

“Inrush Zero”: Projeto Chesf de P&D, Parte I

Modelagem e Estratégia para Chaveamento Controlado de Transformadores Trifásicos

R. Apolônio, UFMT, A. B. Vasconcelos, UFMT, J. C. Oliveira, UFU e H. S. Bronzeado, CHESF

Resumo - Este artigo está associado com a modelagem de transformadores de potência, validação de modelos desenvolvidos e implementação em programa computacional e proposição de uma estratégia para o chaveamento controlado de transformadores trifásicos. Estudos computacionais e¹ laboratoriais são ilustrados para fins de verificação da eficácia da representação e da estratégia de controle propostas. Os resultados obtidos esclarecem sobre a exequibilidade de se energizar transformadores trifásicos sem os inconvenientes dos transitórios eletromagnéticos relacionados com o clássico fenômeno de “inrush”.

Palavras-chave - Corrente de magnetização, corrente de *inrush*, chaveamento controlado, fluxo residual, chaveamento de transformadores.

I. INTRODUÇÃO

A energização não controlada de transformadores de potência pode resultar em fluxos dinâmicos elevados no núcleo, ocasionando a saturação de uma ou mais colunas (e/ou culatras) do transformador e como consequência, o surgimento de elevados valores da corrente de magnetização durante a energização. Essas correntes elevadas, denominadas de correntes de *inrush*, possuem amplo espectro harmônico, incluindo as harmônicas pares, e ocasionam efeitos indesejáveis, tais como: falha na operação do relé diferencial de proteção, fadiga mecânica nos enrolamentos do transformador, deterioração da isolamento e principalmente afundamentos temporários de tensão, etc. Alguns desses efeitos provocam de imediato a redução da qualidade da energia do sistema.

Os valores alcançados pela corrente transitória de magnetização dependem basicamente de dois fatores: o instante sobre a onda de tensão em que ocorre o fechamento das chaves e o fluxo residual presente no núcleo do transformador. Nas condições de regime permanente o fluxo encontra-se atrasado de 90 graus elétricos em relação à tensão, porém quando se energiza o transformador no instante da passagem por zero da onda de tensão, o fluxo transitório no núcleo, produzido pela integral da tensão, e a corrente de magnetização atingem seus valores máximos. Para satisfazer as condições de regime permanente do fluxo magnético no núcleo é necessário que o instante de

fechamento das chaves, ou seja, o instante sobre a onda de tensão no qual as chaves são fechadas, produza um fluxo igual àquele presente no núcleo do transformador [1]. Para a implementação da estratégia de energização suave em transformadores trifásicos é necessário que possa haver o controle individual do fechamento de cada uma das fases do sistema elétrico que supre o transformador. Assim sendo, este artigo realiza estudos sobre o procedimento para se calcular o fluxo residual que permanece no núcleo durante a etapa de desenergização do transformador com base na avaliação da tensão transitória que aparece nos terminais dos seus enrolamentos. Posteriormente, na etapa de energização do transformador, o instante ótimo para o fechamento da primeira chave é avaliado em função do valor e da polaridade do fluxo residual. O instante ótimo para o fechamento das chaves ainda em aberto é obtido através da inspeção dos fluxos presumíveis e fluxos dinâmicos que se estabelecem no núcleo após o fechamento da primeira chave.

II. MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

Diferentes estratégias têm sido utilizadas para a modelagem de transformadores, ou seja, modelagem através de equações elétricas (dualidade), modelagem através de equações elétricas e magnéticas e, modelagem através de relutâncias. A representação do transformador trifásico do tipo núcleo envolvido será realizada com base no uso de relutâncias, forças magnetomotrizes (fmms) e dos recursos disponibilizados pelo simulador Saber. A figura 1 mostra o modelo físico do transformador e o modelo magnético equivalente, cujos detalhes são descritos em [2, 3].

A escolha dessa abordagem para os estudos computacionais de transformadores é particularmente vantajosa e necessária, pois permite que as interações entre os fluxos magnéticos das diferentes fases sejam levadas em conta, bem como as diferentes conexões dos enrolamentos possam ser facilmente obtidas. O modelo do transformador fica completamente caracterizado com a inclusão da histerese ferromagnética do núcleo do transformador, essencial para o estabelecimento do fluxo residual no núcleo durante a etapa de desenergização ou energização do transformador. O modelo de histerese ferromagnética de Jiles-Atherton é utilizado neste trabalho, pois exhibe as principais características necessárias, tais como: a curva inicial de magnetização, saturação da magnetização e remanência [4].

Agradecemos a CAPES pelas bolsas de estudos fornecidas, e a CHESF pelo suporte financeiro para realização dos trabalhos de Laboratório.

R. Apolônio, UFMT, membro da equipe do Projeto.

A. Vasconcelos, UFMT, membro da equipe do Projeto.

J. C. Oliveira, UFU, coordenador da equipe do Projeto.

H. S. Bronzeado, CHESF, gerente do Projeto.

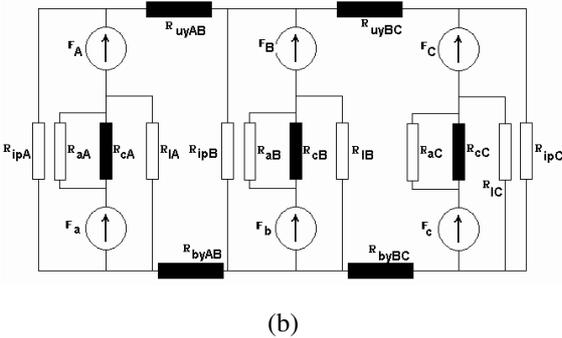
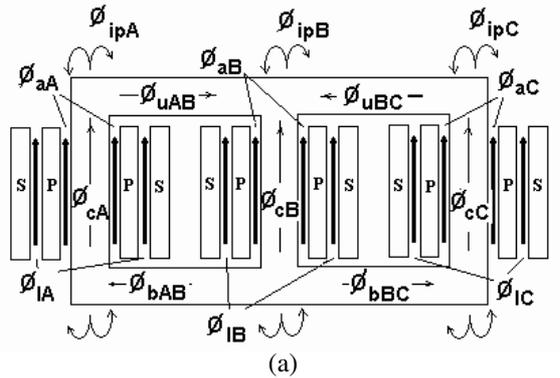


FIGURA 1. Transformador trifásico tipo núcleo envolvido: (a). Modelo físico do transformador – distribuição dos fluxos; (b). Modelo magnético equivalente.

III. FLUXO RESIDUAL

Um dos grandes desafios associados ao procedimento para chaveamento controlado consiste na determinação do fluxo residual. Este, como se sabe, é definido pelas condições impostas ao transformador no momento que antecede a sua desenergização. Ainda, ao ocorrer a desconexão do equipamento, o fenômeno é acompanhado de um comportamento oscilatório que não deve ser ignorado. Esse fluxo residual é influenciado por diversos fatores, tais como: as características do material do núcleo, a presença de entreferros no núcleo, a capacitância dos enrolamentos, as características da corrente de corte do disjuntor e a presença de capacitores ou linhas de transmissão conectadas ao transformador.

O fluxo no núcleo e conseqüentemente o fluxo residual podem ser medidos através da integração da tensão que aparece nos terminais dos enrolamentos do transformador, cujas características são dependentes das variáveis descritas acima. A correta estimativa do fluxo residual é extremamente importante para o sucesso da estratégia de chaveamento controlada, pois o fluxo residual define o instante sobre a onda de tensão no qual a(s) chave(s) devem ser fechadas.

Na etapa de simulações, a correta modelagem da histerese ferromagnética permite que se obtenha o valor do fluxo residual com base no acesso as variáveis do programa de simulação digital. A figura 2 mostra um desses resultados através do acesso as variáveis do programa e com o uso da saída gráfica do simulador. Entretanto, para o caso de

ensaios com protótipos ou ensaios de campo deve-se adotar algum procedimento para o cálculo do fluxo residual com base na tensão transitória que aparece nos terminais dos enrolamentos do transformador. Para tanto, um sistema de aquisição de dados deverá ser utilizado para a amostragem dos sinais de tensão nos terminais do transformador durante a etapa de desenergização. Para o cálculo do fluxo residual a seguinte estratégia deve ser utilizada:

1º) - o sistema de aquisição de dados continuamente armazena os últimos n períodos do sinal discretizado da tensão coletada nos terminais do transformador;

2º) - um programa especialmente desenvolvido para tal fim, examina as amostras das tensões, determina o final das oscilações ou adicionalmente determina a extinção completa da corrente oscilatória nos enrolamentos do transformador, retrocede alguns períodos, não muitos, para detectar o cruzamento por zero da tensão;

3º) - o cálculo do fluxo residual é iniciado no instante em que a tensão passa por zero, com a adição de um procedimento para a correção do deslocamento no valor do fluxo calculado, gerado pelo fato de que a tensão e o fluxo iniciam-se de zero.

Em se tratando de transformadores trifásicos do tipo núcleo envolvido, a soma dos fluxos das três colunas deverá ser zero.

IV. ESTRATÉGIA DE CHAVEAMENTO CONTROLADO CONSIDERANDO O FLUXO RESIDUAL NO NÚCLEO

O princípio básico para a eliminação do sobrefluxo, ou fluxo assimétrico que surge no núcleo do transformador durante a sua energização, é garantir que o fluxo residual seja igual ao fluxo presumível. O fluxo presumível corresponde ao fluxo que viria a ser criado caso a fonte de suprimento estivesse conectada ao transformador e o mesmo já estivesse atingido as condições de regime permanente. Para um transformador monofásico com fluxo residual nulo, o instante ótimo para o fechamento da chave ocorre quando a tensão da fonte de suprimento estiver passando pelo seu valor máximo ou valor de pico, isto seria suficiente para suprimir todo o transitório de energização. Entretanto, um transformador trifásico construído com um núcleo de três colunas possui inerentemente interação entre os fluxos das fases. Nesses transformadores, depois que uma fase (ou duas dependendo da ligação dos enrolamentos) é energizada, um fluxo se estabelece pelas outras colunas. A esse fluxo transitório denominaremos de fluxo dinâmico no núcleo. A figura 2 mostra os fluxos dinâmicos no núcleo após o fechamento da fase (c) de um transformador trifásico ligado em estrela aterrada.

O instante para energização da primeira fase, ou das duas primeiras fases dependendo da ligação dos enrolamentos, é ajustado sobre a onda de tensão quando a tensão instantânea v é igual a:

$$v = V_{\max} \text{seno}(\alpha) \quad (1)$$

onde V_{\max} é a tensão máxima aplicada aos terminais do enrolamento do transformador.

Para um transformador trifásico com os enrolamentos ligados em estrela aterrada, a fase conectada a coluna do

transformador contendo o maior fluxo residual, em módulo, deverá ser energizada primeiramente. Em se tratando da ligação em delta, as duas fases ligadas à coluna com maior fluxo residual deverão ser energizadas em primeiro lugar.

O valor do ângulo α é determinado como segue:

$$\alpha = \arcsen\left(\frac{\varphi_{residual}}{\varphi_{max}}\right) + 90^0 \quad (2)$$

onde $\varphi_{residual}$ é o fluxo residual e φ_{max} , ambos em [Weber], é dado por:

$$\varphi_{max} = \frac{V_{eficaz}}{4,442882.n.f} \quad (3)$$

onde V_{eficaz} é a tensão eficaz aplicada aos enrolamentos do transformador, n é o número de espiras do enrolamento e f é a frequência do sinal de tensão.

Há teoricamente dois instantes ótimos para o fechamento da primeira fase em função do ângulo α . Para fluxo residual positivo, o primeiro ângulo estará situado entre 90° e 180° , isto é, tensão positiva com derivada negativa; o segundo ângulo estará situado entre 180° e 270° , isto é, tensão negativa e derivada negativa. Neste trabalho, o primeiro ângulo será utilizado para o fechamento da primeira fase.

Após o fechamento da primeira fase, o fluxo gerado por ela irá atingir as outras colunas do transformador, eliminando o fluxo residual lá existente, dando origem ao fluxo dinâmico. O fluxo dinâmico é periódico e a soma dos fluxos dinâmicos de cada coluna deverá se igualar ao fluxo gerado pela fase ou coluna que foi energizada.

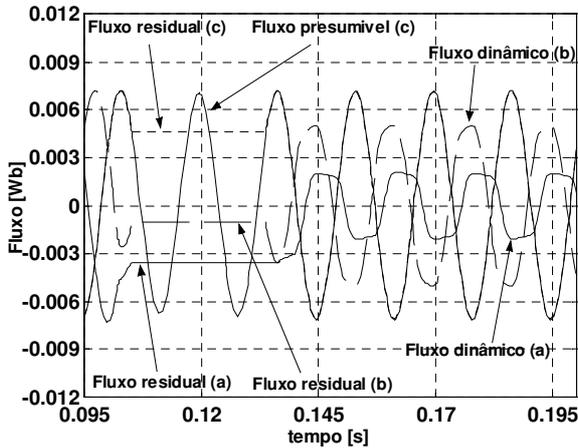


FIGURA 2. Fluxos no núcleo após a energização da fase (c) do transformador.

O instante ótimo para a energização das duas fases ainda em aberto foi derivado dos resultados das simulações, através da inspeção dos fluxos presumíveis e dos fluxos dinâmicos que se estabelecem no núcleo após a energização da primeira fase. A figura 3 ilustra um dos resultados das simulações, na qual a fase (c) foi energizada em primeiro lugar. Na figura 3 estão mostrados os fluxos presumíveis (Flx_p) e os fluxos dinâmicos (Flx_d) das fases (a) e (b). A comparação entre o fluxo presumível e o fluxo dinâmico que se estabelecem no núcleo em decorrência da energização

apenas da fase (c), fornece instantes de tempo repetitivos em que simultaneamente o fluxo presumível e o fluxo dinâmico no núcleo se igualam para as duas fases. Esses instantes são aqueles que poderiam ser designados por “*instantes ótimos*” para o chaveamento simultâneo das duas fases que ainda se encontram em aberto.

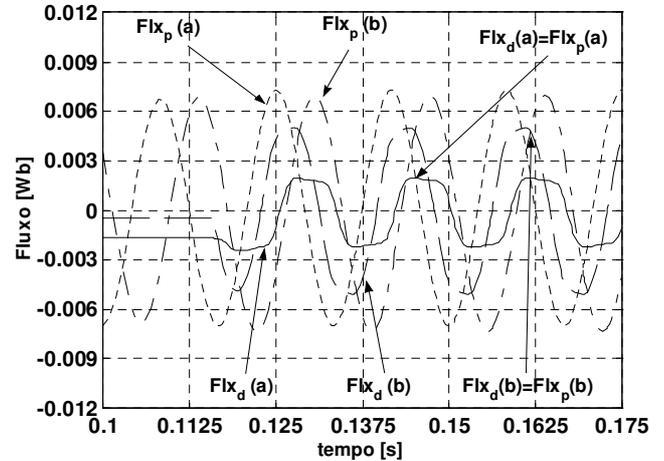


Figura 3. Instantes ótimos para o fechamento das fases restantes (fases (a) e (b)).

As simulações mostram que os instantes ótimos para o fechamento das outras fases ainda em aberto não dependem da intensidade nem mesmo da polaridade do fluxo residual, ou seja, o padrão do fluxo dinâmico que se estabelece no núcleo é repetitivo. Entretanto, o instante ótimo para o fechamento das chaves restantes depende de qual das fases foi primeiramente energizada. A tabela 1 resume os instantes ótimos em função de qual fase foi energizada em primeiro lugar. A referência para a contagem dos tempos é o cruzamento por zero da fase (a) com derivada positiva.

TABELA 1. Instante ótimo para o fechamento das duas fases restantes: conexão estrela aterrada – estrela aterrada/isolada.

B_{resid}	1ª fase energizada	$t_{ótimo}$ fechamento (genérico)
$\pm B_r$	(a)	$t = t_{ref(a)} + n \cdot \frac{T}{2} + 7,7ms$
$\pm B_r$	(b)	$t = t_{ref(a)} + (n+1) \cdot \frac{T}{2} + 5,6ms$
$\pm B_r$	(c)	$t = t_{ref(a)} + (n+2) \cdot \frac{T}{2} + 3,45ms$

onde

T – período da tensão de alimentação;

$t_{ref(a)}$ – instante de referência da fase (a) – cruzamento por zero (inclinação positiva)

A figura 4 mostra os fluxos residuais, dinâmicos e de regime permanente, durante a etapa de energização controlada do transformador. A figura 5 mostra as correntes transitórias de magnetização para o caso descrito. Nela observa-se que as correntes atingem a condição de regime permanente, isto é, as correntes de magnetização a vazio,

sem qualquer sobressalto. A figura 6 apresenta a tensão nos terminais dos enrolamentos após a seqüência de fechamentos das chaves descritas acima.

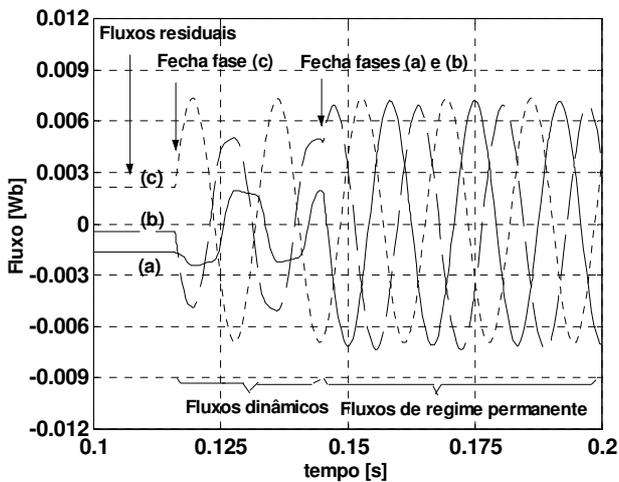


FIGURA 4. Fluxos residuais, fluxos dinâmicos e fluxos de regime permanente durante a energização controlada do transformador.

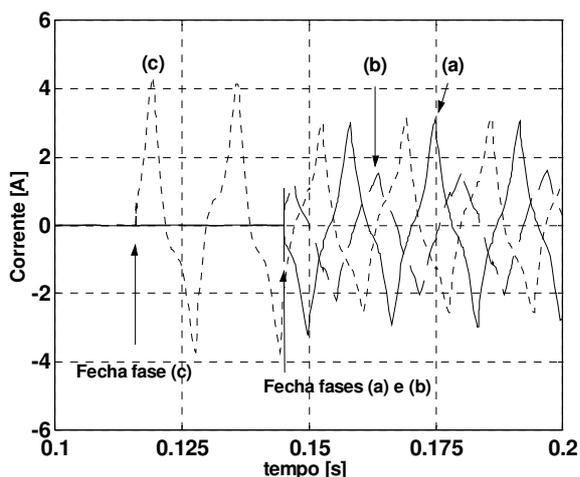


FIGURA 5. Correntes transitorias de magnetização durante a energização controlada do transformador.

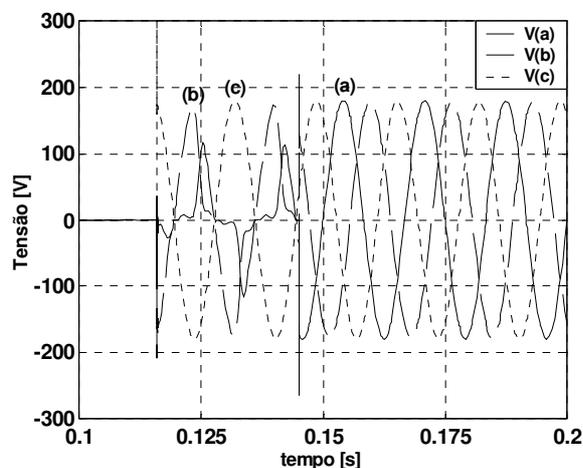


FIGURA 6. Tensões nos terminais dos enrolamentos do transformador durante a etapa de energização controlada.

V. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Com o objetivo de validar a estratégia definida anteriormente, realizaram-se testes de energização em um transformador trifásico de pequeno porte. Tais testes permitiram validar e ratificar os tempos de atraso de fechamento das chaves, cujos valores foram obtidos durante a fase de simulação digital e, mais importante ainda, investigar o aspecto geral ou não de tais tempos de atraso em função do tipo de núcleo trifásico utilizado. A fim de avaliar as estratégias de chaveamento controlado definida em tópicos anteriores faz-se necessário os seguintes dispositivos, conforme mostrados na forma de diagrama de blocos na figura 7 e resumidos a seguir:

- Um transformador do tipo núcleo envolvido;
- Uma placa de condicionamento de sinais com possibilidade de leitura da tensão e corrente trifásica, com capacidade de enquadramento dos níveis destes sinais a valores compatíveis com a etapa de digitalização;
- Uma placa de aquisição, que ao receber os sinais já condicionados, realiza a digitalização dos sinais, para que os mesmos possam ser processados em tempo real ou posteriormente;
- Um *notebook* que recebe e processa os cálculos necessários a execução das estratégias de chaveamento controlado, bem como a sincronização e emissão dos sinais digitais necessários a abertura e fechamento das chaves do circuito de potência;
- Circuitos de interface digital para interligar as saídas do *notebook* ao circuito de comando das chaves para energização ou desenergização do transformador.
- Um conjunto de chaves, com comando individual por fase, capaz de fechar e abrir o circuito de potência através de sinais elétricos provenientes do módulo de controle conectado a saída do *notebook*;

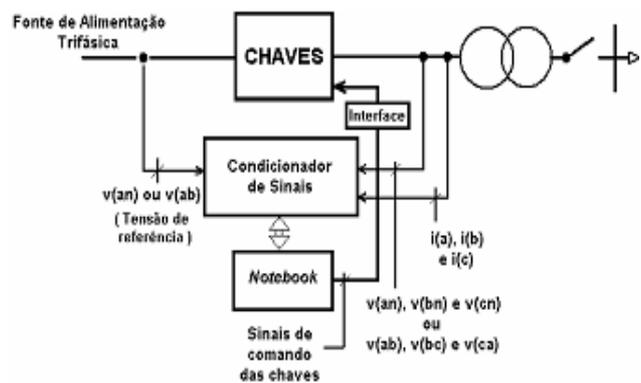


FIGURA 7. Diagrama de blocos da estrutura do chaveamento controlado.

A figura 8 ilustra, com o uso dos dispositivos reais, a estrutura geral do Sistema de Aquisição de Dados e Chaveamento Controlado (SADACC).

Para que o transformador pudesse ser energizado a qualquer tempo e em qualquer seqüência utilizaram-se de três chaves eletrônicas compostas por tiristores bidirecionais cujas características estão descritas na tabela 2, associadas a um circuito de comando acionado pela porta paralela de saída do *notebook*.



FIGURA 8. Dispositivos utilizados na estrutura do chaveamento controlado.

TABELA 2. Tiristores bidirecionais (Triacs) de silício.

Parâmetros	TIC263D
Tensão de pico repetitiva de bloqueio (V_{DRM})	400 V
Corrente direta efetiva de onda completa ($I_{T(RMS)}$)	25 A
Pico de corrente transitória direta – onda senoidal completa (I_{RSM})	175 A
Faixa de temperatura ambiente de operação	-40 a 110 °C

Para a realização da energização controlada, as seguintes etapas foram seguidas:

- 1º-desenergização prévia do transformador, conforme tensões transitórias mostradas na figura 9;
- 2º-cálculo do fluxo residual no núcleo com informações extraídas da desenergização (tabela 3);
- 3º-energização controlada conforme gráficos das tensões e correntes mostradas nas figuras 10 e 11.

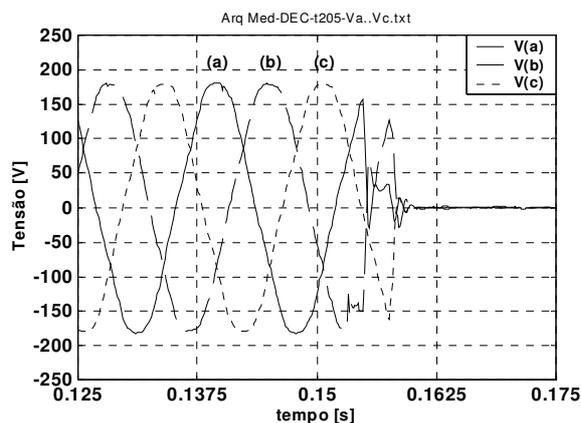
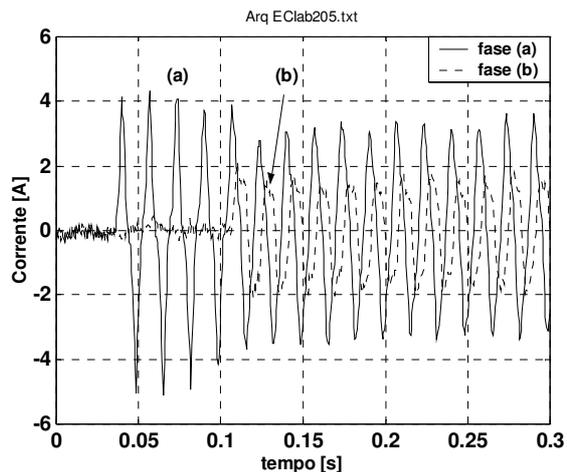


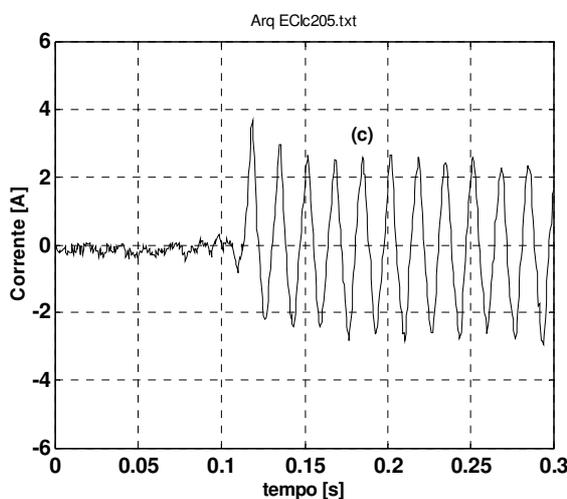
FIGURA 9. Tensões nos terminais do transformador durante a etapa de desenergização.

TABELA 3. Principais grandezas extraídas da etapa de desenergização.

	Fase (a)	Fase (b)	Fase (c)
V_{eficaz} [V]	129,18	128,57	128,76
Fluxo residual [Wb]	-0,00112	$-2,91 \times 10^{-5}$	0,00110
B_{res} [T]	-0,4296	0,0111	0,4201
α	69,22°		



(a)



(b)

FIGURA 10. Correntes de magnetização das três fases: (a) corrente nas fases (b) e (a); (b) corrente na fase (c).

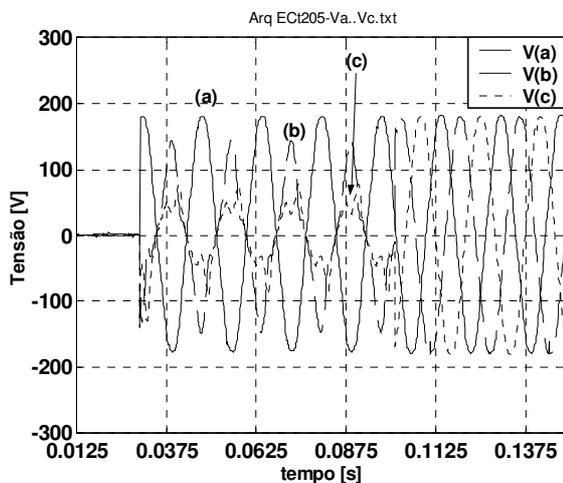


FIGURA 11. Tensões aplicadas nos terminais do transformador durante a etapa de energização controlada.

VI CONCLUSÕES

A modelagem do transformador trifásico através do uso de relutâncias proporcionado pelo simulador Saber mostrou ser bastante eficiente para representar as interações entre os fluxos magnéticos das diferentes fases e adicionalmente permitir a visualização das variáveis magnéticas nas simulações. O acesso as variáveis magnéticas (fluxos) permitiu definir os instantes ótimos de fechamento das fases/chaves durante a energização controlada usando um comando individual para cada chave. Os resultados das simulações, bem como os resultados dos testes em laboratório mostraram a eficiência do procedimento de energização e permitiu ratificar os tempos ótimos definidos na etapa de simulações. O procedimento de energização controlada pode ser estendido a qualquer tipo de conexão dos enrolamentos do transformador em questão, simplesmente utilizando-se os atrasos de tempo entre o fechamento das chaves/fases para essas novas conexões.

VIII REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Brunke, John H. and Fröhlich, Klaus J. (2001). Elimination of transformer inrush currents by controlled switching – part I: theoretical considerations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No.2, April 2001, pp.276-280.
- [2] Apolônio, R., Oliveira, J.C., Bronzeado, H. S. e Vasconcellos, A.B. (2003). The use of Saber simulator for three-phase non-linear magnetic devices simulation: steady-state analysis, *The 7th Brazilian Power Electronics Conference*, Fortaleza, CE – Brazil, pp. 524-529.
- [3] Oliveira, J.C., Apolonio, R., Vasconcellos, A.B. and Bronzeado, H.S. (2003), The use of Saber simulator for non-linear magnetic devices simulation: analysis and improvements, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Rio de Janeiro-Brazil, June/2003.
- [4] Jiles, D.C. and Atherton, D. L. (1986). Theory of ferromagnetic hysteresis, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 61, North-Holland, Amsterdam, pp. 48-60.