

Comparação entre os Modelos de Transformadores Disponíveis no Programa ATP para Estudos de Manobras de Energização

Herivelto S. Bronzeado
Presidência da República - SG/AS/DILOG/COENGE
bronzeado@iecee.org

Nelson C. Jesus, João R. Cogo, Luiz M. Duarte
GSI - Engenharia e Consultoria LTDA
gsi@gsiconsultoria.com.br

Resumo — Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre os principais modelos de transformadores existentes na literatura especializada com o intuito de se verificar qual o modelo mais adequado para os estudos do comportamento transitório das correntes de energização de transformadores (correntes de “inrush”). Os principais fatores que afetam a magnitude e as características dessas correntes são discutidos. Um resumo sobre os modelos estudados, juntamente com os resultados obtidos nas simulações das manobras de energização de transformadores, são apresentados. Os modelos foram construídos com base nos dados de projeto, dados de placa e resultados dos ensaios em um transformador de potência de 70/95 MVA, 230/34,5 kV. O programa de transitórios eletromagnéticos utilizado nas simulações foi o ATPDraw.

Palavras-chaves - Modelagem de Transformadores; Transitórios Eletromagnéticos; Correntes de “Inrush”.

I. INTRODUÇÃO

Transformadores de potência são equipamentos fundamentais à operação de sistemas elétricos. Estudos relacionados a estes equipamentos são realizados tanto em regime permanente quanto sob condições transitórias decorrentes de manobras de energização [1]. Uma das características típicas dos transformadores durante a sua energização é o comportamento não-linear do núcleo magnético e a sua saturação, causando correntes de magnetização transitórias de altas magnitudes (correntes de “inrush”). Estas correntes são geralmente não-senoidais e assimétricas, podendo ocasionar certos distúrbios no sistema elétrico, tais como: falhas de equipamentos, atuação de sistemas de proteção, afundamentos momentâneos de tensão (AMTs), sobretensões harmônicas transitórias, etc., distúrbios estes que afetam a qualidade do fornecimento de energia aos consumidores [1-3].

Em sistemas de potência fracos, com altos valores de resistência série, a energização de transformadores pode causar uma interação entre transformadores que se encontram em operação (“Sympathetic Interaction”), prolongando o tempo de decaimento da corrente de “inrush” [4]. Desta forma, para a realização de estudos e análises específicas do comportamento próximo ao real dos sistemas elétricos torna-se extremamente importante a representação detalhada de transformadores. Neste sentido, para estudos de fenômenos

transitórios de baixa e média frequência, como é o caso da energização de transformadores, é de suma importância que a representação desse equipamento seja a melhor e mais detalhada possível. Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre os principais modelos de transformadores existentes, com base no comportamento das correntes de energização obtidos em simulações.

II. CORRENTES TRANSITÓRIAS DE ENERGIZAÇÃO (INRUSH)

Quando um transformador é energizado, uma corrente de magnetização transitória (corrente de “inrush”) é estabelecida de forma a corresponder ao campo magnético interno ao enrolamento do transformador. Supondo que o transformador seja energizado no instante exato em que o valor (ou ponto) na forma de onda de tensão corresponda à densidade de fluxo magnético do núcleo, a energização seria bem suave, como se o transformador continuasse em operação na condição anterior a sua desenergização, sem a ocorrência do transitório magnético citado anteriormente. É importante observar que quando um transformador é desenergizado, a corrente de magnetização segue o laço de histerese até atingir o seu valor zero, com a densidade de fluxo atingindo um valor estático (residual) B_r , conforme pode ser visto na Fig.1 [2].

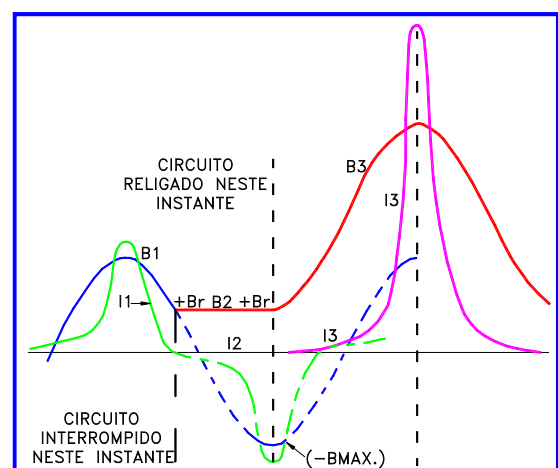


Fig. 1. Comportamento no tempo da densidade do fluxo magnético e corrente de magnetização em um transformador em regime permanente e no transitório de energização.

Analisando-se detalhadamente a Fig. 1, pode-se observar o comportamento da corrente de magnetização I1 e da densidade de fluxo B1 quando interrompidas no instante marcado pela primeira linha vertical tracejada, no momento em que a corrente passou pelo seu zero. Neste instante, a densidade de fluxo apresenta um valor residual Br. Caso o transformador permanecesse energizado, as formas de ondas da corrente e da densidade de fluxo seguiriam as curvas tracejadas [2]. No caso, considerando a desenergização, a corrente e a densidade de fluxo teoricamente se comportam conforme as linhas sólidas horizontais I2 e B2, ou seja, a corrente sendo zero e a densidade de fluxo com o valor +Br.

Para ilustrar uma condição de alta corrente transitória, assume-se que o circuito é restabelecido no instante indicado pela segunda linha tracejada vertical, quando o valor prospectivo da densidade de fluxo estaria em seu valor máximo negativo (-Bmax). Como o fluxo magnético não pode se modificar instantaneamente, a sua forma de onda terá que forçosamente partir do valor residual B2 (igual a +Br), e crescer de acordo com a forma de onda da curva tracejada, formando a curva B3.

A curva B3 é uma curva senoidal deslocada, com um “off set” +Br, considerando-se a aplicação de uma tensão senoidal. Notar que a forma de onda da densidade de fluxo é senoidal (integral da tensão), partindo do seu valor remanescente (residual). Neste caso, teoricamente, a saturação não modifica a forma de onda da densidade do fluxo magnético, mas altera a corrente de magnetização necessária para produzir a correspondente densidade de fluxo, cuja forma de onda é mostrada como I3. O valor máximo teórico da curva B3 é Br + 2Bmax, que produzirá uma forte saturação no circuito magnético e, conseqüentemente, uma elevada corrente transitória de magnetização (corrente de “inrush”) [2].

A equação simplificada para o cálculo do valor máximo da corrente transitória de energização de transformadores monofásicos é [5]:

$$I_{M\acute{A}X} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{RMS}}{\sqrt{(\omega \cdot L_S)^2 + (R)^2}} \cdot \left(1 + \cos\theta + \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\lambda_N}\right) \quad (1)$$

Substituindo o fluxo por $\lambda = N \cdot B \cdot A$ e adotando-se o ângulo de fase $\theta = 0$, pode-se calcular a máxima corrente com a seguinte expressão [5]:

$$I_{M\acute{A}X} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{RMS}}{\sqrt{(\omega \cdot L_S)^2 + (R)^2}} \cdot \left(\frac{2 \cdot B_N + B_R - B_S}{B_N}\right) \quad (2)$$

Onde:

URMS: Valor da tensão eficaz em [V];
 LS: Indutância de núcleo de ar em [H];
 R: Resistência DC do enrolamento em [Ω];
 BR: Densidade do Fluxo Remanescente em [T];
 BS: Densidade do Fluxo de Saturação em [T];
 BN: Densidade do Fluxo nominal em [T];
 λ_R : Fluxo Magnético Remanescente em [Wb];
 λ_S : Fluxo Magnético de Saturação em [Wb];
 λ_N : Fluxo Magnético Nominal em [Wb];
 ω : Velocidade angular em [rad/s].

Na realidade, as equações (1) e (2) se aplicam para transformadores monofásicos e não fornecem uma boa aproximação para a maioria dos transformadores trifásicos. Essas equações não levam em conta alguns dos parâmetros que afetam significativamente a magnitude das correntes de energização, tais como os ajustes da indutância do núcleo magnético para eventos transitórios, a impedância de curto-circuito do sistema, a geometria do núcleo, as configurações e conexões dos enrolamentos, tipos de aterramentos, etc.

Em geral, normalmente se considera que a relação entre a corrente de linha nominal em um transformador trifásico é $1/\sqrt{3}$ da corrente em um transformador monofásico de mesma potência nominal por fase. No caso de conexão em estrela, a corrente de “inrush” de linha é $2/3$ da máxima corrente de “inrush” em um transformador monofásico de $1/3$ desta potência nominal. Esta mesma razão é utilizada para casos com bancos de transformadores formados por unidades monofásicas conectadas em delta. Transformadores trifásicos mais modernos, com enrolamentos em delta ou estrela, podem apresentar valores de corrente de “inrush” na faixa de 60% inferiores aos valores máximos estimados [5].

III. MODELOS DE TRANSFORMADORES

Neste item são apresentadas as principais características dos modelos adotados nas simulações de transitórios eletromagnéticos envolvendo manobras de transformadores [6-7]. No programa de simulação de transitórios ATPDraw estão disponíveis basicamente quatro tipos de modelos de transformadores, incluindo o modelo teórico “transformador ideal”. Também pode-se implementar os modelos com indutores não-lineares representando circuitos equivalentes, onde se considera o tipo de núcleo, efeito de histerese, etc. Os demais modelos para análise do desempenho e operação dos transformadores estão relacionados a seguir.

A. Modelo STC - Saturable Transformer Component

O modelo *Saturable Transformer Component* - STC pode ser utilizado para representar transformadores monofásicos e trifásicos. É baseado na representação do circuito em estrela com o ramo primário sendo tratado como um equivalente R-L de forma desacoplada. Os efeitos de saturação e histerese são modelados pela adição de um indutor não-linear no ponto central da estrela. Possui limitações, não podendo ser usado para transformadores com mais de 3 enrolamentos. Este modelo pode ser estendido para unidades trifásicas através da adição de um parâmetro de relutância de sequência zero, mas esta opção é limitada. No caso de saturação do núcleo, utiliza-se internamente o indutor pseudo não-linear, tipo 98.

Para se obter os dados necessários para esta representação, há necessidade do levantamento da curva característica V_{rms} versus I_{rms} do transformador, alimentando-o com vários níveis de tensão (V_{rms}) e medindo-se a corrente (I_{rms}) correspondente. Posteriormente, utiliza-se a rotina suporte “SATURA” para criar a curva característica com os valores de fluxo (pico) versus corrente (pico). Além disso, a indutância de magnetização em paralelo com a resistência que representa a perda no núcleo é conectada ao ponto central da estrela, o que não é topologicamente correto, podendo ocorrer instabilidades numéricas, especialmente nos casos de transformadores com três enrolamentos.

B. Modelo BCTRAN

O modelo denominado BCTRAN se baseia numa rotina desenvolvida para produzir a representação linear através das matrizes de impedâncias de transformadores trifásicos e monofásicos de múltiplos enrolamentos. Este modelo é geralmente empregado para se modelar transformadores com ambos núcleos tipo envolvido (“core type”) e envolvente (“shell type”) a partir de dados de testes de curto-circuito e a vazio [7]. As perdas por excitação também podem ser consideradas neste modelo. Para transformadores trifásicos tendo um ou mais enrolamentos conectados em delta, o projeto do núcleo (se envolvido ou envolvente) é de menor importância. Para transformadores trifásicos com os enrolamentos conectados somente em estrela, o projeto do núcleo é importante. A distinção deve ser feita entre transformadores com alta e baixa relutância. No caso de transformadores com baixa relutância, tais como os bancos de transformadores monofásicos, transformadores trifásicos com núcleo do tipo envolvente, e transformadores trifásicos de quatro ou cinco colunas, o fluxo homopolar encontra um caminho de baixa relutância característico do material do núcleo. Nesse caso, a corrente de excitação de sequência zero será pequena e as perdas podem ser desprezadas. Para transformadores de alta relutância, como o transformador trifásico com núcleo de três colunas, o fluxo homopolar percorrerá o caminho pelo ar e tanque (caminho de elevada relutância), a corrente de sequência zero e as perdas por excitação não podem ser desprezadas. O comportamento não-linear (saturação e/ou histerese) não pode ser incluído no modelo propriamente dito. Essa não-linearidade normalmente é incluída pela adição de elementos do tipo 93, 96 ou 98 conectados nos terminais apropriados do transformador, isto é, nos enrolamentos mais próximos ao núcleo magnético.

C. MODELO HÍBRIDO

O modelo “híbrido” de transformadores é considerado topologicamente correto e é geralmente o mais utilizado nas simulações de estudos transitórios. Ele é baseado no princípio da dualidade, descrevendo os efeitos capacitivos e de dispersão magnética através de matrizes de impedâncias. Os transformadores trifásicos de dois ou três enrolamentos, autotransformadores com acoplamentos em estrela ou delta são relativamente bem representados por este modelo. Além da inclusão da matriz de indutância inversa para a representação da dispersão, este modelo é topologicamente correto porque inclui as perdas e a saturação individuais para os jugs e colunas do núcleo. Os transformadores de três e cinco colunas têm sido representados satisfatoriamente por este modelo, no qual se pode incluir também o projeto de núcleo do tipo envolvente (“shell type”) [6].

É possível também representar a resistência do enrolamento em função da frequência. Diferentemente dos outros modelos de transformadores, existem três fontes possíveis de dados para o modelo “HÍBRIDO”: a) o projeto, no qual se especifica a geometria e os parâmetros do material do núcleo magnético e dos enrolamentos; b) o relatório de teste, similar ao modelo BCTRAN, exceto para alguns modelos de núcleos; c) os valores típicos de parâmetros, os quais são baseados nos valores de tensão e potência nominais.

O componente XFMR possui os valores de variáveis previamente ajustados no arquivo armazenado no ATPDraw.scl. O modelo “HÍBRIDO” apresenta um nó trifásico para cada enrolamento e um nó monofásico para o neutro. A notação para o enrolamento primário, secundário, terciário e núcleo é chamada de PSTC.

IV. REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES NO ATPDRAW

A Fig.2 apresenta os modelos de transformadores e indutores não-lineares utilizados para a modelagem do efeito de saturação do ramo magnetizante ou partes do núcleo do transformador. Para os indutores, os modelos podem ser divididos em R-L e com histerese. Nos modelos R-L as perdas podem ser representadas pela adição de um resistor linear ou não-linear (tipos 99 ou 92). A curva de saturação é modelada através de um indutor não-linear (tipo 98). Modelos com histerese incluem saturação e fluxo residual no mesmo componente (tipo 96), ou ainda, as perdas, como no tipo 98. Além destes, pode-se incluir modelos adicionais definidos pelo próprio usuário.

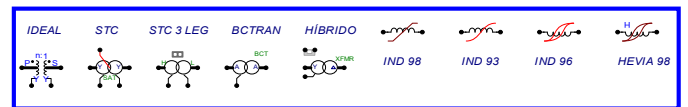


Fig. 2. Modelos de transformadores e indutores não-lineares disponíveis no programa ATPDraw.

Os dados a serem considerados no modelo usado nas simulações se basearam em resultados de testes e ensaios a vazio, de curto-circuito, condição dos dielétricos, bem como nos detalhes do projeto do núcleo e enrolamentos do transformador. Além dos dados relacionados às impedâncias e perdas, tomou-se também, como base, a curva de saturação obtida no ensaio a vazio, com uma tensão máxima aplicada de 115% da tensão nominal, seguida da reatância de núcleo de ar informada pelo fabricante como sendo de 14,27%. A Fig. 3 mostra a curva de saturação adotada na modelagem e simulações das energizações do transformador que subsidiaram a análise comparativa entre os modelos de transformadores estudados. Ressalta-se a influência e importância da representação da reatância de núcleo de ar dos enrolamentos para que se obtenha o comportamento das correntes transitórias de energização mais próximas à realidade. Ressalta-se que a curva de saturação real de um transformador pode ser medida com base nas formas de onda das tensões e correntes obtidas durante o transitório de energização de transformadores já instalados no sistema através de um instrumento denominado “saturômetro” [8].

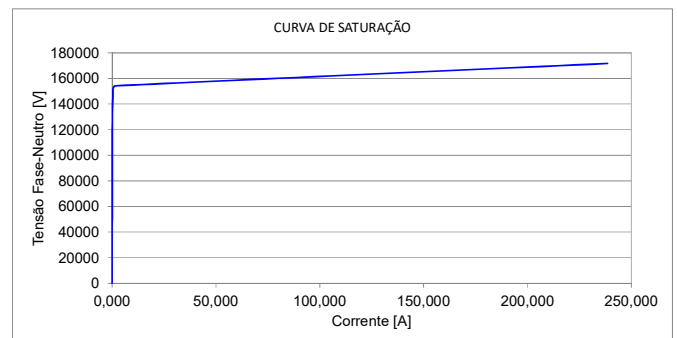


Fig. 3. Curva de saturação adotada como base nas simulações.

V. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MODELOS

Simulações com os três modelos de transformadores trifásicos considerados (STC, BCTAN e HÍBRIDO) foram realizadas, cujos resultados são analisados e comparados neste item. O transformador em questão (70/95 MVA, 230/34,5 kV) tem seus enrolamentos de 230 kV ligados em estrela aterrada, com os enrolamentos secundários (34,5 kV) ligados em delta. Para efeito da análise comparativa, foi considerado que os transformadores seriam formados por núcleos do tipo “tríplex”, devido ao fato de que os três modelos permitem esta possibilidade. Nas simulações, a densidade de fluxo remanescente foi considerado nulo. Foram realizadas manobras com a energização do transformador através dos enrolamentos de 230 kV, com a aplicação de valores de tensão de 100% e 110% da tensão nominal, com formas de onda senoidais e ângulos de referência de fase de 90 e 0 graus, ou seja, tensão inicial no pico e nula da tensão da fase A, respectivamente. Os resultados obtidos serão apresentados a seguir.

A. Análise Comparativa

As formas de onda das correntes de energização nos três modelos, com a aplicação da tensão nominal para ângulo de fase de 90 graus são comparadas na Fig. 4 e na Fig. 5 para ângulo de fase de 0 grau. As formas de onda das correntes indicadas pelas cores em vermelho, verde e azul, representam os resultados para os modelos STC, BCTAN e HÍBRIDO, respectivamente e estão indicadas em valor por unidade [pu], tomando-se como base a corrente nominal para uma potência de 95 MVA em 230 kV.

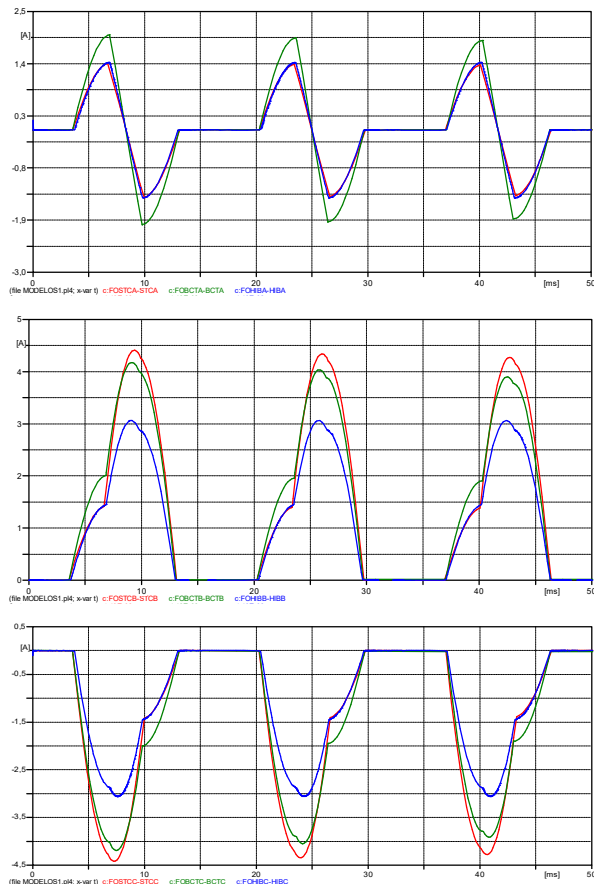


Fig. 4. Comparação entre as correntes nos modelos de transformadores estudados. Caso para ângulo de fase de 90 graus.

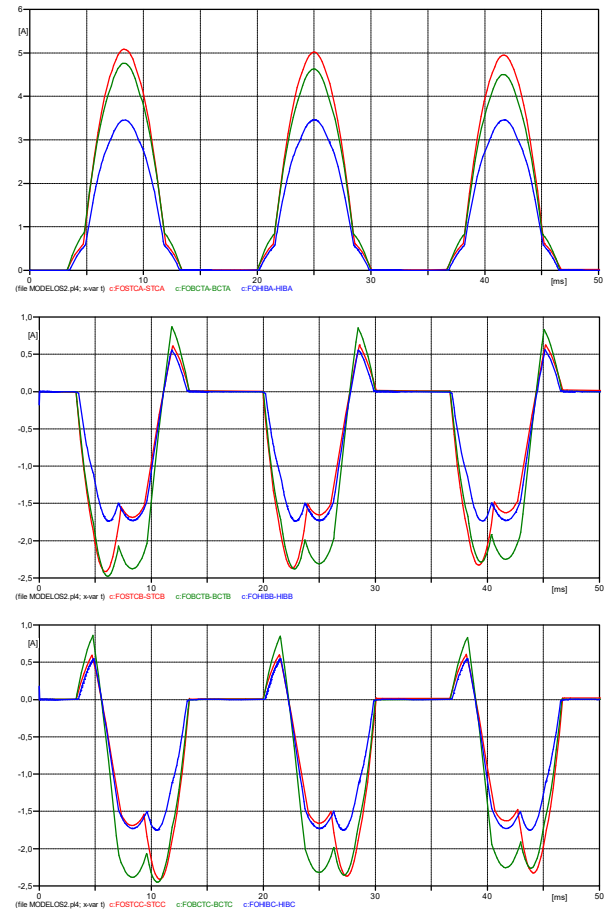


Fig. 5. Comparação entre as correntes nos modelos de transformadores estudados. Caso para ângulo de fase de 0 grau.

A Tabela I mostra os valores de pico das correntes transitórias de energização para os casos analisados. Observa-se que o modelo HÍBRIDO apresenta valores menores do que os outros modelos para as mesmas condições estudadas (tensão nominal e fluxo residual nulo). Observa-se também que o valor obtido com o modelo HÍBRIDO é bastante próximo àquele calculado pelas tradicionais equações 1 e 2 (808 A), levando-se em conta o fator de 2/3, para a corrente em transformadores trifásicos com conexão em estrela.

TABELA I.
ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS CORRENTES TRANSITÓRIAS (INRUSH)

MODELO	Valores de pico [A] (V=1,0 UN)	Valores de pico [A] (V= 1,1 UN)	Valores de pico [pu] (V= 1,0 UN)	Valores de pico [pu] (V= 1,1 UN)
STC	1055	1343	4,4	5,6
BCTAN	1136	1402	4,8	5,9
HÍBRIDO	826	1035	3,5	4,3

Obs.: O valor de pico de referência da corrente calculado pelas equações (1) e (2) é 808 A (tensão 1,0 pu e fluxo residual nulo).

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise comparativa da representação de transformadores utilizando os modelos do tipo STC, BCTRAN e HÍBRIDO disponíveis no programa de transitórios eletromagnéticos ATPDraw, tendo como base os valores das correntes de “inrush” obtidas nas simulações do transitório de energização dos transformadores e o valor teórico obtido através da fórmula tradicional. Os parâmetros utilizados nos modelos estudados consideraram a mesma base de dados e valores obtidos nos ensaios e projeto do equipamento. Da análise realizada, verifica-se que, para o tipo de transformador avaliado, as correntes transitórias de energização (corrente de “inrush”) apresentaram fundamentalmente o mesmo comportamento qualitativo nos diversos modelos. No entanto, com os parâmetros adotados, o modelo HÍBRIDO apresentou resultados mais próximos aos valores teóricos e foi considerado o modelo mais adequado para os estudos de transitórios de energização de transformadores quando comparado com os modelos STC e BCTRAN, os quais apresentaram valores de corrente de “inrush” superiores aos esperados.

É importante ressaltar que as correntes transitórias de energização são influenciadas por diversos fatores, notadamente pela curva de saturação do núcleo do transformador e os valores da reatância de núcleo de ar dos enrolamentos. Para que as simulações sejam confiáveis, torna-se necessário que se conheçam os detalhes construtivos e demais informações do transformador a ser estudado, fazendo com que a sua representação seja a mais refinada e adequada possível. Recomenda-se a utilização de modelos que levem em conta a topologia do núcleo magnético, principalmente para estudos da operação a vazio e manobras controladas de disjuntores para se evitar as altas correntes de “inrush”. Neste caso, a modelagem do transformador a ser manobrado torna-se extremamente importante, tendo em vista a necessidade de se conhecer detalhadamente as condições magnéticas e elétricas do transformador bem como do sistema elétrico onde o equipamento será conectado. As manobras de chaveamento dependem de diversos fatores, incluindo as dispersões dos disjuntores e assim, tais manobras caracterizam-se como eventos estatísticos, sendo assim, os resultados são diretamente dependentes dos instantes de chaveamento. Neste contexto, tem sido atualmente utilizados sistemas e técnicas de chaveamentos controlados no sentido de reduzir os esforços eletrodinâmicos e possíveis interações das correntes transitórias de energização com o sistema elétrico [9-11].

Outras comparações entre modelos são necessárias de forma a se avaliar as diversas condições operacionais, sendo este um tema de grande relevância. Neste sentido, deve-se ainda validar os resultados de modelos tomando-se como base medições em campo e em laboratórios para aplicação em diversos estudos de transitórios eletromagnéticos, incluindo dispositivos de chaveamentos controlados.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] - Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão - Estudos Elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linha de Transmissão.
- [2] - S.V. Kulkarni; S.A. Khaparde, Transformer Engineering Design and Practice, Marcel, Inc., New York, 2004.

- [3] - IEEE PES Task Force on Data for Modeling System Transients, Parameter Determination for Modeling System Transients - Part III: Transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, n° 3, July, 2005.
- [4] H. S. Bronzeado; R. Yacimini, “Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients”, IEEE Power Proceedings - Science, Measurement and Technology, vol 142, pp. 323-329, 1995.
- [5] R. S. Girgis; E. G. teNyenhuys, “Characteristics of Inrush Current of Present Designs of Power Transformers”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6, 2007.
- [6] N. Chiesa; B. A. Mork; H. K. Hoidalén, “Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 25, pp. 2599-2608, 2010.
- [7] J. A. M. Velasco, B. A. Mork, “Transformer Modelling for Simulation of Low Frequency Transients in Power Systems”, in 17th CIRED International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, May, 2003.
- [8] J. M. S. C. Costa; M. D. Teixeira; P. A. B. Block; A. E. Lazaretti; M. R. Sans; L. F. R. B. Toledo; V. S. Borges; R. Scholz; “Validação da Curva de Saturação de Transformadores de Potência a Partir de Medições de Campo”, XXIII SNPTTE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu (PR), Brasil, Outubro, 2015.
- [9] H.S. Bronzeado, “CHESF P&D – Projeto de mitigação de correntes de inrush em transformadores”, Relatório Interno publicado pela CHESF/DOEL, Recife, PE, Brazil, dezembro 2003.
- [10] J. H. Brunke, and K. J. Fröhlich, “Elimination of transformer inrush currents by controlled switching, Part I”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, pp. 276-280, abril 2002.
- [11] E. Portales and A. Mercier, on behalf of CIGRÉ Working Group A3.07, “Controlled switching of unloaded power transformers”, ELECTRA No. 212, pp. 39-47, Feb. 2004.

APÊNDICE I - DADOS DOS MODELOS

A1: SATURABLE TRANSFORMER COMPONENT (STC)

A1.1 - DADOS DE ENTRADA:

Tensão nominal do Primário: 132796 [V]
Tensão nominal do Secundário: 34500 [V]
Conexão: YnD1
Resistência do Primário: 0,95 [Ω]
Resistência do Secundário: 0,05 [Ω]
Reatância do Primário: 187,723 [Ω]
Reatância do Secundário: 4,217 [Ω]
Corrente a vazio: 0,235 [A]
Fluxo Nominal: 498.5 [Volts/espira]
Resistência de Magnetização: 364.490 [Ω]
Curva de Saturação: (vide Fig. 3 e A1.2)

A1.2 - CARTÃO DE DADOS:

TRANSFORMER	.235 498.5X0002A3.64E5
0.063639610307	172.56062726
0.12294483813	348.68500661
0.13198427803	373.59375803
0.14765427127	398.50250944
0.15767852073	423.41126085
0.17684375474	448.35752545
0.21725898069	473.22876368
0.32043326394	498.13751509
0.48844019566	524.39674098
0.8468544956	547.95501792
1.2973701578	572.86376933
595.65392725	643.87997009
9999	
1STCA	.95187.721.33E5
2X0001AX0001B	.054.217634500.
TRANSFORMER X0002A	X0002B
1STCB	
2X0001BX0001C	
TRANSFORMER X0002A	X0002C
1STCC	
2X0001CX0001A	

A.2: BCTRAN

A.2.1 - DADOS DE ENTRADA:

Tensão nominal de Linha do Primário: 230 [kV]
Tensão nominal do Secundário: 34,5 [kV]
Conexão: YnD1
Impedância Percentual: 9,37 [%] (base de 70 MVA)
Potência Nominal: 70/95 [MVA]
Perdas de Curto-Circuito: 180 [kW]
Curva de Saturação: (vide Fig. 3 e A.2.2)

A.2.2 - CARTÃO DE DADOS:

\$VINTAGE, 1,
1BCTA XX0003 .109342606577E7
USE AR
1BCTA XX0003 5.3259565936607 .9716326543254
2X0004AX0004B -20.49961056579
78.903037907599 .06558520408163

\$VINTAGE, -1,
USE OLD
\$VINTAGE, 1,
1BCTB XX0003 .109342606577E7
USE AR
1BCTB XX0003 5.3259565936607 .9716326543254
2X0004BX0004C -20.49961056579
78.903037907599 .06558520408163

\$VINTAGE, -1,
USE OLD
\$VINTAGE, 1,
1BCTC XX0003 .109342606577E7
USE AR
1BCTC XX0003 5.3259565936607 .9716326543254
2X0004CX0004A -20.49961056579
78.903037907599 .06558520408163

\$VINTAGE, -1,
USE OLD
98BCTA XX0003 0.0989423.42
0.098943831806 423.41867956
0.11122771829 473.23264186
0.24357099545 498.13962301
0.4284532015 523.04660416
1.205716256 572.86056646
595.26907416 644.09453255
9999.

A.3: MODELO HÍBRIDO

A.3.1 - DADOS DE ENTRADA:

Tensão nominal de Linha do Primário: 230 [kV]
Tensão nominal do Secundário: 34,5 [kV]
Conexão: YnD1
Impedância Percentual: 9,37 [%] (Base de 70 MVA)
Potência Nominal: 70/95 [MVA]
Perdas de Curto-Circuito: 180 [kW]
Capacitância parasita (P-G): 3,302 [nF]
Capacitância parasita (S-G): 5,098 [nF]
Capacitância parasita (P-S): 2,185 [nF]
Reatância de Núcleo de ar: 6,7109 [mH]
Curva de Saturação: (Vide Fig. 3 e A.3.2)

A.3.2 - CARTÃO DE DADOS:

98X0004BX0004AX0004AX0004C0.3808110.01
98X0004CX0004BX0004AX0004C0.3808110.01
99X0004AX0004C
0.3168115942 29325.
0.40937198068 32775.
0.46743961353 34500.
0.5322705314 36225.
0.74782608696 39675.
0.9361352657 44608
9999.
99X0004BX0004A
0.3168115942 29325.
0.40937198068 32775.
0.46743961353 34500.
0.5322705314 36225.
0.74782608696 39675.
0.9361352657 44608.
9999.

99X0004CX0004B

0.3168115942 29325.
0.40937198068 32775.
0.46743961353 34500.
0.5322705314 36225.
0.74782608696 39675.
0.9361352657 44608
9999.

C Nonlinear core representation

C -----
96X0007AT0001A 8888.
-67.649267621 -156.84885122
-33.824633811 -156.62185546
-16.912316905 -153.90299151
-8.1831248255 -150.22935907
-3.9550455992 -145.22277295
-1.841005986 -138.44407272
-0.78398617942 -129.42047043
-0.25547627613 -117.73874279
0.00877867552 -103.23353746
0.14090615134 -86.257912684
0.40516110298 86.257912684
0.53728857881 103.23353746
0.80154353045 117.73874279
1.3300534337 129.42047043
2.3870732403 138.44407272
4.5011128535 145.22277295
8.7291920798 150.22935907
16.912316905 153.90299151
33.824633811 156.62185546
67.649267621 156.84885122
9999.
X0007AT0001A 1.48E5
96X0007BT0001B 8888.
-67.649267621 -156.84885122
-33.824633811 -156.62185546
-16.912316905 -153.90299151
-8.1831248255 -150.22935907
-3.9550455992 -145.22277295
-1.841005986 -138.44407272
-0.78398617942 -129.42047043
-0.25547627613 -117.73874279
0.00877867552 -103.23353746
0.14090615134 -86.257912684
0.40516110298 86.257912684
0.53728857881 103.23353746
0.80154353045 117.73874279
1.3300534337 129.42047043
2.3870732403 138.44407272
4.5011128535 145.22277295
8.7291920798 150.22935907
16.912316905 153.90299151
33.824633811 156.62185546
67.649267621 156.84885122
9999.
X0007BT0001B 1.48E5
96X0007CT0001C 8888.
-67.649267621 -156.84885122
-33.824633811 -156.62185546
-16.912316905 -153.90299151
-8.1831248255 -150.22935907
-3.9550455992 -145.22277295
-1.841005986 -138.44407272
-0.78398617942 -129.42047043
-0.25547627613 -117.73874279
0.00877867552 -103.23353746
0.14090615134 -86.257912684
0.40516110298 86.257912684
0.53728857881 103.23353746
0.80154353045 117.73874279
1.3300534337 129.42047043
2.3870732403 138.44407272
4.5011128535 145.22277295
8.7291920798 150.22935907
16.912316905 153.90299151
33.824633811 156.62185546
67.649267621 156.84885122
9999.