

Elemento *Transformer* do OpenDSS

1 Objetivo

O objetivo desse documento é descrever os principais parâmetros que o OpenDSS utiliza para definir o elemento *Transformer*. Para tanto, conceitos importantes e comumente apresentados em cursos de máquinas elétricas são utilizados, como ensaios de transformadores em vazio e em curto-circuito. Em seguida, diferentes configurações/conexões de transformadores são ilustradas, bem como a sua definição no software, com exemplos de códigos na linguagem de programação do OpenDSS.

Por fim, apresenta-se como modelar transformadores de distribuição no OpenDSS para o efeito de cálculo de perdas técnicas, de acordo com o módulo 7 do PRODIST [3].

2 Por quê?

Os transformadores de potência são elementos fundamentais nos sistemas elétricos de potência. Eles tornam possível a geração e a transmissão de eletricidade em níveis de tensão mais econômicos e tecnicamente adequados e a utilização de energia a níveis de tensão mais adequados para cada dispositivo. Além disso, eles permitem interligar sistemas de diferentes tensões, garantindo uma maior flexibilidade, confiabilidade e melhor aproveitamento da potência instalada nos sistemas elétricos, [4] e [6].

3 Modelagem

Existem vários modelos de circuitos equivalentes de transformadores na literatura. Em geral, os modelos mais adequados dependem do tipo de aplicação. Nessa nota técnica, os modelos apresentados estão de acordo com o utilizado no OpenDSS, de tal modo que o usuário possa compreender diretamente como os parâmetros utilizados no software se relacionam com o modelo considerado. A lista a seguir exibe os tipos de transformadores modelados nessa nota técnica:

- Transformador Monofásico
- Transformador Trifásico
- Transformador de Fase Dividida

Basicamente, ensaios de curto-circuito e em vazio são realizados nos transformadores com o propósito de se obter os valores da impedância de curto-circuito e da admitância de circuito aberto, conforme apresentado em (1) e (2), para serem utilizados como parâmetros no OpenDSS.

$$\bar{Z}_{sc} = R_{sc} + j \times X_{sc} \quad (1)$$

$$\bar{Y}_{oc} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (2)$$

Onde,

- \bar{Z}_{sc} : Impedância de Curto-Circuito
- R_{sc} : Resistência que representa as Perdas no Cobre
- X_{sc} : Reatância de Curto-Circuito
- \bar{Y}_{oc} : Admitância de Circuito-Aberto
- G_{oc} : Condutância que representa as Perdas no Ferro
- B_{oc} : Suceptância de Magnetização

Os índices “*sc*” e “*oc*” vêm do inglês, *short-circuit* e *open-circuit*, respectivamente.

3.1 Transformador Monofásico

A Figura 1 apresenta o modelo matemático de um transformador monofásico, que apresenta os seguintes dados elétricos:

- Potência Aparente Nominal: $|\bar{S}_n|$
- Tensão Nominal do Primário: $|\dot{V}_{P_n}|$
- Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{S_n}|$
- Corrente Nominal do Primário: $|\dot{I}_{P_n}|$
- Corrente Nominal do Secundário: $|\dot{I}_{S_n}|$
- Relação de Transformação: $a = \frac{N_P}{N_S} = \frac{|\dot{E}_{P_n}|}{|\dot{E}_{S_n}|} \approx \frac{|\dot{V}_{P_n}|}{|\dot{V}_{S_n}|} = \frac{|\dot{I}_{S_n}|}{|\dot{I}_{P_n}|}$
- Impedância de Curto-Circuito: \bar{Z}_{sc}
- Impedância de Circuito Aberto: \bar{Z}_{oc}

Por conveniência, define-se o primário do transformador como sendo o enrolamento de maior tensão e o secundário, conseqüentemente, como o de menor tensão.

3.1.1 Ensaio de Curto-Circuito

O ensaio de curto-circuito é realizado para se obter a impedância de curto-circuito, \bar{Z}_{sc} , e o valor das perdas variáveis ou perdas no cobre na condição de plena carga, P_{sc} . Para realizar esse ensaio, normalmente, por questões práticas e de segurança, o enrolamento de menor tensão (no nosso caso, o secundário) é colocado em curto-circuito e, em seguida, o enrolamento primário é alimentado com

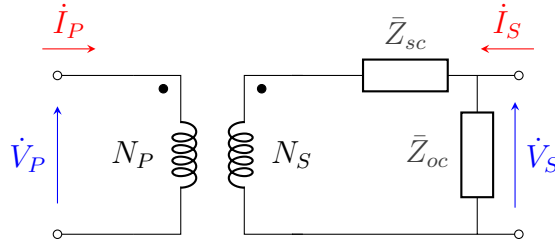


Figura 1: Modelo Matemático de um Transformador Monofásico

tensões crescentes até que a corrente medida no primário atinja seu valor, $|\dot{I}_{P_n}|$, conforme apresentado na Figura 2.

Esse procedimento é adotado, pois, ao curto-circuitar o enrolamento de menor tensão, evita-se medir correntes de magnitude elevada, dado que a corrente nominal no enrolamento de maior tensão de um transformador é menor que a do enrolamento de menor tensão, enquanto que a tensão medida é bem baixa, comumente menor que 10% da tensão nominal.

A partir desse ensaio é possível obter as seguintes medidas elétricas:

- Corrente Nominal do Primário: $|\dot{I}_{P_n}|$
- Tensão de Curto-Circuito do Primário: $|\dot{V}_{P_{sc}}|$
- Perda no Cobre na Condição Nominal: P_{sc}

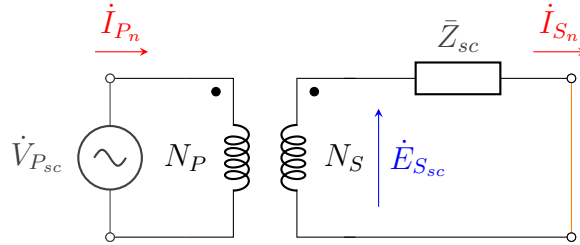


Figura 2: Modelo Matemático do Transformador Monofásico durante um Ensaio de Curto-Circuito

A impedância de curto-circuito pode ser calculada através da Equação 3. Entretanto, não são conhecidos tanto o fasor da corrente nominal do primário quanto a tensão $\dot{E}_{S_{sc}}$, que corresponde a uma grandeza elétrica imensurável, dado que ela é interna ao modelo do transformador adotado.

$$\bar{Z}_{sc} = \frac{\dot{E}_{S_{sc}}}{\dot{I}_{S_n}} = R_{sc} + j \times X_{sc} \quad (3)$$

Utilizando a relação de transformação do transformador, pode-se relacionar os módulos da tensão e da corrente do enrolamento de alta tensão com os correspondentes módulos do enrolamento de menor tensão, conforme (4) e (5).

$$|\dot{E}_{S_{sc}}| = \frac{1}{a} \times |\dot{V}_{P_{sc}}| \quad (4)$$

$$|\dot{I}_{S_n}| = a \times |\dot{I}_{P_n}| \quad (5)$$

Posto isto, pode-se calcular o módulo da impedância de curto-circuito visto pelo secundário aplicando a Equação 6.

$$|\bar{Z}_{sc}| = \frac{|\dot{E}_{S_{sc}}|}{|\dot{I}_{S_n}|} = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{P_{sc}}|}{|\dot{I}_{P_n}|} \quad (6)$$

A Equação 8 apresenta como se pode calcular o ângulo da impedância de curto-circuito.

$$P_{sc} = |\dot{V}_{P_{sc}}| \times |\dot{I}_{P_n}| \times \cos\varphi_{sc} \quad (7)$$

$$\varphi_{sc} = \arccos\left(\frac{P_{sc}}{|\dot{V}_{P_{sc}}| \times |\dot{I}_{P_n}|}\right) \quad (8)$$

A impedância de curto-circuito pode ser escrita como a soma de uma resistência e uma reatância de curto-circuito, conforme apresentado na Equação 9.

$$\bar{Z}_{sc} = R_{sc} + j \times X_{sc} \quad (9)$$

$$R_{sc} = \text{Re}(\bar{Z}_{sc}) = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{P_{sc}}|}{|\dot{I}_{P_n}|} \times \cos\varphi_{sc} \quad (10)$$

$$X_{sc} = \text{Im}(\bar{Z}_{sc}) = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{P_{sc}}|}{|\dot{I}_{P_n}|} \times \sin\varphi_{sc} \quad (11)$$

Pode-se escrever essa impedância em pu , conforme (12).

$$\bar{z}_{sc} = \frac{\bar{Z}_{sc}}{Z_{Base2}} = r_{sc} + j \times x_{sc} \quad (12)$$

Onde,

$$Z_{Base2} = \frac{|\dot{V}_{S_n}|^2}{|\bar{S}_n|} \quad (13)$$

Por fim, P_{sc} , em pu , pode ser relacionada com R_{sc} , também em pu , conforme Equação 14.

$$p_{sc} = \frac{P_{sc}}{|\bar{S}_n|} = \frac{R_{sc} \times |\dot{I}_{S_n}|^2}{|\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = \frac{R_{sc} \times |\dot{I}_{S_n}|^2}{Z_{Base2} \times |\dot{I}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = \frac{R_{sc}}{Z_{Base2}} = r_{sc} \quad (14)$$

3.1.2 Ensaio em Vazio

Através desse ensaio é possível calcular a impedância de circuito-aberto, \bar{Z}_{oc} , e medir diretamente o valor das perdas constantes ou perdas no ferro, P_{oc} . Para realizar esse ensaio, normalmente, por questões práticas e de segurança, o enrolamento de maior tensão do transformador é deixado em vazio e, em seguida, o enrolamento de menor tensão é alimentado com tensão nominal, $|\dot{V}_{S_n}|$, conforme apresentado na Figura 3.

Esse procedimento é adotado, pois ao deixar o enrolamento de maior tensão em vazio evita-se medir tensões de magnitude elevada ao mesmo tempo em que a magnitude da corrente em vazio medida no enrolamento de maior tensão é ínfima.

A partir desse ensaio é possível obter as seguintes medidas elétricas:

- Corrente em Vazio no Secundário: $|\dot{I}_{S_{oc}}|$
- Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{S_n}|$
- Perdas no Ferro: P_{oc}

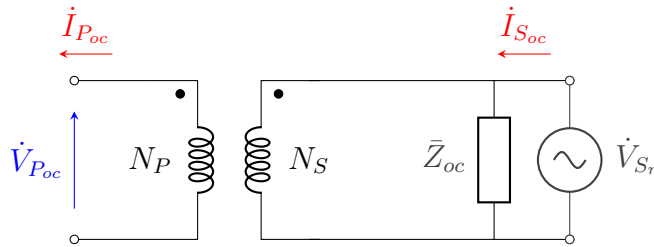


Figura 3: Modelo Matemático do Transformador Monofásico para o Ensaio em Vazio

O primário do transformador está em vazio e, portanto, a sua corrente, $\dot{I}_{P_{oc}}$, é nula. Dessa forma, pode-se calcular a admitância \bar{Y}_{oc} e o seu módulo conforme as equações (15) e (16), respectivamente.

$$\bar{Y}_{oc} = \frac{1}{\bar{Z}_{oc}} = \frac{\dot{I}_{S_{oc}}}{\dot{V}_{S_n}} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (15)$$

$$|\bar{Y}_{oc}| = \frac{|\dot{I}_{S_{oc}}|}{|\dot{V}_{S_n}|} \quad (16)$$

A Equação 18 apresenta como se pode calcular o ângulo da impedância \bar{Z}_{oc} .

$$P_{oc} = |\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_{oc}}| \times \cos \varphi_{oc} \quad (17)$$

$$\varphi_{oc} = \arccos\left(\frac{P_{oc}}{|\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_{oc}}|}\right) \quad (18)$$

A admitância \bar{Y}_{oc} pode ser escrita como a soma de uma condutância e uma susceptância de magnetização, conforme apresentado na Equação 19.

$$\bar{Y}_{oc} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (19)$$

$$G_{oc} = \text{Re}(\bar{Y}_{oc}) = \frac{|\dot{I}_{Soc}|}{|\dot{V}_{Sn}|} \times \cos\varphi_{oc} \quad (20)$$

$$B_{oc} = \text{Im}(\bar{Y}_{oc}) = -\frac{|\dot{I}_{Soc}|}{|\dot{V}_{Sn}|} \times \sin\varphi_{oc} \quad (21)$$

Observação 1: Note que B_{oc} possui um valor negativo, pois essa susceptância tem caráter indutivo. A admitância \bar{Y}_{oc} pode ser escrita em *pu*, conforme (22).

$$\bar{y}_{oc} = \bar{Y}_{oc} \times Z_{Base2} = g_{oc} + j \times b_{oc} \quad (22)$$

A perda no ferro P_{oc} pode ser relacionada com G_{oc} conforme a Equação 23.

$$p_{oc} = \frac{P_{oc}}{|\bar{S}_n|} = \frac{G_{oc} \times |\dot{V}_{Sn}|^2}{|\dot{V}_{Sn}| \times |\dot{I}_{Sn}|} = \frac{G_{oc} \times |\dot{V}_{Sn}|^2}{|\dot{V}_{Sn}| \times \frac{|\dot{V}_{Sn}|}{Z_{Base2}}} = G_{oc} \times Z_{Base2} = g_{oc} \quad (23)$$

A corrente em vazio no secundário \dot{I}_{Soc} pode ser dividida em duas partes, conforme apresentado em (24), em *pu*: $i_{S_{real}}$, que passa pela condutância, e $i_{S_{mag}}$, que passa pela susceptância, chamada de corrente de magnetização.

$$\dot{i}_{Soc} = \dot{i}_{S_{real}} + \dot{i}_{S_{mag}} \quad (24)$$

Por fim, o módulo da corrente de magnetização no secundário, $i_{S_{mag}}$, pode ser relacionada com o módulo da susceptância de magnetização, b_{oc} , conforme a Equação 46.

$$|\dot{i}_{S_{mag}}| = \frac{|\dot{I}_{S_{mag}}|}{|\dot{I}_{Sn}|} = \frac{|B_{oc}| \times |\dot{V}_{Sn}|}{|\dot{V}_{Sn}| \times \frac{1}{Z_{Base2}}} = |B_{oc}| \times Z_{Base2} = |b_{oc}| \quad (25)$$

3.2 Transformador Trifásico

Com a finalidade de também encontrar as impedâncias de curto-circuito e de circuito-aberto para transformadores trifásicos, o método também é aplicado à esses transformadores de forma similar. As impedâncias são calculadas independentemente do seu tipo de ligação.

Um transformado trifásico, em geral, apresenta os seguintes dados elétricos:

- Potência Aparente Trifásica Nominal: $|\bar{S}_n|$
- Tensão de Linha Nominal do Primário: $|\dot{V}_{Pn}|$
- Tensão de Linha Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{Sn}|$
- Corrente de Linha Nominal do Primário: $|\dot{I}_{Pn}|$

- Corrente de Linha Nominal do Secundário: $|\dot{I}_{S_n}|$
- Relação de Transformação: $a = \frac{N_P}{N_S} \approx \frac{|\dot{V}_{P_n}|}{|\dot{V}_{S_n}|} = \frac{|\dot{I}_{S_n}|}{|\dot{I}_{P_n}|}$
- Impedância de Curto-Circuito de cada Enrolamento: \bar{Z}_{sc}
- Impedância de Circuito-Aberto de cada Enrolamento: \bar{Z}_{oc}
- Perdas Trifásicas no Cobre na Condição de Plena Carga: P_{sc}
- Perdas Trifásicas no Ferro: P_{oc}

O modelo elétrico para um transformador trifásico utiliza três modelos de transformadores monofásicos conectados de acordo com a ligação desejada. Por exemplo, a Figura 4 apresenta o modelo elétrico de um transformador trifásico conectado em estrela-estrela isoladas.

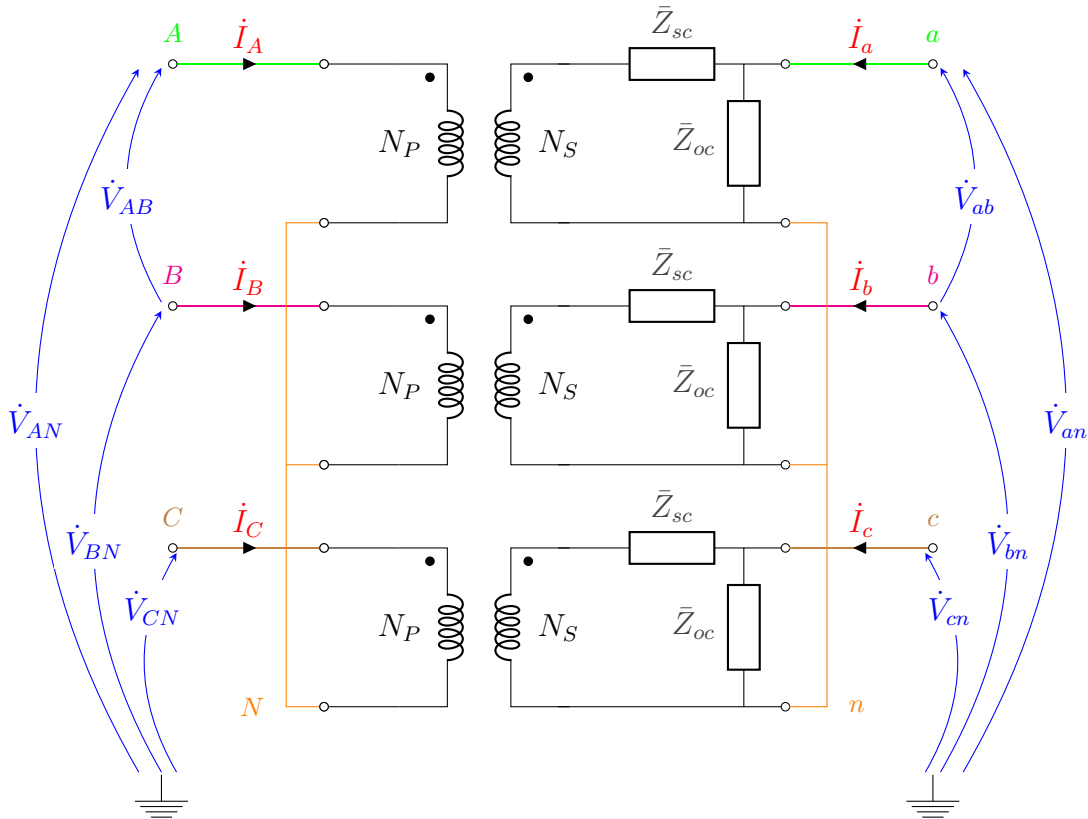


Figura 4: Modelo Matemático de um Transformador Trifásico Conectado em Estrela-Estrela isoladas

Um Transformador trifásico é, em geral, um elemento equilibrado, pois as suas impedâncias de curto-circuito são idênticas para as três fases, assim como as impedâncias de circuito-aberto. Posto isto, pode-se extrair, de qualquer transformador trifásico, independentemente de sua ligação, um modelo monofásico equivalente derivado de um trifásico representado em estrela, conforme a Figura 5.

O monofásico equivalente é o modelo matemático que é utilizado para se obter as impedâncias de curto-circuito e de circuito-aberto através das medidas obtidas a partir dos ensaios de curto-circuito e em vazio.

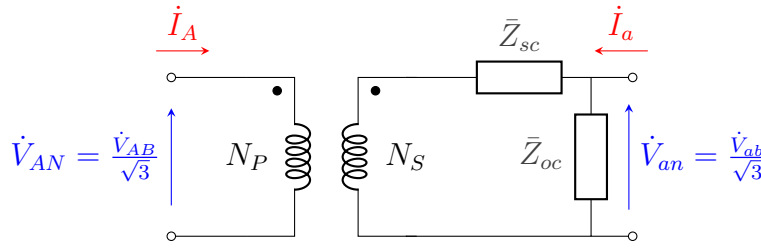


Figura 5: Monofásico Equivalente de um Transformador Trifásico

3.2.1 Ensaio de Curto-Circuito

A montagem apresentada na Figura 6 é utilizada no ensaio de curto-circuito em um transformador trifásico qualquer. O transformador em si é representado como uma caixa preta, pois a montagem independe da conexão do transformador. Como pode-se notar, o secundário está em curto-circuito e o primário é alimentado por um sistema trifásico de tensão simétrico que produz correntes de linha nominais.

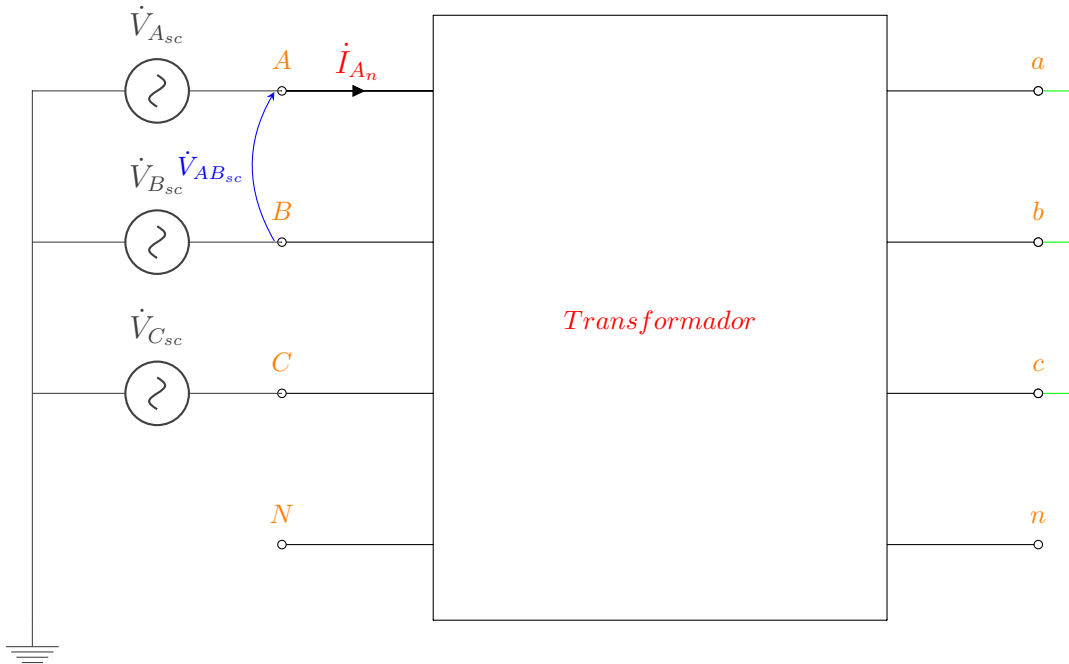


Figura 6: Conexão de um Transformador Trifásico para o Ensaio de Curto-Circuito

A partir desse ensaio, é possível obter as seguintes medidas elétricas:

- Corrente de Linha Nominal do Primário: $|\dot{I}_{An}|$
- Tensão de Linha de Curto-Circuito do Primário: $|\dot{V}_{ABsc}|$
- Perda Trifásica no Cobre na Condição de Plena Carga: P_{sc}

O modelo utilizado para calcular a impedância de curto-circuito é apresentado na Figura 7.

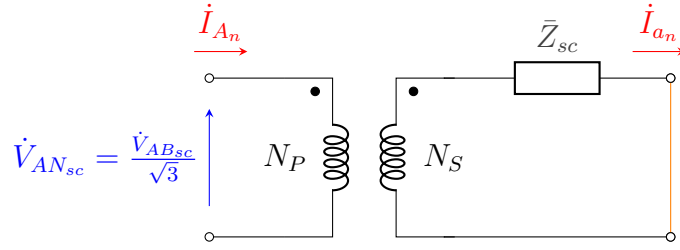


Figura 7: Modelo Matemático do Monofásico Equivalente de um Transformador Trifásico para o Ensaio de Curto-Circuito

Semelhante ao apresentado na seção (3.1.1), pode-se escrever o módulo da impedância de curto-circuito visto pelo secundário em (26).

$$|\bar{Z}_{sc}| = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{AB_{sc}}|}{\sqrt{3} \times |\dot{I}_{A_n}|} \quad (26)$$

O ângulo da impedância de curto-circuito pode ser calculada conforme a Equação 28.

$$P_{sc} = \sqrt{3} \times |\dot{V}_{AB_{sc}}| \times |\dot{I}_{A_n}| \times \cos \varphi_{sc} \quad (27)$$

$$\varphi_{sc} = \arccos\left(\frac{P_{sc}}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{AB_{sc}}| \times |\dot{I}_{A_n}|}\right) \quad (28)$$

Logo, a resistência e a reatância de curto-circuito são apresentadas em (30) e (31).

$$\bar{Z}_{sc} = R_{sc} + j \times X_{sc} \quad (29)$$

$$R_{sc} = \text{Re}(\bar{Z}_{sc}) = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{AB_{sc}}|}{\sqrt{3} \times |\dot{I}_{A_n}|} \times \cos \varphi_{sc} \quad (30)$$

$$X_{sc} = \text{Im}(\bar{Z}_{sc}) = \frac{1}{a^2} \times \frac{|\dot{V}_{AB_{sc}}|}{\sqrt{3} \times |\dot{I}_{A_n}|} \times \sin \varphi_{sc} \quad (31)$$

A impedância de curto-circuito pode escrita em pu , conforme a Equação 32.

$$\bar{z}_{sc} = \frac{\bar{Z}_{sc}}{Z_{Base2}} = r_{sc} + j \times x_{sc} \quad (32)$$

Onde,

$$Z_{Base2} = \frac{|\dot{V}_{S_n}|^2}{|\bar{S}_n|} \quad (33)$$

Por fim, P_{sc} pode ser relacionada com R_{sc} , conforme Equação 34.

$$p_{sc} = \frac{P_{sc}}{|\bar{S}_n|} = \frac{3 \times R_{sc} \times |\dot{I}_{a_n}|^2}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = \frac{3 \times R_{sc} \times |\dot{I}_{a_n}|^2}{3 \times Z_{Base2} \times |\dot{I}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = r_{sc} \quad (34)$$

Lembrando que,

$$|\dot{I}_{S_n}| = |\dot{I}_{a_n}| \quad (35)$$

3.2.2 Ensaio em Vazio

A Figura 8 apresenta a conexão que deve ser feita para se realizar o ensaio em vazio em um transformador trifásico. Como se pode notar, o secundário é alimentado por um sistema trifásico de tensão simétrico com valores nominais e, o primário, é deixado em vazio.

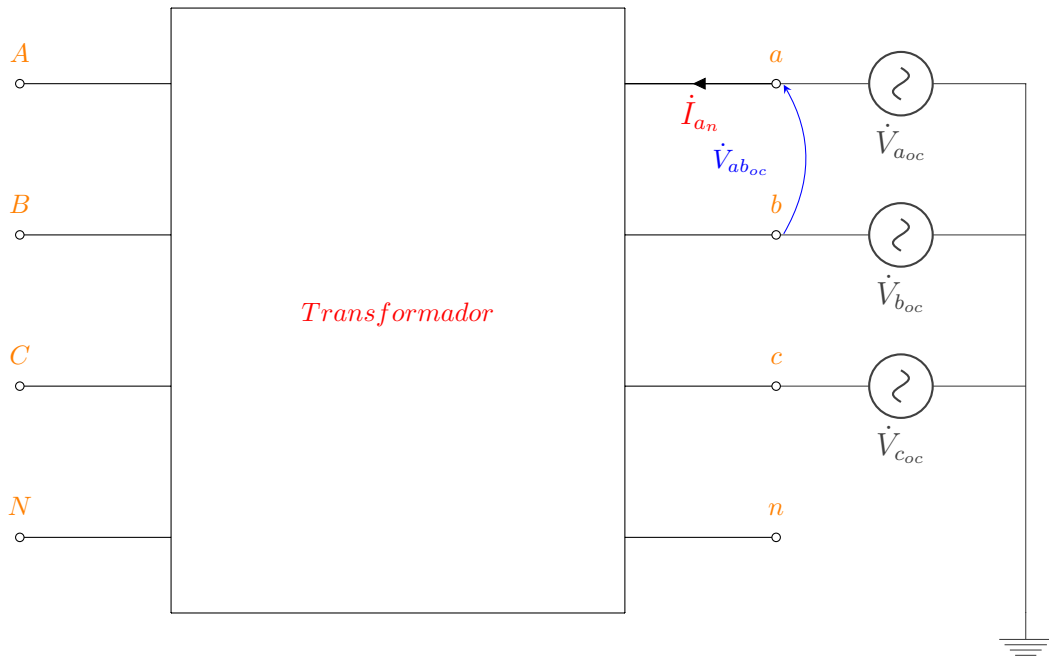


Figura 8: Conexão do Transformador Trifásico para o Ensaio em Vazio

A partir desse ensaio, obtém-se as seguintes medidas elétricas:

- Corrente de Linha em Vazio do Secundário: $|\dot{I}_{a_{oc}}|$
- Tensão de Linha Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{ab_n}|$
- Perda Trifásica no Ferro: P_{oc}

O modelo matemático utilizado para se calcular a impedância de circuito-aberto é apresentado na Figura 9.

De forma semelhante ao apresentado na seção (3.3.2), pode-se escrever a admitância de circuito-aberto e o seu módulo em (36) e (37), respectivamente.

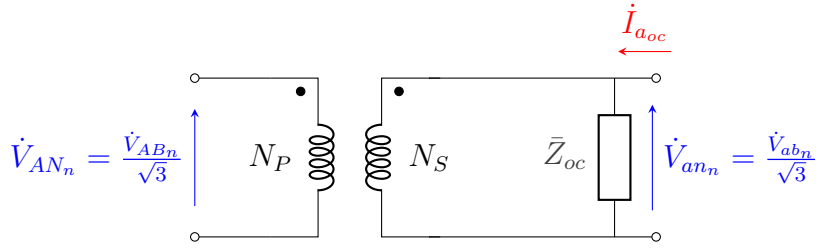


Figura 9: Modelo Matemático do Monofásico Equivalente de um Transformador Trifásico durante o Ensaio em Vazio

$$\bar{Y}_{oc} = \frac{1}{\bar{Z}_{oc}} = \sqrt{3} \times \frac{\dot{I}_{a_{oc}}}{\dot{V}_{ab_n}} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (36)$$

$$|\bar{Y}_{oc}| = \sqrt{3} \times \frac{|\dot{I}_{a_{oc}}|}{|\dot{V}_{ab_n}|} \quad (37)$$

O ângulo da impedância de circuito-aberto pode ser calculada conforme a Equação 39.

$$P_{oc} = \sqrt{3} \times |\dot{V}_{ab_n}| \times |\dot{I}_{a_{oc}}| \times \cos \varphi_{oc} \quad (38)$$

$$\varphi_{oc} = \arccos\left(\frac{P_{oc}}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{ab_n}| \times |\dot{I}_{a_{oc}}|}\right) \quad (39)$$

Logo, a condutância e a susceptância de magnetização podem ser expressas conforme (41) e (42).

$$\bar{Y}_{oc} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (40)$$

$$G_{oc} = \text{Re}(\bar{Y}_{oc}) = \sqrt{3} \times \frac{|\dot{I}_{a_{oc}}|}{|\dot{V}_{ab_n}|} \times \cos \varphi_{oc} \quad (41)$$

$$B_{oc} = \text{Im}(\bar{Y}_{oc}) = -\sqrt{3} \times \frac{|\dot{I}_{a_{oc}}|}{|\dot{V}_{ab_n}|} \times \sin \varphi_{oc} \quad (42)$$

Portanto, a admitância de circuito-aberto pode ser escrita em pu , conforme apresentado em (43).

$$\bar{y}_{oc} = \bar{Y}_{oc} \times Z_{Base2} = g_{oc} + j \times b_{oc} \quad (43)$$

A perda trifásica no ferro, P_{oc} pode ser relacionada com G_{oc} , conforme Equação 44.

$$p_{oc} = \frac{P_{oc}}{|\bar{S}_n|} = \frac{3 \times G_{oc} \times |\dot{V}_{an_n}|^2}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{S_n}| \times |\dot{I}_{S_n}|} = \frac{3 \times G_{oc} \times \frac{|\dot{V}_{ab_n}|^2}{3}}{\sqrt{3} \times |\dot{V}_{S_n}| \times \frac{|\dot{V}_{S_n}|}{\sqrt{3} \times Z_{Base2}}} = G_{oc} \times Z_{Base2} = g_{oc} \quad (44)$$

Lembrando que,

$$|\dot{V}_{S_n}| = |\dot{V}_{ab_n}| \quad (45)$$

Por fim, a corrente de magnetização do secundário, $|\dot{I}_{a_{mag}}|$, pode ser relacionada com a susceptância de magnetização, B_{oc} , conforme Equação 46.

$$|\dot{i}_{a_{mag}}| = \frac{|\dot{I}_{a_{mag}}|}{|\dot{I}_{S_n}|} = \frac{|B_{oc}| \times \frac{|\dot{V}_{ab_n}|}{\sqrt{3}}}{|\dot{V}_{S_n}| \times \frac{1}{\sqrt{3} \times Z_{Base2}}} = |B_{oc}| \times Z_{Base2} = |b_{oc}| \quad (46)$$

3.3 Transformador de Fase Dividida

Apesar desse transformador possuir fisicamente dois enrolamentos, o enrolamento que possui uma derivação central costuma ser modelado como se fosse dois enrolamentos, conforme a Figura 10. De fato, em geral, cada metade do enrolamento de baixa tensão é carregado de forma independente. Portanto, necessita-se que o circuito equivalente utilizado modele cada metade separadamente [5]. Assim, o lado de baixa tensão é representado por um enrolamento secundário e um terciário. Na Figura 10 também são apresentados os seguintes dados elétricos:

- Potência Aparente Nominal: $|\bar{S}_n|$
- Tensão Nominal do Primário: $|\dot{V}_{1_n}|$
- Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{2_n}|$
- Tensão Nominal do Terciário: $|\dot{V}_{3_n}|$
- Corrente Nominal do Primário: $|\dot{I}_{1_n}|$
- Corrente Nominal do Secundário: $|\dot{I}_{2_n}|$
- Corrente Nominal do Terciário: $|\dot{I}_{3_n}|$
- Relação de Transformação entre Primário e Secundário: $a_{12} = \frac{N_1}{N_2}$
- Relação de Transformação entre Primário e Terciário: $a_{13} = \frac{N_1}{N_3}$
- Relação de Transformação entre Secundário e Terciário: $a_{23} = \frac{N_2}{N_3}$
- Impedância de Curto-Circuito do Primário: \bar{Z}_{sc1}
- Impedância de Curto-Circuito do Secundário: \bar{Z}_{sc2}
- Impedância de Curto-Circuito do Terciário: \bar{Z}_{sc3}
- Impedância de Curto-Circuito entre Primário e Secundário: \bar{Z}_{sc12}
- Impedância de Curto-Circuito entre Primário e Terciário: \bar{Z}_{sc13}
- Impedância de Curto-Circuito entre Secundário e Terciário: \bar{Z}_{sc23}
- Impedância de Circuito-Aberto: \bar{Z}_{oc}

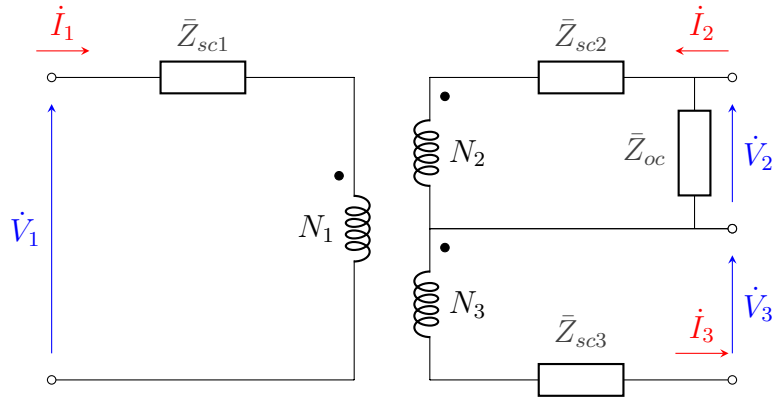


Figura 10: Modelo Matemático de um Transformador de Fase Dividida

Da mesma forma que apresentado para os transformadores monofásico e trifásico, ensaios de curto-circuito e em vazio devem ser realizados para a obtenção das impedâncias de curto-circuito e de circuito-aberto.

3.3.1 Ensaios de Curto-Circuito

O primeiro ensaio de curto-circuito, dos três a serem executados, é realizado para se obter a impedância de curto-circuito entre primário e secundário, \bar{z}_{sc12} , em *pu*. Para tal, o secundário do transformador deve ser colocado em curto-circuito, o terciário deixado em vazio e, em seguida, deve-se alimentar o primário com a finalidade de se ter corrente nominal no secundário, $|\dot{I}_{2n}|$, conforme apresentado na Figura 11.

Portanto, a partir do ensaio é possível obter as seguintes medidas elétricas:

- Corrente de Curto-Circuito do Primário que Resulta em Corrente Nominal no Secundário: $|\dot{I}_{1sc2}|$
- Tensão de Curto-Circuito do Primário: $|\dot{V}_{1sc2}|$
- Perda no Cobre na Condição Nominal: P_{sc12}

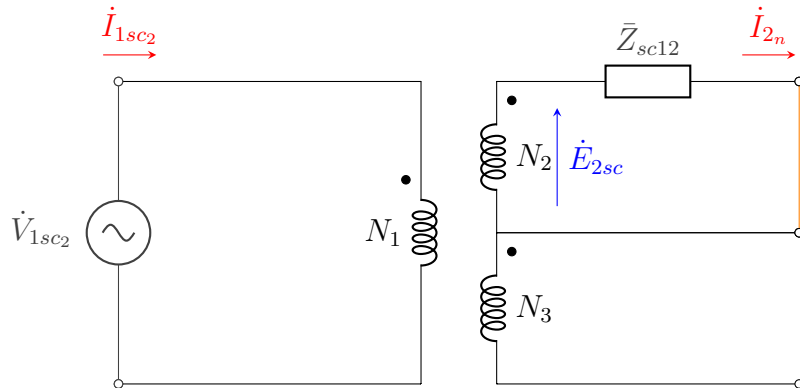


Figura 11: Modelo Matemático do Transformador de Fase Dividida para o Ensaio de Curto-Circuito entre Primário e Secundário

A impedância de curto-circuito entre o primário e secundário, vista pelo secundário, pode ser calculada conforme apresentado na Equação 47.

$$\bar{Z}_{sc12} = \frac{1}{a_{12}^2} \times \bar{Z}_{sc1} + \bar{Z}_{sc2} = \frac{\dot{E}_{2sc}}{\dot{I}_{2n}} = R_{sc12} + j \times X_{sc12} \quad (47)$$

Além disso, sabendo que se pode relacionar os módulos da tensão e da corrente do primário com os correspondentes módulos do secundário, conforme (48) e (49),

$$|\dot{E}_{2sc}| = \frac{1}{a_{12}} \times |\dot{V}_{1sc2}| \quad (48)$$

$$|\dot{I}_{2n}| = a_{12} \times |\dot{I}_{1sc2}| \quad (49)$$

O módulo da impedância de curto-circuito entre primário e secundário visto pelo secundário pode ser calculado aplicando a Equação 50.

$$|\bar{Z}_{sc12}| = \frac{|\dot{E}_{2sc}|}{|\dot{I}_{2n}|} = \frac{1}{a_{12}^2} \times \frac{|\dot{V}_{1sc2}|}{|\dot{I}_{1sc2}|} \quad (50)$$

A Equação 52 apresenta como se pode calcular o ângulo da impedância de curto-circuito entre o primário e secundário.

$$P_{sc12} = |\dot{V}_{1sc2}| \times |\dot{I}_{1sc2}| \times \cos\varphi_{sc12} \quad (51)$$

$$\varphi_{sc12} = \arccos\left(\frac{P_{sc12}}{|\dot{V}_{1sc2}| \times |\dot{I}_{1sc2}|}\right) \quad (52)$$

A impedância de curto-circuito entre o primário e secundário, vista pelo secundário, pode ser escrita como a soma de uma resistência e uma reatância de curto-circuito, conforme apresentado na Equação 53.

$$\bar{Z}_{sc12} = R_{sc12} + j \times X_{sc12} \quad (53)$$

$$R_{sc12} = \text{Re}(\bar{Z}_{sc12}) = \frac{1}{a_{12}^2} \times \frac{|\dot{V}_{1sc2}|}{|\dot{I}_{1sc2}|} \times \cos\varphi_{sc12} \quad (54)$$

$$X_{sc12} = \text{Im}(\bar{Z}_{sc12}) = \frac{1}{a_{12}^2} \times \frac{|\dot{V}_{1sc2}|}{|\dot{I}_{1sc2}|} \times \sin\varphi_{sc12} \quad (55)$$

Pode-se escrever essa impedância em *pu*, conforme (56).

$$\bar{z}_{sc12} = \frac{\bar{Z}_{sc12}}{Z_{Base2}} = r_{sc12} + j \times x_{sc12} \quad (56)$$

Onde,

$$Z_{Base2} = \frac{|\dot{V}_{2n}|^2}{|\bar{S}_n|} \quad (57)$$

O segundo ensaio de curto-circuito, dos três a serem executados, é realizado para se obter a impedância de curto-circuito entre primário e terciário, \bar{z}_{sc13} , em *pu*. Semelhante ao primeiro ensaio, o terciário é colocado em curto-circuito, o secundário deixado em vazio e, em seguida, o primário é alimentado com a finalidade de se ter corrente nominal no terciário, $|\dot{I}_{3n}|$, conforme apresentado na Figura 12.

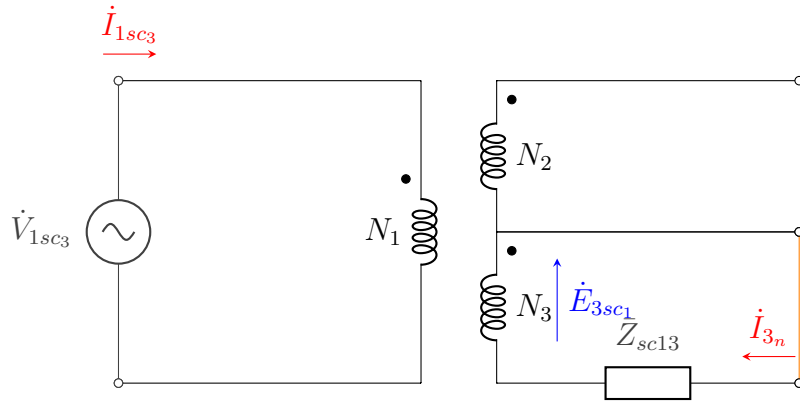


Figura 12: Modelo Matemático do Transformador de Fase Dividida para o Ensaio de Curto-Circuito entre Primário e Terciário

A impedância entre primário e terciário pode ser obtida de forma análoga ao realizado para se obter a impedância de curto-circuito entre primário e secundário. Sabendo que a impedância entre primário e terciário vista pelo terciário é definida como apresentado na Equação 58.

$$\bar{Z}_{sc13} = \frac{1}{a_{13}^2} \times \bar{Z}_{sc1} + \bar{Z}_{sc3} = \frac{\dot{E}_{3sc1}}{\dot{I}_{3n}} = R_{sc13} + j \times X_{sc13} \quad (58)$$

Pode-se escrever \bar{z}_{sc13} , conforme (59).

$$\bar{z}_{sc13} = \frac{\bar{Z}_{sc13}}{Z_{Base3}} = r_{sc13} + j \times x_{sc13} \quad (59)$$

Onde,

$$Z_{Base3} = \frac{|\dot{V}_{3n}|^2}{|\bar{S}_n|} \quad (60)$$

Por fim, o terceiro ensaio de curto-circuito é realizado para se obter a impedância de curto-circuito entre secundário e terciário, \bar{z}_{sc23} , em *pu*. Nesse caso, o terciário é colocado em curto-circuito, o primário deixado em vazio e, em seguida, o secundário é alimentado com a finalidade de se ter corrente nominal no terciário, $|\dot{I}_{3n}|$, conforme apresentado na Figura 13.

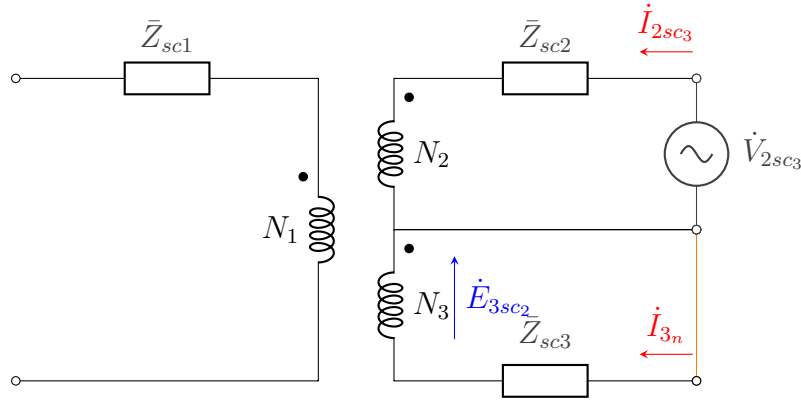


Figura 13: Modelo Matemático do Transformador de Fase Dividida para o Ensaio de Curto-Circuito entre Secundário e Terciário

A impedância entre secundário e terciário pode ser obtida de forma análoga ao realizado nos dois casos anteriores. Sabendo que a impedância entre secundário e terciário vista pelo terciário é definida como apresentado na Equação 61.

$$\bar{Z}_{sc23} = \frac{1}{a_{23}^2} \times \bar{Z}_{sc2} + \bar{Z}_{sc3} = \frac{\dot{E}_{3sc2}}{\dot{I}_{3n}} = R_{sc23} + j \times X_{sc23} \quad (61)$$

Pode-se escrever \bar{z}_{sc23} , conforme (62).

$$\bar{z}_{sc23} = \frac{\bar{Z}_{sc23}}{Z_{Base3}} = r_{sc23} + j \times x_{sc23} \quad (62)$$

Finalizando os três ensaios de curto-circuito, tem-se os resultados das três impedâncias entre enrolamentos:

$$\bar{z}_{sc12} = r_{12} + j \times x_{12} \quad (63)$$

$$\bar{z}_{sc13} = r_{13} + j \times x_{13} \quad (64)$$

$$\bar{z}_{sc23} = r_{23} + j \times x_{23} \quad (65)$$

Para as reatâncias, o OpenDSS aceita como parâmetros de entrada os valores de x_{12} , x_{13} e x_{23} diretamente. Já para as resistências, o OpenDSS não aceita os valores entre bobinas, e sim, os valores de resistência de cada bobina separadamente. Para isso, r_1 , r_2 e r_3 devem ser obtidos conforme (66), (67) e (68), respectivamente.

$$r_1 = 0.5 \times (r_{12} + r_{13} - r_{23}) \quad (66)$$

$$r_2 = 0.5 \times (r_{12} + r_{23} - r_{13}) \quad (67)$$

$$r_3 = 0.5 \times (r_{13} + r_{23} - r_{12}) \quad (68)$$

3.3.2 Ensaio em Vazio

Nesse ensaio o objetivo é obter o valor da impedância de circuito-aberto vista pelo secundário, \bar{Z}_{oc} . Para realizar esse ensaio, o primário e o terciário do transformador devem ser deixados em vazio e, em seguida, deve-se alimentar o secundário com tensão nominal, $|\dot{V}_{2n}|$, conforme apresentado na Figura 14.

A partir do ensaio é possível obter as seguintes medidas elétricas:

- Corrente em vazio do Secundário: $|\dot{I}_{2oc}|$
- Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{2n}|$
- Perdas no Ferro: P_{oc}

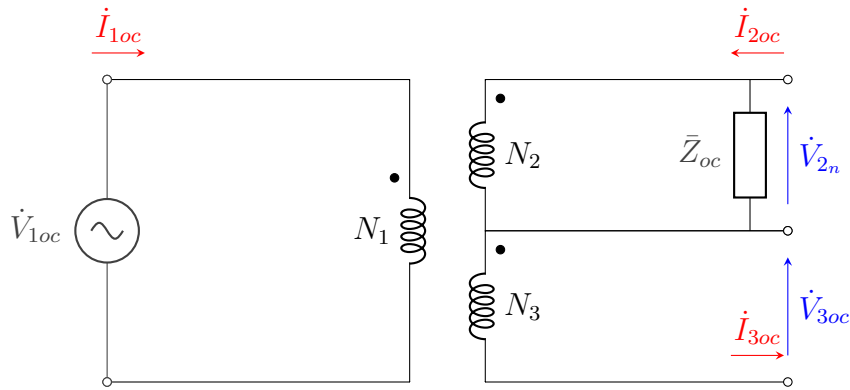


Figura 14: Modelo Matemático de um Transformador de Fase Dividida durante o Ensaio em Vazio

O primário e o terciário do transformador estão em vazio e, portanto, as suas correntes, \dot{I}_{1oc} e \dot{I}_{3oc} , são nulas. Dessa forma, pode-se calcular a admitância de circuito-aberto vista pelo secundário, conforme apresentado em (69), e o seu módulo conforme apresentado em (70).

$$\bar{Y}_{oc} = \frac{1}{\bar{Z}_{oc}} = \frac{\dot{I}_{2oc}}{\dot{V}_{2n}} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (69)$$

$$|\bar{Y}_{oc}| = \frac{|\dot{I}_{2oc}|}{|\dot{V}_{2n}|} \quad (70)$$

A Equação 72 mostra como se pode calcular o ângulo da impedância em vazio.

$$P_{oc} = |\dot{V}_{2n}| \times |\dot{I}_{2oc}| \times \cos \varphi_{oc} \quad (71)$$

$$\varphi_{oc} = \arccos\left(\frac{P_{oc}}{|\dot{V}_{2n}| \times |\dot{I}_{2oc}|}\right) \quad (72)$$

A admitância de circuito-aberto pode ser escrita como a soma de uma condutância e uma susceptância de magnetização, conforme apresentado na Equação 73.

$$\bar{Y}_{oc} = G_{oc} + j \times B_{oc} \quad (73)$$

$$G_{oc} = \text{Re}(\bar{Y}_{oc}) = \frac{|\dot{I}_{2oc}|}{|\dot{V}_{2n}|} \times \cos \varphi_{oc} \quad (74)$$

$$B_{oc} = \text{Im}(\bar{Y}_{oc}) = -\frac{|\dot{I}_{2oc}|}{|\dot{V}_{2n}|} \times \sin \varphi_{oc} \quad (75)$$

Pode-se escrever essa admitância em pu , conforme (76).

$$\bar{y}_{oc} = \bar{Y}_{oc} \times Z_{Base2} = g_{oc} + j \times b_{oc} \quad (76)$$

A perda no ferro, P_{oc} pode ser relacionada com G_{oc} , conforme Equação 77.

$$p_{oc} = \frac{P_{oc}}{|\bar{S}_n|} = \frac{G_{oc} \times |\dot{V}_{2n}|^2}{|\dot{V}_{2n}| \times |\dot{I}_{2n}|} = \frac{G_{oc} \times |\dot{V}_{2n}|^2}{|\dot{V}_{2n}| \times \frac{|\dot{V}_{2n}|}{Z_{Base2}}} = G_{oc} \times Z_{Base2} = g_{oc} \quad (77)$$

Por fim, a corrente de magnetização do secundário, $|\dot{I}_{2mag}|$, pode ser relacionada com a susceptância de magnetização, B_{oc} , conforme Equação 78.

$$|\dot{i}_{2mag}| = \frac{|\dot{I}_{2mag}|}{|\dot{I}_{2n}|} = \frac{|B_{oc}| \times |\dot{V}_{2n}|}{|\dot{V}_{2n}| \times \frac{1}{Z_{Base2}}} = |B_{oc}| \times Z_{Base2} = |b_{oc}| \quad (78)$$

Observação 2: Em geral, os fabricantes não fornecem a informação das impedâncias de curto-circuito de cada enrolamento. Os dados de placa apresentam a chamada impedância de curto “completa”, que é obtida quando o ensaio de curto é feito curto-circuitando os dois enrolamentos de baixa tensão. Assim, na impossibilidade de realização dos quatro ensaios apresentados nessa nota técnica, utilizam-se os dados de placa e costuma-se fazer uma aproximação que também depende do formato do núcleo de ferro (tipo núcleo ou tipo concha), [5] e [8].

4 Exemplos de Códigos

Nessa seção, os parâmetros apresentados anteriormente são utilizados para definir o elemento *Transformer* na linguagem de programação do OpenDSS.

4.1 Exemplo para um Transformador Monofásico

Para o primeiro exemplo, é assumido que transformador monofásico da Figura 15 apresenta os seguintes dados:

- Nome: *TrafoMono*

- Potência Aparente Nominal: $|\bar{S}_n| = 100 \text{ kVA}$
- Tensão Nominal do Primário: $|\dot{V}_{P_n}| = \frac{13.8}{\sqrt{3}} = 7.9674 \text{ kV}$
- Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{S_n}| = 0.22 \text{ kV}$
- Conectado entre as Barras: A e B
- Primário Conectado entre Fase B e Neutro/Terra
- Secundário Conectado entre Fases B e C

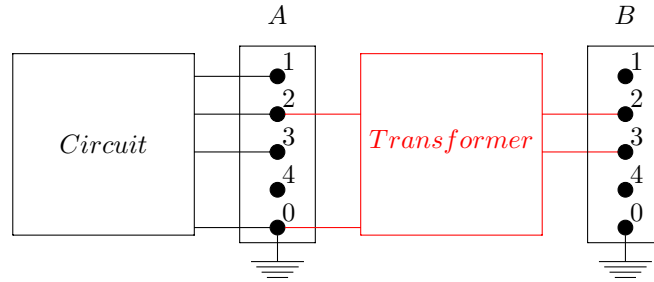


Figura 15: Conexão no OpenDSS do Transformador Monofásico com o seu Primario entre Fase-Neutro e o seu Secundário entre Fases

Pode-se definir os transformadores em linguagem de programação do OpenDSS utilizando duas formas distintas, conforme apresentadas a seguir:

4.1.1 Primeira Alternativa

Basicamente, o usuário deve inserir as informações de tensão, potência e conexão de cada enrolamento separadamente.

A parte resistiva da impedância de curto-circuito é definida a partir das propriedades `%loadloss` ou `%r`. Porém, diferentemente de `%r`, que é um parâmetro individual de cada enrolamento, `%loadloss` é um parâmetro do elemento transformador como um todo, que deve ser declarado antes das especificação dos parâmetros específicos aos enrolamentos. Por esse motivo, apesar do nome do parâmetro ser `%r`, em notas técnicas, costumamos fazer referência à `%r1` e `%r2`, por exemplo, a transformadores com dois enrolamentos.

A reatância de curto-circuito, por sua vez, é definida através da propriedade `xhl`. As expressões abaixo relacionam as grandezas obtidas através dos ensaios de curto-circuito e os parâmetros utilizados no OpenDSS.

$$\%loadloss = \%r_1 + \%r_2 = 100 \times p_{sc} = 100 \times r_{sc} \quad (79)$$

$$xhl = 100 \times x_{sc} \quad (80)$$

Já a admitância de circuito-aberto é definida através das propriedades `%noloadloss` e `%imag` para a condutância e susceptância, respectivamente.

$$\%noloadloss = 100 \times p_{oc} = 100 \times g_{oc} \quad (81)$$

$$\%imag = 100 \times |i_{mag}| = 100 \times |b_{oc}| \quad (82)$$

Observação 3: Por considerar essa alternativa a mais organizada, em [1], a ANEEL recomenda a sua utilização.

A seguir é apresentado um exemplo de transformador definido através da primeira alternativa:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Transformer.TrafoMono phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss=0.015
%imag=2
~ wdg=1 bus=A.2 kv=7.9674 kva=100
~ wdg=2 bus=B.2.3 kv=0.22 kva=100

Set voltagebases=[13.8 0.22]
Calcvoltagebases

Solve
```

4.1.2 Segunda Alternativa

Diferente do caso anterior, nessa alternativa o usuário deve inserir as informações de tensão, potência e conexão para ambos os enrolamentos através dos parâmetros kVs , $kVAs$ e $buses$, respectivamente, os quais são arrays de dois elementos. Os parâmetros devem ser inseridos nos arrays de forma individual e na ordem dos enrolamentos.

A seguir, o mesmo exemplo do caso anterior é apresentado de acordo com a segunda alternativa:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Transformer.TrafoMono phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss=0.015
%imag=2 kvs=[7.9674 0.22] buses=[A.2 B.2.3] kvas=[100 100]

Set voltagebases=[13.8 0.22]
Calcvoltagebases

Solve
```

4.2 Exemplos para Transformadores Trifásicos

Para esse exemplo, diferentes conexões de transformadores trifásicos são definidas, sendo algumas através de modos distintos.

- Nome: *TrafoTri*
- Potência Aparente Nominal: \bar{S}_n
- Tensão Nominal do Primário: $|\dot{V}_{P_n}| = 13.8 \text{ kV}$
- Tensão Nominal do Secundário: $|\dot{V}_{S_n}| = 0.22 \text{ kV}$
- Impedância de Curto-Circuito: \bar{Z}_{sc}
- Impedância de Circuito Aberto: \bar{Z}_{oc}
- Conectado entre as Barras: *A* e *B*
- Impedância de Curto-Circuito do Transformador Monofásico: $\bar{z}_{sc} = 0.0015 + j \times 0.05 \text{ pu}$
- Admitância de Circuito-Aberto do Transformador Monofásico: $\bar{y}_{oc} = 0.00015 - j \times 0.02 \text{ pu}$

4.2.1 Conexão DY1(+30°)

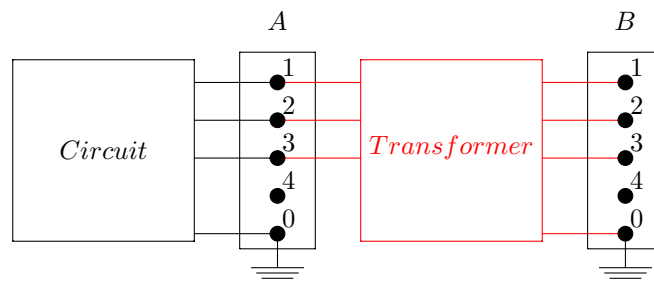


Figura 16: Conexão no OpenDSS de um Transformador Trifásico Conectado em Delta-Estrela Aterrada

- **Opção 1:** através de um banco de três transformadores monofásicos

```
Clear
New Circuit.TheveninEquivalent bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Transformer.TrafoA phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss
=0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A.1.3 kv=13.8 kva=100 conn=delta
~ wdg=2 bus=B.1 kv=0.127 kva=100 conn=wye

New Transformer.TrafoB phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss
=0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A.2.1 kv=13.8 kva=100 conn=delta
~ wdg=2 bus=B.2 kv=0.127 kva=100 conn=wye
```

```
New Transformer.TrafoC phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss  
=0.015 %imag=2  
~ wdg=1 bus=A.3.2 kv=13.8 kva=100 conn=delta  
~ wdg=2 bus=B.3 kv=0.127 kva=100 conn=wye  
  
Set voltagebases=[13.8]  
Calc voltagebases  
  
Solve
```

- **Opção 2:** através de um único transformador trifásico

```
Clear  
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8  
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]  
  
New Transformer.TrafoTri phases=3 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss  
=0.015 %imag=2 LeadLag=Lag  
~ wdg=1 bus=A kV=13.8 kva=300 conn=delta  
~ wdg=2 bus=B kV=0.22 kva=300 conn=wye  
  
Set voltagebases=[13.8 0.22]  
Calc voltagebases  
  
Solve
```

Observação 4: Note que, na primeira opção, a defasagem entre primário e secundário é definida através da conexão entre os transformadores monofásicos, enquanto que no segundo caso, a defasagem é definida pelo parâmetro *LeadLag*. Quando o parâmetro *LeadLag* é definido como “Lag” (ou “atraso”, em português), significa que o **primário está atrasado em relação ao secundário**, ou, em outras palavras, que a tensão secundária se adianta de 30°.

Observação 5: Por *default*, o parâmetro *LeadLag* é definido como “Lag”.

4.2.2 Conexão DY11(-30°)

- **Opção 1:** através de um banco de três transformadores monofásicos

```
Clear  
New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8  
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]  
  
New Transformer.TrafoA phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss  
=0.015 %imag=2  
~ wdg=1 bus=A.1.2 kv=13.8 kva=100 conn=delta  
~ wdg=2 bus=B.1 kv=0.127 kva=100 conn=wye  
  
New Transformer.TrafoB phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss  
=0.015 %imag=2  
~ wdg=1 bus=A.2.3 kv=13.8 kva=100 conn=delta  
~ wdg=2 bus=B.2 kv=0.127 kva=100 conn=wye
```

```
New Transformer.TrafoC phases=1 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss
    =0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A.3.1 kv=13.8 kva=100 conn=delta
~ wdg=2 bus=B.3 kv=0.127 kva=100 conn=wye

Set voltagebases=[13.8]
Calc voltagebases

Solve
```

- **Opção 2:** através de um único transformador trifásico

```
Clear
New Circuit.TheveninEquivalent bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Transformer.TrafoTri phases=3 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss
    =0.015 %imag=2 LeadLag=Lead
~ wdg=1 bus=A kv=13.8 kva=300 conn=delta
~ wdg=2 bus=B kv=0.22 kva=300 conn=wye

Set voltagebases=[13.8 0.22]
Calc voltagebases

Solve
```

4.2.3 Conexão YY

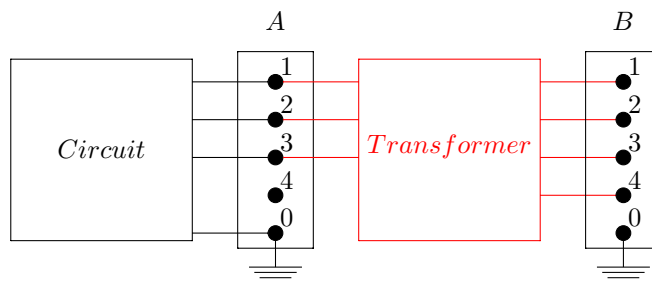


Figura 17: Conexão no OpenDSS de um Transformador Trifásico Conectado em Estrela-Estrela Isolada

- **Opção 1:** Sem impedância de aterramento no secundário

```
Clear
New Circuit.TheveninEquivalent bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Transformer.TrafoTri phases=3 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss
    =0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A kv=13.8 kva=300 conn=wye
~ wdg=2 bus=B.1.2.3.4 kv=0.22 kva=300 conn=wye
```

```
Set voltagebases=[13.8 0.22]
Calc voltagebases

Solve
```

- **Opção 2:** Com impedância de aterramento no secundário

```
Clear
New Circuit.TheveninEquivalent bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Transformer.TrafoTri phases=3 windings=2 xhl=5 %loadloss=0.15 %noloadloss
=0.015 %imag=2
~ wdg=1 bus=A kv=13.8 kva=300 conn=wye
~ wdg=2 bus=B.1.2.3.4 kv=0.22 kva=300 conn=wye

New Reactor.Ground phases=1 bus1=B.4 r=10 x=10

Set voltagebases=[13.8 0.22]
Calc voltagebases

Solve
```

Observação 6: Também é possível adicionar uma impedância de aterramento em enrolamentos através dos parâmetros *rneut* e *xneut* do elemento *Transformer*, que são internos ao modelo do transformador, porém, em geral, é preferível utilizar um elemento *Reactor* externo, pois através dele, é possível obter diretamente o resultado da corrente que flui por esse elemento, o que não ocorre quando se utiliza os parâmetros *rneut* e *xneut*. Mais informações sobre esses parâmetros podem ser obtidas em [2].

4.3 Exemplo para um Transformador *Split-Phase*

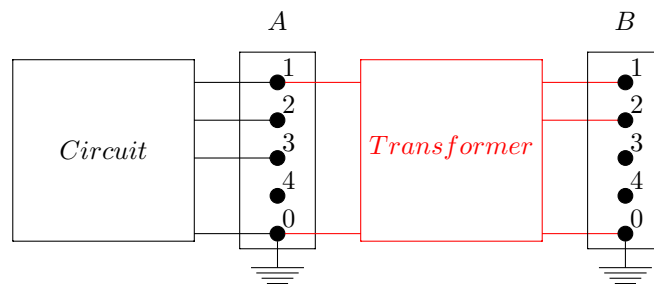


Figura 18: Conexão no OpenDSS de um Transformador *Split-Phase*

```
Clear
New Circuit.TheveninEquivalent bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Transformer.Trafo phases=1 windings=3 xhl=5 xht=2.04 xlt=1.36 %noloadloss=0.015
%imag=2 %Rs=[0.6 1.2 1.2]
~ wdg=1 bus=A.1 kv= kva=10 conn=wye
```



```
~ wdg=2 bus=B.1.0 kv=0.110 kva=10 conn=wye
~ wdg=3 bus=B.0.2 kv=0.110 kva=10 conn=wye

Set voltagebases=[13.8 0.22]
Calc voltagebases

Solve
```

Observe a especificação do parâmetro *bus* de cada enrolamento. A ordem dos nós informada para os enrolamentos da baixa tensão ditam a polaridade, conforme a Figura 10, necessária para se obter a tensão de linha de 220V.

5 Especificação de Transformadores para o Cálculo de Perdas Técnicas - PRODIST Módulo 7

O módulo 7 do PRODIST [3] define os valores regulatórios de perdas totais e em vazio para os transformadores de distribuição em seu anexo I.

As perdas em vazio e total são definidas dependendo do nível de tensão primária e da potência nominal do transformador, sendo seus valores dados em Watts.

Por esse motivo, para efeito de modelagem no OpenDSS, essas perdas podem ser especificadas diretamente através dos parâmetros *%loadloss* e *%noloadloss* do elemento *Transformer*.

Como exemplo, vamos modelar um transformador trifásico cujos parâmetros foram especificados em [1] e são repetidos abaixo, a menos dos dados de perdas, que serão extraídos do anexo I de [3]:

- Nome: *TR1*
- Potência Aparente Nominal: 150 *kVA*
- Número de Enrolamentos: 2
- Tensão Nominal do Primário: 13.8 *kV*
- Tensão Nominal do Secundário: 0.38 *kV*
- Conexão: *delta/estrela*
- Tap: 1.05
- Reatância de curto-circuito: 2.72 % = 0.00272 *pu*
- Conectado entre as Barras (por exemplo): *A* e *B*

Como o nível de tensão primária desse transformador é de 13.8 kV, deve-se utilizar a Tabela I, do Anexo I de [3]. Para a potência nominal de 150kVA, temos então que a perda em vazio desse transformadores de distribuição deve ser 485W, enquanto que a perda total deve ser de 2335W.

Assim, o parâmetro *%noloadloss* pode ser calculado por:

$$\%noloadloss = \frac{485}{150000} \times 100 = 0.3233 \quad (83)$$

e o parâmetro *%loadloss* como:

$$\%loadloss = \frac{2335 - 485}{150000} \times 100 = 1.2333 \quad (84)$$

Então, o código na linguagem de programação do OpenDSS para esse transformador é:

```
New Transformer.TR1 phases=3 windings=2 xhl=2.72 %loadloss=1.2333 %noloadloss=0.3233  
~ wdg=1 bus=A kv=13.8 kva=150 conn=delta  
~ wdg=2 bus=B kv=0.38 kva=150 conn=we tap=1.05
```

Observação 8: O módulo 7 do PRODIST não faz nenhuma menção à modelagem da corrente de magnetização de transformadores. Assim, sugere-se que não se declare esse parâmetro, pois o seu valor *default* é zero.

6 Comentários Adicionais

Esse material foi disponibilizado gratuitamente, porém, ao utilizá-lo, pedimos que as devidas referências sejam feitas.

Se você possui alguma dúvida ou encontrou algum erro nessa nota técnica, por favor, entre em contato conosco através do e-mail opendss.brasil@gmail.com.

7 Referências

- [1] ANEEL: *Nota Técnica nº 0057/2014-SRD/ANEEL*, 2014. http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/026/documento/nota_tecnica_0057_srd.pdf.
- [2] Dugan, Roger: *OpenDSS neutral conventions*. Technical report, Electric Power Research Institute(EPRI), 2010. <https://sourceforge.net/p/electricdss/code/HEAD/tree/trunk/Distrib/Doc/OpenDSS%20Neutral%20Rules.pdf>.
- [3] Energia Elétrica, ANEEL Agência Nacional de: *Procedimentos de Distribuição de Energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição, Revisão 4*. 2015.
- [4] Fitzgerald, A., A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. Umans: *Electric Machinery*. Electrical Engineering Series. McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2003, ISBN 9780073660097. <https://books.google.com.br/books?id=YBKk4kWSle0C>.
- [5] Gonen, T.: *Electric Power Distribution System Engineering, Second Edition*. Taylor & Francis, 2007, ISBN 9781420062007. <https://books.google.com.br/books?id=vX1bbwAACAAJ>.
- [6] Jordão, Rubens Guedes: *Transformadores*. Edgard Blücher, São Paulo, 2012.
- [7] Oliveira, C.B., H.P. Schmidt, N. Kagan e E.J. Robba: *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência - Componentes Simétricas*. Edgard Blücher, São Paulo, 2ª edição, 2000.
- [8] Short, T.A.: *Electric Power Distribution Handbook*. Electric power engineering series. CRC Press, 2003, ISBN 9780203486504. https://books.google.com.br/books?id=mVW2D_6XB5EC.
- [9] Stevenson Jr., William D.: *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. McGraw-Hill, São Paulo, 1986.