XVI CEEL - ISSN 2178-8308
Universidade Federal de Uberlândia
05 a 09 de novembro de 2018

MODELAGEM DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Isabela França Novais*[1], Acriziomar A. P. Junior[1], Sérgio Ferreira de Paula Silva[1]
[1]FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - **Transformadores em sistemas de energia elétrica são de grande importância, com efeitos significativos na distribuição de energia elétrica. A modelagem do mesmo, com diferentes tipos de conexões, requer uma análise mais detalhada para melhores resultados. Assim, o objetivo deste trabalho é propor um novo modelo de transformador trifásico incorporando o neutro nas matrizes de admitância, considerando a impedância de aterramento, diferentes tapes e o ramo magnetizante.**

Palavras-chave - **transformadores trifásicos, neutro aterrado, impedância de aterramento, ramo de magnetização, modelagem de transformadores desbalanceados.**

MODELING THREE-PHASE TRANSFORMERS

Abstract - **Transformers in electric power systems are of great importance, with significant effects on the distribution of electric energy. Three-phase considering the different types of connections, requires a more detailed analysis for better results. Thus, the objective of this work is to propose a novel three-phase transformer model incorporating the magnetizing branch, the neutral wire, fixed and automatic taps, and considering the ground impedance.**

Keywords - **three-phase transformers, grounded neutral, ground impedance, magnetizing branch, modeling of unbalanced transformers**

I. INTRODUÇÃO

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica, os transformadores são de fundamental importância, pois são os responsáveis pela compatibilização entre a tensão de distribuição (média tensão) com a tensão de fornecimento ao cliente final (baixa tensão). Em conjunto com os condutores elétricos, os transformadores são o meio para conduzir a energia entre a fonte e o consumo final, ou seja, estão em série com a carga. Isto significa que toda a corrente circula pelos mesmos e, consequentemente, quanto maior a resistência destes, maior a perda joule (RI^2) decorrente do seu funcionamento.

isabela_0405@hotmail.com

De acordo com um estudo realizado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), as perdas de tais máquinas somam, por dia, um custo médio de R$ 6.336.429,00, o que corresponde a ordem de 22.169,3 MWh de energia [5]. Portanto, a magnitude destas perdas demonstra que transformadores eficientes são uma excelente decisão para a conservação de fontes preciosas de energia e para a redução de custos operacionais da indústria, ao passo que auxilia na conservação do meio ambiente

Portanto, apesar de bastante conhecidos, os transformadores constituem-se uma excelente oportunidade de estudo com vistas à identificação de possibilidades de economia ou mesmo recomendações quanto à melhor tecnologia a ser utilizadas por estes equipamentos.

Nos projetos de novos sistemas elétricos e na avaliação dos existentes, a simulação digital constitui uma ferramenta essencial ao trabalho do engenheiro. No entanto, devido à praticidade de modelagem e o menor esforço computacional, os sistemas elétricos de grande porte, em sua maioria, ainda utilizam modelagem monofásica para sua simulação [1]. Esta condição despreza os diferentes tipos de conexões, os acoplamentos e os possíveis desequilíbrios entre as fases.

Os sistemas computacionais atuais possuem capacidade de processamento e armazenamento que permitem a simulação trifásica de grandes sistemas de potência. Esta propriedade permite a realização de estudos mais precisos, mas esbarra em novos obstáculos, como a dificuldade de convergência dos algoritmos, preparados para sistemas monofásicos, e a adaptação dos modelos monofásicos em trifásicos.

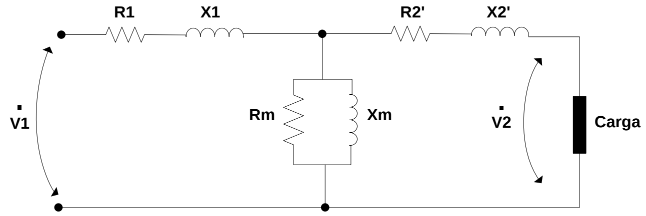
Os transformadores trifásicos estão presentes em todos os sistemas elétricos de potência e possuem diversas opções de conexão primária e secundária, formas de aterramento e controle da tensão.

Neste contexto, o objetivo deste artigo é apresentar adaptações do modelo tradicional de um transformador de potência de dois enrolamentos trifásicos, incorporando o neutro nas matrizes de admitâncias e considerando a impedância de aterramento, os possíveis tapes e o ramo magnetizante. Além da representação destes parâmetros, o estudo busca contribuir na obtenção de sistemas mais estáveis, com menor tempo de processamento.

II. IMPEDÂNCIAS BASE DO TRANSFORMADOR

O transformador, por desempenhar um papel fundamental nos sistemas elétricos, sempre demandou a necessidade de uma representação por um circuito elétrico que traduzisse o comportamento das tensões e correntes em sua entrada e saída. Em conjunto com a representação no domínio da frequência, C*harles P. Steinmetz* [3] apresentou a modelagem matemática de um transformador monofásico, conforme ilustrado pela Figura 1. O equivalente de *Steinmetz se* aplica tanto para transformadores monofásicos, quanto para uma fase de um transformador trifásico.

Figura 1: Circuito Equivalente de Steinmetz



Os parâmetros do circuito de *Steinmetz* são obtidos a partir dos dados de placa do transformador e de dois ensaios: a vazio e em curto-circuito [3].

As impedâncias do primário $\dot{Z}_1$ ($R_1 + jX_1$), do secundário referida ao primário $\dot{Z}_2$ ($R'_2 + jX'_2$), do ramo de magnetização $\dot{Z}_M$(R_M // jX_M) e suas consequentes admitâncias $\dot{Y}_1$, $\dot{Y}_2$ *e* $\dot{Y}_M$ constituem os parâmetros básicos para a elaboração da matriz de transferência entre o barramento primário e o barramento secundário.

O procedimento matemático para a obtenção destes parâmetros é apresentado na sequência, considerando o sistema por unidade [pu], onde os valores de referência de tensão (V_B), corrente (I_B), potência S_B e impedância (Z_B) utilizam os valores nominais (de placa) do transformador.

$$S_B = S_{nomnial}\ [VA] \tag{1}$$

$$V_B = V_{nomnial}[V] \tag{2}$$

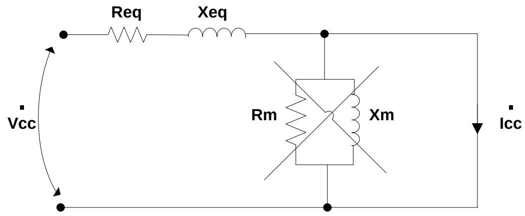
$$I_B = I_{nominal}\ [A] \tag{3}$$

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B}\ [\Omega]. \tag{4}$$

O ensaio em curto-circuito, no caso de transformadores de dois enrolamentos, é efetuado curto-circuitando os terminais de um dos enrolamentos, de preferência o de menor tensão por facilidade na leitura de tensão e corrente no lado de alta, e aplicando-se tensão, à frequência nominal, no outro enrolamento, até que, circule pelo curto-circuito a corrente nominal [3]. Este procedimento possibilita o cálculo da impedância de curto-circuito, que caracteriza a impedância entre primário e secundário, composta por uma resistência em série com uma reatância indutiva, que por sua vez, traduzem as perdas Joulicas devido à circulação de corrente nominal pelos enrolamentos e as perdas por dispersão do fluxo magnético, respectivamente. Além disso, fornece a queda de tensão percentual provocada pelo equipamento quando alimenta uma determinada carga. Este ensaio determina o valor da impedância percentual do transformador.

Neste ensaio a tensão aplicada é pequena comparada com a tensão nominal. Nessas circunstâncias, a corrente do ramo magnetizante é muito pequena comparada à que circula pelo curto e, por essa razão, o ramo magnetizante pode ser desprezado. Portanto, tem-se que o circuito elétrico equivalente da Figura 2.

Figura 2: Circuito Equivalente do Ensaio em Curto-Circuito.



A resistência elétrica equivalente R_{eq} e a reatância indutiva equivalente X_{eq} correspondem, respectivamente, à soma das resistências e reatâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário referida ao primário. A impedância percentual do transformador é dada por Z_{eq}, informação contida na placa do mesmo.

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2 \cdot Z_B}[pu] \rightarrow Req = \frac{P_{cc}}{S_B}\ [pu] \tag{5}$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_B . Z_B}[pu] = \frac{V_{cc}}{V_B}\ [pu]. \tag{6}$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}\ [pu]. \tag{7}$$

Onde:

P_{cc} - Potência de Curto-Circuito em [W].
I_{cc} - Corrente de Curto-Circuito em [A].
V_{cc} - Tensão de Curto-Circuito em [V].

A resistência R_{eq} deve ter seu valor corrigido para a temperatura de operação do transformador, já que, muito provavelmente no ato do ensaio, o equipamento está fora de sua temperatura operacional o que afeta a resistência elétrica dos enrolamentos, pois esta grandeza varia com a temperatura. A correção está prevista na norma técnica NBR5380/1993 [9], conforme (8).

$$R'_{eq} = R_{eq} \cdot \frac{\theta_1 + 273}{\theta_2 + 273} \tag{8}$$

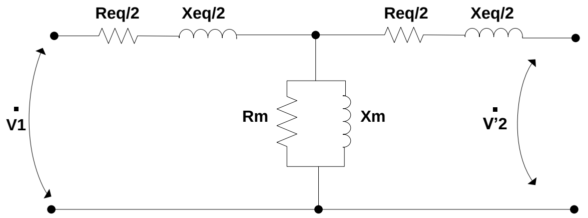
Sendo:

Θ_1 - Temperatura de referência, em °C.
Θ_2 - Temperatura do meio circundante, em °C.

O ensaio a vazio ou "sem carga" é realizado aplicando-se tensão senoidal pura de valor eficaz nominal à frequência nominal do equipamento [3]. Mede-se tensão, corrente e potência, viabilizando assim, o cálculo dos parâmetros do ramo magnetizante, que representa as denominadas perdas a vazio, por Histerese Magnética e Foucault (correntes parasitas).

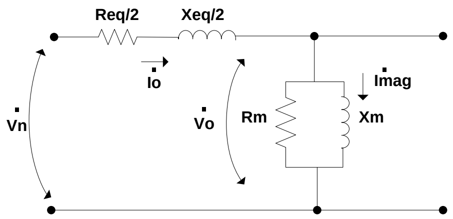
Diferente dos modelos tradicionais de transformadores, neste trabalho optou-se por representar o transformador de acordo com a Figura 3. Nesta, observa-se que a impedância equivalente, obtida pelo ensaio em curto-circuito, é dividida em duas parcelas. Estas parcelas, em [pu] são idênticas. Esta opção resulta em estudos mais precisos do impacto da corrente de magnetização nos sistemas elétricos de potência, pois não despreza a queda de tensão do enrolamento primário.

Figura 3: Circuito Equivalente Completo.



A Figura 4 mostra o circuito equivalente para o ensaio a vazio.

Figura 4: Circuito Equivalente do Ensaio a Vazio.



Da Figura 4, observa-se que para obtenção do ramo paralelo, a queda de tensão na impedância série do primário provocada pela circulação da corrente a vazio é considerada. Essa é uma das peculiaridades da modelagem apresentada neste documento.

$$\dot{V}_0 = V_n - \left(\frac{R_{eq}}{2} + j\,\frac{RX_{eq}}{2}\right) \cdot \dot{I}_0 \ [V] \tag{9}$$

$$R_m = \frac{\dot{V}_0^2}{P_0 - \frac{R_{eq} \cdot \dot{I}_0^2}{2}} \ [pu] \tag{10}$$

O valor da corrente a vazio em conjunto com o fator de potência resultante (fp_o), permite o cálculo da reatância de magnetização (X_m)

$$\dot{I}_0 = I_0 \cdot cos\phi_o + j\, I_0 \cdot sen\phi_o \ [A] \tag{11}$$

$$fp_o = cos\phi_o = \frac{P_0}{V_n . I_0} \tag{12}$$

$$X_m = \frac{V_0}{Io. sen\phi_o} \ [\Omega] = \frac{I_0}{Io. sen\phi_o \,. Z_B} [pu] \tag{13}$$

Assim, as admitâncias equivalentes do primário, secundário e magnetização são:

$$\dot{Y}_1 = \dot{Y}_2 = \frac{2}{R_{eq} + jX_{eq}} \ [pu] \tag{14}$$

$$\dot{Y}_m = \frac{R_m + jX_m}{j(R_m + X_m)} \ [pu] \tag{15}$$

III. MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

A matriz de admitâncias do transformador trifásico, para cada enrolamento, considerando os acoplamentos entre as fases, é representada por (16).

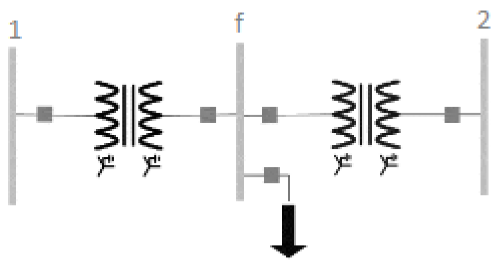
$$[\dot{Y}_{\text{abcn}}] = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{aa} & \dot{Y}_{ab} & \dot{Y}_{ac} & \dot{Y}_{an} \\ \dot{Y}_{ba} & \dot{Y}_{bb} & \dot{Y}_{bc} & \dot{Y}_{bn} \\ \dot{Y}_{ca} & \dot{Y}_{cb} & \dot{Y}_{cc} & \dot{Y}_{cn} \\ \dot{Y}_{na} & \dot{Y}_{nb} & \dot{Y}_{nc} & \dot{Y}_{nn} \end{bmatrix} \tag{16}$$

A matriz de transferência entre o barramento primário (índice 1) e o secundário (índice 2) de um transformador trifásico de dois enrolamentos ($[\dot{Y}_{12}]$) constitui-se por quatro submatrizes primárias que equivalem ao primário ($[\dot{Y}_{pp}]$), ao secundário($[\dot{Y}_{ss}]$), e aos acoplamentos entre ambos ($[\dot{Y}_{ps}]$ e $[\dot{Y}_{sp}]$).

$$[\dot{Y}_{12}] = \begin{bmatrix} [\dot{Y}_{pp}] & [\dot{Y}_{ps}] \\ [\dot{Y}_{sp}] & [\dot{Y}_{ss}] \end{bmatrix} \tag{17}$$

Para representar o ramo de magnetização na modelagem trifásica, optou-se por criar uma barra fictícia entre o primário e o secundário, semelhante à modelagem monofásica. No entanto, neste caso, entre o primário e a barra fictícia é inserido um transformador trifásico (sem o ramo de magnetização), o mesmo ocorre entre a barra fictícia e o secundário, conforme ilustrado pela Figura 5. O ramo de magnetização é inserido na forma de uma carga à barra fictícia.

Figura 5: Modelagem do transformador trifásico.



Utilizando esta metodologia, a matriz de transferência entre o primário e secundário resulta em uma matriz de ordem 12x12. Esta será formada a partir de submatrizes como mostrado por (18), onde o índice *f* indica a barra fictícia.

$$[\dot{Y}_{12}] = \begin{bmatrix} [\dot{Y}_{pp}] & [\dot{Y}_{pf}] & [\dot{Y}_{ps}] \\ [\dot{Y}_{fp}] & [\dot{Y}_{fs}] & [\dot{Y}_{ff}] \\ - & [\dot{Y}_{sf}] & [\dot{Y}_{ss}] \end{bmatrix} \quad (18)$$

Cabe ressaltar que a conexão do secundário do transformador entre o primário e a barra fictícia sempre será estrela aterrada o mesmo ocorre para a conexão primária do transformador entre a barra fictícia e o secundário. O ramo de magnetização é modelado na forma de uma carga, também, conectada em estrela aterrada. Assim, a barra fictícia sempre possui uma conexão com a referência (terra). Esta opção tem por objetivo a minimização de problemas de convergência nos algoritmos de fluxo de carga quando a presença de conexões sem vinculação à terra, como as conexões Delta e estrela isolada.

Portanto, as submatrizes $[\dot{Y}_{fp}], [\dot{Y}_{pf}], [\dot{Y}_{fs}] e\ [\dot{Y}_{sf}]$ representam os transformadores conectados entre as barras primária e fictícia e fictícia e secundária, e dependem da conexão adotada nos respectivos enrolamentos. O ramo de magnetização é modelado pela submatriz $[\dot{Y}_{ff}]$, conforme (19).

$$[\dot{Y}_{ff}] = \begin{bmatrix} \dot{Y}_m & - & - & -\dot{Y}_m \\ - & \dot{Y}_m & - & -\dot{Y}_m \\ - & - & \dot{Y}_m & -\dot{Y}_m \\ -\dot{Y}_m & -\dot{Y}_m & -\dot{Y}_m & 3\dot{Y}_m \end{bmatrix} \quad (19)$$

Como a barra fictícia não traz informações relevantes aos estudos de sistemas elétricos de potência, do ponto de vista computacional é melhor que a matriz resultante seja reduzida para uma de ordem [8,8], representando o equacionamento entre primário e secundário. Este trabalho é realizado pela denominada Redução de Kron [12]. Essa ferramenta matemática permite "eliminar" barras ou nós passivos, ou seja, os que estão conectados a cargas representadas por impedância e que não estejam diretamente interligados às fontes geradoras [9]. A redução é efetuada, de forma geral, a partir da seguinte (20).

$$Y'ij = Yij - \frac{Yik - Ykj}{Ykk} \quad (20)$$

Onde:
i = 1,2,...,k-1,k+1,...n, e j = 1,2,...,k-1,k+1,...n.

Após a redução de Kron, a matriz admitância se resume na matriz Y'.

$$[\dot{Y}'_{12}] = \begin{bmatrix} [\dot{Y}'_{pp}] & [\dot{Y}'_{ps}] \\ [\dot{Y}'_{sp}] & [\dot{Y}'_{ss}] \end{bmatrix} \quad (21)$$

Para exemplificar, a matriz de admitâncias de um transformador conectado em estrela aterrado em ambos os enrolamentos (Y_t -Y_t) resulta da seguinte formula:

$$[\dot{Y}'_{12}] = \begin{bmatrix} [\dot{Y}'_{pp}] & [\dot{Y}'_{ps}] \\ [\dot{Y}'_{sp}] & [\dot{Y}'_{ss}] \end{bmatrix} \quad (22)$$

Que equivale:

$$[\dot{Y}_{12}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 & 1 & 1 & 1 & -3 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -3 & -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Nesta equação, $\dot{Y}_{12}$ representa a impedância equivalente do transformador ($\dot{Y}_1$ ou $\dot{Y}_2$), de acordo com a posição do transformador modelado em relação à barra fictícia.

A. Tipos de conexão

Excluindo a conexão *zigue-zague*, quatro submatrizes são suficientes para representar as outras conexões do primário e secundário.

As submatrizes devem ser corrigidas de acordo com as mudanças das tensões, devido ao tipo de conexão. A tabela na sequência traduz estas alterações.

Tabela 1: Tipos de Conexões

Conexão	$[Y_{PP}]$	$[Y_{SS}]$	$[Y_{PS}],[Y_{SP}]$
$Y_T – Y_T$	$[Y_I]$	$[Y_I]$	$-[Y_I]$
Y_T - Y	$[Y_I]$	$[Y_I]$	$-[Y_I]$
Y_T - D	$[Y_I]$	$[Y_{II}]$	$[Y_{III}]/\sqrt{3}$
Y_T - Z	$[Y_I]$	$[Y_{IV}]$	$-[Y_I]$
Y – Y	$[Y_I]$	$[Y_I]$	$-[Y_I]$
Y – Y_T	$[Y_I]$	$[Y_I]$	$-[Y_I]$
Y - D	$[Y_{II}]/3$	$[Y_{II}]$	$[Y_{III}]/\sqrt{3}$
Y - Z	$[Y_I]$	$[Y_{IV}]$	$-[Y_I]$
D – D	$[Y_{II}]/3$	$[Y_{II}]/3$	$-[Y_{II}]/3$
D - Y_T	$[Y_{II}]/3$	$[Y_I]$	$[Y_I]$
D – Y	$[Y_{II}]/3$	$[Y_I]$	$[Y_I]/\sqrt{3}$
D - Z	$[Y_{II}]/3$	$[Y_{IV}]$	$-[Y_I]$
Z - Y_T	$[Y_{IV}]$	$[Y_I]$	$-[Y_I]$
Z – Y	$[Y_{IV}]$	$[Y_I]$	$-[Y_I]$
Z - D	$[Y_{IV}]$	$[Y_{II}]/3$	$-[Y_I]$

Sendo:

$$[Y_I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \quad (24) \qquad [Y_{II}] = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$[Y_{III}] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26) \qquad [Y_{IV}] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \quad (27)$$

- Ligação Zigue-Zague

Na ligação do tipo *zigue-zague*, a matriz de admitâncias sofre algumas alterações. Os termos K1 e k2 são usados para corrigir os parâmetros na matriz$[\dot{Y}'_{12}]$.

$$K_1 = \frac{-\sin\alpha}{\sin -120º} \tag{28}$$

$$K_2 = \frac{(\cos\alpha - \sin\alpha)}{\tan -120\,º} \tag{29}$$

Sendo α o ângulo do parâmetro.

A matriz $[\dot{Y}'_{12}]$ é multiplicada por uma nova matriz que corrige os parâmetros de acordo com os ângulos, conforme (30).

$$\begin{bmatrix} - & - & - & - & k1 & k2 & - & - \\ - & - & - & - & - & k1 & k2 & - \\ - & - & - & - & k2 & - & k1 & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - \\ k1 & - & k2 & - & (k1^2+k2^2) & (k1.k2) & (k1.k2) & - \\ k2 & k1 & - & - & (k1.k2) & (k1^2+k2^2) & (k1.k2) & - \\ - & k2 & k1 & - & (k1.k2) & (k1.k2) & (k1^2+k2^2) & - \\ - & - & - & - & - & - & - & - \end{bmatrix} \tag{30}$$

B. Transformadores com neutro aterrado

Para transformadores com o primário aterrado, a admitância de aterramento é adicionada na submatriz $\dot{Y}'_{pp}$, enquanto que para impedância de aterramento no secundário, a mesma é adicionada à submatriz $\dot{Y}'_{ss}$.

C. Transformadores com TAP

- Transformadores com TAP fixo

Para transformadores com o TAP fixo no primário a matriz [Y’] passa pela seguinte operação:

$$[\dot{Y}'_{12}] = \begin{bmatrix} \frac{[\dot{Y}'_{pp}]}{Tap^2} & \frac{[\dot{Y}'_{ps}]}{Tap} \\ \frac{[\dot{Y}'_{sp}]}{Tap} & [\dot{Y}'_{ss}] \end{bmatrix} \tag{31}$$

Para transformadores com TAP fixo no secundário, a matriz [Y’] passa pela seguinte operação:

$$[\dot{Y}'_{12}] = \begin{bmatrix} [\dot{Y}'_{pp}] & \frac{[\dot{Y}'_{ps}]}{Tap} \\ \frac{[\dot{Y}'_{sp}]}{Tap} & \frac{[\dot{Y}'_{ss}]}{Tap^2} \end{bmatrix} \tag{32}$$

- Transformadores trifásicos com TAP automático

Para cada interação do fluxo de carga o tap pode ser alterado de acordo com a tensão a ser controlada. Assim, caso a tensão desejada não esteja dentro de limites pré-determinados, o tap é majorado o reduzido de acordo com o valor e quantidade de taps disponíveis.

IV. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a validação do modelo, foram realizados ensaios a vazio e curto-circuito. Os parâmetros utilizados foram: S = 100 kVA, P_0 = 0,5%, I_0 = 1%, P_{cc} = 1% e Z% = 3.

No ensaio de curto-circuito, tendo em vista a impedância percentual de 3% da tensão nominal do primário e secundário, foi colocada uma carga infinita (carga muito grande comparada à carga nominal do transformador) para simular um curto-circuito. Potência da carga 10 MVA e fator de potência 0,85, com impedância constante.

Tabela 2: Resultado do Ensaio à Vazio das diferentes ligações

Ligação	Esperado	Simulado
Yt - Yt	P = 0,5 kW	P = 0,5 kW
Yt - D	P = 0,5 kW	P = 0,5 kW
Yt - Y	P = 0,5 kW	P = 0,5 kW
D - Yt	P = 0,5 kW	P = 0,5 kW
D - Y	P = 0,5 kW	P = 0,5 kW
D - D	P = 0,5 kW	P = 0,5 kW
Y - Yt	P = 0,5 kW	P = 0,5 kW
Y - Y	P = 0,5 kW	P = 0,5 kW
Y - D	P = 0,5 kW	P = 0,5 kW
Yt - Z (10º) Yt - Z (15º) Yt - Z (20º)	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW
Y - Z (10º) Y - Z (15º) Y - Z (20º)	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW
D - Z (10°) D - Z (15°) D - Z (20°)	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW
Z (10°) - Yt Z (15°) - Yt Z (20°) - Yt	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW
Z (10°) - Y Z (15°) - Y Z (20°) - Y	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW
Z (10°) - D Z (15°) - D Z (20°) - D	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW	P = 0,5 kW P = 0,5 kW P = 0,5 kW

Para a ligação *zigue-zague* foram feitos os ensaios em três diferentes ângulos 10º, 15º e 20º.

Como é possível notar pela Tabela 2, não houve erro no Ensaio a Vazio nos diferentes tipos de ligações. O valor esperado foi o mesmo que o simulado, validando assim o modelo.

Na Tabela 3, é possível notar que assim como no Ensaio a Vazio não apresentou erros, o valor esperado foi o mesmo que o simulado. O modelo que apresenta o neutro e o ramo de magnetização pode ser validado.

Tabela 3: Resultados do Ensaio de Curto-Circuito das diferentes ligações

Ligação	Esperado	Simulado
Yt - Yt	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Yt - D	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Yt - Y	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
D - Yt	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
D - Y	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
D - D	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Y - Yt	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Y - Y	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Y - D	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Yt - Z (10º)	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Yt - Z (15º)	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Yt - Z (20º)	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Y - Z (10º)	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Y - Z (15º)	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Y - Z (20º)	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
D - Z (10º)	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
D - Z (15º)	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
D - Z (20º)	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Z (10°) - Yt	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Z (15°) - Yt	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Z (20°) - Yt	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Z (10°) - Y	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Z (15°) - Y	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Z (20°) - Y	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Z (10°) - D	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Z (15°) - D	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW
Z (20°) - D	P = 1,0 kW	P = 1,0 kW

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi proposto uma nova metodologia para modelar transformadores trifásicos desequilibrados, no qual inclui-se o ramo magnetizante e o neutro para os diferentes tipos de conexões. Este tipo de método, foi realizado para representar de forma mais realística o sistema elétrico, diferentemente dos demais estudos que são encontrados na literatura.

Os resultados obtidos através das simulações foram possíveis observar a eficiência do método proposto. Os diferentes tipos de conexões convergiram e não houve aumento do tempo computacional de solução.

Para trabalhos futuros serão estudados a convergência em um sistema de 18 barras e o número de interações necessárias. Além disso, serão comparados o tempo computacional dos diferentes métodos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório de Eficiência Energética (LEFE) da Universidade Federal de Uberlândia pelo suporte que facilitaram a pesquisa e pela ajuda na redação deste artigo. A CNPq pela bolsa de estudos da primeira autora.

REFERÊNCIAS

[1] ARRILLAGA, J; ARNOLD, C.P. Computer Analysis of Power Systems.

[2] CAPARÓ, José Luis C., *Modelagem de Transformadores de Distribuição para Aplicação em Algoritmos de Fluxo de Potência Trifásico*. 2005. 158f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2005.

[3] CHAPMAN, Stephen. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 671p.

[4] DARIO E. RODAS R. Distribuition Transformers Modeling With Angular Displacement – Actual Values And Per Unit Analysis. Revista Controle & Automação, Vol. 18, n° 4, Outubro, Novembro e Dezembro 2007.

[5] Eletrobras – O Cepel. Disponível em: <http://www.cepel.br/> Acesso em: 17 Jul. 2018.

[6] EMBARCADERO. Delphi 10 Seattle, versão 23.0.

[7] JUNIOR, Antonio Rubens Baran. *Fluxo de Potência Ótimo Trifásico.*2013. 147f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

[8] MAMDOUH ABDEL-AKHER. Implementation of three-phase transformer model in radial load-flow analysis. Ain Shams Engineering Journal. 2013. 4. 65-73.

[9] NRB5380 – Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT

[10]SILVA, Fabrício Luiz. *Modelagem de Transformadores Trifásicos de Distribuição para Estudos de Fluxo de Potência.* 2004. 99f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004

[11] SILVA, Sérgio F. P. Simulador de Sistema Elétricos de Potência, versão 2018.

[12] STEVENSON, W. D. Elementos de Análise de Sistemas de Potência. 2 Ed. Editora MacGraw-Hill do Brasil. São Paulo, 1979.