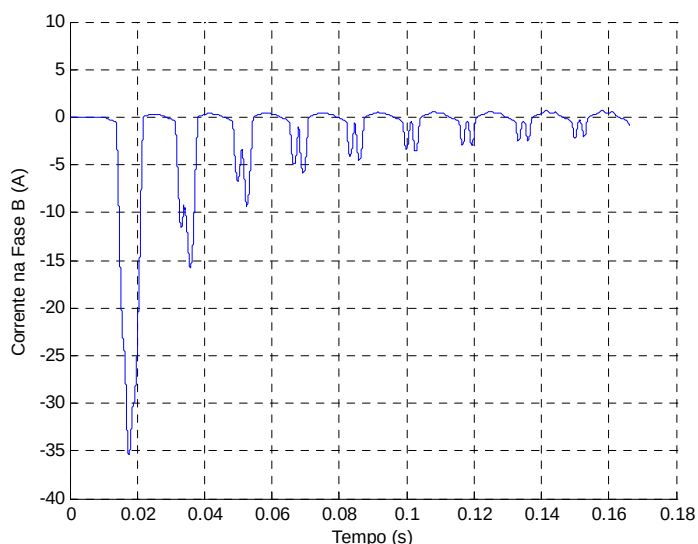


Figura 4.24 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A figura 4.24 (b) ilustra a corrente no enrolamento secundário do TC que corresponde a -35,451 A na fase B, durante o processo de energização do transformador de potência.

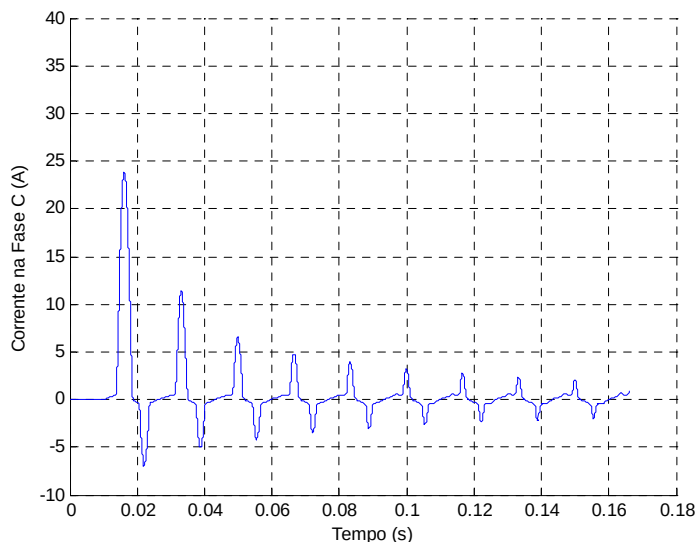


Figura 4.24 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A figura 4.24 (c) mostra também a forma de onda da corrente de *inrush* no enrolamento secundário do TC correspondente à fase C, com um valor de pico de 23,864 A.

Nesta situação, a figura 4.25 mostra o surgimento de uma corrente transitória de neutro com um valor máximo de 98,10 mA, que também assim como o caso anterior está relacionado diretamente com o desequilíbrio percentual das cargas nominais dos TC's e pelo processo de magnetização do transformador, que neste caso opera a vazio.

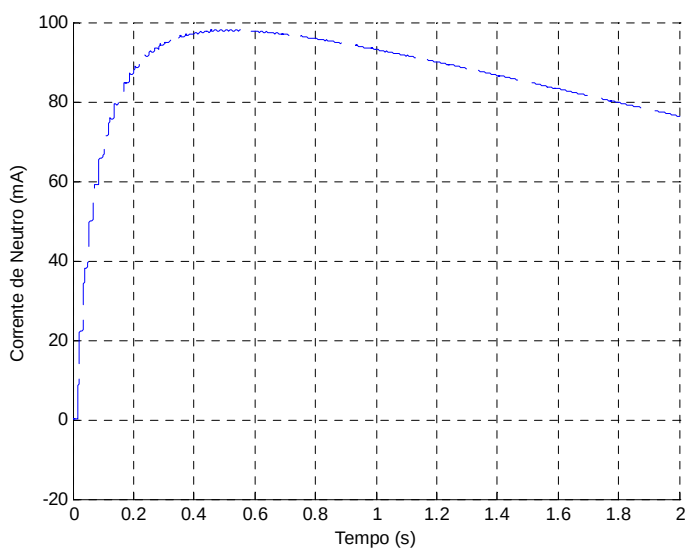


Figura 4.25 - Corrente transitória de magnetização em mA - neutro.

A figura 4.26, mostra a diferença percentual dos TC's, a partir da relação entre o enrolamento primário e secundário e nota-se que essa diferença é muito pequena entre as fases, para esse cálculo foi atribuído como referência o enrolamento secundário.

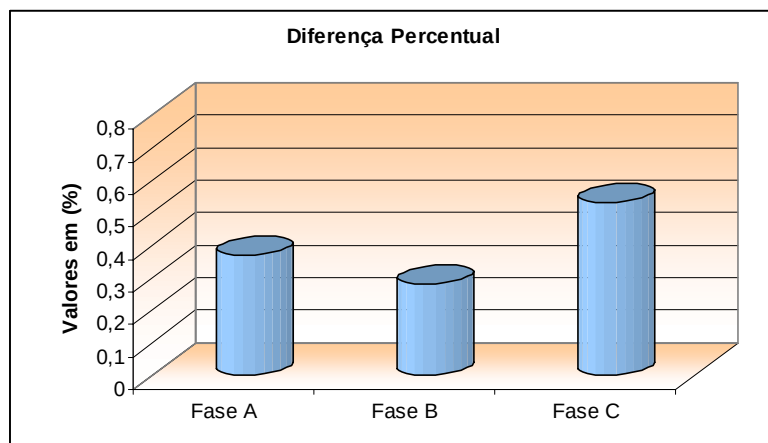


Figura 4.26 - Diferença Percentual dos TC's em relação ao primeiro pico de corrente de *inrush*. Enrolamento do primário x enrolamento secundário (relação de transformação dos TC's de 10:1 A).

4.3.3 - SÍNTESES DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

A tabela a seguir ilustra de forma resumida os valores de pico nas fases tanto no enrolamento primário quanto no enrolamento secundário, os valores máximos da corrente de neutro e as diferenças percentuais tendo como referência a relação nominal entre as fases, obtido durante os ensaios.

Tabela 4.3 - Síntese dos resultados.

Caso	Valor de Pico da Corrente no Enrolamento						Valor Máximo da Corrente de Neutro mA	Diferença Percentual entre as Fases do Enrolamento Primário e Secundário (%)		
	Primário			Secundário				Fase A	Fase B	Fase C
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C				
Base	303,84	-355,62	239,79	30,326	-35,49	23,93	0,00	0,191	0,194	0,138
A	303,17	-355,86	238,27	30,218	-35,51	23,71	12,63	0,327	0,208	0,483
B	302,42	-356,23	237,84	30,156	-35,52	23,68	25,29	0,284	0,281	0,429
C	302,58	-354,83	238,78	30,172	-35,41	23,78	37,95	0,284	0,200	0,398
D	302,67	-354,54	238,94	30,205	-35,38	23,81	63,25	0,205	0,203	0,339
E	303,56	-355,51	239,92	30,244	-35,45	23,86	98,10	0,369	0,281	0,534

Os resultados apresentados anteriormente tornam-se possível o estabelecimento de termos comparativos, obtidos através dos diferentes casos em que foram realizados os ensaios experimentais. Vale ressaltar que os aspectos qualitativos e quantitativos das correntes transitórias são fortemente influenciados por variáveis como:

- Curva de saturação (curva B-H) do material magnético dos transformadores;
- Nível de desequilíbrios das cargas alimentadas pelos TC's;
- Instante em que acontecem as energizações;
- Fluxo residual dos transformadores;
- Parâmetros resistivos e indutivos, do cabo do alimentador e do transformador.

Após serem obtidos os seguintes resultados anteriores, as análises conduzidas ao longo desse capítulo permitem concluir que:

A origem das correntes de neutro, que são as responsáveis pela atuação das correspondentes proteções, pode ser devido à presença de desequilíbrios entre as impedâncias conectadas aos secundários dos TC's. Tendo em vista os valores fornecidos para as impedâncias dos relés, constata-se que efeitos oriundos de contatos, cabos, etc. Poderão em longe sobrepujar estes valores. Isto pode ser responsável por substanciais graus de desequilíbrios e intensificar a corrente de neutro.

4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das informações sintetizadas anteriormente, bem como dos detalhamentos apresentados, pode-se, ao final deste capítulo, tecer as seguintes considerações:

Foi apresentado primeiramente o conceito do desequilíbrio e foram retratadas suas definições aplicáveis e expressões para o cálculo do desequilíbrio a partir do método das Componentes Assimétricas, as normas/recomendações CIGRÉ, ONS, NRS 048, NEMA e IEEE. Neste trabalho para avaliar o desequilíbrio das cargas nos secundários dos TC's, optou-se pela norma da NEMA.

A respeito dos ensaios, os resultados e análises conduzidas anteriormente permitem concluir que os fenômenos em estudo possuem fortes dependências com parâmetros e condições de chaveamento (resistências, reatâncias, saturação, fluxo residual e instante de chaveamento). Desta forma, as formas de ondas e valores mostrados neste capítulo referem-se a situações particulares, pois quaisquer mudanças em uma destas grandezas possam implicar em alterações qualitativas e quantitativas dos resultados obtidos.

Apesar destas distinções, todas as investigações foram voltadas para o conhecimento das conseqüências das manobras sobre:

- Correntes de linha;
- Corrente de neutro na conexão dos transformadores de corrente.

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a modelagem dos transformadores de corrente descrita no capítulo III, foram realizadas simulações computacionais e seus resultados são apresentados neste capítulo, além das análises para a validação do modelo.

Na busca desta validação serão retratadas a influência de cargas desbalanceadas nos enrolamentos secundário dos TC's ligados em estrela durante o processo de energização de um transformador de potência. Essa energização provoca o surgimento de correntes de neutro nas conexões dos terminais secundários dos TC's quando os mesmos apresentam-se desequilibrados.

Serão mostradas algumas alternativas que elevarão consideravelmente a sensibilidade da proteção contra correntes de neutro durante o processo de inrush de transformadores de potência

5.2 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os resultados das simulações computacionais serão apresentados a seguir, para tanto, utilizou-se as características dos transformadores de corrente de forma a retratar com maior fidelidade os TC's ensaiados em laboratório. Ressalta-se que as impedâncias oriundas do alimentador que interliga a subestação ao laboratório onde foram realizados os ensaios, não foram retratadas com grande fidelidade em função de possíveis derivações existentes ao longo do seu percurso.

O transformador de potencia utilizado nesta simulação computacional foi modelado de tal forma que aproxima-se do modelo ensaiado experimentalmente, desta forma, comprovar a existência de corrente de sequência zero como foi constatado através dos ensaios experimentais.

5.2.1 - ARRANJO DO SISTEMA

A figura 5.1 mostra o diagrama de ligação que foi utilizado nesta simulação computacional.

Como se observa foi utilizado como fonte de alimentação três fontes de tensão senoidais com amplitude de 179,6 V onde foram conectadas três impedâncias (representa as impedâncias de todo o sistema ensaiado, como: a impedância do condutor que interliga a subestação ao laboratório e a impedância dos cabos utilizados para realizar a ligação) que foram ligadas a três chaves para realizá-la a energização. Junto a elas, são conectados em série com o condutor três transformadores de correntes (representados por três transformadores de núcleo saturável do tipo 98 para a sua modelagem no programa ATP) onde em seus secundários estão inseridas impedâncias para representação de suas cargas.

No ponto comum entre as impedâncias foi colocado um medidor para efetuar a medição das correntes de neutro. Em série com os TC's estão conectados um banco de três transformadores de potência monofásicos de núcleo saturável do ligados em estrela/estrela.

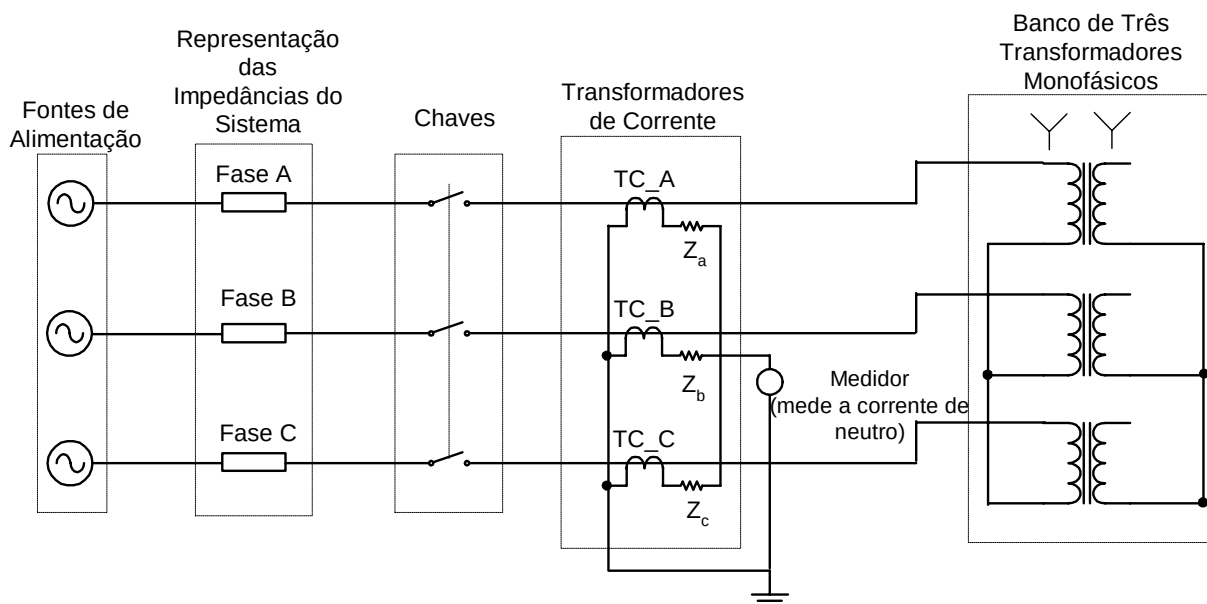


Figura 5.1 - Diagrama de ligação dos TC's e os referidos pontos de medições.

5.2.2 - METODOLOGIA UTILIZADA

Objetivando atingir os propósitos delineados no capítulo anterior, as simulações que se seguem encontra-se estruturadas de forma a repetir todo o processo de energização do transformador efetuado no laboratório, o qual obedece a seguinte metodologia:

- O transformador é energizado a partir do fechamento das chaves;
- Os fenômenos transitórios são registrados e a atenção ficou totalmente voltada para os efeitos das correntes de energização sobre o neutro das conexões dos TC's de relações de 10:1A.

5.2.3 - ESTRUTURA DAS SIMULAÇÕES

Obedecendo a metodologia anteriormente estabelecida, o sistema foi simulado, originando os casos abaixo descritos. As simulações foram as mesmas feitas durante o **capítulo IV**, isto é, foram primeiramente realizados simulações sem desequilíbrio e depois foi aplicado desequilíbrios de 10%, 20%, 30%, 50% e 70%.

Caso Base

Esse caso contempla a energização do transformador de potência conectado em estrela/estrela com o secundário operando a vazio e sem desequilíbrio entre as cargas conectadas no enrolamento secundário dos TC's.

As figuras 5.2 (a), (b) e (c) correspondem às formas de ondas nas fases A, B e C do enrolamento da alta dos TC's respectivamente.

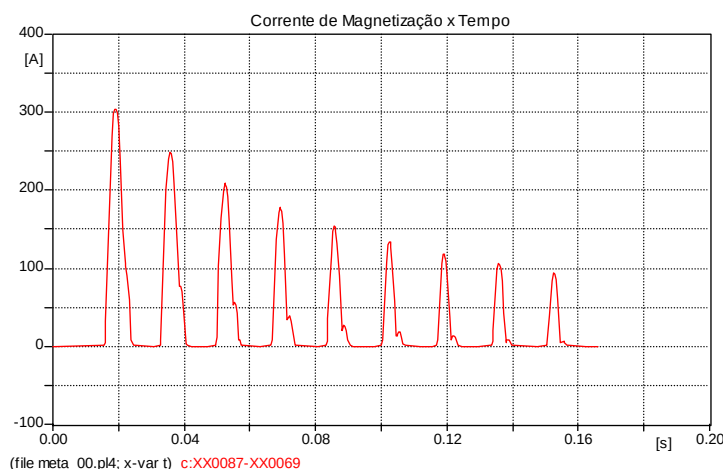


Figura 5.2 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Como se pode observar na figura 5.2 (a), em relação aos ensaios experimentais vistos no capítulo anterior, constata-se que o valor do primeiro pico de corrente tem uma amplitude de 310,12 A, enquanto que durante o ensaio experimental a amplitude registrada pelo oscilógrafo foi de 303,84 A. Desta forma, a diferença percentual apresentado entre o ensaio experimental e computacional é de 2,069%.

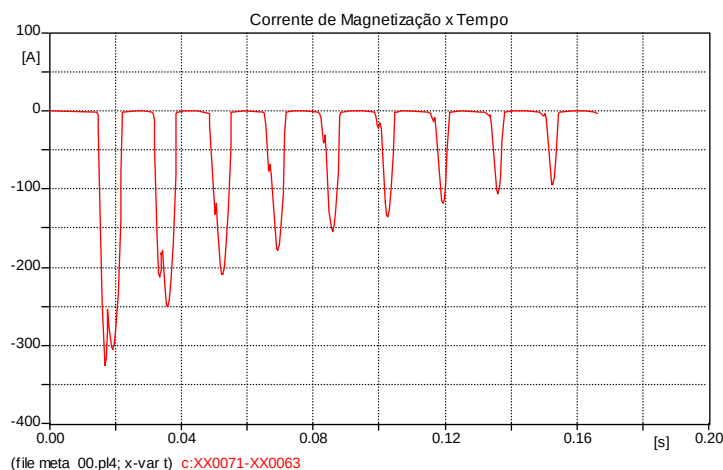


Figura 5.2 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

Na figura 5.2 (b) como se observa, o valor de pico da corrente de magnetização na fase B é de -339,621 A enquanto no ensaio experimental obteve-se um valor de pico de -355,620 A, apresentando uma diferença percentual de 4,498%.

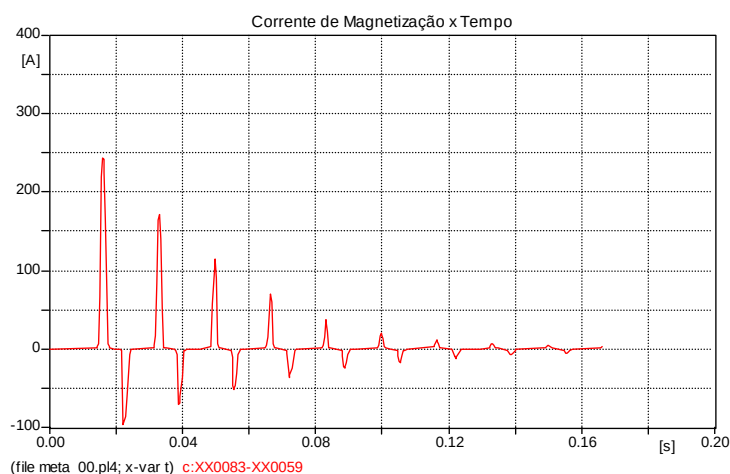


Figura 5.2 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

A figura 5.2 (c) ilustra a corrente de *inrush*, onde o valor do instante do primeiro pico é de 241,062 A, enquanto a do ensaio experimental foi de 238,270 A apresentando assim, uma diferença percentual de 1,172%.

As figuras 5.3 (a), (b) e (c) corresponde às formas de ondas nas fases A, B, C do enrolamento de baixa dos TC's respectivamente.

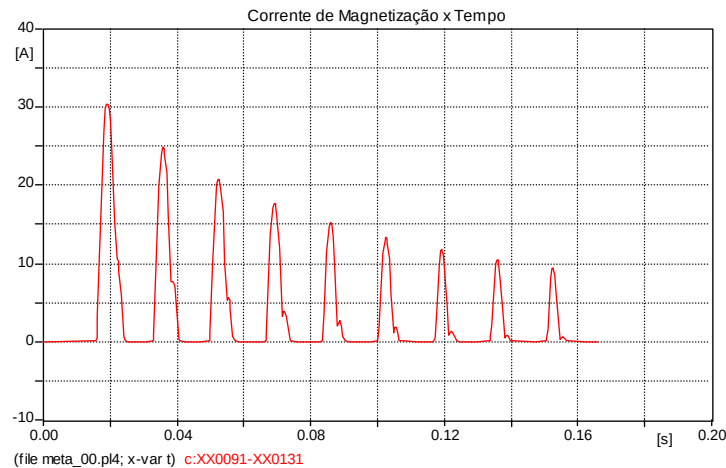


Figura 5.3 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

A figura 5.3 (a) mostra que o valor de pico da corrente de energização do transformador de potência no enrolamento do secundário do TC. Este valor foi de 31,01 A enquanto no ensaio experimental foi 30,32 A, com uma diferença percentual de 2,265%.

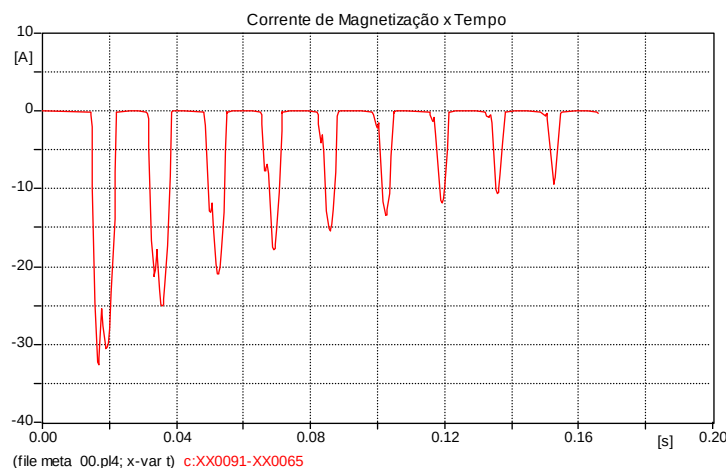


Figura 5.3 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A figura 5.3 (b) apresenta um valor de pico da corrente de *inrush* de 33,96A em relação ao ensaio experimental que foi de 35,49A apresenta uma diferença percentual de 4,317%.

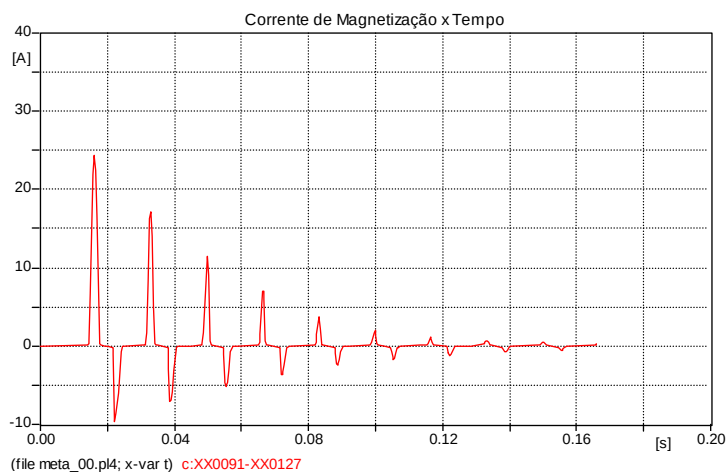


Figura 5.3 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

O valor de pico da corrente transitória de magnetização no enrolamento secundário da fase C é de 24,10 A, vide figura 5.14(c), portanto, durante os ensaios experimentais o valor alcançado foi de 23,93 A, com uma diferença percentual de 0,706%.

Como se observa na figura 5.4, a corrente de neutro não foi registrada, pelo fato de haver nenhum desequilíbrio nas cargas dos TC's.

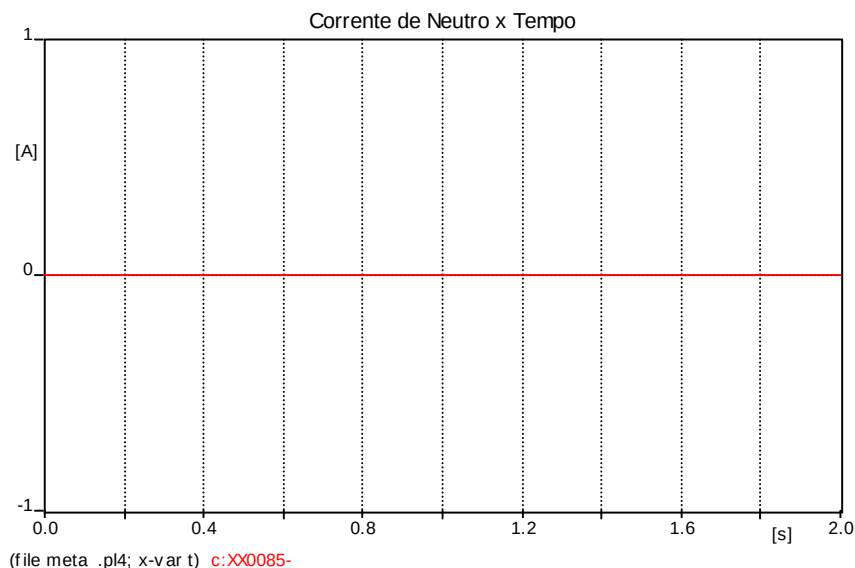


Figura 5.4 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro

Caso A

O transformador de potência é energizado pelo enrolamento primário e com o enrolamento secundário a vazio ligados em estrela/estrela, e com os terminais das cargas conectadas no enrolamento secundário com um desequilíbrio de 10%.

As figuras 5.5 (a), (b) e (c) correspondem às formas de ondas nas fases A, B e C do enrolamento da alta dos TC's respectivamente.

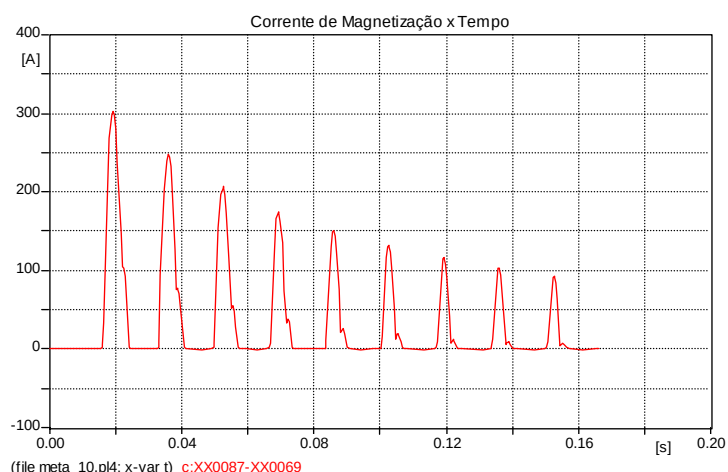


Figura 5.5 (a) - Corrente transiente de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Como se pode observar na figura 5.5(a), que o valor do primeiro pico de corrente tem uma amplitude de 310,12 A enquanto que durante o ensaio experimental a amplitude registrada pelo oscilógrafo foi de 303,17 A, desta forma, a diferença percentual apresentado entre o ensaio experimental e computacional é de 2,294%.

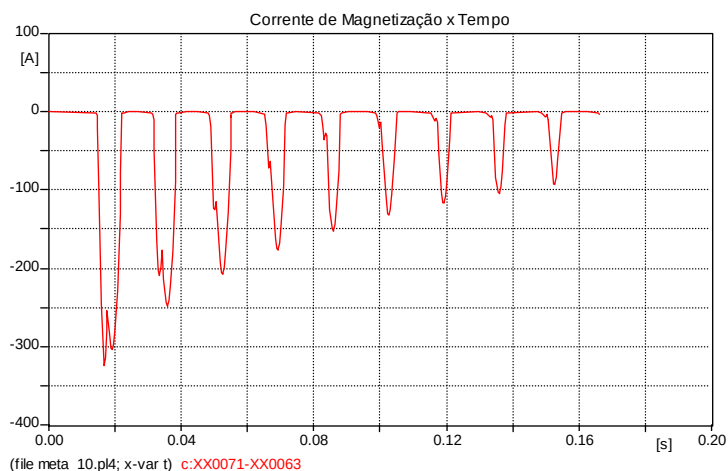


Figura 5.5 (b) - Corrente transiente de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

A figura 5.5 (b) como se observa, o valor de pico da corrente de magnetização na fase B é de -339,621 A enquanto ao ensaio experimental obteve-se um pico de -355,860 A, apresentando uma diferença percentual de 4,563%.

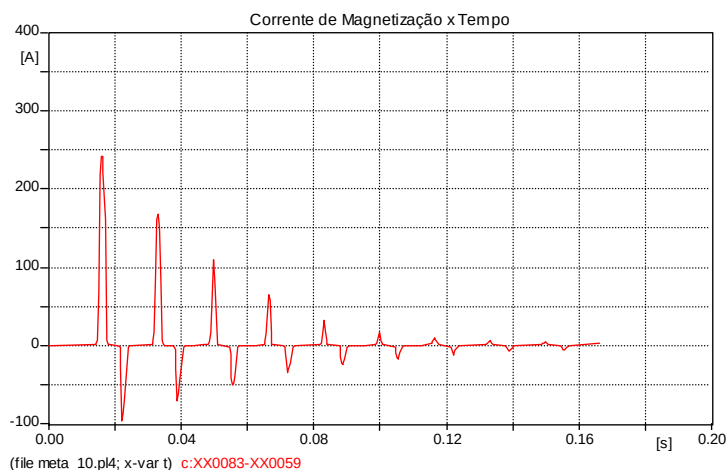


Figura 5.5 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

A figura 5.5 (c) ilustra a corrente de magnetização para a fase C, onde o valor do instante do primeiro pico é de 241,06 A, enquanto a do ensaio experimental foi de 238,27 A com uma diferença percentual de 1,172%.

As figuras 5.6 (a), (b) e (c) corresponde às formas de ondas nas fases A, B, C do enrolamento de baixa dos TC's respectivamente.

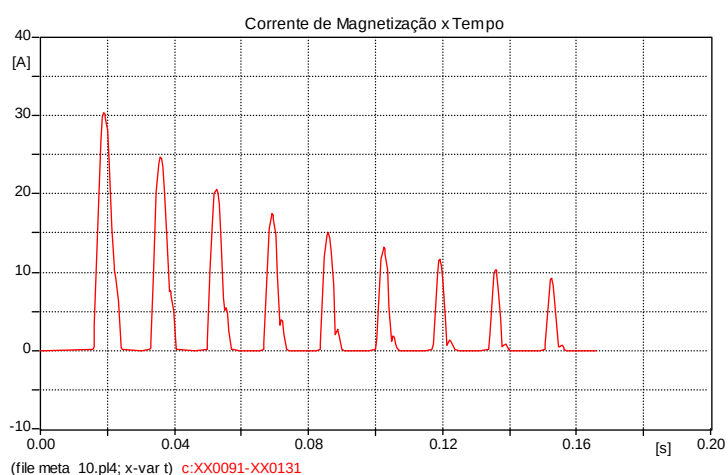


Figura 5.6 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A

A figura 5.6 (a) mostra o valor de pico da corrente de magnetização no enrolamento do secundário do TC. Este valor foi de 31,01 A enquanto no ensaio experimental 30,218 A, com uma diferença percentual de 2,63%.

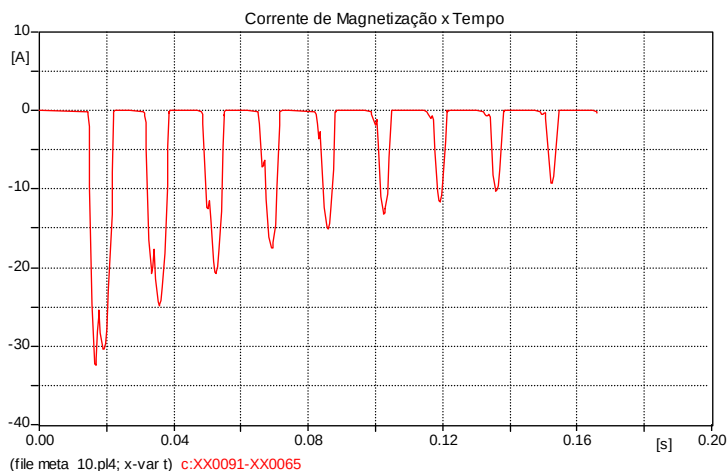


Figura 5.6 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A corrente transitória de magnetização teve seu primeiro pico de corrente com o valor -33,76 A figura 5.6(b), enquanto o ensaio experimental forneceu um valor de pico de -35,51 A, apresentando uma diferença percentual de 4,93%.

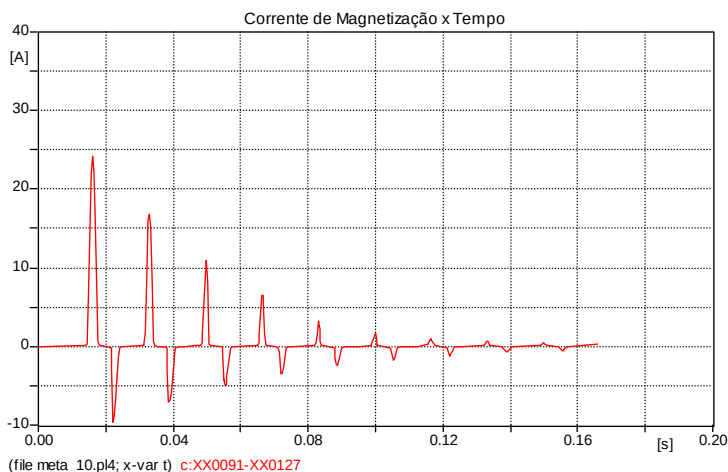


Figura 5.6 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A figura 5.6 (c) mostra a corrente transitória de magnetização com o primeiro pico de 24,20 A e ensaio experimental de 23,71 A apresentando uma diferença percentual de 2,087%.

A figura 5.7 mostra a corrente de neutro no secundário dos TC's, observa-se que ela cresce de forma logarítmica até 12,820 mA até 0,6 segundos e depois decresce até entrar em regime.

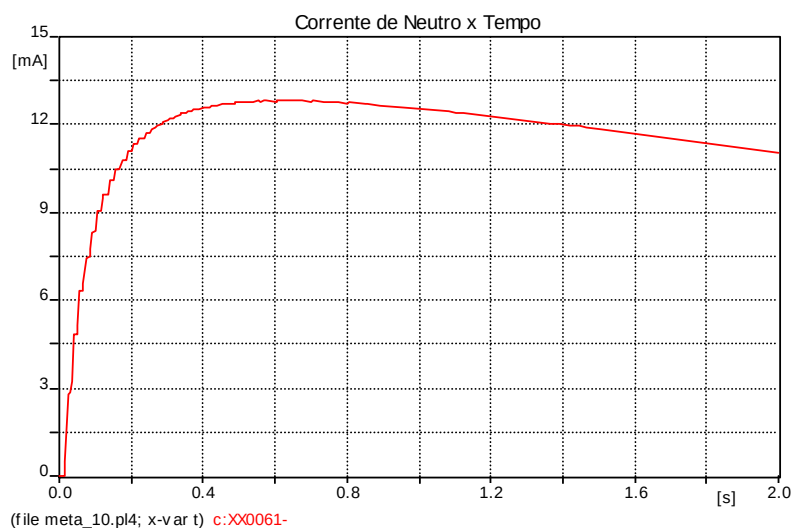


Figura 5.7 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

Caso B

Análise do comportamento das formas de ondas dos TC's com um desbalanceamento de suas cargas no enrolamento secundário em 20%, durante a energização do transformador de potência operando a vazio.

As figuras 5.8 (a), (b) e (c) correspondem às formas de ondas nas fases A, B e C do enrolamento da alta dos TC's, respectivamente.

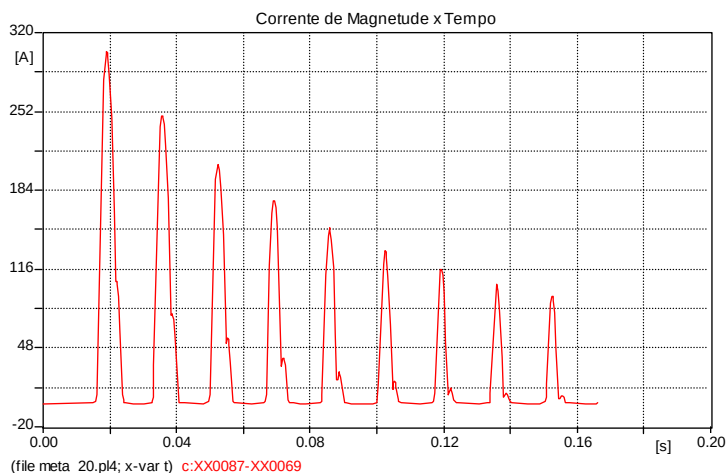


Figura 5.8 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Como observa-se na figura 5.8 (a), o valor do primeiro pico de corrente tem uma amplitude de 310,40 A enquanto que durante o ensaio experimental a amplitude registrada pelo oscilógrafo foi de 302,42 A, desta forma, houve uma diferença percentual entre o ensaio experimental e computacional de 2,639%.

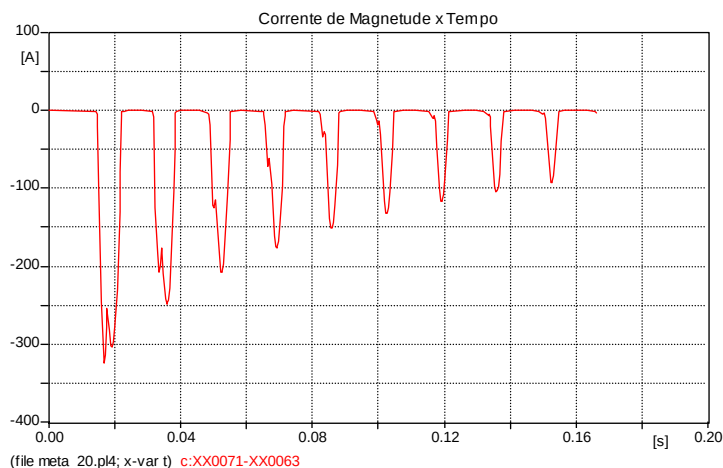


Figura 5.12 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

A figura 5.8 (b) como se observa, o valor de pico da corrente de magnetização na fase B é de -339,24 A enquanto que no ensaio experimental obteve-se um pico de -356,23 A, apresentando uma diferença percentual de 4,769%.

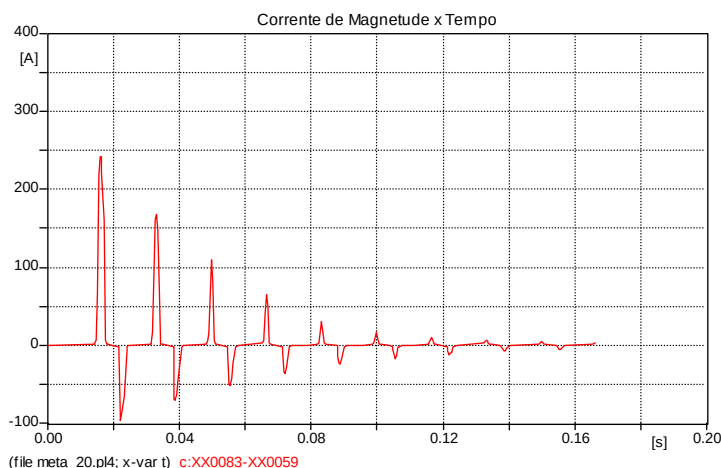


Figura 5.8 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

A figura 5.8 (c) ilustra a corrente de magnetização para a fase C, onde o valor do instante do primeiro pico é de 241,262 A, enquanto a do ensaio experimental foi de 236,820 A com uma diferença percentual de 1,875%.

As figuras 5.9 (a), (b) e (c) correspondem as formas de ondas nas fases A, B e C do enrolamento da baixa dos TC's, respectivamente.

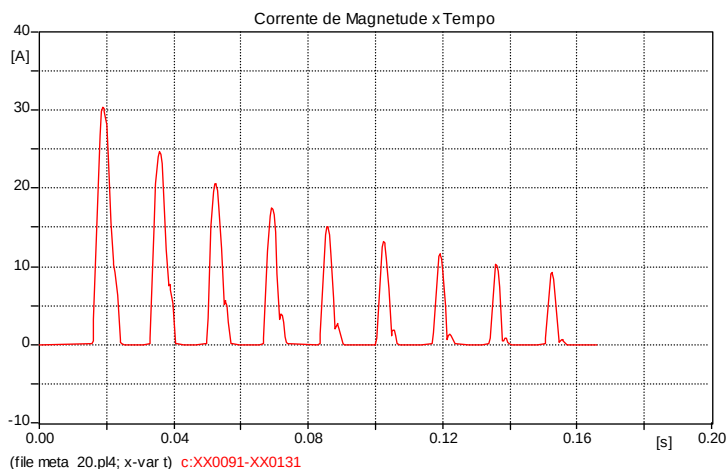


Figura 5.9 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

O valor de pico da corrente de magnetização no enrolamento do secundário do TC é mostrado na figura 5.9 (a), este valor foi de 31,101 A enquanto no ensaio experimental 30,156 A, com uma diferença percentual de 3,133%.

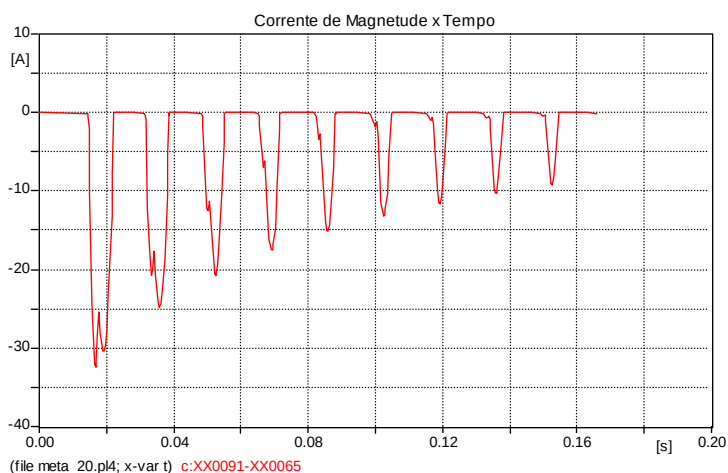


Figura 5.9 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A figura 5.9 (b) ilustra o valor do primeiro pico de corrente de magnetização no enrolamento secundário do TC, este valor foi de -33,965 A enquanto no ensaio experimental -35,523 A, com uma diferença percentual de 4,386%.

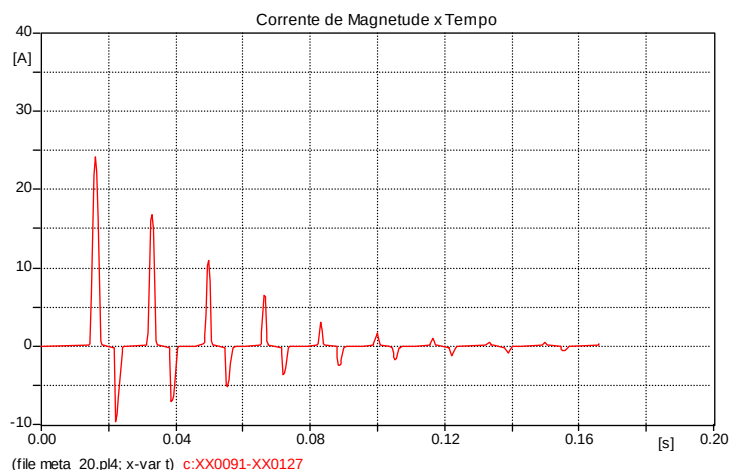


Figura 5.9 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A figura 5.9 (c) mostra o valor do primeiro pico de corrente de magnetização no enrolamento do secundário do TC, este valor foi de 24,11 A enquanto no ensaio experimental 23,68 A, com uma diferença percentual de 1,83%.

Nesta situação, a figura 5.10 mostra o surgimento de uma corrente transitória de neutro com um valor máximo de 25,68 mA, que está relacionada com o desequilíbrio percentual das cargas nominais dos TC's e também pelo processo de magnetização do transformador, que neste caso opera a vazio.

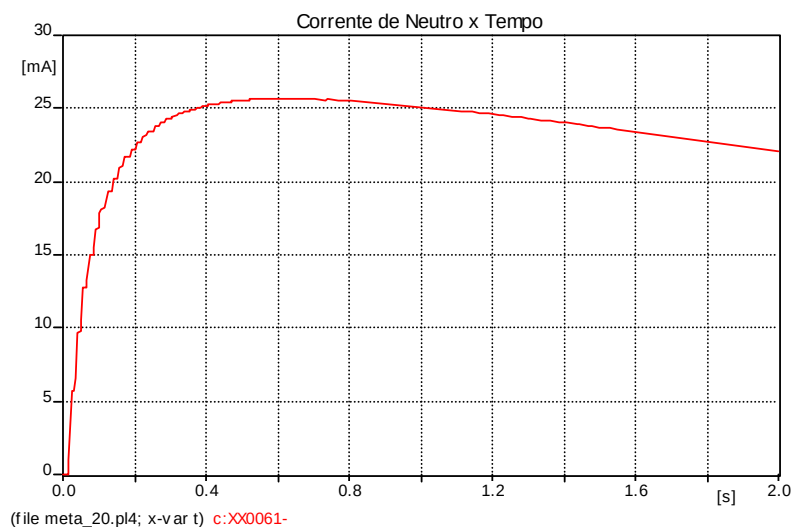


Figura 5.10 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

Caso C

Consiste na energização do transformador de potência a vazio com um desequilíbrio de 30% entre as cargas no circuito secundário dos TC's;

As figuras 5.11 (a), (b) e (c) correspondem às formas de ondas nas fases A, B e C do enrolamento da alta dos TC's respectivamente.

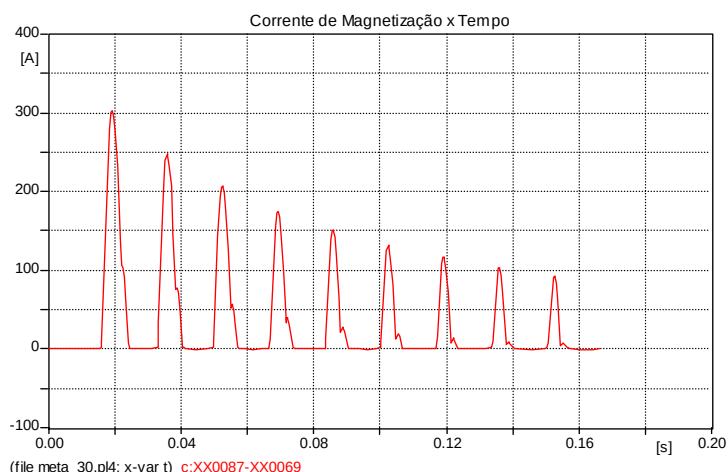


Figura 5.11 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Como se observa, a figura 5.11 (a), o valor do primeiro pico de corrente tem uma amplitude de 310,12 A enquanto que durante o ensaio experimental a amplitude registrada pelo oscilógrafo foi de 302,58 A, desta forma, a diferença apresentada entre o ensaio experimental e computacional é de 2,49%.

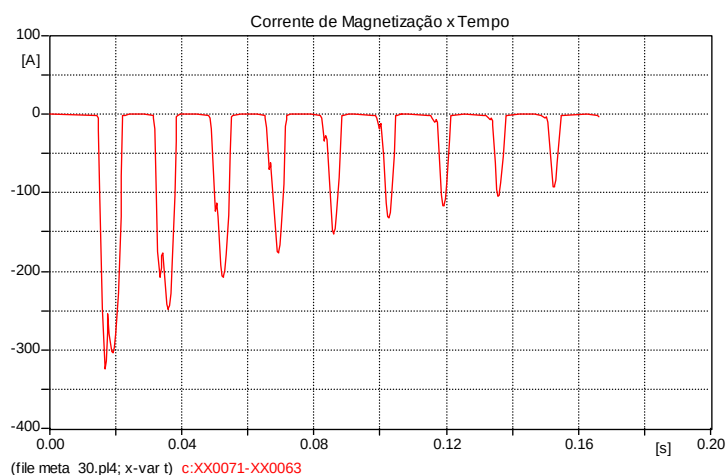


Figura 5.11 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

Na figura 5.11 (b) como se observa, o valor de pico da corrente de magnetização na fase B é de -339,62 A, enquanto que no ensaio experimental

obteve-se um pico de -354,83 A. Assim, comparando esses resultados obtém-se uma variação de 4,28%.

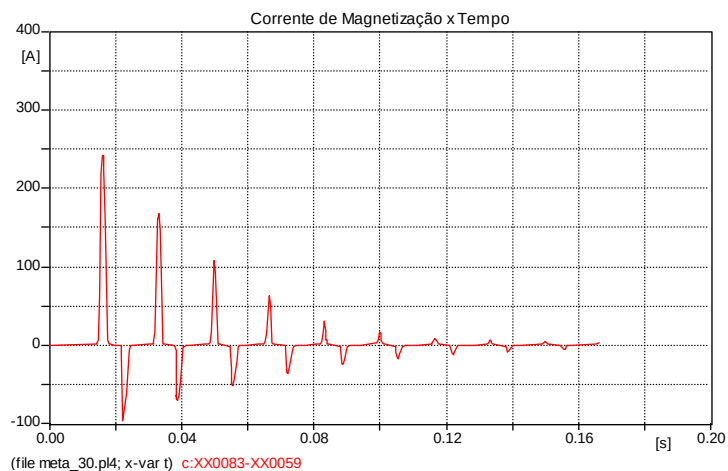


Figura 5.11 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

A figura 5.11 (c) ilustra a corrente de magnetização para a fase C, onde o valor do instante do primeiro pico é de 241,05 A, enquanto a do ensaio experimental foi 238,78 A, com uma diferença percentual de 0,95%.

As figuras 5.12 (a), (b) e (c) correspondem as formas de ondas nas fases A, B e C do enrolamento da baixa dos TC's, respectivamente.

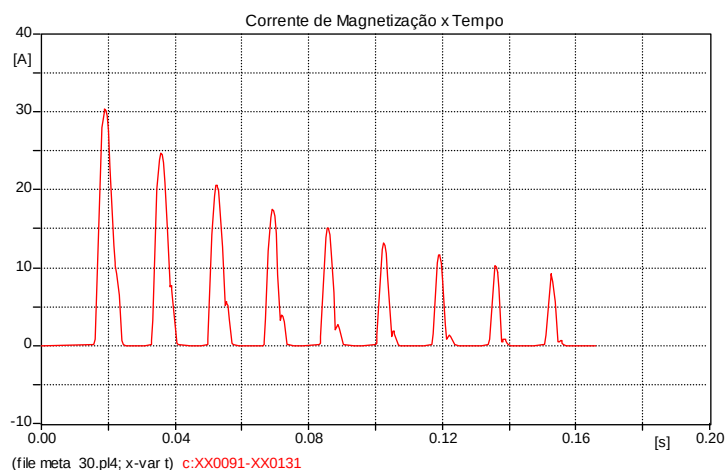


Figura 5.12 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

O valor de pico da corrente de magnetização no enrolamento do secundário do TC é mostrado na figura 5.12 (a), este valor foi de 31,10 A, enquanto no ensaio experimental 30,17 A, com uma diferença percentual de 3,08%.

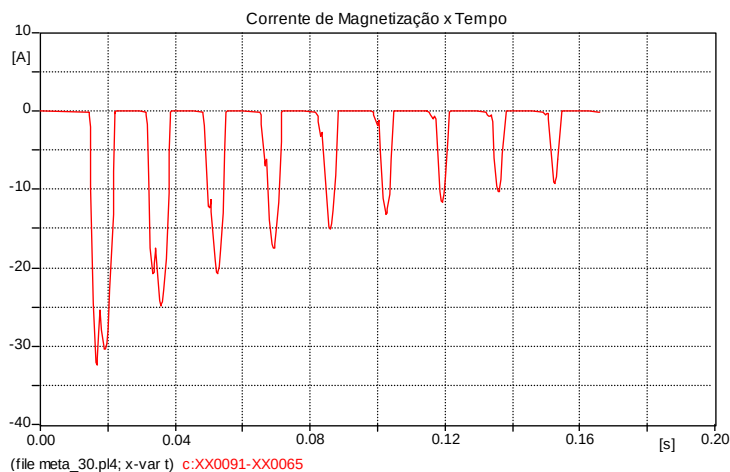


Figura 5.12 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A figura 5.12 (b) ilustra o valor do primeiro pico de corrente de magnetização no enrolamento do secundário do TC. Este valor foi de -33,96 A enquanto no ensaio experimental -35,41 A, com uma diferença percentual de 4,086%.

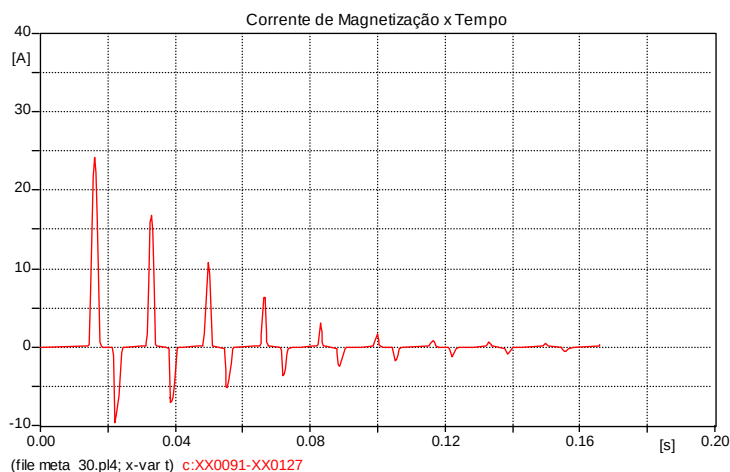


Figura 5.12 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A figura 5.12 (c) mostra o valor do primeiro pico de corrente de magnetização no enrolamento do secundário do TC. Este valor foi de 24,11 A enquanto no ensaio experimental 23,78 A, com uma diferença percentual de 1,404%.

A corrente transitória de neutro é ilustrada na figura 5.13, devido ao desequilíbrio percentual das cargas nominais dos TC's, ela cresce até 38,53 mA e depois ela decresce até entrar em regime.

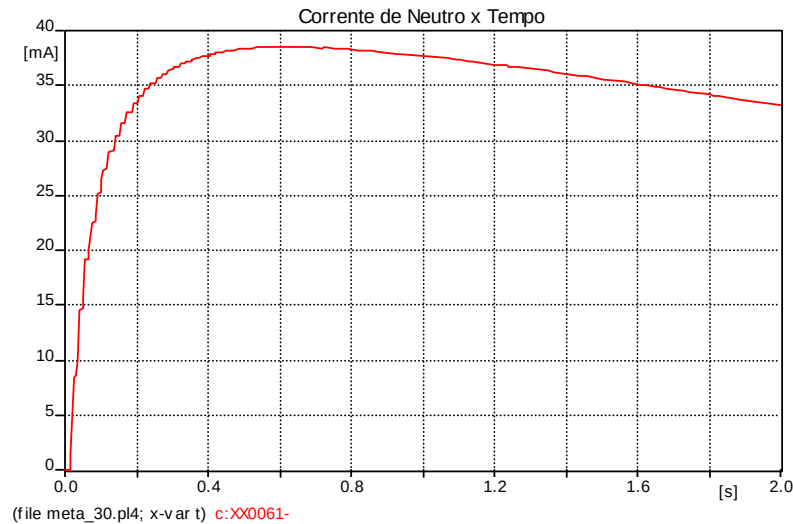


Figura 5.13 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

Caso D

Será aplicado um desequilíbrio de 50% nas cargas conectadas no circuito secundário dos TC's. Logo feito isso, energiza o enrolamento primário do transformador de potência e o enrolamento secundário fica a vazio.

As figuras 5.14 (a), (b) e (c) correspondem às formas de ondas nas fases A, B e C do enrolamento da alta dos TC's respectivamente.

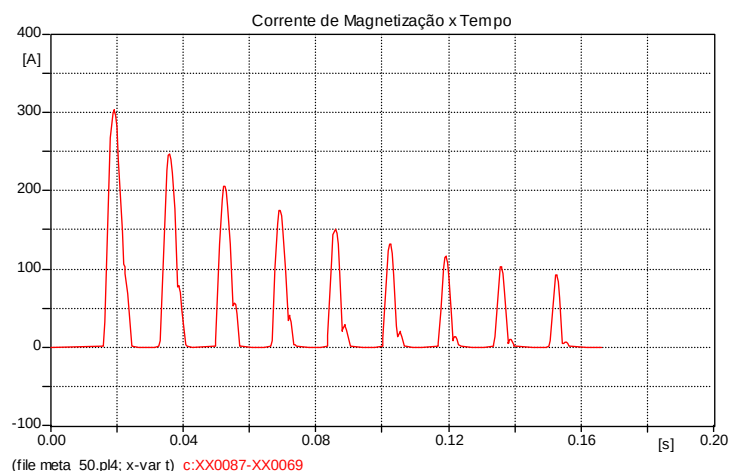


Figura 5.14 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

Como se pode observar na figura 5.14 (a), o valor do primeiro pico de corrente tem uma amplitude de 310,12 A enquanto que durante o ensaio experimental a amplitude registrada pelo oscilógrafo foi de 302,67 A.

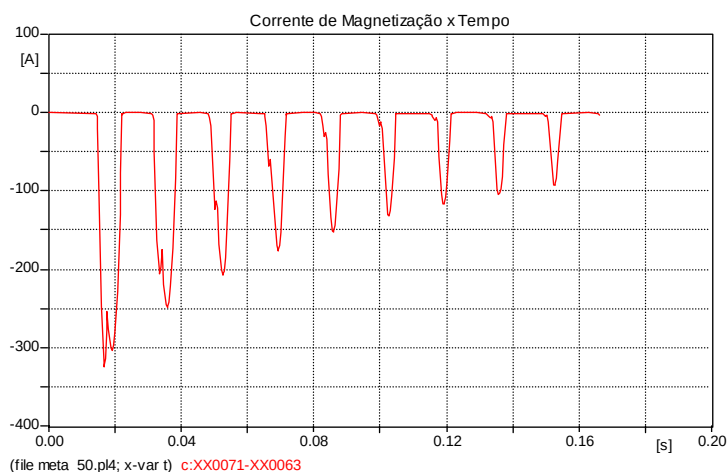


Figura 5.14 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

A figura 5.14 (b) como se observa, o valor de pico da corrente de magnetização na fase é de -339,61 A enquanto ao ensaio experimental obteve-se um pico de -354,54 A apresentando uma diferença percentual de 4,208%.

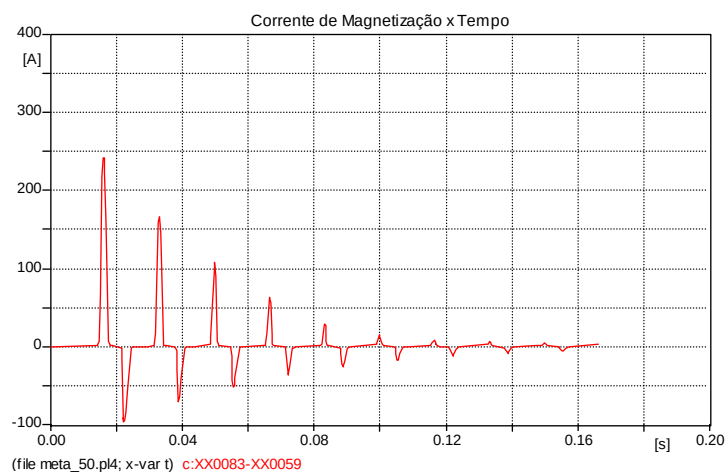


Figura 5.14 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C.

A figura 5.18 (c) ilustra o instante que a corrente de *inrush* atinge o valor máximo no primeiro ciclo de 241,06 A, enquanto a do ensaio experimental foi de 238,94 A com uma diferença percentual de 0,889%.

As formas de ondas das fases A, B e C do enrolamento secundário dos TC's são representadas através das figuras 5.15 (a), (b) e (c), respectivamente.

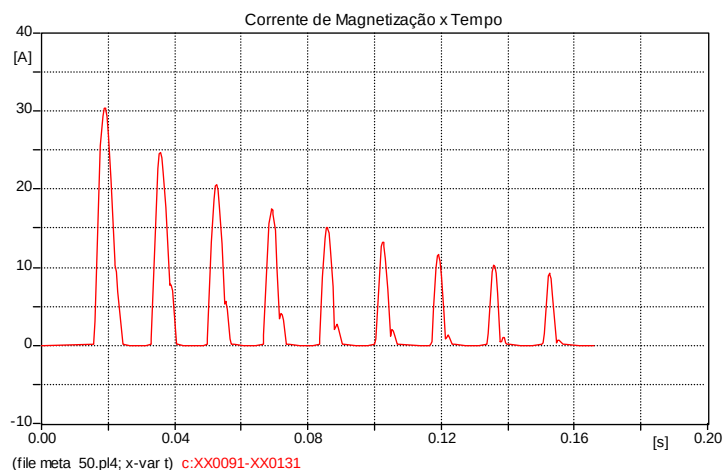


Figura 5.15 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

O valor de pico da corrente de magnetização no enrolamento do secundário do TC é mostrado na figura 5.15 (a), é de 31,10 A enquanto no ensaio experimental foi de 30,20 A, com uma diferença percentual de 2,976%.

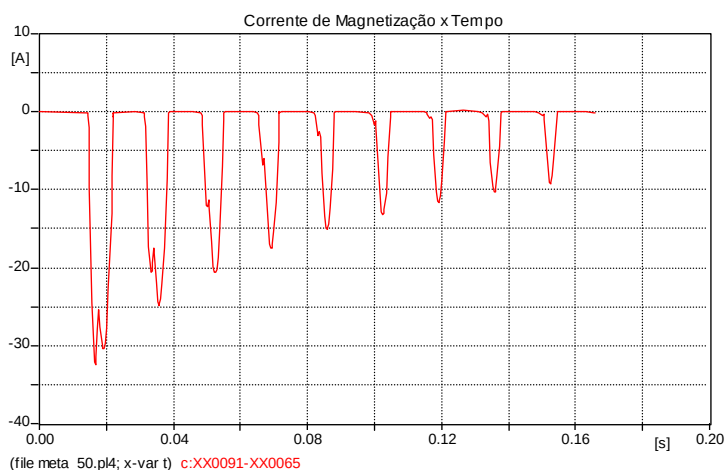


Figura 5.15 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

O valor de pico da corrente de magnetização no enrolamento do secundário do TC é mostrado na figura 5.15 (b), este valor foi de 33,96 A enquanto no ensaio experimental 35,38 A, com uma diferença percentual de 4,007%.

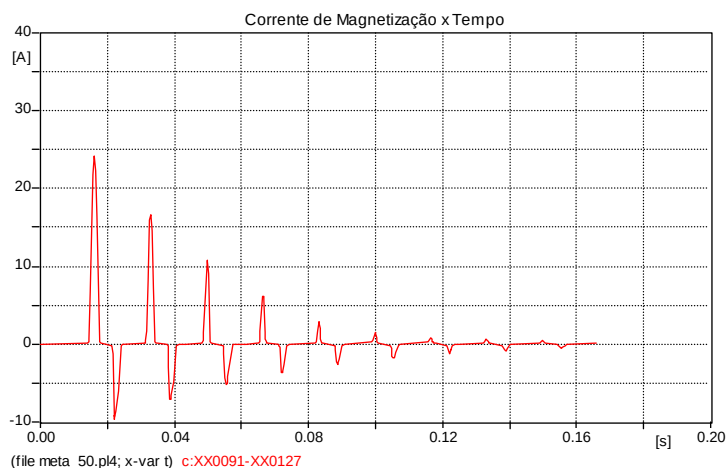


Figura 5.15 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

O valor de pico da corrente de magnetização no enrolamento do secundário do TC é mostrado na figura 5.15 (c), este valor foi de 24,15 A enquanto no ensaio experimental 23,81 A, com uma diferença percentual de 1,452%.

A figura 5.16 mostra a corrente transitória de neutro, gerada devido ao desequilíbrio percentual das cargas nominais dos TC's, ela cresce de forma logarítmica até a um valor máximo de 64,22 mA e depois decresce até entrar em regime.

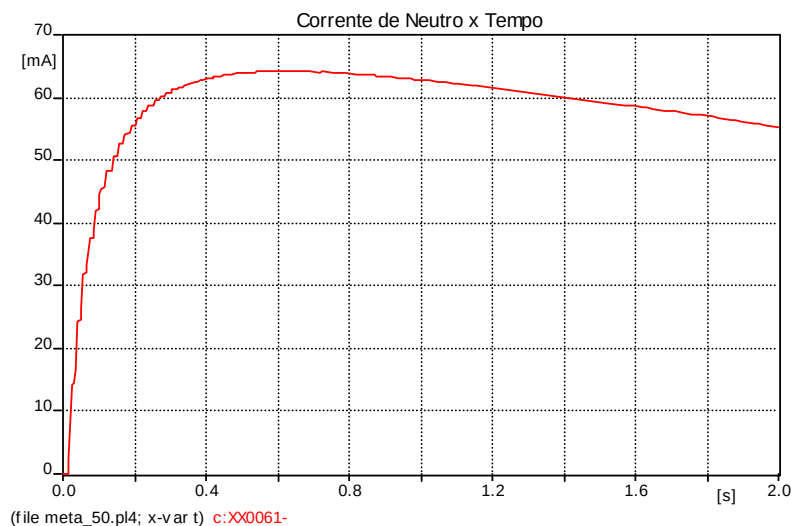


Figura 5.16 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

Caso E

O processo de energização do transformador de potência é o mesmo apresentado nos casos anteriores, com a exceção do nível de desequilíbrio aplicado, que nesse caso é 70%.

As formas de ondas das correntes de *inrush* das fases A, B e C correspondentes ao enrolamento primário respectivamente, serão ilustradas pelas figuras 5.17 (a), (b) e (c).

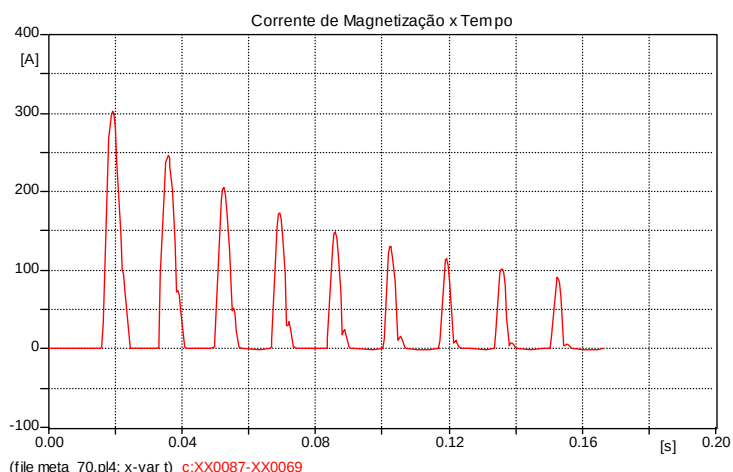


Figura 5.17 (a) - Corrente transiente de magnetização no enrolamento do primário da fase A.

O valor registrado do primeiro pico do transitório de corrente é ilustrado pela figura 5.17 (a), alcançou um valor de 310,12 A. A diferença percentual apresentada em relação ao ensaio experimental foi de 2,16%.

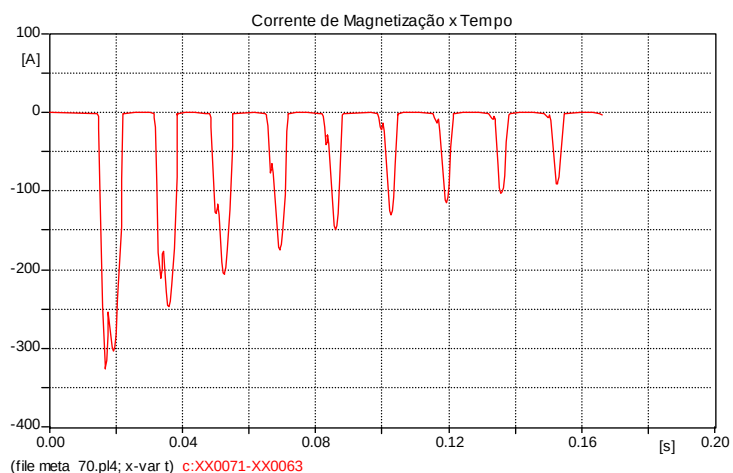


Figura 5.17 (b) - Corrente transiente de magnetização no enrolamento do primário da fase B.

A corrente transitória de energização do transformador de potência para a fase B foi de -339,61A, assim, a diferença percentual em relação ao ensaio experimental foi de 4,47%.

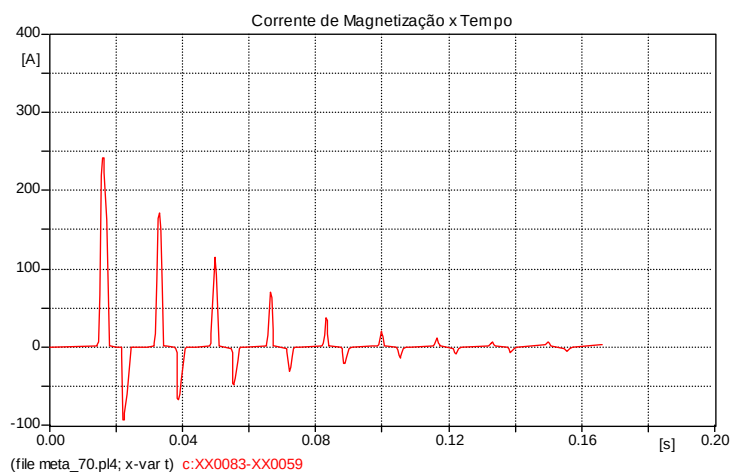


Figura 5.17 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do primário da fase C

A figura 5.17 (c) ilustra a corrente transitória de *inrush*, onde o valor do instante do primeiro pico foi de 241,08 A, e 0,61% de diferença em relação ao ensaio experimental que apresentou um valor de 239,62 A.

As formas de ondas das correntes de *inrush* nos enrolamentos secundários dos TC's são ilustrados pelas figuras 5.18 (a), (b) e (c).

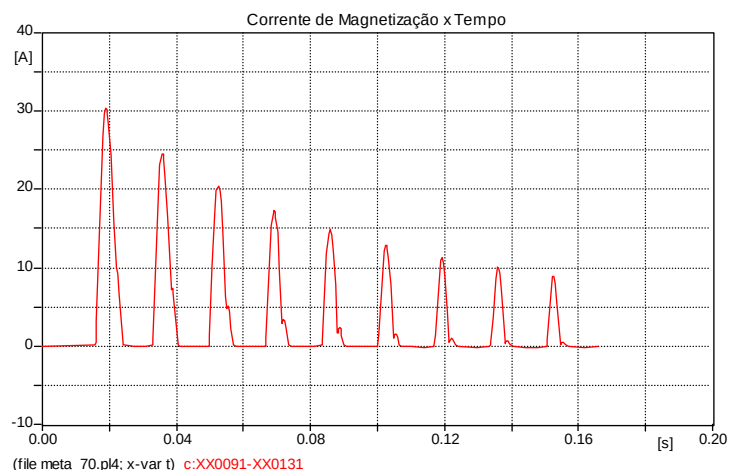


Figura 5.18 (a) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase A.

A figura 5.18 (a) mostra o valor do primeiro pico de corrente transitória com valor de 31,01 A. Enquanto que durante o ensaio experimental o valor

máximo registrado pelo oscilógrafo foi de 30,24 A, desta forma, a diferença percentual apresentado entre o ensaio experimental e computacional foi de 2,536%.

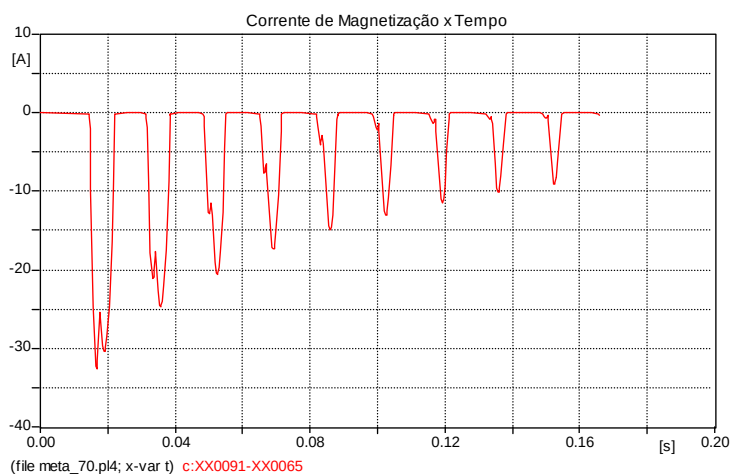


Figura 5.18 (b) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase B.

A corrente transitória de energização do transformador de potência é ilustrada pela figura 5.18 (b), o primeiro pico de corrente atingiu o valor de -33,96. A diferença percentual ao ensaio experimental foi de 4,2%.

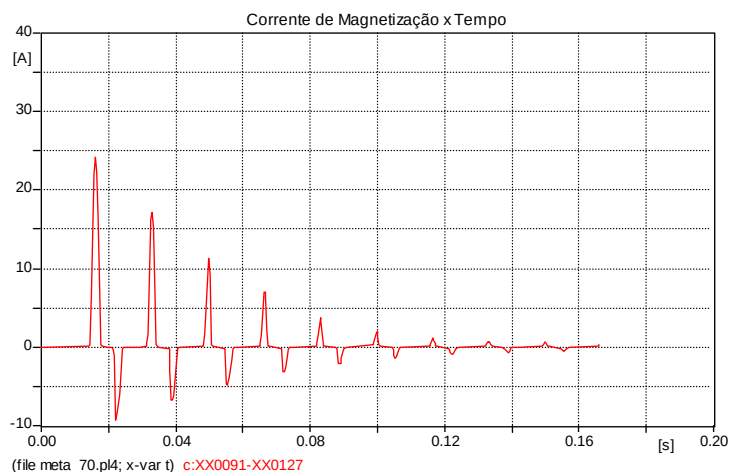


Figura 5.18 (c) - Corrente transitória de magnetização no enrolamento do secundário da fase C.

A forma de onda de corrente de inrush apresentada pela figura 5.18 (c) foi de 24,10 A enquanto que durante o ensaio experimental foi de 23,864 A, desta forma, a diferença percentual apresentado entre experimental e computacional é de 1,768%.

A figura 5.19 ilustra a forma de onda da corrente transitória de neutro. Pode-se observar que durante a energização do transformador de potência a corrente transitória proveniente do desequilíbrio aplicado entre as cargas no enrolamento secundário dos TC's registrou-se um valor de 99,6 mA

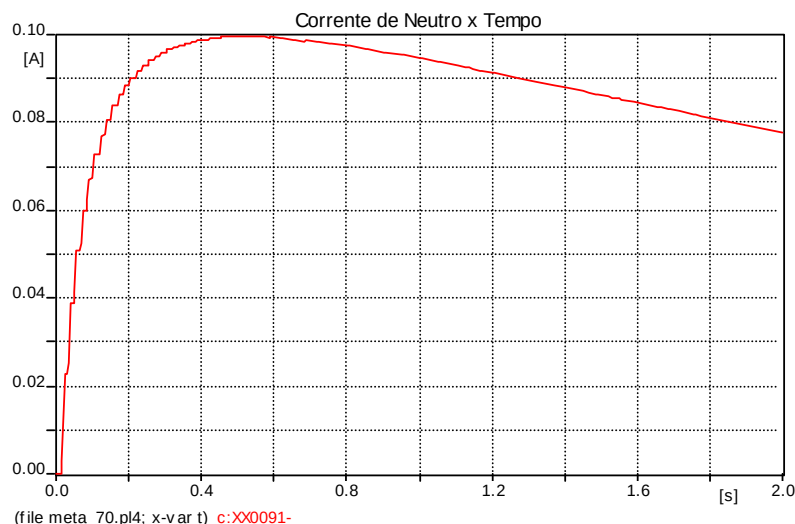


Figura 5.19 - Corrente transitória de *inrush* mA - neutro.

5.3 - ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE NEUTRO NOS TC's

Serão apresentadas aqui algumas alternativas que uma vez estudadas e devidamente aplicadas, permitirão que os “relés” sejam sensíveis a proteção contra correntes de neutro durante o processo de energização de um transformador de potência e, com isso, proporcionando minimização dos sérios inconvenientes tão comuns nos sistemas de distribuição de energia elétrica que atualmente acontecem. Os métodos que serão mostrados são:

- Diminuição do nível de desequilíbrio nos secundários dos TC's;
- Utilização do *ground sensor*.

5.3.1 - DIMINUIÇÃO DO NÍVEL DE DESEQUILÍBRIO NOS SECUNDÁRIOS DOS TC's

Uma solução que pode ser aplicada a fim de reduzir o nível de desequilíbrio é a adição de uma impedância a mais em cada secundário dos TC's, desta forma, o nível de desequilíbrio diminuiria em relação ao atual.

Serão efetuados aqui os mesmos casos mencionados anteriormente, porém com o acréscimo de uma impedância de $0,2 \Omega$ no secundário dos TC's, demonstrando assim o cálculo do novo nível de desequilíbrio. As formas de ondas dos fenômenos transitórios aqui apresentadas serão referentes para os efeitos das correntes de energização sobre o neutro.

Caso A

Consiste na energização do transformador de potência e adição de uma impedância de $0,2\Omega$ nos terminais do enrolamento secundário de cada TC conforme observa-se abaixo.

Carga nominal em seu secundário de:

Antes	Acréscimo	Nova Impedância
$Z_a = 0,180 \Omega$	$0,2\Omega$	$Z_a = 0,380 \Omega$
$Z_b = 0,220 \Omega$	$0,2\Omega$	$Z_b = 0,420 \Omega$
$Z_c = 0,200 \Omega$	$0,2\Omega$	$Z_c = 0,400 \Omega$

Cálculo do desequilíbrio percentual

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,380 + 0,420 + 0,400}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,4\Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,02\Omega}{0,4\Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 5,0\%$$

Como se observa na figura 5.20, a corrente transitória de neutro sofreu um decréscimo considerável em relação ao mesmo caso apresentado no **item a**

com um valor de 6,53 mA apresentando uma diferença percentual de 49,0% em relação ao caso anterior que foi de 12,82 mA.

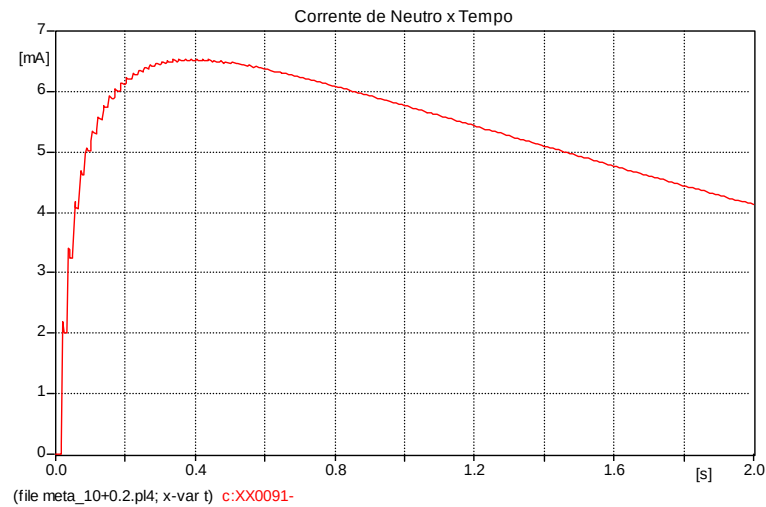


Figura 5.20 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

Caso B

Esse caso consiste no mesmo método utilizado no item anterior, assim, a seguir é feito o cálculo do desequilíbrio da carga nominal do enrolamento secundário dos TC's.

Carga nominal em seu secundário de:

Antes	Acréscimo	Nova Impedância
$Z_a = 0,160 \, \Omega$	$0,2 \, \Omega$	$Z_a = 0,360 \, \Omega$
$Z_b = 0,220 \, \Omega$	$0,2 \, \Omega$	$Z_b = 0,440 \, \Omega$
$Z_c = 0,200 \, \Omega$	$0,2 \, \Omega$	$Z_c = 0,400 \, \Omega$

Cálculo do desequilíbrio percentual

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,360 + 0,440 + 0,400}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,4 \, \Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,04 \, \Omega}{0,4 \, \Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 10,0\%$$

A figura 5.21 mostra que o acréscimo de uma impedância de $0,2\Omega$ em cada secundário dos TC's, proporciona uma redução do nível de desequilíbrio de corrente de neutro em relação aos mesmos casos estudados anteriormente. Para este caso a corrente de neutro alcançou um valor máximo de 13,05 mA.

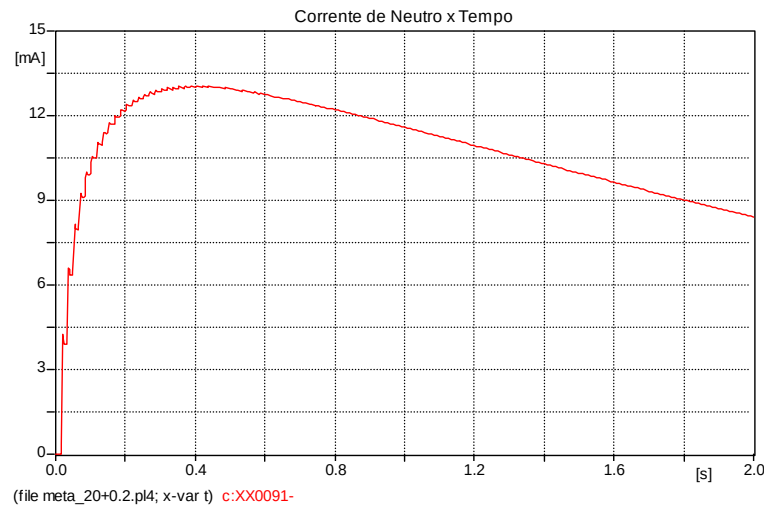


Figura 5.21 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

Caso C

Será realizado energização do transformador de potência conforme realizou no **Caso C** do item 5.2.3. A seguir é mostrado o cálculo de desequilíbrio aplicado nessa simulação.

Carga nominal em seu secundário de:

Antes	Acréscimo	Nova Impedância
$Z_a = 0,140 \Omega$	$0,2\Omega$	$Z_a = 0,340 \Omega$
$Z_b = 0,260 \Omega$	$0,2\Omega$	$Z_b = 0,460 \Omega$
$Z_c = 0,200 \Omega$	$0,2\Omega$	$Z_c = 0,400 \Omega$

Cálculo do desequilíbrio percentual

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,340 + 0,460 + 0,400}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,4\Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,06\Omega}{0,4\Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 15\%$$

A figura 5.22 ilustra a corrente de neutro proveniente do processo de energização do transformador de potência, o valor registrado de 19,63 mA, apresentando uma diferença de 49,05% em relação a 38,531 mA do **Caso C** do item anterior.

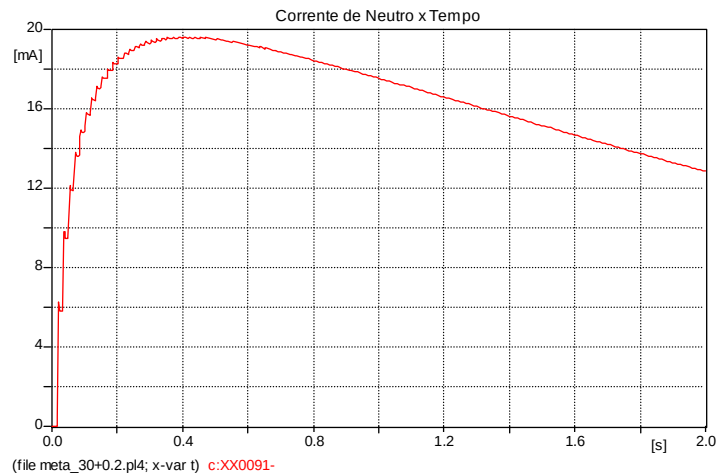


Figura 5.22 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

Caso D

Consiste na energização do transformador de potência e adição de uma impedância de $0,2\Omega$ nos terminais do enrolamento secundário de cada TC conforme observa-se abaixo.

Carga nominal em seu secundário de:

Antes	Acréscimo	Nova Impedância
$Z_a = 0,100 \Omega$	$0,2\Omega$	$Z_a = 0,300 \Omega$
$Z_b = 0,300 \Omega$	$0,2\Omega$	$Z_b = 0,500 \Omega$
$Z_c = 0,200 \Omega$	$0,2\Omega$	$Z_c = 0,400 \Omega$

Cálculo do desequilíbrio percentual

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,300 + 0,500 + 0,400}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,4\Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,1\Omega}{0,4\Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 25\%$$

Novamente observa-se que a figura 5.23 comprova que o método utilizado reduz a corrente de neutro. Sua corrente registrada no instante de maior valor foi de 33,01 mA enquanto que no **Caso D** apresentado no item anterior registrou-se 64,22 mA com uma discrepância de 48,60%.

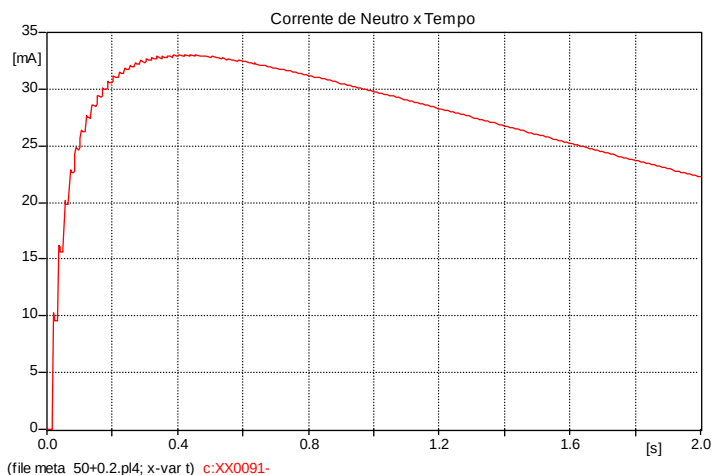


Figura 5.23 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

Caso E

Será realizado energização do transformador de potência conforme realizado no **Caso E** do item 5.2.3. O cálculo do desequilíbrio a ser aplicado nesse caso é descrito abaixo.

Carga nominal em seu secundário de:

Antes	Acréscimo	Nova Impedância
$Z_a = 0,450 \, \Omega$	$0,2 \, \Omega$	$Z_a = 0,650 \, \Omega$
$Z_b = 0,120 \, \Omega$	$0,2 \, \Omega$	$Z_b = 0,320 \, \Omega$
$Z_c = 0,220 \, \Omega$	$0,2 \, \Omega$	$Z_c = 0,420 \, \Omega$

Cálculo do desequilíbrio percentual

$$Z_{\text{médio}} = \frac{Z_a + Z_b + Z_c}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = \frac{0,650 + 0,320 + 0,420}{3} \Rightarrow Z_{\text{médio}} = 0,4633 \, \Omega$$

$$D(\%) = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{médio}}} \times 100 \Rightarrow D(\%) = \frac{0,1867 \, \Omega}{0,4633 \, \Omega} \times 100 \Rightarrow D(\%) = 40,3\%$$

A figura 5.24 ilustra a mesma situação, isto é, a diminuição do nível de desequilíbrio nos TC's provoca uma redução considerável na forma de onda da corrente de neutro. Esta atinge um valor máximo de 58,59 mA enquanto que a diferença entre o Caso E ilustrado no item anterior que registrou uma amplitude de 99,60 mA, foi de 40,17 %.

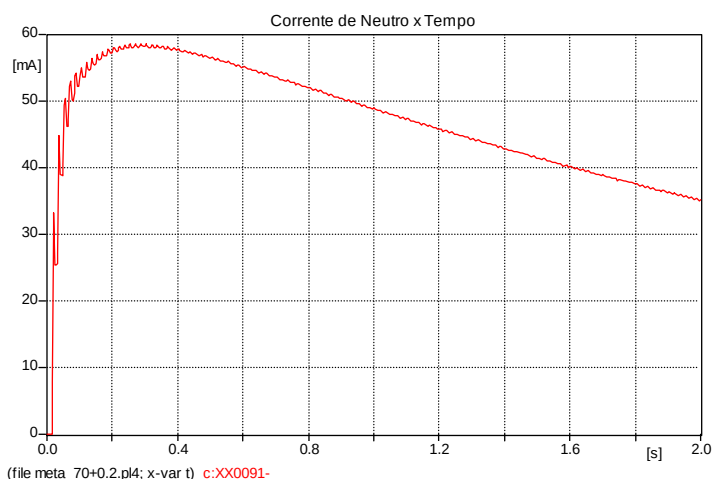


Figura 5.24 - Corrente transitória de magnetização mA - neutro.

5.3.2 - GROUND SENSOR

Uma alternativa que pode ser utilizada é o sensor de terra, conhecido como “ground sensor”, “seqüência zero” ou “núcleo balanceado” como mostrado na figura 5.25. Este sensor consiste em um simples TC toroidal com uma larga janela, o bastante para acomodar todos três condutores de fase.

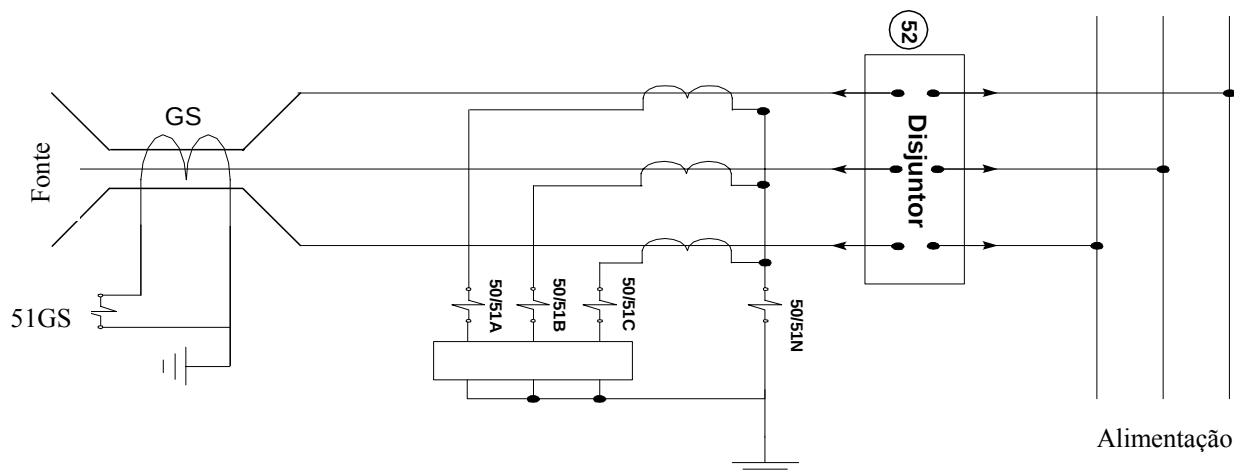


Figura 5.25 - Configuração diferente do relé de falta pra terra.

Como se pode ser observado, nas saídas dos alimentadores geralmente são utilizados disjuntores comandados por relés de sobrecorrente de fase e de terra, com religamento automático executado através do relé religador.

Os relés de sobrecorrente de fase devem atuar para curtos-circuitos trifásicos e bifásicos e o relé de terra deve atuar para curto-circuito monofásico (ou fase-terra). Eles possuem dois elementos (ou unidades): o elemento temporizado e o elemento instantâneo. A tabela 5.1 mostra os relés de sobrecorrente e os seus respectivos elementos e as nomenclaturas.

Tabela 5.1 - Mostra os relés de sobrecorrente e os seus respectivos elementos e as nomenclaturas.

Relé	Elemento	Nomenclaturas
Fase	Temporizado	51
Fase	Instantâneo	50
Terra	Temporizado	51N e 51GS
Terra	Instantâneo	50N

As nomenclaturas são números padrões que identificam os relés por função.

O relé de terra denominado 51GS *Ground Sensor* é ligado em série com o relé 50/51N. Este relé pode ser ajustado para um valor de *pick-up* muito baixo, o que permite que ele atue para curto-circuito monofásico com alta impedância.

O *Ground Sensor* foi implementado no ATP utilizando uma TACS HYBRID, com o objetivo de efetuar o somatório das correntes nas fases de alta para sensibilizar a proteção em seu secundário.

No ATP, para representar o *Ground Sensor*, foram utilizadas chaves de medições, que são aquelas que se encontram permanentemente fechadas e cuja finalidade é somente monitorar corrente do TIPO 91 (representam chaves de corrente). Para efetuar o somatório das correntes nas fases de alta foi utilizado TIPO 98 (representa a saída dos valores das correntes), que consiste em uma interface das variáveis do ATP. Para isso, foi implementada no ATP uma TACS HIBRID.

A seguir será ilustrada uma simulação computacional utilizando o modelo do *Ground Sensor* como TC toroidal. O motivo dessa simulação foi constatar como o somatório das correntes é feita no enrolamento da alta.

Como pode se observa na figura 5.26, a corrente medida pelo *ground sensor* é desprezível. Desta forma pode-se constatar que o *ground sensor* tem permitindo uma melhor proteção do sistema em qual está acoplado. No sentido desta ser mais precisa, isto é, evitando operações indevidas.

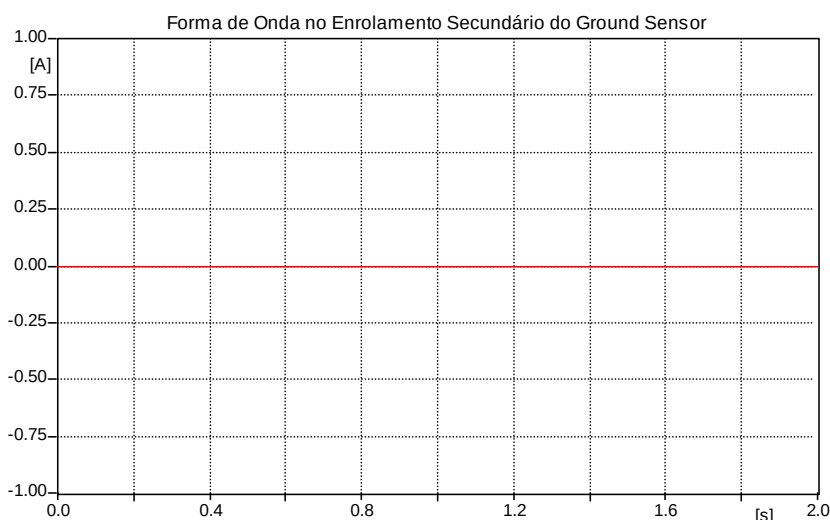


Figura 5.26 - Somatório das Correntes na Fase de Alta medida pelo *Ground Sensor*.

5.4 - SÍNTESES DOS RESULTADOS DO ENSAIO COMPUTACIONAL

A seguir são mostradas duas tabelas que representam em síntese os resultados da simulação computacional e as alternativas aqui empregadas. Através da inspeção visual dos resultados anteriormente apresentados torna-se possível o estabelecimento de termos comparativos entre os oscilogramas obtidos através das diferentes simulações computacionais efetuadas. Assim procedendo pode-se extrair as informações constantes nas tabelas 5.2 e 5.3. Mais uma vez, vale ressaltar que os aspectos qualitativos e quantitativos das correntes transitórias são fortemente influenciados por variáveis como:

- Curva real de saturação do material magnético dos transformadores;
- Parâmetros resistivos, indutivos, etc;
- Momento exato em que acontecem as energizações;
- Fluxo residual dos transformadores;
- Origem e nível dos desequilíbrios das cargas alimentadas pelos TC's e respectivos cabos de conexão.

Tabela 5.2 - Quadro comparativo dos valores máximos das correntes nos enrolamentos e diferença percentual entre as estratégias computacional e experimental em cada enrolamento.

CASO	Valor Máximo da Corrente A						Diferença Percentual entre Computacional e Experimental (%)					
	Enrolamento Primário			Enrolamento Secundário			Enrolamento Primário			Enrolamento Secundário		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
A	310,127	-339,621	241,062	31,013	-33,962	24,106	2,069	4,498	1,172	2,265	4,310	0,706
B	310,127	-339,621	241,062	31,013	-33,761	24,207	2,294	4,563	1,172	2,630	4,930	2,087
C	310,401	-339,241	241,262	31,101	-33,965	24,117	2,639	4,769	1,875	3,133	4,386	1,837
D	310,127	-339,623	241,054	31,101	-33,965	24,117	2,490	4,287	0,952	3,080	4,086	1,404
E	310,122	-339,618	241,066	31,104	-33,964	24,159	2,462	4,208	0,889	2,976	4,007	1,452
F	310,125	-339,617	241,087	31,011	-33,962	24,106	2,163	4,470	0,612	2,536	4,200	1,768

A tabela 5.2 mostra um quadro comparativo resumido dos valores de máximos das correntes de energização durante a simulação computacional nos enrolamentos primário e secundário e ilustra também a diferença percentual dos ensaios experimental e computacional em cada fase de seus enrolamentos tomando como referência a relação de espiras.

Tabela 5.3 - Comparação das correntes de neutro entre as estratégias experimental e computacional.

CASO	Máximo Corrente de Neutro [mA]		Diferença Percentual entre Computacional e Experimental (%)
	Experimental	Computacional	
Base	0,00	0,00	0,000
A	12,63	12,82	1,504
B	25,29	25,68	1,542
C	37,95	38,53	1,528
D	63,25	64,22	1,534
E	98,10	99,60	1,529

A tabela 5.3 ilustra os valores experimental e computacional da corrente de neutro nos TC's. Analisando a diferença percentual entre ambas as estratégias observa-se que a discrepância encontrada entre as correntes de neutro nos ensaios são pequenas.

É apresentada a seguir a tabela demonstrativa das alternativas utilizadas para a diminuição da corrente de neutro nos transformadores de corrente, para evitar a operação indevida dos equipamentos de proteção.

Os métodos utilizados foram:

- Diminuição do nível de desequilíbrio nos secundários dos TC's;
- Utilização do *Ground Sensor*.

Tabela 5.4 - Comparação do valor da corrente de neutro da a simulação computacional com a alternativa de diminuição do nível de desequilíbrio nos secundários dos TC's.

DIMINUIÇÃO DO NÍVEL DE DESEQUILÍBRIO NOS SECUNDÁRIOS DOS TC'S			
CASO	Máximo Corrente de Neutro [mA]		Diferença Percentual entre computacional e experimental (%)
	Computacional sem Acréscimo de Impedância	Computacional com a Adição de Impedância	
A	0,00	0,000	0,000
B	12,82	6,537	49,00
C	25,68	13,05	49,18
D	38,53	19,63	49,05
E	64,22	33,01	48,60
F	99,60	58,59	40,17

A tabela 5.4 apresenta os valores da corrente de neutro entre as estratégias computacionais com e sem a adição de impedância. Como pode se observar, o acréscimo da impedância de $0,2\Omega$ fez com que a corrente de neutro caísse consideravelmente como comprovada pelos cálculos em cada caso.

Assim sendo, as formas de onda e valores mostrados neste capítulo referem-se a situações particulares. Isto determina que, mudança em qualquer uma destas grandezas podem implicar em alterações qualitativas e quantitativas dos resultados. Não obstante tais ressalvas, as constatações discutidas são orientativas sobre as conseqüências de cada uma das manobras simuladas.

Apesar destas distinções, todas as investigações foram voltadas para o conhecimento das manobras sobre correntes de neutro na conexão dos TC's. Tendo em mente que a origem de todo o trabalho se fundamenta na operação da

proteção de neutro, o enfoque e comentários foram direcionados para tal grandeza.

5.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de distribuição de energia elétrica crescem de forma progressiva e com isso crescem também os inconvenientes, aos quais os mesmos estarão sujeitos. Logo, os sistemas de proteção, necessariamente, devem dia a dia se tornar mais refinados; entende-se que refinar o sistema de proteção é procurar meios e soluções de uma forma econômica que consigam contornar os problemas que estão surgindo.

Fica claro, então, que os problemas são diversos, e para cada novo problema deve haver apenas um equacionamento bem adequado, o qual dê origem a melhor solução. Portanto, embasados neste fato é que apresentado nesse trabalho duas “alternativas”, e que a aplicação dessas alternativas, será em função do problema a ser solucionado e não da solução aparente apresentada pela alternativa.

Há necessidade de que os profissionais que trabalham com proteção sejam mais flexíveis e tenham em mente que a obtenção de uma melhor solução somente se dará através de uma rigorosa e minuciosa análise do problema, encarando não somente a parte técnica, mas, sobretudo, os investimentos bem como o retorno destes.

A atual situação que as concessionárias estão passando, obriga a uma avaliação e análise ampla e minuciosa, fornecendo soluções sólidas, econômicas e duradouras.

Em função disto não foi feito comentário sobre vantagens e desvantagens dos métodos utilizados, mas lembra-se que dentre algumas alternativas levando em conta custo e benefício provavelmente a melhor alternativa para novos

sistemas seja a utilização do transformador de corrente do tipo janela atuando como um sensor de terra ou “ground sensor”, o qual apresenta uma diferença percentual em relação à corrente residual desprezível, de modo a sensibilizar largamente as proteções de neutro.

CONCLUSÕES GERAIS

Ao longo desta dissertação foram apresentadas conclusões específicas para cada assunto tratado, contendo comentários sobre o mais relevante de cada capítulo. Desta forma, será mostrada aqui uma síntese dos pontos fundamentais observados. Serão ainda destacadas as principais contribuições do trabalho e apresentadas propostas para desenvolvimentos futuros.

O principal objetivo desta dissertação foi a investigação da corrente de neutro nos transformadores de correntes conectados em estrela aterrada com e sem desequilíbrios das cargas nos secundários dos mesmos, durante o processo de energização de um transformador de potência.

No *capítulo I*, realizou-se uma abordagem geral sobre o estado da arte do estudo de transitórios em transformadores de corrente, seus limites, suas características de desempenho, efeitos causados devido a desequilíbrio nas cargas de seus secundários. Após as considerações feitas, conclui-se que nesta área da engenharia elétrica, apesar dos grandes desenvolvimentos já ocorridos, pode-se facilmente identificar grandes lacunas a serem investigadas.

No **capítulo II**, procurou-se ilustrar os tipos mais comuns de transformadores de corrente, abordando seus tipos e características e subsídios necessários à evolução dos modelos no decorrer desta dissertação.

No **capítulo III**, foi feita uma revisão dos fenômenos eletromagnéticos associados à operação dos núcleos ferromagnéticos em regime transitório, a baixas frequências. Para a modelagem dos transformadores de corrente foi utilizado um transformador saturável para representá-los. Esse transformador emprega um reator saturável (tipo 98) no ATP para representar a saturação do ramo de magnetização, para o qual, a curva de magnetização dos TC's foi também levantada.

No **capítulo IV**, foram realizados os ensaios experimentais, que tiveram por objetivo verificar a forma de onda da corrente secundária dos TC's e a corrente de neutro nos mesmos, durante a energização de um transformador de potência. Foram discutidos alguns conceitos referentes à Qualidade da Energia Elétrica, com destaque ao item de desequilíbrios quanto as normas nacionais e internacionais, as quais fornecem elementos para o cálculo de desequilíbrio e índices de conformidades.

No **capítulo V**, foram realizados ensaios computacionais, onde de início foi feito um curto estudo a respeito de esquemas de proteção de transformadores (relés de sobrecorrentes). As simulações foram efetuadas a partir da energização do transformador de potência. Os resultados obtidos permitiram comparar possíveis correntes de fuga para terra, obtidas em um sistema de proteção que emprega três TC's conectados em estrela. Depois de realizados esses ensaios foram feitas algumas alternativas para uma melhor resposta da proteção em relação ao valor da corrente de neutro nos TC's tais como: diminuição do nível de desequilíbrio nos secundários dos TC's e a utilização de *ground sensor* (foi

utilizada uma TACS HYBRID do ATP) para efetuar o somatório das correntes nas fases da alta para sensibilizar a proteção em seu enrolamento secundário.

Deve-se ressaltar que embora os temas abordados nesta dissertação tenham procurado aprofundar nos os assuntos descritos, muito há ainda a ser investigadas nessa área.

Para o aperfeiçoamento deste estudo, sugere-se acrescentar os seguintes itens:

- Modelagem dos transformadores de corrente, levando em consideração as perdas por foucault e por histerese;
- Considerar os efeitos capacitivos e fluxos remanescentes no núcleo;
- A inserção de entreferros no núcleo do TC deve também ser investigada sob o ponto de vista da exatidão do mesmo. Isto porque o entreferro constitui uma componente de alta relutância, fazendo com que o fluxo de dispersão aumente. Assim, a especificação do tamanho do entreferro deve ser um item a ser cuidadosamente avaliado.

Por fim, essa dissertação de mestrado proporcionou a publicação de um artigo:

- **GARCIA, R. A., LYNCE, M, R. C., OLIVEIRA, J, C., CECÍLIO, A, P., FELÍCIO, J, V. COMPORTAMENTO DOS TC'S SOB CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA**, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - **SNPTEE XVIII** - Curitiba / PR, 16 a 21 de outubro de 2005.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SEELEY, H.T – “The Effect of Current - Transformer Residual Magnetism on Balanced - Current or Differential Relay” - **AIEE Trans.**, Vol 62, apr. 1943.

- [2] SOHIER, J.; GAILLET, B.; LÉGER, H. S. – “Comportement des Transformateur de courant em Regime Asymétrique de Court” - Circuit - **Revue Générale de L' Électricité**, Tome 75, No. 6, Juin. 1966.

- [3] WIZSNIEWSKY, A, - “Improvement of Current - Transformer Transient Performance” - **Proc. IEE**, Vol. 119, No. 5, May 1972.

- [4] SMOLINSKY, W. J. – “Design Considerations in the Application of Current Transformers” - **IEEE PES Winter Meeting**, New York - N. Y., Jan. 28 Feb. 2, 1973.

- [5] KORPONAY, N. E. – “Nongapped Cores, Antiremanence Gapped Cores or Linear Cores for Current Transformers” - **IEEE PES Summer Meeting**, México City, México, July 17-32, 1977.

- [6] KRISHNAMOORTHY, T. S.; VENUGOPAL, M.- “New Mathematical Model for Current Transformers” - **Proc. IEE**, Vol. 121, No 8, Agu.1974.

- [7] MARIOTTO, M. I. R. J. – “Análise e Simulação do Comportamento de Transformadores de Corrente em Sistemas de Proteção” - **Dissertação de Mestrado** - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 1986.

- [8] ALMICAR, A. M. – “Transitórios em Transformadores de Corrente para Relés de Proteção” - **Dissertação de Mestrado** - Escola Politécnica da USP - SP, 1978.
- [9] BETÂNIA, M. G. S. - “Transformadores de Corrente para Relés de Proteção - Modelagem e Análise do Comportamento Transitório” **Dissertação de Mestrado** - Universidade Federal da Paraíba - PB, 1991.
- [10] WRIGHT, A.; CARNEIRO JUN., S. – “Analysis of Circuit Containing Components with Cores of Ferromagnetic Material” - **Proc. IEE**, Vol. 121, No. 12, Dec. 1974.
- [11] WIZSNIEWSKY, A – “Calculation of Current - Transformer Transient Performance” - **Proc. IEE**, Vol. 119, No. 5, May 1972.
- [12] CONRAD, T.; OEDING, D. – “A method to Correct the Distorted Secondary Currents of Current Transformer” - **9th Power System Computation Conference**, 1987.
- [13] RAO, T. S. M. - “Power System Protection-Static-Relays”, **McGraw-Hill**, New Delhi, 1979.
- [14] Vanderleck, J.M.; Chairman, D. M. Allen; “Transients Response Of Currents Transformers”, **IEEE TRANS.**, Vol. PAS 96, pp. 1809 – 1811, Nov / Dez. 1977.
- [15] GEC - Measurements - “Protective Relays Application Guide” - **The General Electric Company Limited of England**, 1979.

- [16] CAMINHA, Amadeu, C; “Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos”, **Editora Edgar Blucher Ltda** - 1977.
- [17] CLARK, H.K. – “Proteção de Sistemas Elétricos de Potência” - **série PTI-UFSM**. Santa Maria-RS, 1979. 298p.
- [18] PEREIRA, M.A. “Introdução à Proteção de Sobrecorrente para Sistemas Elétricos Aéreos de Distribuição” - **Ilha Solteira-SP, CESP**, 1986. 609p.
- [19] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 6820** Transformadores de Corrente - Método de Ensaio.
- [20] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 6856** - Transformadores de Corrente - Especificações.
- [21] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – **NBR 6509** - Instrumentos de Medição e Terminologia.
- [22] - MAMEDE, João, F; “Manual de Equipamentos Elétricos, **2ª Ed., Editora LTC, Vol I**, - 1994.
- [23] IEEE C37.97 (Reaffirmed 12/90), “**IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power System Buses**”.
- [24] MASON, C.R. “The Art and Science of Protective Relaying” - New York, **Copyright by G.E.C.**, 1956. 30Sp.
- [25] STEVENSON, W. D.; “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”. **Editora McGraw-Hill do Brasil**, Rio de Janeiro, 1978.

- [26] ANTÔNIO, M. P “Proteção contra Falta Assimétrica Tipo Fase Terra de Alta Impedância nos Sistemas de Distribuição de Energia” - **Ilha Solteira** - SP, CESP.
- [27] TAVARES, M. C.; COURY, D. V.; CAMPOS, P. E. G.; LIMA, M.C. “Análise de Desempenho da Proteção Diferencial dos Transformadores de Potência com o Emprego do ATP-EMTP” - **XV SNPTEE** Outubro de 1999 Foz do Iguaçu - Paraná - Brasil.
- [28] R. YACAMINI and H. BRONZEADO - “Transformer Inrush Calculation Using a Coupled Eletromagnetic Model”, **IEE Proc.Sci.Meãs.Technol.**, nº 06, November/1994.
- [29] GREENWOOD, A.; “Electrical Transients in Power Systems” - **Wiley Intercience**, 1971 - Chaper 5
- [30] BALDWIN, B. Jr., TED, A. B., “Operation of Ground Sensor Relays Under Conditions of Partial CT Saturation”, **IEEE Trans. Ind. Applicat.**, vol. 33, pp. 1111-1116, July/Aug. 1997.
- [31] LEUVEN EMTP CENTER (LEC) – “Alternative Transients Program (ATP)” - **RULE BOOK**, july/1987.
- [32] LEMOS, A. M., OLIVEIRA, J. C., DELAIBA, A. C., LYNCE, M, R. C., OLIVEIRA, J. C. F., MEDEIROS, A. C. G “Experimental and Computational Investigations Related to CT’s Neutral Current Arising from Inrush Phenomenon on Delta Connected Transformers”, **V Induscon**, Salvador, BA, 2002.

[33] WRIGHT, A. – “Current Transformers – Their Transient and Steady State Performance” – **Chapman and Hall Ltd**, 1968.

[34] - PINTO, E. T.; “Enfoques Principais na Sistemática de Estudo e Aplicação de Transformadores de Corrente”, **Dissertação de Mestrado** - UNIFEI - MG, junho de 1975.

[35] - TALUKDAR, S.N.; BAILEY, J. R, “Histeresis Models for System Studies”, **IEEE TPAS**, Vol. PAS – 95, No. 4, jul/agust. 1976.

[36] - GCOI / SCEL / GTEE. “Critérios e Metodologias para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”. **Rel. SCEL / GTEE**, Julho – 1974.

[37] - ANEEL. “Contribuições Para a Normatização da Qualidade da Energia Elétrica: Harmônicos e Desequilíbrios”. **UFU**, 2000.

[38] - IEEE 446-1987. “IEE Recommended Praticice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications”. (**Orange Book**).

[39] - BRONZEADO, H. S. E YACAMINI, R. “transformers Interaction Caused by Inrush Current”, **IPST’97**, Seattle, EUA., 1997.