



V SBQEE
Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica
17 a 20 de Agosto de 2003
Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 076
Tópico: Modelagens e Simulações

ANÁLISE DO FENÔMENO DE *INRUSH* EM TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS: SIMULADOR SABER VERSUS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Roberto Apolônio - MSc*
UFMT

José Carlos de Oliveira - PhD
UFU

Herivelto S. Bronzeado - MSc
CHESF

Arnulfo Barroso de Vasconcellos - MSc
UFMT

RESUMO

Este artigo descreve o procedimento de modelagem de transformadores com base no uso de relutâncias. O procedimento adotado, dentre outras vantagens associadas com as representações no domínio do tempo, inclui a não linearidade do núcleo magnético. Para este fim utiliza-se o modelo de histerese ferromagnética de Jiles-Atherton e o modelo completo é implementado no simulador Saber. Com tal estratégia, os efeitos da densidade magnética de fluxo residual e do ângulo de chaveamento podem ser também investigados. Para verificar o desempenho da estratégia de modelagem e o modelo de histerese, simulações utilizando um transformador monofásico são realizadas e comparadas com medições efetuadas em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem de transformadores, Corrente de *inrush*, Simulador Saber, Modelo de Jiles-Atherton, Modelo de relutâncias.

1.0 - INTRODUÇÃO

O conceito do fenômeno da corrente de *inrush* de magnetização de transformadores é bastante antigo e remonta a última década do século XIX. A corrente de *inrush* de magnetização ocorre no instante de energização de um transformador e é

decorrente do sobrefluxo temporário que ocorre no núcleo do transformador. Essa corrente é drenada do sistema ao qual o equipamento está conectado e alcança elevados valores, podendo chegar a dez vezes ou mais a corrente nominal. Além deste aspecto, as formas não lineares das correntes decorrentes deste fenômeno possuem um expressivo conteúdo harmônico, tanto no que tange as ordens como também em magnitudes. Isto pode acarretar efeitos indesejáveis tais como: perda da vida útil do transformador, fadiga dos enrolamentos, má operação de relés de proteção e perda de qualidade do sistema elétrico de suprimento. Tradicionalmente, para as investigações desse fenômeno, a literatura indica procedimentos distintos que podem ser agrupados em: métodos analíticos, métodos usando simulação digital e recursos numéricos, e métodos que fazem uso de sistemas de medição com capacidade para análise em tempo real e recursos de armazenagem das informações. As pesquisas sobre esse assunto aparecem na ordem cronológica dos métodos acima citados, pois estão estritamente relacionadas ao desenvolvimento da eletrônica digital, e conseqüentemente ao fato dessas ferramentas se tornarem cada vez mais acessíveis ao pesquisador.

Dentro deste contexto, diversos trabalhos foram realizados, cujas contribuições se somam para ampliar cada vez mais os conhecimentos do assunto enfocado [1]-[6]. A disponibilidade de computadores digitais tem permitido direcionar as estratégias de pesquisa para a utilização crescente da simulação digital. O uso da

* Av. Fernando Correa da Costa, s/Nº, Bloco D – CEP 78060-900 – Cuiabá – MT – BRASIL
Tel.: +55(065)615-8780 – E-mail: apolonio@cpd.ufmt.br

simulação digital permite que fatores complicadores tais como: interação entre os fluxos magnéticos das diferentes fases do transformador, fluxo residual e o instante de chaveamento possam ser levados em conta na busca de resultados mais precisos. O uso da simulação digital requer que o dispositivo, no caso, o transformador, seja representado por modelos matemáticos e faz uso de métodos numéricos para a solução do problema [7]-[11]. Em geral os métodos diferem em relação à abordagem usada para modelar o transformador e na representação ou não da não linearidade do núcleo magnético. Em qualquer caso, o modelo é aplicado para solução da corrente de *inrush* numa variedade de situações e os resultados das simulações são comparados com resultados experimentais. Finalmente, o transformador pode ser inserido num sistema elétrico e questões relacionadas a possíveis interferências em dispositivos de proteção, afundamentos de tensão, sobretensões de chaveamento dentre outros fenômenos possam ser analisadas.

2.0 - MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

Dentro do cenário dos estudos computacionais, diferentes estratégias têm sido utilizadas para a modelagem de transformadores sob condições transitórias. São eles:

- Modelos através de equações elétricas (dualidade) [7],[8];
- Modelos através de equações elétricas e magnéticas [9],[10];
- Modelos baseados no uso de relutâncias [4],[5].

Na modelagem utilizando relutâncias, a representação do transformador é derivada da teoria de circuitos com base na associação de relutâncias lineares e não-lineares. Essa abordagem é particularmente vantajosa para o uso com o simulador Saber, pois esse programa de simulação possui uma variedade de blocos de dispositivos (modelos representados pelos *templates*) prontos e incorporados na sua biblioteca, sendo capazes de simular fenômenos elétricos e magnéticos. Assim, a flexibilidade e facilidade para conectar os *templates* permite com certa facilidade a construção de modelos de transformadores.

Para mostrar como usar o simulador Saber para modelar transformador, considere o transformador monofásico, com dois enrolamentos, do tipo núcleo envolvente, mostrado na figura 1a. A figura 1b mostra a redução do modelo físico num circuito magnético equivalente composto por forças magnetomotrizes (FMMs) e relutâncias [4].

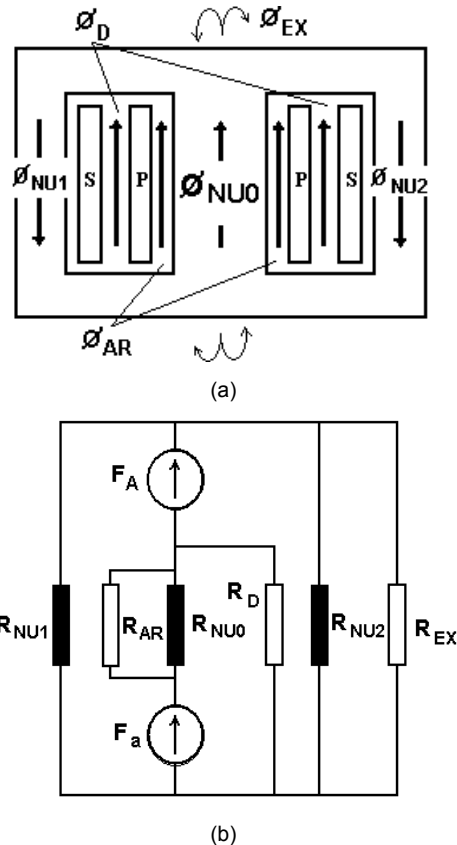


Figura 1 – (a) Distribuição dos fluxos num transformador;
(b) Modelo magnético equivalente.

onde:

- F_a FMM do enrolamento primário (ou interno);
- F_A FMM do enrolamento secundário (ou externo);
- R_{nu0} Relutância não linear da coluna central;
- R_{nu1} Relutância não linear da coluna à esquerda;
- R_{nu2} Relutância não linear da coluna à direita;
- R_{ar} Relutância linear do caminho de fluxo pelo ar entre o núcleo e o enrolamento interno;
- R_d Relutância de dispersão associada a Φ_d entre o enrolamento interno e o externo;
- R_{ex} Relutância associada ao fluxo no espaço de ar entre o núcleo e o tanque.

Referindo-se a figura 1b, há três tipos de elementos no circuito magnético equivalente: FMMs, relutâncias lineares e não lineares. Esses elementos são associados aos modelos constantes na biblioteca de modelos do simulador Saber. A fonte de FMM é modelada usando o *template wind.sin*, a relutância linear é modelada usando o *template core.sin* e, a relutância não linear é modelada usando um *template* implementado usando a linguagem MAST própria do simulador [15]. Para as relutâncias lineares os parâmetros necessários são: área, comprimento da via magnética e permeabilidade relativa do ar ($\mu_r=1$). Para as relutâncias não lineares, além dos parâmetros acima, também é necessário fornecer

os parâmetros do modelo de histerese. Substituindo-se os elementos pelos modelos no simulador resulta na representação do transformador mostrado na figura 2. Devido às facilidades do simulador a combinação de *templates* torna possível a construção de novos *templates*, permitindo que se construa bancos de transformadores com diferentes ligações elétricas de seus enrolamentos.

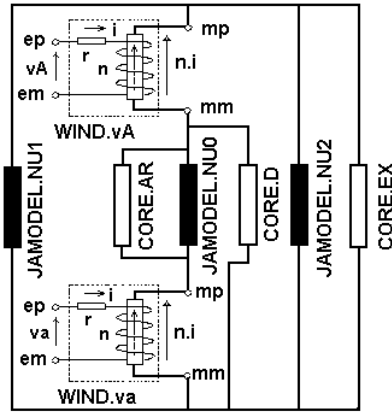


Figura 2 – Modelo equivalente para o Simulador Saber do transformador monofásico de núcleo envolvente.

3.0 – MODELO DE HISTERESE

A não linearidade do núcleo utiliza o modelo de histerese ferromagnética de Jiles-Atherton [13],[14], que possui as seguintes equações:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \quad (1)$$

$$M_{an} = M_s \left[\coth\left(\frac{H + \alpha M}{a}\right) - \frac{a}{H + \alpha M} \right] \quad (2)$$

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (3)$$

$$M = M_{rev} + M_{irr} \quad (4)$$

onde:

- M_{irr} parte irreversível da magnetização [A/m];
 M_{an} magnetização não histerética. Esta é representada pela função de Langevin e é uma função não linear do campo efetivo (H_e) dado por: $H_e = H + \alpha M$, [A/m];
 α parâmetro que representa o acoplamento dos domínios ferromagnéticos, determinando a forma da magnetização não histerética;
 k parâmetro dependente do material ferromagnético, sendo uma medida da histerese;
 δ sinal de (dH/dt) , assumindo o valor +1 quando $dH/dt > 0$ e -1 quando $dH/dt < 0$, o qual difere entre os ramos inferiores e superiores do laço de histerese;
 H intensidade de campo magnético [A/m];
 M magnetização total, [A/m];
 M_s magnetização de saturação, uma vez que

$M_{an} \rightarrow M_s$ quando $H \rightarrow \infty$, [A/m];

- M_{rev} parte reversível da magnetização, [A/m];
 a parâmetro que caracteriza a forma da magnetização não histerética.
 c constante de proporcionalidade que considera o movimento reversível das paredes do material ferromagnético.

As equações do modelo são implementadas diretamente no Saber utilizando-se da linguagem MAST do simulador [16].

4.0 – ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO

Com o objetivo de avaliar a abordagem utilizada para modelagem do transformador e o modelo de histerese ferromagnética utilizado, efetuou-se testes em um transformador monofásico do tipo núcleo envolvente, com dois enrolamentos. A tabela 1 fornece os dados elétricos e geométricos do transformador utilizado.

A característica da curva BH do núcleo é mostrada na figura 3. A densidade de fluxo magnético (B) e a intensidade de campo magnético (H) foram obtidas indiretamente medindo-se a tensão induzida no enrolamento secundário e a corrente de magnetização do enrolamento primário, conforme procedimento descrito em [12]. Para realizar tal procedimento, um osciloscópio digital foi usado para medir, digitalizar e armazenar a tensão e a corrente. Os dados digitalizados foram transferidos para um computador e os demais cálculos necessários foram então realizados.

Tabela 1. Características do transformador monofásico

Tensão primária (enrolamento interno)	70 V
Tensão secundária (enrolamento externo)	127 V
Número de espiras do primário	48
Número de espiras do secundário	88
Área da coluna central	$44,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Fator de empilhamento	0,95
Área da coluna lateral	$22,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Comprimento médio da coluna central	0,21 m
Comprimento médio da culatra	0,18 m
Altura do núcleo (externa)	0,24 m
Comprimento equivalente total do caminho magnético	0,57 m
Altura da janela	0,18 m
Resistência do enrolamento interno	0,0162 Ω
Resistência do enrolamento externo	0,0882 Ω
Área transversal do enrolamento interno	$50,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Área transversal do enrolamento externo	$19,4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Área da via de ar entre enrolamentos	$4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Largura da coluna central e culatra	$3,0 \times 10^{-2} \text{ m}$
Largura da coluna central	$6,0 \times 10^{-2} \text{ m}$

A curva de histerese medida deve, então, ser representada pelo modelo de histerese ferromagnética de Jiles-Atherton. Sendo assim, os parâmetros do modelo devem ser ajustados de

modo a reproduzir o mais fielmente possível as medições. Para atingir esse objetivo, um algoritmo de otimização foi desenvolvido e implementado, no qual se utilizou o método de pesquisa direta de Hooke-Jeeves [17] associado à técnica probabilística denominada *Simulating Annealing* [18]. A otimização dos parâmetros do modelo foi alcançada através da minimização do erro quadrático entre os resultados calculados da densidade de fluxo magnético (B) ou magnetização (M) pelo modelo, em relação aos respectivos valores medidos.

Na figura 3 mostra-se a curva de histerese reproduzida pelo modelo após a utilização do algoritmo de otimização. Os parâmetros do modelo são: $M_s=1.145 \times 10^6$; $a=42,0$; $k=34,0$; $\alpha=11,0 \times 10^{-5}$ e $c=0,14$.

A figura 4 mostra o resultado da simulação nas mesmas condições em que o ciclo de histerese foi obtido. A tensão foi aplicada ao transformador com um ângulo de 90° e sem fluxo residual, cujo objetivo foi o de suprimir o longo período transitório de energização que normalmente ocorre para outras condições iniciais.

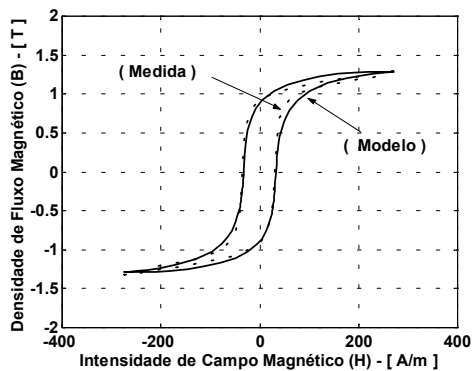


Figura 3 - Curva de histerese medida e curva reproduzida pelo modelo de histerese.

Os resultados da simulação mostram que o modelo do transformador e o modelo da curva de histerese reproduzem adequadamente as condições de regime permanente da corrente de magnetização do transformador.

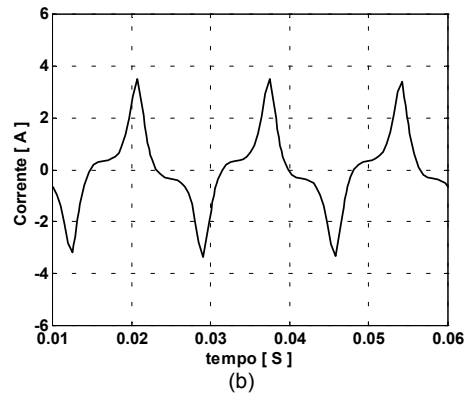
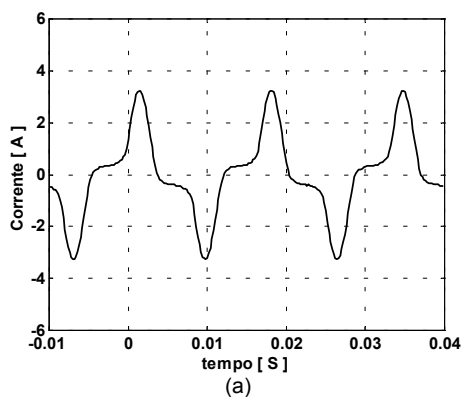


Figura 4 – Corrente de magnetização em regime permanente. (a) Corrente medida, (b) corrente simulada.

A tabela 2 resume algumas informações de interesse extraídas da figura 4.

Tabela 2. Comparação entre medição e simulação em regime permanente

	I_{PICO} [A]	I_{RMS} [A]	% 3 ^a Harm.	% 5 ^a Harm.	THD Corrente
medição	3,22	1,60	51,8	14,8	13,6
simulação	3,43	1,51	49,6	18,3	13,3

5.0 - COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DA CORRENTE DE *INRUSH*

Apesar do modelo responder satisfatoriamente para as condições de regime permanente, para a simulação da corrente de *inrush*, informações complementares associadas aos parâmetros do núcleo do dispositivo devem ser utilizadas. Desse modo, uma nova curva BH do núcleo deve ser obtida aplicando-se um valor de tensão que leve a curva até a região de saturação. A figura 5 mostra a curva BH do núcleo para uma tensão de 100 V ($143\% V_{NOM}$), onde visivelmente o núcleo atinge a região da saturação.

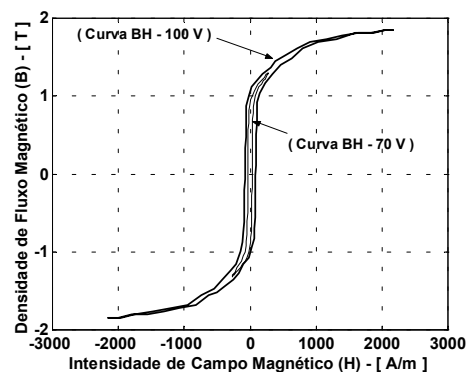


Figura 5 – Curvas de histerese: Tensão aplicada de 70 V e 100 V.

Para a curva de histerese com tensão aplicada de 100 Volts, os seguintes valores serão utilizados para os parâmetros do modelo de histerese: $M_s=1,72 \times 10^6$, $a=470,0$, $k=95,0$, $\alpha=81,72 \times 10^{-5}$ e $c=0,136$.

As medições da corrente de *inrush* foram obtidas utilizando-se de uma chave eletrônica, implementada com Triacs, juntamente com um circuito de disparo com retardo de tempo programável e sincronizado com a fonte de alimentação. Desse modo, o ângulo de disparo pode ser variado de 0° a 180° . O transformador está inserido num sistema cujas características são :

- impedância do transformador adaptador (127-70V): $r_T=0,0686 \Omega$ e $L_T=89,2 \mu\text{H}$;
- resistência da chave eletrônica: $0,05 \Omega$;
- resistência de medição da corrente (R_{shunt}): $60 \text{ mV}/50\text{A}$;

A figura 6 mostra os resultados das medições considerando o instante de fechamento da chave com um ângulo de 0° .

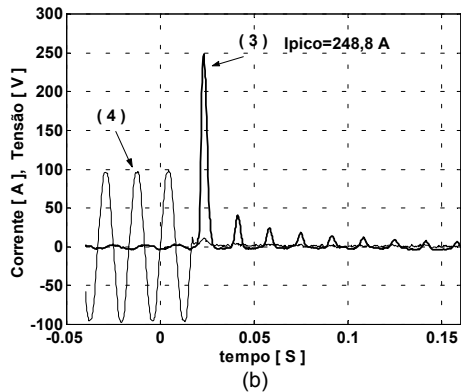
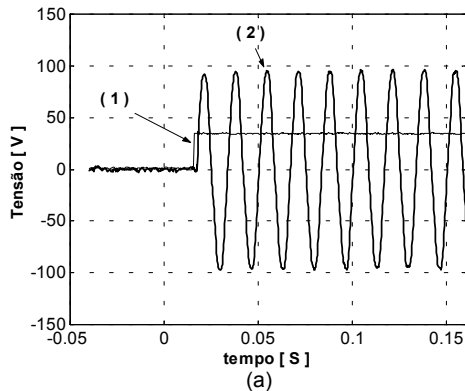


Figura 6 – Medições da corrente de *inrush* : (1) fechamento da chave eletrônica, (2) tensão nos terminais do transformador, (3) corrente de *inrush* e (4) tensão nos terminais da chave eletrônica.

Para validar o modelo computacional apresentado, realizou-se simulações da energização do transformador nas mesmas condições utilizadas na medição. A figura 7 mostra a corrente de *inrush* resultante.

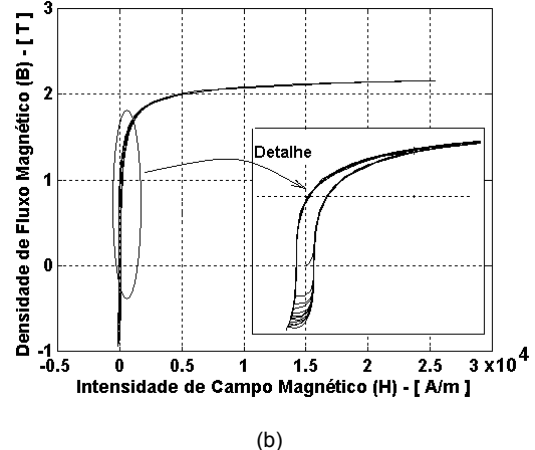
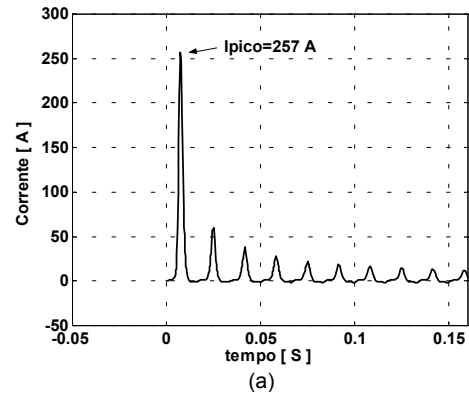


Figura 7 – (a) Corrente de *inrush* e (b) curva de histerese resultante da simulação.

A tabela 3 resume alguns resultados extraídos da simulação e da medição.

Tabela 3. Comparação entre simulação e medição.

	Medição	Simulação	Erro %
Amplitude do 1º pico	248,8 [A]	257 [A]	3,3
Razão de decaimento 1º p/ 2º pico	0,16	0,23	-

Os resultados apresentam-se bastante satisfatórios tendo em vista que:

- a impedância do sistema de alimentação, desde a subestação até o local de ensaio não foi incluída;
- a modelagem não contempla perdas no núcleo ferromagnético, resultando em menor amortecimento da corrente.

Uma situação comumente encontrada é a existência de fluxo residual no núcleo do transformador. A presença do fluxo residual faz com que a corrente de *inrush* atinja valores de pico ainda maiores, com efeitos ainda piores ao sistema de suprimento. A figura 8 ilustra uma simulação na qual considerou-se uma densidade de fluxo residual (B_R) igual a 0,5 Tesla. O modelo de histerese implementado permite indiferentemente valores positivos ou negativos

para a densidade de fluxo magnético residual, limitado a aproximadamente um máximo de 1 Tesla, conforme dados da curva.

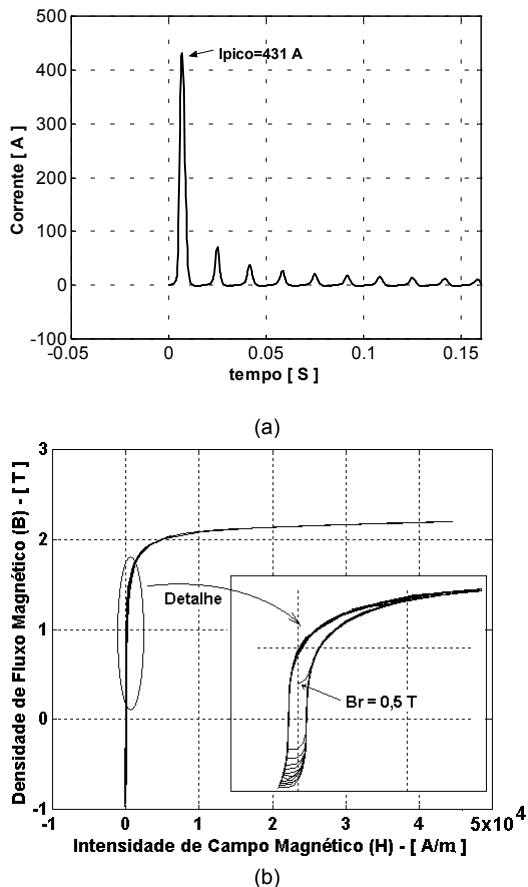


Figura 8 – Simulação: (a) corrente de *inrush*; (b) Histerese para $B_r=0,5$ Tesla.

6.0 – CONCLUSÕES

O uso do modelo de relutâncias para o transformador, bem como o modelo de histerese ferromagnética de Jiles-Atherton produziu bons resultados para a simulação do fenômeno da corrente de *inrush*. Diferentes estudos sobre os parâmetros que afetam a corrente podem ser conduzidos, como por exemplo, a adição de resistor de pré-inserção, instante de chaveamento sobre a onda de tensão e densidade de fluxo residual. A abordagem de modelagem do transformador permite estender o estudo às diferentes configurações do núcleo e enrolamentos, incluindo transformadores trifásicos de diferentes núcleos e tipos de ligação dos enrolamentos.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Yacamini and A. Abu-Nasser, "Numerical Calculation of Inrush Current in Single-phase Transformers", *IEE Proceedings*, V.128, Pt.B, No.6, November 1981, pp.327-334.
- [2] P. C. Y. Ling and A. Basak, "Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-phase Transformer", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.24, No.6, November 1988, pp.3217-3222.
- [3] M. A. Rahman and A. Gangopadhyay, "A Digital Simulation of Magnetizing Inrush Currents in Three-phase Transformers", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.PWRD-1, No.4, Oct, 1986.
- [4] R. Yacamini and H. Bronzeado, "Transformer Inrush Calculation Using a Coupled Electromagnetic Model", *IEE Proc.Sci.Meas.Technology*, Vol.141, No 06, November/1994, pp.491-498.
- [5] A. M. Miri, C. Müller and C. Sihler, "Modelling of Inrush Currents in Power Transformers by a Detailed Magnetic Equivalent Circuit", *Universität Karlsruhe, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik and Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)*.
- [6] M. A. Rahman and A. Gangopadhyay, "A Digital Simulation of Magnetizing Inrush Currents in Three-phase Transformers", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.PWRD-1, No.4, Oct 1986.
- [7] E. G. Domingues, "Uma contribuição a Modelagem de Transformadores convencionais e especiais utilizando o simulador Saber", *Dissertação de Mestrado*, UFU, Uberlândia, 1996.
- [8] S. Chimklai and J. R. Marti, "Simplified Three-phase Transformer Model for Electromagnetic Transient Studies", *IEEE Trans.on Power Delivery*, Vol.10, No.3, July, 1995, pp.1316-1325.
- [9] X. S. Chen and P. Neudorfer, "Digital Modeling of Modern Single-phase Distribution Transformers", *IEE Intern.Conf.on Advances in Power System Control, Operation and Management*, Nov 1991.
- [10] D. N. Ewart, "Digital Computer Simulation Model of a Steel-core Transformer", *IEEE Trans.on Power Delivery*, Vol.PWRD-1, No.3, July, 1986, pp. 174-181.
- [11] X. S. Chen and P. Neudorfer, "Digital Model for Transient Studies of a Three-phase Five-legged Transformer", *IEE Proceedings - C*, Vol.139, No.4, July 1992, pp.351-358.
- [12] N. Schmidt and H. Güldner, "A Simple Method to Determine Dynamic Hysteresis Loops of Soft Magnetic Materials", *IEEE Trans.on Magnetics*, Vol.32, No.2, March, 1996, pp.489-496.
- [13] D.C.Jiles and D. L. Atherton, "Theory of Ferromagnetic Hysteresis", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 61, pp.48-60, 1986.
- [14] D.C. Jiles and J.B. Thoeke and M.K. Devine, "Numerical Determination of Hysteresis Parameters for the Modeling of Magnetic Properties Using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis", *IEEE Trans.on Magnetics*, Vol.28, No.1, January, 1992, pp.27-35.
- [15] Analogy Inc., Model Fundamentals – Release 5.0, 1999.
- [16] Analogy Inc., Guide to Writing MAST Templates – Release 5.0, 1999.
- [17] M. Marchesi, "A new Class of Optimization Algorithms for Circuit Design and Modeling", *IEEE Intern.Symposium on Circuit and Systems*, Vol.2, June 1988, pp.1691-1695.
- [18] W.H. Press et al, "Numerical Recipes in Fortran 77 – the Art of Scientific Computing, second edition, 1997.