



GRUPO X

GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC

MODELAGEM DE TRANSFORMADORES REGULADORES PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS  
ELETROMAGNÉTICOS ATRAVÉS DA REPRESENTAÇÃO DE SEUS TRANSFORMADORES  
CONSTITUINTES

Robson A. Oliveira \*

Rui Jovita C. G. da Silva

RESUMO

A interligação entre a Usina Hidrelétrica de Itaipu e o Sistema Interligado Nacional Paraguaio (SINP) é feita na subestação Margem Direita (SE-MD), com 4 conjuntos de autotransformadores e transformadores reguladores, conforme mostra a Figura 1, sendo que o último conjunto entrou em operação em dezembro de 2002. No estudo de energização do quarto conjunto foram obtidos resultados que implicavam em restrições à operação do sistema, exigindo maior tempo para a recomposição. Essas restrições contrariavam a tendência natural da evolução do sistema, isto é, as condições para energização do quarto conjunto, estando três em operação, eram mais restritivas do que a do terceiro conjunto, estando dois em operação. Em função disso julgou-se necessário reavaliar os modelos utilizados nas simulações dos conjuntos de transformadores, visando reproduzir com maior fidelidade o arranjo físico do conjunto da transformação.

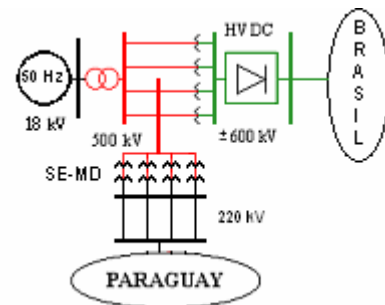


FIGURA 1 – Diagrama Unifilar do Sistema.

O transformador regulador utilizado é o mesmo de uso difundido para o controle de tensão em sistemas elétricos de potência de alta tensão. O modelo desenvolvido considera o equacionamento das tensões e correntes nos dois transformadores que o compõem, o transformador de excitação e o transformador série, assim como o comutador de “tap” e o seletor de que o transformador está aumentando ou reduzindo a tensão.

Este artigo apresenta o modelo detalhado de transformador regulador para ser utilizado em estudos de transitórios eletromagnéticos no ATP – *Alternative Transients Program* [1]. Este novo modelo é mais exato e detalhado do que o modelo utilizado até então, com isso as simulações são mais próximas do real, diminuindo eventuais restrições à operação de sistema, tais como corrente de *Inrush* e sobretensões.

Para a validação do novo modelo para o transformador regulador fez-se a comparação dos resultados do ensaio de fábrica de curto-circuito com os resultados da aplicação de curto-circuito através do ATP. No sentido de complementar a validação dos modelos foram realizados ensaios de campo de energização de um dos conjuntos autotransformador e transformador regulador.

PALAVRAS-CHAVE: Transformador Regulador, Modelagem, Energização, Sobretensões, ATP.

1. INTRODUÇÃO

A interligação entre a Usina Hidrelétrica de Itaipu e o Sistema Interligado Nacional Paraguaio (SINP) é feita na subestação Margem Direita (SE-MD) através da transformação de 500 kV para 220 kV. A transformação é composta de 4 conjuntos formados pela conexão em série de um autotransformador 525/241,5/13,8 kV com um transformador regulador 241,5/241,5 $\pm$ 8x1,25% kV, todos trifásicos e com potência nominal de 375 MVA. A SE-MD situa-se a 2 km da usina e a 8 km do Elo de Corrente Contínua (Elo CC) de Foz do Iguaçu, sendo o sistema conectado através de seis linhas de transmissão em 500 kV. A usina é composta de 10 unidades geradoras de 700 MW cada e o Elo CC é composto de dois bipolos  $\pm$ 600 kV com 3.132 MW cada.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma nova modelagem para transformadores reguladores de tensão para simulações de transitórios eletromagnéticos, uma vez que o modelo utilizado atualmente nos estudos em Itaipu o considera como um transformador comum, ou seja, um enrolamento primário separado galvanicamente do enrolamento secundário. Na verdade este tipo de transformador é constituído por dois transformadores, sendo um

de excitação e outro série. Para completar a representação do conjunto utiliza-se para o autotransformador o modelo proposto por Dommel [1] para a conversão de impedâncias de transformador em impedância para autotransformador. A motivação para o desenvolvimento desta nova modelagem foi que no estudo de energização do quarto conjunto de transformadores, estando três em operação, obteve-se resultados que estavam restringindo a operação normal, sendo que não havia histórico de problema de sobretensão durante manobras na referida SE.

Sabe-se que durante a energização de transformadores a corrente de Inrush pode atingir valores elevados devido ao sobrefluxo e/ou saturação do núcleo, tendo esta corrente elevado conteúdo harmônico. Estes harmônicos podem interagir com indutâncias e/ou capacitâncias do sistema originando sobretensões harmônicas, que podem durar até alguns segundos [2]. Estas sobretensões dependerão de muitos fatores tais como instante de fechamento do disjuntor relativo à forma de onda, característica de saturação do transformador, fluxo residual do transformador, indutância da fonte e capacitância do sistema. As sobretensões podem levar à falha ou mesmo ao dano permanente de equipamentos.

## 2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO CONJUNTO AUTOTRANSFORMADOR / TRANSFORMADOR REGULADOR

Os modelos utilizados até então nos estudos que envolvem o conjunto autotransformador e transformador regulador da SE-MD são os modelos clássicos de transformadores do ATP, *Saturable Transformer Component* [1, 3]. Para cada um dos autotransformadores e dos transformadores reguladores eram utilizados um elemento com esta modelagem clássica. Desta forma o conjunto é representado por dois transformadores em série, o primeiro com relação de transformação 525/241,5/13,8 kV e o segundo, conectado ao secundário do primeiro, com relação de transformação de 241,5 kV para o tap apropriado ao estudo. Esta representação até então utilizada não possui nenhum rigor físico com a conexão elétrica destes equipamentos que tem sua construção conforme a Figura 2. Essa ausência de rigor físico nestas modelagens levou ao desenvolvimento de um novo modelo para o conjunto de forma a se aproximar o máximo possível do real. Esses modelos são detalhados a seguir.

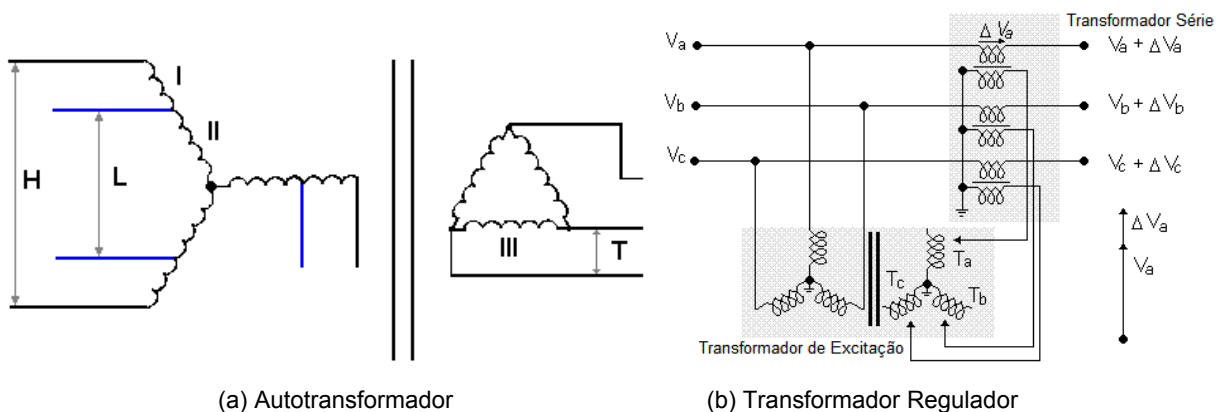


FIGURA 2 – Forma construtiva do conjunto Autotransformador/Transformador Regulador.

### 2.1 Autotransformador

Para a conversão de impedância de transformador para autotransformador foi utilizado o modelo proposto por Dommel [1]. Nesta conversão utilizam-se as equações de (1) a (4), onde  $Z$  é a impedância entre enrolamentos e  $V$  é a tensão de cada enrolamento, de acordo com a Figura 2-a.

$$\left. \begin{aligned} V_I &= V_H - V_L \\ V_{II} &= V_L \\ V_{III} &= V_T \end{aligned} \right\} \quad (1) \quad Z_{I,II} = Z_{HL} \cdot \left( \frac{V_H}{V_H - V_L} \right)^2 \quad (3)$$

$$Z_{II,III} = Z_{LT} \quad (2) \quad Z_{I,III} = Z_{HL} \frac{V_H \cdot V_L}{(V_H - V_L)^2} + Z_{HT} \frac{V_H}{V_H - V_L} - Z_{LT} \frac{V_L}{V_H - V_L} \quad (4)$$

Com esta conversão obtêm-se as impedâncias do modelo de um transformador com três enrolamentos, sendo que o primário e o secundário são conectados em série. É necessário ainda referir a curva de saturação, que antes era para o enrolamento de alta (H), para o enrolamento de maior tensão, que no caso específico deste estudo é o enrolamento I, que possui tensão nominal de 163,67 kV. O enrolamento II possui tensão nominal de 139,43 kV e o enrolamento III 13,8 kV.

### 3. MODELO DO TRANSFORMADOR REGULADOR

Neste item é descrita a principal contribuição deste trabalho. Não se obteve na literatura nenhum modelo que procedesse a representação de um transformador regulador de acordo com sua constituição física, assim como não pôde ser aplicada a mesma conversão utilizada para o autotransformador, visto que os resultados dos ensaios de curto-circuito e a vazão do transformador regulador são feitos para o conjunto todo e não separadamente para os transformadores de excitação e série, visto que os mesmos são montados em um único tanque. Assim sendo, tornou-se necessário o equacionamento matemático do transformador regulador, que será efetuado para cada transformador constituinte em separado e depois será realizada a união, para obtenção do modelo final.

No circuito da Figura 2-b são destacados os dois transformadores que constituem o transformador regulador: o transformador de excitação e o transformador série. O secundário do transformador de excitação é conectado ao primário do transformador série, que por sua vez tem fluindo pelo seu secundário a corrente de carga. O primário do transformador de excitação é alimentado pela tensão do autotransformador. A comutação dos taps é realizada no transformador de excitação, sendo ainda neste transformador modificada a polaridade para determinar se os taps vão elevar ou reduzir a tensão. Quando operando no tap nominal o transformador série está com o primário em curto-circuito e o transformador de excitação está com o secundário a vazão.

#### 3.1 Transformador de Excitação

O transformador de excitação é alimentado a partir do secundário do autotransformador, e o seu secundário alimenta o transformador série. Para o desenvolvimento de suas equações será considerada uma fonte de corrente no seu secundário, que representa o transformador série. O secundário do transformador de excitação é dotado de dois tipos de controle:

- Comutador de tap: com 8 posições de 1,25 % cada, totalizando 10 % de variação. Quando este comutador está na posição central, referente ao tap nominal, o transformador fica a vazão.
- Comutador de polaridade: pode ser positivo ou negativo, tornando a tensão induzida no secundário positiva ou negativa. A seguir são apresentadas as equações referentes a cada polaridade.

##### a) Polaridade Negativa

Seja o circuito equivalente do transformador mostrado na Figura 3, considerando-se o comutador de polaridade na posição negativa. As equações (5) a (9) descrevem o modelo.

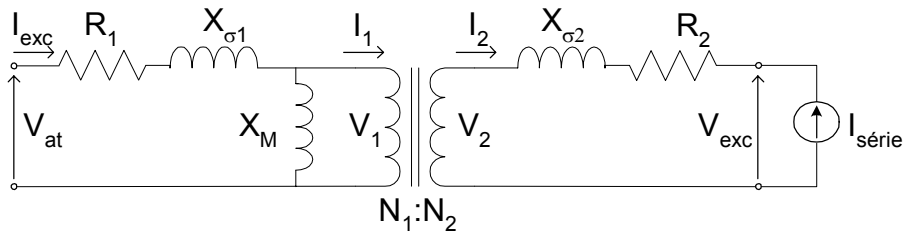


FIGURA 3 – Circuito Equivalente do Transformador de Excitação – Polaridade Negativa.

$$\begin{cases} V_{at} = (R_1 + jX_{\sigma 1}) * I_1 + V_1 \\ V_2 = (R_2 + jX_{\sigma 2}) * I_2 + V_{exc} \end{cases} \quad (5) \quad \frac{V_2}{N_2} = \frac{V_1}{N_1} \quad (7)$$

$$\begin{cases} N_1 * I_1 = N_2 * I_2 \\ I_2 = -I_{série} \\ I_1 = I_{exc} \end{cases} \quad (6) \quad V_{exc} = V_2 + (R_2 + jX_{\sigma 2}) * I_{série} \quad (8)$$

$$V_{exc} = \frac{N_2}{N_1} * \left[ V_{at} + (R_1 + jX_{\sigma 1}) \frac{N_2}{N_1} I_{série} \right] + (R_2 + jX_{\sigma 2}) * I_{série} \quad (9)$$

Onde:  $I_{exc}$  = corrente de alimentação do transformador;

$R_1, X_{\sigma 1}$  e  $R_2$  e  $X_{\sigma 2}$  = impedância de dispersão do primário e secundário respectivamente;

$V_{at}$  = tensão aplicada ao transformador de excitação pelo autotransformador;

$X_M$  = reatância de magnetização;

$V_1$  e  $V_2$  = tensão do primário e secundário;

$I_1$  e  $I_2$  = corrente do primário e secundário;

$N_1:N_2$  = relação de transformação;

$V_{exc}$  = tensão no secundário do transformador de excitação;

$I_{série}$  = corrente que passa pelo primário do transformador série.

b) *Polaridade Positiva*

O circuito equivalente para a polaridade positiva é o mesmo da Figura 3, porém ocorre a inversão da polaridade da fonte de corrente. As equações (6), (8) e (9) se alteram para (10), (11) e (12), respectivamente.

$$I_2 = I_{\text{série}} \quad (10) \quad V_{\text{EXC}} = -V_2 - (R_2 + jX_{\sigma 2}) * I_{\text{série}} \quad (11)$$

$$V_{\text{EXC}} = -\frac{V_{\text{at}}}{N} + \left[ \left( -R_2 + \frac{R_1}{N^2} \right) + j \left( -X_{\sigma 2} + \frac{X_{\sigma 1}}{N^2} \right) \right] * I_{\text{série}} \quad (12)$$

c) *Tap Nominal*

Nesta posição de tap a corrente do transformador série não circula pelo transformador de excitação e, desta forma, a corrente é nula. As equações (6) e (8) ficam de acordo com (13) e (14), respectivamente.

$$I_2 = 0 \quad (13) \quad V_{\text{EXC}} = \frac{V_{\text{at}}}{N} - (R_1 + jX_{\sigma 1}) * I_{\text{EXC}} \quad (14)$$

### 3.2 Transformador Série

O transformador série é alimentado a partir do secundário do transformador de excitação, e o seu secundário está em série com a carga alimentada pelo regulador. Para o desenvolvimento de suas equações será considerada uma fonte de tensão no primário ( $V_{\text{exc}}$ ) representando o transformador de excitação, conforme a Figura 4. A tensão resultante no secundário do transformador série está em fase com a tensão  $V_{\text{at}}$ , que é a tensão do secundário do autotransformador e aplicada ao primário do transformador de excitação. Assim, o transformador em série adiciona uma tensão  $\Delta V$  a  $V_{\text{at}}$ . O valor deste acréscimo depende, logicamente, da posição do tap. Desta maneira, obtém-se o controle do módulo da tensão  $V_{220}$  [4].

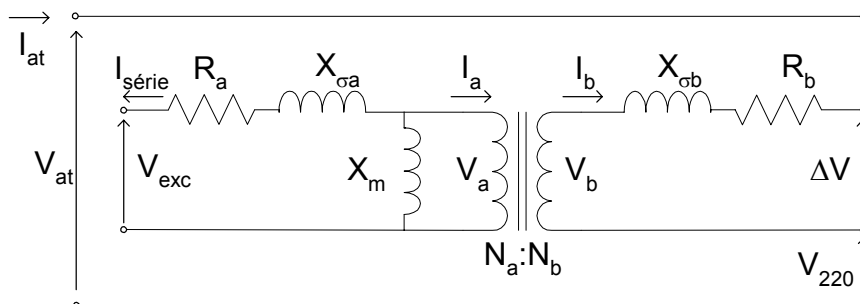


FIGURA 4 – Circuito Equivalente do Transformador Série.

Considerando-se as equações (15), (16) e (17),

$$\begin{cases} V_{\text{exc}} = (R_a + jX_{\sigma a}) * I_a + V_a \\ V_b = (R_b + jX_{\sigma b}) * I_b + \Delta V \\ V_{\text{at}} = \Delta V + V_{220} \end{cases} \quad (15) \quad \begin{cases} \frac{V_b}{N_b} = \frac{V_a}{N_a} \\ \frac{I_b}{N_b} = -\frac{I_a}{N_a} \end{cases} \quad (16) \quad \begin{cases} N_a * I_a = N_b * I_b \\ I_a = -I_{\text{série}} \\ I_b = -I_{\text{at}} \end{cases} \quad (17)$$

e chamando:

$$\frac{N_a}{N_b} = N_s \quad (18)$$

encontra-se para representar o transformador série as equações (19) e (20):

$$\Delta V = \frac{V_{\text{exc}}}{N_s} + \left[ \left( R_b + \frac{R_a}{N_s^2} \right) + j \left( X_{\sigma b} + \frac{X_{\sigma a}}{N_s^2} \right) \right] * I_{\text{at}} \quad (19)$$

$$V_{220} = V_{\text{at}} + \left[ \left( R_b + \frac{R_a}{N_s^2} \right) + j \left( X_{\sigma b} + \frac{X_{\sigma a}}{N_s^2} \right) \right] * I_{\text{at}} - \frac{V_{\text{exc}}}{N_s} \quad (20)$$

Onde:  $R_a$ ,  $X_{\sigma a}$  e  $R_b$ ,  $X_{\sigma b}$  = reatância de dispersão do primário e secundário, respectivamente;

$V_a$  e  $V_b$  e  $I_a$  e  $I_b$  = tensão e corrente do primário e secundário, respectivamente;

$X_m$  = reatância de magnetização;

$N_a$  e  $N_b$  = número de espiras do primário e secundário, respectivamente;

$\Delta V$  = variação de tensão aplicada pelo regulador;

$V_{\text{exc}}$  = tensão aplicado ao transformador série pelo transformador de excitação;

$V_{220}$  = tensão na saída do regulador;

$I_{\text{série}}$  = corrente que circula entre o secundário do transformador de excitação e o primário do transformador série.

### 3.3 Conjunto Transformador de Excitação e Transformador Série

A curva de saturação do transformador regulador é representada no primário do transformador de excitação. Manipulando-se as equações mostradas anteriormente, obtém-se a equação geral para o transformador regulador:

$$V_{220} = TAP * V_{at} - Z_{eq} * \frac{I_{at}}{TAP} \quad \text{não sei} \quad (21)$$

onde  $TAP$  e  $Z_{eq}$  dependem da polaridade de conexão:

#### a) Polaridade Negativa

$$\begin{cases} Z_{eq-} = Z_b + \frac{Z_a}{N_s^2} + \frac{Z_2}{N_s^2} + \frac{Z_1}{(N * N_s)^2} \\ TAP_- = \frac{N * N_s - 1}{N * N_s} \end{cases} \quad (22)$$

#### b) Polaridade Positiva

$$\begin{cases} Z_{eq+} = Z_b + \frac{Z_a}{N_s^2} - \frac{Z_2}{N_s^2} + \frac{Z_1}{(N * N_s)^2} \\ TAP_+ = \frac{N * N_s + 1}{N * N_s} \end{cases} \quad (23)$$

#### c) Tape Nominal

Neste caso  $V_{exc} = 0$ , resultando em,

$$Z_{eq_0} = Z_b + \frac{Z_a}{N_s^2} \quad (24) \quad V_{220} = V_{at} - \left[ R_b + \frac{R_a}{N_s^2} + j \left( X_{cb} + \frac{X_{ca}}{N_s^2} \right) \right] * I_{at} \quad (25)$$

#### d) Cálculo dos Parâmetros

Baseado nos resultados dos ensaios de curto-circuito do conjunto, nas equações de (21) a (25) e nos dados de placa do transformador regulador, obtém-se os seguintes parâmetros:

$$\begin{cases} R_a = 0,103 \text{ Ohms} \\ L_a = 13,803 \text{ mH} \\ R_b = 0,029 \text{ Ohms} \\ L_b = 4,2053 \text{ m} \end{cases} \quad \begin{cases} R_1 = 5,0 \text{ Ohms} \\ L_1 = 691,9 \text{ mH} \\ R_2 = 0,025 \text{ Ohms} \\ L_2 = 0,5885 \text{ mH} \end{cases} \quad \begin{cases} N_1 = 139,4 \text{ kV} \\ N_2 = 25,35 \text{ kV} \\ N_a = 25,35 \text{ kV} \\ N_b = 13,94 \text{ kV} \end{cases}$$

A comparação entre o ensaio de curto-circuito de fábrica e a aplicação de curto-circuito no modelo do ATP é mostrada na Tabela 1. Pode-se considerar que o erro, sempre inferior a 4 %, é baixo, o que valida o modelo em termos de impedância equivalente.

TABELA 1 – Ensaio de curto-circuito – Comparação Ensaio de Campo e Simulação.

Tap	Tensão aplicada (V)	Corrente ensaio (A)	Corrente modelo (A)	Erro	Média do Erro	Tap	Tensão aplicada (V)	Corrente ensaio (A)	Corrente modelo (A)	Erro	Média do Erro
-8 (Mín)	9312	889.6	900.8	1.26%	1.59%	1	4007	899.7	871.2	-3.17%	2,71%
-7	8250	893.3	915.2	2.45%		2	4044	884.3	868.6	-1.78%	
-6	7007	891.7	888.2	-0.39%		3	4075	878.9	846.0	-3.74%	
-5	6282	890.7	903.6	1.45%		4	4363	891.7	859.7	-3.59%	
-4	5638	894.9	910.8	1.78%		5	4694	897.1	865.8	-3.49%	
-3	5113	892.8	914.7	2.45%		6	5125	899.2	875.1	-2.68%	
-2	4507	876.8	876.5	-0.03%		7	5625	899.2	884.0	-1.69%	
-1	4250	905.6	879.2	-2.92%		8 (Max)	6125	896.0	882.2	-1.54%	
0 (Nom)	4138	903.5	907.7	0.46%	0.46%	<b>Erro Médio</b>			<b>2.05 %</b>		

## 4. ENSAIOS E SIMULAÇÕES DE ENERGIZAÇÃO

Para complementar a validação do modelo foram feitas comparações de ensaios de energização com resultados de simulação no ATP. Além dos modelos do conjunto autotransformador e transformador regulador, nas simulações também estão representados a usina de Itaipu 50 Hz, com 9 unidades geradoras, o sistema de

transmissão em 500 kV e o Elo CC, que foi representado por cargas equivalentes ao valor transmitido, no nível de 500 kV, e com o circuito detalhado dos filtros de harmônicos. A relação de transformação considerada para o transformador regulador nestas simulações foi 241,5/217,35 kV, isto é, o tap mínimo (posição -8). Também foi efetuada a comparação dos resultados do modelo desenvolvido (modelo Novo) com modelo utilizado até então (modelo Atual).

A Figura 5 compara as correntes de neutro no autotransformador (5-a) e no transformador regulador (5-b). A Figura 6 mostra a corrente na fase C do autotransformador (6-a) e a tensão na fase A do 220 kV (6-b), isto é, no secundário do transformador regulador.

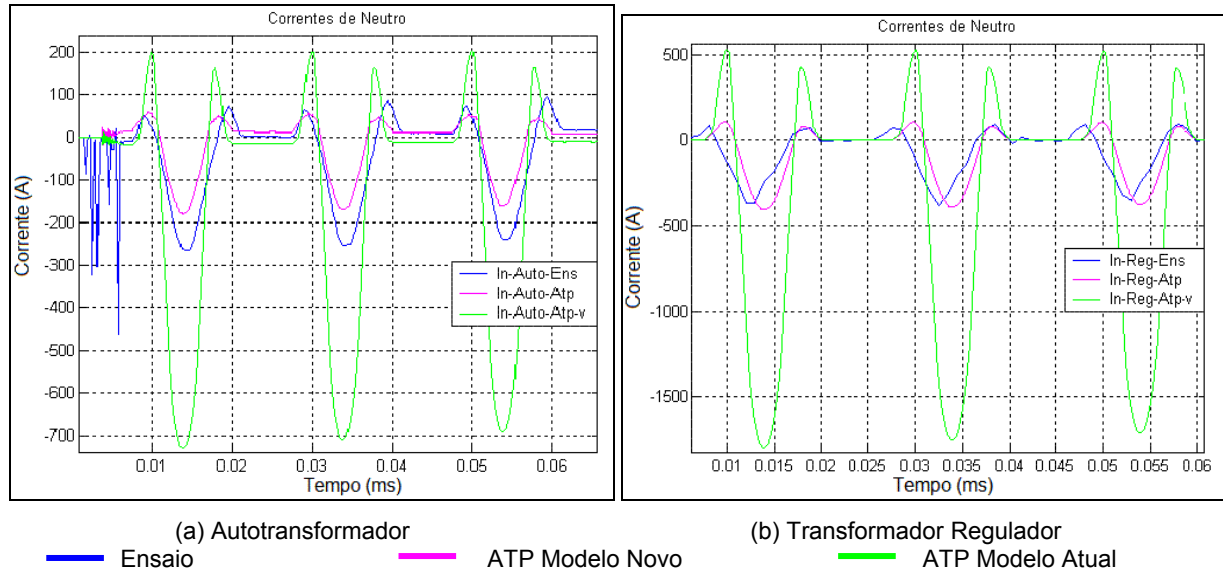


FIGURA 5 – Correntes de Neutro.

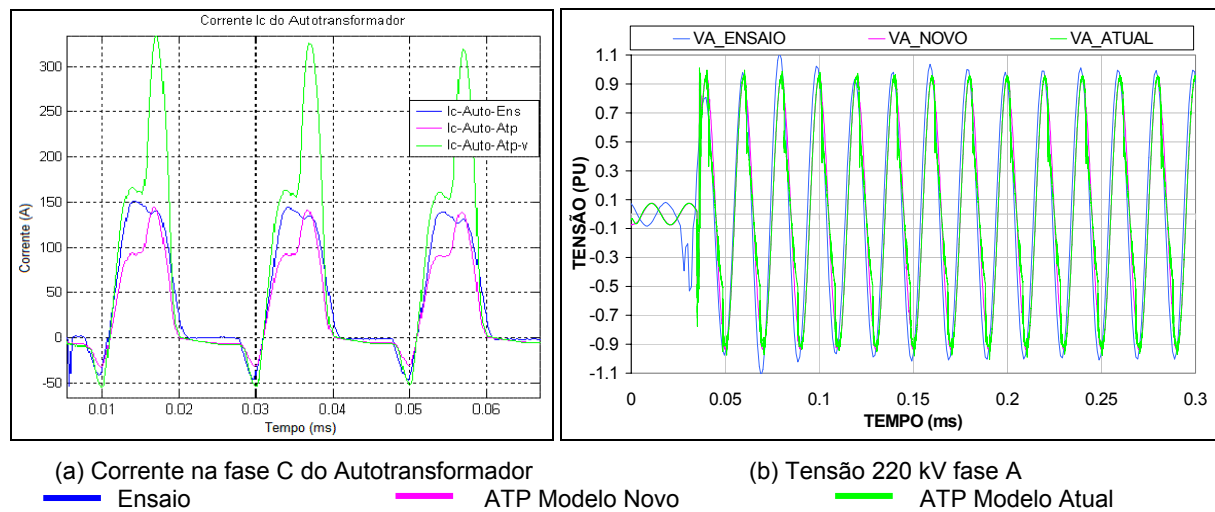


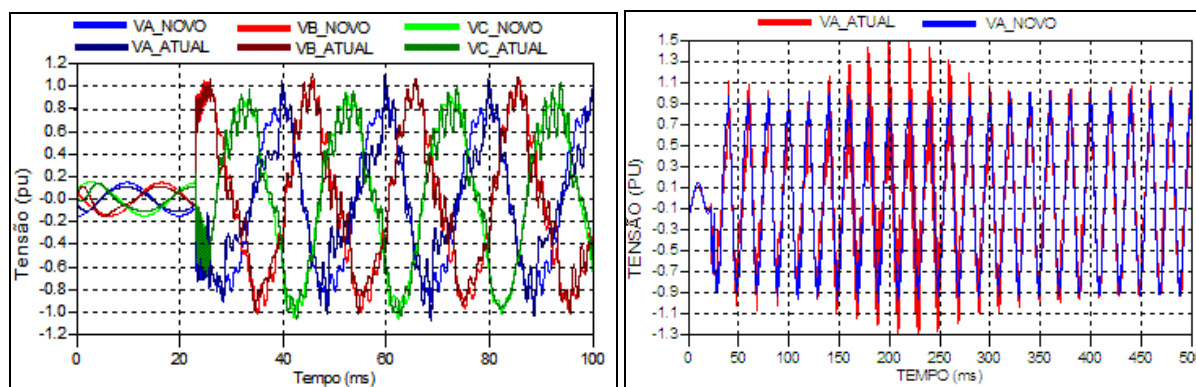
FIGURA 6 – Comparações de Tensão e Corrente de Fase.

Pode-se observar que a corrente de fase na simulação com o modelo Novo é muito próxima da corrente medida no ensaio de campo, enquanto que a do modelo Atual atinge aproximadamente o dobro do valor. Na corrente de neutro esta diferença é ainda maior entre os dois modelos, sendo o modelo Novo praticamente igual ao ensaio de campo, tanto no autotransformador quanto no transformador regulador. Uma das causas da diferença entre a corrente de neutro do autotransformador, entre o ensaio e a simulação com o modelo Novo, pode ser creditada a existência de fluxo remanescente, que não foi levado em consideração nas simulações.

Houve diferença qualitativa no comportamento das tensões no 220 kV ao se comparar os ensaios de campo com os resultados das simulações, qualquer que seja o modelo. Os resultados dos ensaios mostram oscilações típicas de circuitos RLC, os quais não eram esperados e não foram verificados nas simulações. Esta diferença pode ser atribuída ao uso de DPB (Dispositivo Potencial de Bucha) no registro dos ensaios [5]. Isto pode ser visto na Figura 6-b. Desta forma, os resultados com o modelo Novo permitem sua validação como representativo do conjunto de transformadores da SE-MD.

Para complementar a comparação entre os modelos, foi realizada a análise estatística no ATP com 100 energizações do conjunto de transformadores. Para o modelo Atual o pior caso apresentou uma sobretensão de 122,9 % e a média das sobretensões foi 107,5 %. Para o modelo Novo esses valores foram 106,5 % e 99,6 %, respectivamente, indicando que as restrições à operação com o modelo Novo devem ser reduzidas.

Na Figura 7 são comparados os resultados de energizações para a pior configuração do sistema do ponto de vista de sobretensões, ou seja, o sistema com uma unidade geradora em Itaipu 50 Hz, uma LT 500 kV até a SE-MD e somente um conjunto de transformadores na SE-MD, simulando um ensaio de *power restoration* [6]. Pode-se observar a maior presença de harmônicos na forma de onda de tensão do modelo Atual, discriminados na Tabela 2. A Figura 7-b mostra a mesma simulação da Figura 7-a, apenas com tempo de simulação maior, onde pode ser observada a presença de ferroressonância com o modelo atual, provocando sobretensões elevadas, que não ocorrem com o modelo novo, caracterizando que as restrições ao sistema com este novo modelo devem diminuir. A Figura 8 e Tabela 3 mostram as comparações entre as correntes nos dois modelos, sendo observada uma redução significativa da amplitude da corrente fundamental no modelo Novo.



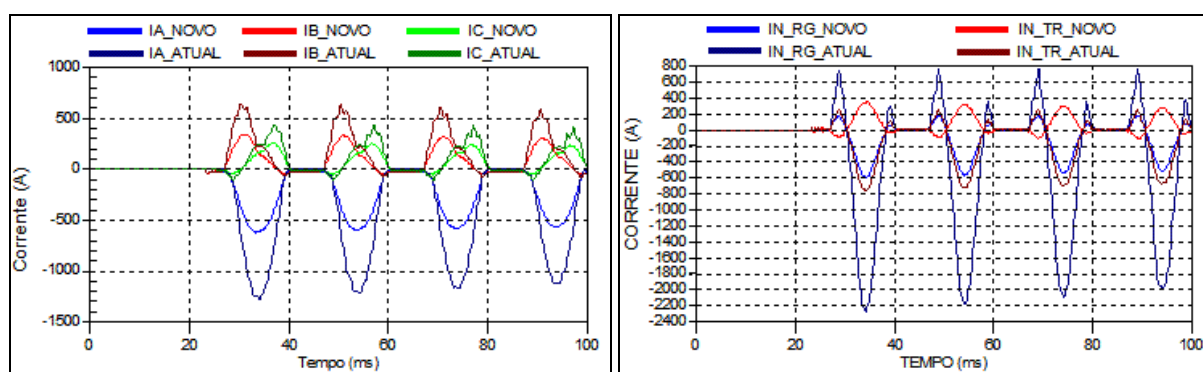
(a) Tensão no 220 kV – até 100 ms.

(b) Tensão no 220 kV – até 500 ms.

FIGURA 7 – Tensão no 220 kV durante energização do conjunto autotransformador/regulador.

TABELA 2 – Harmônicos na tensão do 220 kV na energização.

Fase	Fund (kV)	THD (%)	RMS <sub>h</sub> (kV)	H2 (%)	H3 (%)	H4 (%)	H5 (%)	H6 (%)
VA_NOVO	107.56	12.25	13.18	6.27	5.13	3.51	1.64	1.15
VB_NOVO	113.92	13.66	15.56	5.90	3.48	2.01	1.70	1.19
VC_NOVO	116.04	9.43	10.94	6.00	2.06	3.25	2.08	1.36
VA_ATUAL	84.63	40.31	34.12	30.17	5.57	11.96	1.77	6.91
VB_ATUAL	104.40	26.94	28.13	13.34	12.38	8.19	3.94	4.56
VC_ATUAL	110.17	20.80	22.92	10.63	6.08	9.45	4.84	4.05



(a) Correntes de fase de alimentação do conjunto.

(b) Correntes de neutro.

FIGURA 8 – Correntes de energização nas simulações com modelo Atual e Novo.

Em virtude do modelo Novo apresentar valores de corrente muito inferiores ao modelo Atual, as distorções de tensão no modelo Novo também são muito menores que no modelo Atual, explicando porque a ferroressonância não se manifesta naquele modelo.

TABELA 3 – Análise Harmônica das Correntes de *Inrush*.

CORRENTE	Fund (A)	THD (%)	RMSH (A)	H2 (%)	H3 (%)	H4 (%)	H5 (%)	H6 (%)
IA_NOVO	226.3	109.6	248.0	27.5	7.5	5.1	1.5	1.6
IB_NOVO	120.4	81.6	98.3	39.2	16.8	5.2	3.9	2.8
IC_NOVO	85.6	94.1	80.6	42.3	16.7	12.8	5.1	1.7
IA_ATUAL	459.9	100.6	462.8	34.7	3.3	5.7	1.3	2.0
IB_ATUAL	202.4	92.5	187.3	42.1	24.5	10.1	3.5	4.6
IC_ATUAL	138.8	87.8	121.8	40.1	23.0	18.0	7.5	2.1
IN_RG_NOVO	170.8	104.4	178.3	78.6	22.0	6.6	3.6	4.9
IN_TR_NOVO	98.9	109.3	108.1	79.0	22.3	6.0	2.8	4.1
IN_RG_ATUAL	654.6	107.1	700.8	80.3	24.6	8.2	1.6	6.0
IN_TR_ATUAL	220.1	105.2	231.5	80.5	24.3	8.1	1.7	6.2

## 5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o desenvolvimento do modelo matemático para simulações no ATP de um transformador regulador utilizado para o controle de tensão em Sistemas Elétricos de Potência. Tal modelo considera o arranjo físico real do transformador regulador, constituído por um transformador de excitação e um transformador série montados em um mesmo tanque, conforme a Figura 2-b. O modelo desenvolvido utiliza dois *Saturable Transformer Component* conectados de acordo com a conexão física do transformador regulador. Os parâmetros para este modelo são calculados a partir dos ensaios de curto-circuito do transformador regulador utilizando-se as equações apresentadas neste artigo.

A validação do modelo desenvolvido foi realizada no estudo do conjunto autotransformador/transformador regulador da SE-MD, que interliga a usina de Itaipu ao Sistema Interligado Nacional Paraguai, sendo adotado para o autotransformador o modelo *Saturable Transformer Component* com a conversão de impedâncias desenvolvida por Dommel. A resposta do modelo mostrou grande proximidade com os ensaios de energização realizados, quanto a corrente de *Inrush*, tanto no autotransformador quanto no transformador regulador, para as correntes de fase e neutro.

As variações de tensão provenientes do ensaio de energização não foram semelhantes às variações obtidas através da simulação. Entretanto, o fato das medições serem realizadas com auxílio de DPB justifica essa diferença, visto que o DPB introduz um circuito capacitivo à cadeia de medição.

O modelo utilizado até então para as simulações com o ATP produziu resultados diferentes dos obtidos com o modelo apresentado neste trabalho, principalmente no nível da corrente e no conteúdo de harmônicos nas tensões. Espera-se com isso que as restrições impostas à recomposição do sistema sejam reduzidas quando o novo modelo for utilizado na realização do estudo em virtude da menor possibilidade de excitar alguma ressonância no sistema.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hermann W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program – Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA, August 1986.
- [2] Durbak, D. W., "Temporary Overvoltage Following Transformer Energizing", Siemens PTI, US, Newsletter September 2006.
- [3] Juan A. Martinez Velasco and Bruce A. Mork, "Transformer Modeling for Low Frequency Transients – The State of the Art", International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003, New Orleans, USA.
- [4] Olle L. Elgerd, "Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica", McGraw-Hill do Brasil, 1978.
- [5] Damasio Fernandes Jr. e Washington L. A. Neves, "Representação de TPC no EMTP: cálculo de parâmetros e cuidados necessário às simulações de ferroressonância", XIV CBA, Setembro de 2002.
- [6] M. Rioual and C. Sicre, "Energization of a no-load transformer for power restoration purposes: Impact of the sensitivity to parameters", IPST, Rio de Janeiro, June, 2001.

## 7. DADOS BIOGRÁFICOS

Robson Almir de Oliveira  
Nascido em Itajubá, MG em 05 de março de 1974.  
Mestrado (2001) na área de Sistemas de Potência e  
Graduação (1997) em Engenharia Elétrica, ambos  
na EFEI. Trabalha na Itaipu Binacional desde 2000,  
na Divisão de Estudos Elétricos e Normas.

Rui Jovita Godinho Corrêa da Silva  
Nascido em Belém-PA. Mestrado (1990) na área de  
Sistemas de Potência, na EFEI, e graduação (1983)  
em Engenharia Elétrica na UFPA. Trabalhou na  
CEMIG de 1985 a 1989. Desde 1989 está na Itaipu  
Binacional, na Divisão de Estudos Elétricos e  
Normas.