



Modelagem e ensaio de um transformador a vazio

Anderson Rodrigo Piccini^{1,2} – anderson.piccini@ifpr.edu.br
Lais Resende Bonfim¹ – lais.resendebonfim@gmail.com
Geraldo Caixeta Guimarães (Orientador)¹ – gcaixeta@ufu.br

1 – Universidade Federal de Uberlândia - UFU

2 – Instituto Federal do Paraná – IFPR Paranavaí

Resumo: O objetivo deste trabalho é apresentar resultados de simulações da modelagem de um transformador instalado no Instituto Federal do Paraná – Campus Paranavaí. Esse modelo representa o equipamento de entrada de energia em média tensão o comportamento do sistema em um ensaio a vazio. Será apresentado o comportamento do transformador de 300kVA, tensões, correntes e corrente de magnetização para esse modelo, é possível observar situações interessantes que comumente acontecem com esses equipamentos.

Palavras-chave: Transformador; ATPDraw; Tensão; Corrente; Corrente de *Inrush*.

1. INTRODUÇÃO

Entende-se por simulação, a imitação, reprodução de uma operação, sistema ou processo do mundo real (BANKS, 1998). Desde modo, qualquer simulação deve passar pela construção de um modelo matemático e/ou físico de um processo que poderá ser utilizado para a realização de diversos tipos de ensaios e análises, mesmo antes de sua concepção para facilitar sua compreensão (TAMASHIRO, GUIMARÃES, *et al.*, 2016).

Na área de sistemas de controle e processos industriais existe uma vasta disponibilidade de ferramentas para a realização de simulações, principalmente computacionais, essas ferramentas podem ser utilizadas nos cursos de Eletromecânica, Mecatrônica, Engenharia Elétrica e em diversas outras áreas do conhecimento. Essas ferramentas computacionais sendo usadas na educação auxiliam os professores a transmitir para os estudantes diversos conceitos teóricos por meio da visualização gráfica os resultados, possibilitando que os estudantes assimilem mais facilmente os conceitos apresentados.

Para a área de engenharia elétrica, no que diz respeito ao ensino e pesquisa, existe uma grande variedade de programas de simulação disponíveis para utilização gratuita ou comercial. Alguns programas comerciais têm uma boa quantidade de recursos oferecidos, uma grande eficiência computacional muito maior que as versões gratuitas, no entanto, eles são pagos, fechados e não permitem a alteração nem adição de novas funções em seu código fonte. Para fins educacionais, a flexibilidade e a capacidade de criar modelos personalizados são muitas vezes os aspectos mais importantes do que a eficiência computacional (MILANO, 2005).

Devido a esse fato, várias ferramentas são desenvolvidas dentro das Universidades e Institutos Federais, com código fonte aberto e destinadas a análise do sistema elétrico.

Para esse estudo foi utilizada uma ferramenta computacional chamada ATP (Alternative Transients Program). A entrada de dados e a configuração dos parâmetros da simulação foram feitas por meio da utilização de uma ferramenta gráfica denominada de ATPDraw.

A partir da década de 60, iniciou-se o desenvolvimento do programa EMTP (Eletromagnetic Transient Program) por Herman W. Dommel, para a Bonneville Power Administration (BPA). O programa inicial trabalhava com simulação de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências em linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Com o passar dos anos, o programa foi sofrendo alterações de diversos colaboradores do mundo todo.

A partir de 1973, Scott Meyer assumiu a coordenação e o desenvolvimento do programa, estabelecendo um processo de desenvolvimento articulado com os usuários do EMTP, que o tornou uma ferramenta poderosa em estudos de transitórios em sistemas elétricos. A partir de 1984 foi criada uma nova versão e uma nova denominação ATP - Alternative Transient Program. Esta nova versão, possui melhores facilidades gráficas como o pré-processador gráfico e o gráfico PLOTXY, os quais permitem trabalhar utilizando somente o ambiente Windows. Novas melhorias e a evolução para a versão mais sofisticada chamamos de ATPDraw. O ATPDraw nos permite modelar adequadamente os sistemas elétricos, reproduzindo o mais fiel possível a configuração elétrica real das redes, além de apresentar o diagrama unifilar em ambiente gráfico (BERNARDON, VEIGA, *et al.*, 2006).

Nesses estudos, a simulação foi importante para: modelar um transformador de 300kVA instalado em uma instituição de ensino em Paranavaí, para assim poder analisar e estudar como seria seu comportamento em um ensaio pratico a vazio.

2 MODELAGEM DO TRANSFORMADOR

A validação do modelo do transformador implementado no software ATPDraw foi realizada comparando os ensaios de fabricação do transformador com as simulações computacionais seguindo os métodos de ensaio descrito na NBR 5380 (CAMARGO, CHAVES, *et al.*, 2008). Estas simulações foram realizadas para a condição de ligação do transformador descritas abaixo.

Ensaio a vazio do transformador de potência de 300KVA, trifásico, frequência de 60Hz, com ligação dos enrolamentos de média tensão, conectados em sistema DELTA, a 03 (três) fios, enrolamentos de baixa tensão, conectados em sistema ESTRELA (neutro acessível), a 04 (quatro) fios para tensão de distribuição em 220/127V (ARAUJO e NEGRÃO, 2009). As características complementares estão descritas na Tabela I, em posse dessas informações é possível calcular os dados da Tabela II, que serão utilizados na modelagem do transformador no ATPDraw. Esses dados foram calculados conforme sugerido pelo livro de manual de equipamentos elétricos (FILHO, 2005).

Tabela I - Dados do transformador

Potencia kVA	Tensão Primário kV Delta	Tensão Secundário kV Estrela	Resistência %.	Reatância %.	Impedância %
300	13,8	0,127	1,23	4,33	4,5

Fonte: o Autor, 2016

Tabela II - Dados calculados para o transformador

L1 AT (mH)	R1 AT (ohm)	L2 BT (mH)	R2 BT (ohm)	I(0) (A)	F(0) (Wb-esp)	Rm (ohm)
109,305706	11,7438	0,009257	0,000995	0,184	51,80	160000

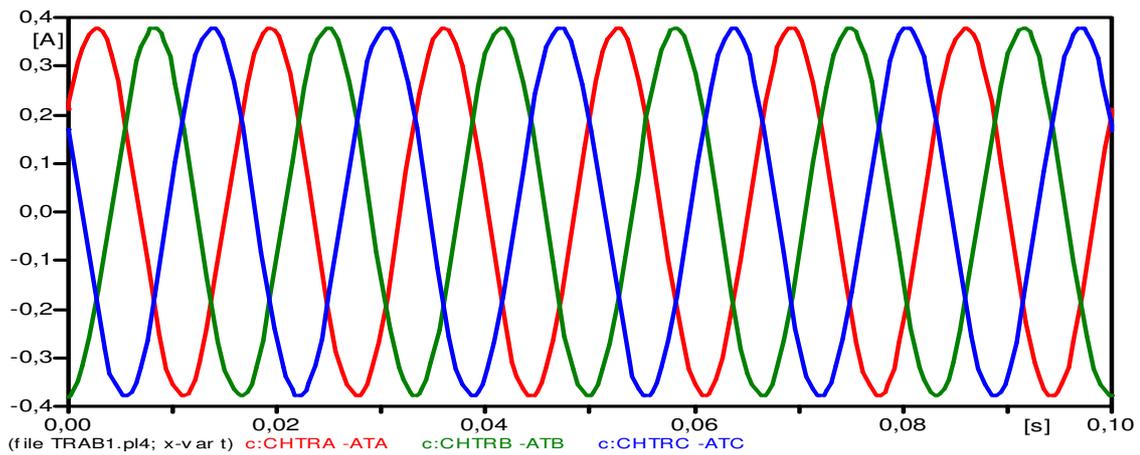
Fonte: o Autor, 2016

Os oscilogramas a seguir apresentam as formas de ondas de pico-a-pico e nas legendas são informados os valores RMS retirados do ATP.

O oscilograma da figura 1, apresenta as correntes eficazes das três fases dos enrolamentos primários do transformador modelado. Na sequência a figura 2, plota as tensões de entrada do equipamento sendo fornecidas pela concessionaria local, na ordem de 13,8kV. A figura 3, demonstra a forma de onda das tensões nos enrolamentos secundário do transformador entre fase e fase. Esses valores eficazes simulados estão de acordo com os níveis determinados pelo fabricante e pela literatura para projeto e simulações desses equipamentos (FILHO, 2005) (GREENWOOD, 1923).

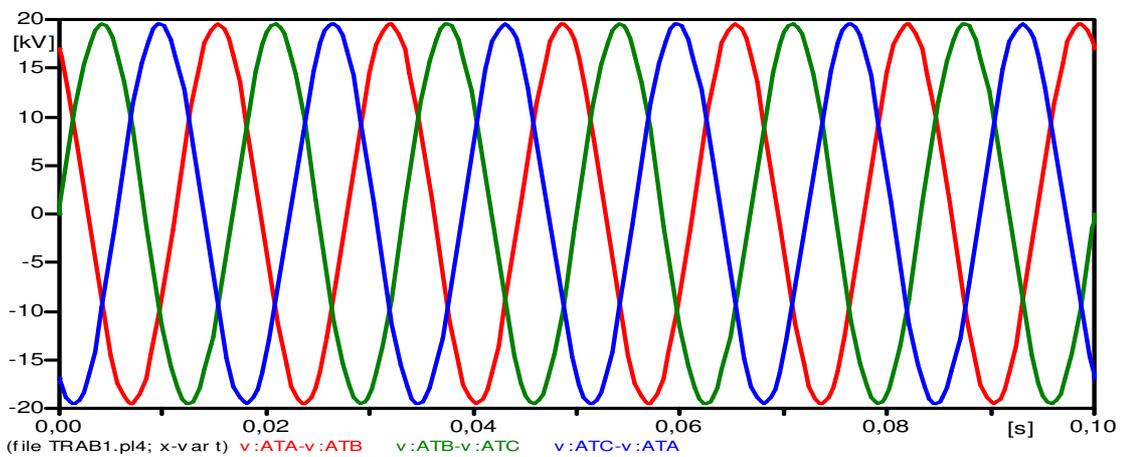
No ensaio de curto circuito do secundário no ATPDraw, é possível simular com a tensão nominal do transformador de 13,8kV, para comparar a impedância percentual fornecida pelo fabricante, mas, na prática, com o equipamento, deve-se reduzir a tensão de entrada e gradualmente deve-se aumentá-la até que obtenha-se a corrente nominal do transformador, que nesse caso é de 12,55A, para que não seja danificado o equipamento. A figura 4 traz as formas de onda das correntes nos enrolamentos primários do transformador para um nível de tensão de 620V.

Figura 1. Corrente nos enrolamentos do primário $I_A = I_B = I_C = 0,269$ A (RMS)



Fonte: o autor, 2016

Figura 2. Tensão nos enrolamentos do primário $V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = 13,79$ V (RMS)



Fonte: o autor, 2016

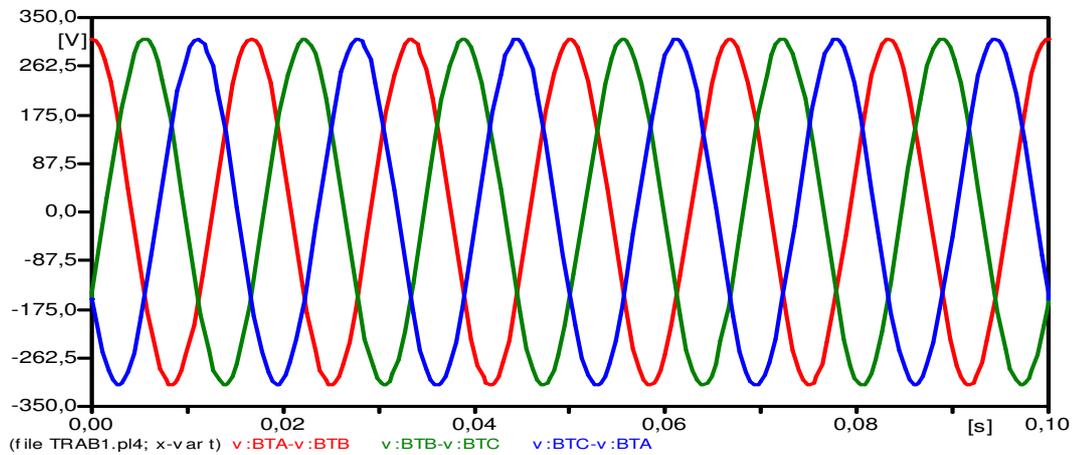
Com esses dados é possível determinar a impedância percentual do transformador, desta forma divide-se a tensão aplicada de 620V pela tensão nominal do transformador, obtendo-se o valor de $ZCC = 4,493\%$. O valor encontrado está muito próximo do valor apresentado pelos dados do fabricante do transformador.

Corrente de magnetização (corrente de *inrush*) durante a energização do transformador sem o curto no secundário. Estas correntes aparecem durante a energização do transformador, devido à magnetização e à saturação do seu núcleo, sendo sua magnitude determinada pela declividade da característica de magnetização na região saturada. Nos transformadores de elevada potência, altas correntes de *inrush* (GREENWOOD, 1923) podem ser atingidas, como pode ser observado na figura 5. Ao fechar a chave na entrada de energia do transformador no tempo 10ms, tem-se um pico de corrente em uma das fases superior a 10 vezes a corrente nominal do transformador, a qual ira sendo amortecida no tempo.

Analisando os valores obtidos nesta simulação, nota-se que a corrente de magnetização obtida está dentro dos valores recomendados pelo fabricante, comprovando que

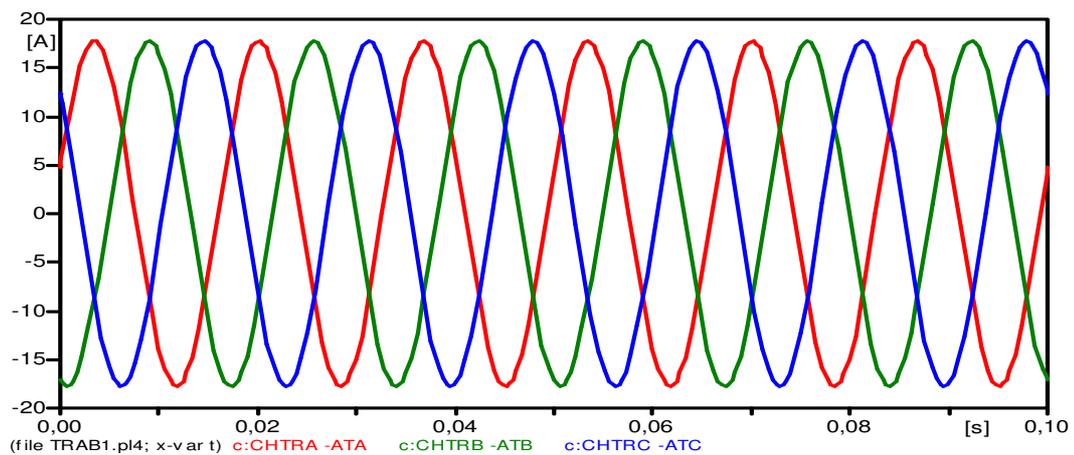
o modelo simulado apresenta suas características muito próximas ao equipamento real instalado na instituição.

Figura 3. Tensão nos enrolamentos no secundário $V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = 219,4V$ (RMS)



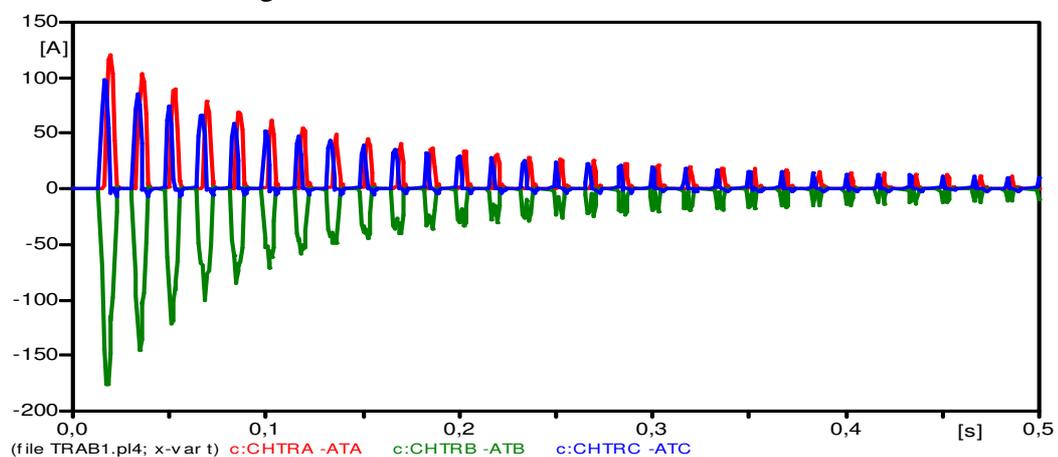
Fonte: o autor, 2016

Figura 4. Corrente nos enrolamentos do primário com tensão aplicada de 620V (RMS) corrente por fase de 12,55 A (RMS).



Fonte: o autor, 2016

Figura 5. Corrente de *Inrush* do transformador



Fonte: o autor, 2016

3. CONCLUSÕES

Mediante os resultados obtidos a partir das simulações realizadas utilizando a ATPDraw, foi apresentado um estudo do comportamento das tensões, correntes e corrente de *inrush* de um transformador de 300kVA em um ensaio a vazio.

A análise quanto ao modelo projetado, indica que os dados teóricos e os dados de simulação estão equivalentes, indicando que o modelo desenvolvido no software ATPDraw, está corretamente dimensionado, não apresentando nenhuma condição que esteja em desacordo com as normas e a literatura e dentro dos parâmetros do fabricante.

O modelo proposto nesta metodologia atendeu as expectativas de sua eficiência baseado nos resultados das simulações de validação realizada. O que propiciou resultados satisfatórios para a realização de estudos dinâmicos com transitórios de curta duração.

Na próxima etapa da pesquisa deve se realizar o ensaio prático real deste equipamento para validar os dados de simulação, realizar as medições no local e, assim, efetivar novamente os ensaios e analisá-los para as devidas considerações.

4. REFERÊNCIAS

ARAUJO, H. D.; NEGRÃO, S. **MEMORIAL TÉCNICO DESCRITIVO**. INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PARANÁ - CAMPUS PARANAÍ. CURITIBA. 2009.

BANKS, J. **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. [S.l.]: Atlanta: John Wiley & Sons, 1998. ISBN ISBN: 978-0-471-13403-9.

BERNARDON, D. P. et al. **Modelagem e Aplicação do Programa ATP para Estudos de Paralelismo nas Redes de Distribuição Atendidas por Subestações de Diferentes Fontes**. SENDI XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte / MG, 21 a 25 Agosto 2006. Disponível em: <<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081219104438-QEE01-0290.pdf>>.

CAMARGO, J. D. M. et al. **Modelagem do transformador regulador de tensão para estudos dinâmicos utilizando o programa ATP**. SENDI XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Olinda - PE, 06 a 10 outubro 2008. Disponível em: <<http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Modelagem-do-transformador-regulador-de-tens%C3%A3o-para-estudos-din%C3%A2micos-utilizando-o-programa-ATP.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2016.

FILHO, J. M. **MANUAL DE EQUIPAMENTOS ELETRICOS**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

FRANCO, G. J.; SILVA, M. I.; SILVA, S. M. **Operação dinâmica de bancos de capacitores com eliminação de correntes de *inrush***. O Setor Elétrico, n. Edição 53, jun. 2010.

GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. 2ª. ed. [S.l.]: [s.n.], 1923.

MILANO, F. **An Open Source Power System Analysis Toolbox**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 20, 2005.

TAMASHIRO, M. A. et al. **Comparative Study of TACS/DBM and MODELS of ATP-EMTP Applied to Power Systems Computer Simulation**. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, v. 14, p. 704 - 712, fev. 2016.