

3

Avaliação do Modelo Usual de Transformador com *Tap* Variável em Estabilidade de Tensão

3.1

Modelo Usual de Transformador com *Tap* Variável

3.1.1

Transformadores em Regime Permanente

A partir dos ensaios em vazio e curto circuito é possível obter o circuito elétrico de um transformador operando em regime permanente [21] a [32], conforme apresentado na Figura 3.1. Esse circuito é composto por duas impedâncias série, sendo uma do lado k refletida para o lado m ($R'_k + jX'_k$) e a outra do lado m ($R_m + jX_m$). Essas impedâncias se referem às resistências dos enrolamentos e às reatâncias de dispersão. Entre elas, há uma impedância *shunt*, referente às perdas no ferro (R_f) e à reatância de magnetização X_{mag} .

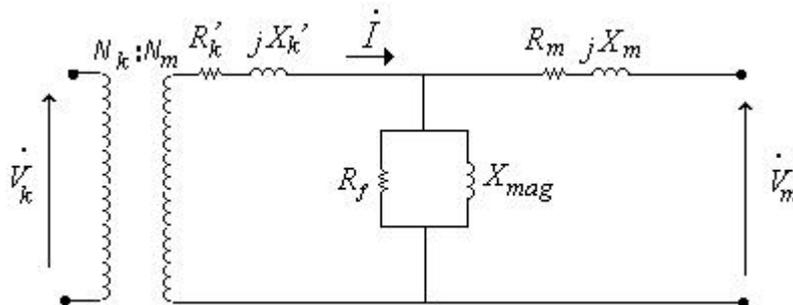


Figura 3.1: Modelo de um Transformador Operando em Regime Permanente

De forma a simplificar o modelo apresentado anteriormente, despreza-se a impedância *shunt* devido ao seu elevado valor comparado às impedâncias série. Além disso, as resistências dos enrolamentos também podem ser desprezadas por serem muito inferiores às respectivas reatâncias de dispersão. Os erros introduzidos por essas simplificações são irrelevantes na maioria dos problemas de sistemas elétricos de potência [21]. Assim, tem-se um circuito equivalente

simplificado que consiste de um transformador ideal em série com uma reatância, conforme apresentado na Figura 3.2. Essa reatância é o resultado da soma da reatância de dispersão do lado m do transformador com a reatância de dispersão do lado k referida ao lado m , utilizando-se a relação de nominal de transformação:

$$X'_k = X_k \left(\frac{N_m}{N_k} \right)^2$$

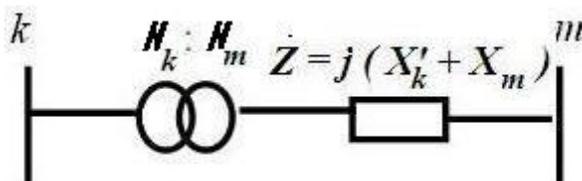


Figura 3.2: Modelo Simplificado de Transformador Operando em Regime Permanente

3.1.2

Transformador com *Tap* Variável

Muitos transformadores utilizados em sistemas elétricos de potência possuem uma tomada, denominada *tap*, para variar a relação de espiras e, conseqüentemente, as tensões. A variação usualmente permitida fica entre 10% e 15% do valor nominal de transformação [33].

Um transformador com *tap* variável tem a relação entre as espiras variável em relação ao valor nominal para compensar variações das tensões no sistema. Essas variações ocorrem principalmente devido às modificações das condições de operação do sistema. Como exemplo, cita-se variações de demanda de potência, da topologia do sistema e violação da capacidade de geração de potência reativa.

Quando a variação do *tap* é efetuada com pouca freqüência, o *tap* dos transformadores permanece fixo sob carga. Nesse caso, a variação do *tap*, em relação ao valor nominal, é realizada com o transformador desenergizado. Esse tipo de transformador é denominado NLTC (*No-Load Tap Changing*) [34].

Por outro lado, se a necessidade de variar o *tap* é mais freqüente, como por exemplo durante as variações de carga no decorrer do dia, são utilizados transformadores com *tap* variável, com chaveamento sob carga, também

denominados LTC (*Load Tap Changer*) ou OLTC (*On-Load Tap Changing*) [34]. Como exemplo de LTC ou OLTC, cita-se a situação na qual a variação do *tap* do transformador é utilizada para controlar automaticamente a tensão de determinada barra. Outra denominação para esse tipo de transformador é ULTC (*Under-Load Tap Changing*).

A variação do *tap* do LTC pode ser efetuada de forma manual ou automática. No caso de manobras automáticas, que podem sofrer comando remoto ou local, a tensão num dos terminais é comparada a uma referência e o erro é utilizado para gerar um sinal que corrige a posição do *tap*.

3.1.3

Representação de Transformador em Por Unidade

Em p.u., os valores das reatâncias referidas aos lados k ou m terão os mesmos valores, desde que, na escolha dos valores-base de tensão de cada lado do transformador, seja obedecida a relação de transformação. E, ainda, a potência-base deve ser a mesma nos dois lados do transformador, assim como em todo o sistema [29]. O exemplo na Seção 3.1.3.1 ilustra essa situação.

3.1.3.1

Exemplo: Vantagem da Representação em p.u.

Considere um transformador de 100 MVA, cuja relação nominal entre as tensões seja 13,8:138 kV, e cuja impedância total referida ao lado de alta tensão valha $j38 \Omega$. Assim, tem-se o seguinte valor para a impedância referida ao lado de baixa tensão, considerando-se que a relação entre o número de espiras é igual à relação entre as tensões nominais, como apresentado em [29]:

$$Z_{BT}^{\Omega} = Z_{AT}^{\Omega} \left(\frac{V_{BT}}{V_{AT}} \right)^2 \therefore Z_{BT} = 0,38 \Omega$$

A tensão-base no lado de baixa tensão será arbitrada como sendo 13,8 kV. Consequentemente, a tensão-base no lado de alta tensão será 138 kV, de forma a

manter a relação de transformação. A potência-base será arbitrada como sendo a potência nominal do transformador. Assim, as impedâncias-base nos lados de baixa e de alta tensão terão os seguintes valores:

$$Z_{baseBT} = \frac{(V_{baseBT})^2}{S_{base}} \therefore Z_{baseBT} = 1,9 \Omega$$

$$Z_{baseAT} = \frac{(V_{baseAT})^2}{S_{base}} \therefore Z_{baseAT} = 190 \Omega$$

Logo, as reatâncias em p.u. nos lados de alta e de baixa terão os seguintes valores:

$$Z_{BT}^{p.u.} = \frac{Z_{BT}^{\Omega}}{Z_{baseBT}} \therefore Z_{BT}^{p.u.} = 0,2 p.u.$$

$$Z_{AT}^{p.u.} = \frac{Z_{AT}^{\Omega}}{Z_{baseAT}} \therefore Z_{AT}^{p.u.} = 0,2 p.u.$$

3.1.3.2

Modelo Usual de Transformador com *Tap* Variável: Transformador Ideal em Série com Impedância

O exemplo apresentado é ilustrativo da grande vantagem de se representar transformadores em p.u.. O transformador pode ser representado completamente por sua impedância em p.u., sem o transformador ideal, conforme Figura 3.3, já que nenhuma transformação é necessária. A corrente terá o mesmo valor em p.u. tanto no primário quanto no secundário (a impedância *shunt* foi desprezada).

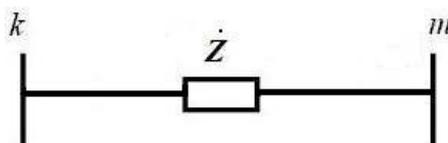


Figura 3.3: Representação de Transformador em p.u. quando Valores-Base de Tensão obedecem a Relação de Transformação

Entretanto, na operação de sistemas elétricos de potência é comum variar-se *taps* de transformadores com o objetivo de se controlar o perfil de tensão. Nessas situações, seria necessário estabelecer novas bases de tensão e de impedância no lado do sistema onde o *tap* foi mudado e recalcular grandezas em p.u. (tensões e impedâncias), de forma a ser observada a vantagem da representação em p.u. mencionada. Assim, tensões nodais e impedâncias de linhas de transmissão e de transformadores deveriam ser modificadas a cada alteração do *tap*. Esse procedimento, evidentemente, seria inviável.

A solução adotada para se modelar transformador com *tap* variável é reintroduzir o transformador ideal, com relação de transformação diferente da nominal, conforme apresentado na Figura 3.4, onde o *tap* variável está no lado *m*, escolhido arbitrariamente, mas sem perda de generalidade para essa análise.

Além da impedância, o *tap* também é representado em p.u. na Figura 3.4, sendo o *tap*-base igual ao *tap* nominal, que é igual à relação entre o número de espiras ($N_m:N_k$), em condições nominais. Assim, $a=1$ quando a relação é a nominal e o circuito da Figura 3.4 fica igual ao da Figura 3.3. Nessa representação, as tensões-base permanecem constantes, obedecendo a relação nominal de transformação, independente do valor do *tap*.

Como exemplo, para um transformador cuja relação nominal seja 13,8:138 kV, o *tap* base (igual ao *tap* nominal) vale 10. Se a relação de transformação é a nominal, tem-se o *tap* valendo 10 e, em p.u., $a=1$. Porém, se a relação é modificada para 13,8:124,2 kV, tem-se o *tap* valendo 9 e, em p.u., tem-se $a=0,9$.

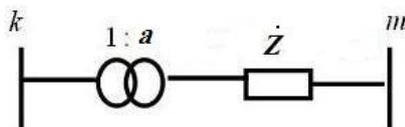


Figura 3.4: Modelo Usual de Transformador com *Tap* Variável

Ainda em relação à Figura 3.4, conforme apresentado em [4] a [11] e [21] a [32], a impedância \dot{Z} , em ohms, é medida através do teste de curto-circuito. Essa é a razão da utilização do modelo usual. As impedâncias de cada um dos enrolamentos do transformador não podem ser obtidas separadamente de maneira direta, mesmo que fossem realizados dois testes de curto circuito (um em cada

lado), devido à dependência linear entre as equações geradas, conforme Apêndice III.

A referência [30], além de mencionar que a impedância \dot{Z} é medida através do teste de curto-circuito, destaca que a mesma tem um valor que é dependente (função) da posição do *tap* para o qual foi realizado o teste. O valor da impedância utilizado, entretanto, é fixo, correspondente à situação de *tap* nominal, o que é justificado pela pequena variação do *tap* em torno de 1 p.u..

Outra questão importante a ser mencionada, é que no modelo apresentado na Figura 3.4, está definido que o *tap* estará no secundário ou no primário se o fluxo de potência estiver da barra k para a barra m ou da barra m para a barra k , respectivamente. Em [35] é apresentado um modelo para transformador com *tap* variável, através do qual o *tap* pode estar no primário ou no secundário, independente do sentido do fluxo de potência, podendo ser utilizado também para modelar transformadores defasadores ou linhas de transmissão, sendo obtidas equações simétricas e genéricas para as correntes.

3.1.3.3

Exemplo: Reintrodução do Transformador Ideal

O transformador apresentado na Seção 3.1.3.1 é usado no sistema de 3 barras apresentado na Figura 3.5.

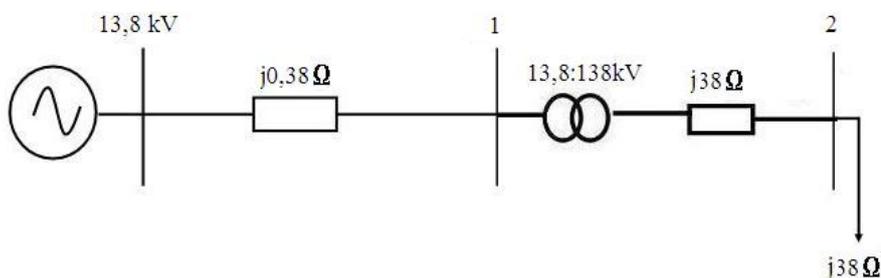


Figura 3.5: Sistema de 3 Barras

Se o transformador opera com *tap* nominal, o transformador ideal não precisa ser representado em p.u., conforme Figura 3.6, desde que seja obedecida a

relação de transformação ao se estabelecer os valores-base de tensão e a potência-base seja a mesma em cada lado transformador. Neste exemplo, os valores de tensão-base no primário e no secundário e de potência-base são 13,8kV, 138kV e 100MVA, respectivamente.

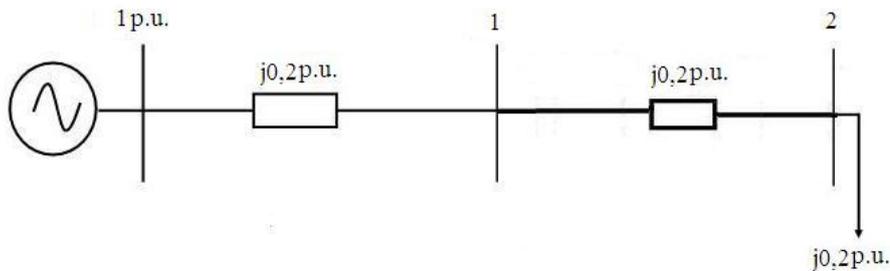


Figura 3.6: Sistema de 3 Barras em p.u.

Entretanto, se o transformador opera com *tap* diferente do nominal, 13,8:124kV, por exemplo, as tensões-base devem obedecer à nova relação de transformação, de forma a ser observada a vantagem da representação em p.u., que consiste em representar o transformador completamente por sua impedância em p.u. (sem o transformador ideal), uma vez que os valores das impedâncias são os mesmos em ambos os lados do equipamento. Assim, modifica-se a tensão-base no lado de alta de 138kV para 124,2kV. Logo, o valor da impedância-base no lado de alta tensão também será alterado:

$$Z_{baseAT} = \frac{(124,2)^2}{100} \therefore Z_{baseAT} = 154,25 \Omega$$

Conseqüentemente, a impedância do transformador e demais impedâncias que estejam localizadas à direita deste equipamento também serão alteradas (no caso deste exemplo, só impedância da carga), conforme Figura 3.7. Observa-se que a impedância do transformador será j0,25 p.u. tanto do lado 1 quanto do lado 2, logo o transformador ideal não precisa ser representado, como já explicado.

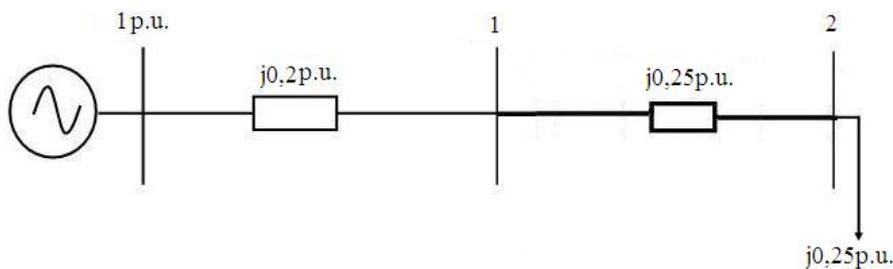


Figura 3.7: Sistema de 3 Barras em p.u. Modificado devido à Alteração do Tap

Tem-se a seguinte equação matricial para o circuito da Figura 3.7:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & j0,25 & 0 & -1 \\ 0 & j0,25 & -1 & 1 \\ j0,2 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

cuja solução em p.u. é:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1,44 \\ -j1,44 \\ 0,71 \\ 0,35 \end{bmatrix} p.u.$$

Convertendo-se para grandezas elétricas, a partir dos valores-base, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j10,44kA \\ -j1,16kA \\ 9,82kV \\ 44,20kV \end{bmatrix}$$

Conforme mencionado na Seção 3.1.3.2, seria inviável utilizar o procedimento detalhado neste exemplo na solução de circuitos elétricos com transformador com *tap* variável. Assim, uma solução alternativa é inserir um transformador ideal no circuito em p.u., conforme Figura 3.8.

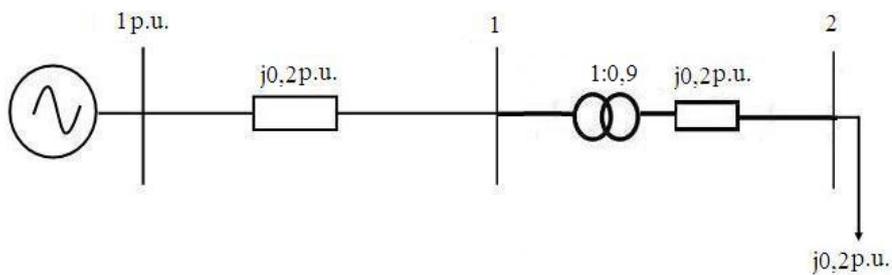


Figura 3.8: Sistema de 3 Barras em p.u. com Inserção do Transformador Ideal

Tem-se a seguinte equação matricial para o circuito da Figura 3.8:

$$\begin{bmatrix} 1 & -0,9 & 0 & 0 \\ 0 & j0,2 & 0 & -1 \\ 0 & j0,2 & -0,9 & 1 \\ j0,2 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

cuja solução em p.u. é:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1,44 \\ -j1,60 \\ 0,71 \\ 0,32 \end{bmatrix} p.u.$$

Convertendo-se para grandezas elétricas, a partir dos valores-base, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j10,44kA \\ -j1,16kA \\ 9,82kV \\ 44,20kV \end{bmatrix}$$

Observa-se que foi obtido o mesmo resultado comparando-se com a situação na qual foram alterados valores-base e impedâncias. A reintrodução do transformador ideal é, entretanto, mais viável computacionalmente, sendo mundialmente utilizada em programas de fluxo de potência.

3.1.3.4

Circuito π Equivalente ao Modelo Usual

Para eliminar o transformador ideal da Figura 3.4, o circuito elétrico é representado por seu π equivalente, conforme mostrado na Figura 3.9 e em [4] a [11]. Esse circuito foi inicialmente proposto em [4] e [5], sendo mundialmente utilizado em programas de fluxo de potência. No Apêndice I, apresenta-se como foram obtidas as impedâncias deste circuito π equivalente, conforme apresentadas em [4] a [11], mostrando que o mesmo é delta-ressonante [11], uma vez que a soma das três impedâncias do circuito π é nula [7] e [11].

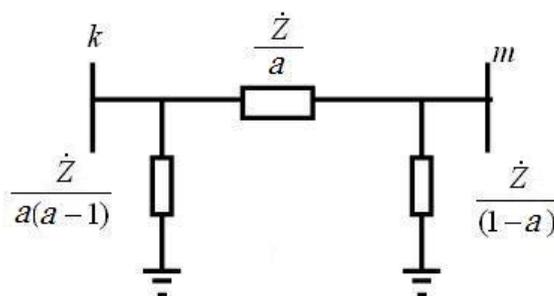


Figura 3.9: Circuito π (com Impedâncias) Equivalente ao Modelo Usual de Transformador com *Tap* Variável

Sem o transformador ideal verifica-se que é imediata a montagem da matriz de admitância de barras. Na Figura 3.10 é apresentado o circuito π equivalente, com admitâncias. Quando da troca de *tap*, verifica-se que um dos elementos da matriz admitância de barras permanece constante:

- O elemento (k,k) varia, uma vez que a soma das admitâncias ligadas a barra k vale $a^2\dot{Y}$;
- Os elementos (k,m) e (m,k) variam, uma vez que a admitância entre as barras k e m vale $a\dot{Y}$;
- O elemento (m,m) permanece constante, uma vez que a soma das admitâncias ligadas à barra m vale \dot{Y} .

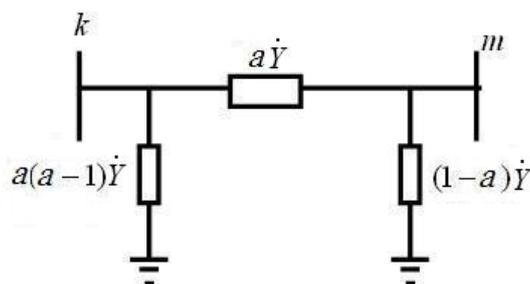


Figura 3.10: Circuito π (com Admitâncias) Equivalente ao Modelo Usual de Transformador com *Tap* Variável

A partir das admitâncias indicadas na Figura 3.10 é possível analisar o efeito da variação da relação de transformação sobre os módulos das tensões V_k e V_m . Se o *tap* opera em sua condição nominal ($a=1$), as admitâncias *shunt* ligadas às barras k e m são nulas e o circuito Π equivalente se resume a admitância série \dot{Y} . Se o valor do *tap* for alterado para um valor $a < 1$, a admitância *shunt* ligada à barra k terá sinal contrário a \dot{Y} , sendo capacitiva, ao passo que a admitância *shunt* ligada à barra m será indutiva. Conseqüentemente, haverá uma tendência de aumentar V_k e diminuir V_m .

Por outro lado, se o valor do *tap* for alterado para um valor $a > 1$, a admitância *shunt* ligada à barra k terá o mesmo sinal de \dot{Y} , sendo indutiva, ao passo que a admitância *shunt* ligada à barra m será capacitiva. Conseqüentemente, haverá uma tendência de aumentar V_m e de diminuir V_k . Observa-se que os efeitos nas tensões (e correntes), a partir da variação do *tap*, são os mesmos que seriam obtidos analisando-se a Figura 3.4, o que é óbvio, uma vez que os circuitos são equivalentes.

Por fim, é importante destacar, de acordo com [35], que os arquivos de dados referentes ao fluxo de potência apresentam o *tap* invertido, em relação à Figura 3.4 (utiliza-se $a':1$ em vez de $1:a$). Porém, de acordo com essa mesma referência, os programas de fluxo de potência utilizam a representação da Figura 3.4 (fazendo $a=1/a'$), considerando que as equações de fluxo de potência, obtidas a partir das admitâncias indicadas na Figura 3.9, são mais simples, comparadas à situação na qual o *tap* está do lado oposto.

3.1.3.5

Referências Iniciais sobre o Modelo Usual

Foi efetuada pesquisa, com o objetivo de se analisar as referências iniciais sobre o modelo usual de transformador com *tap* variável. Nessas referências, observa-se que o modelo usual é representado através de seu circuito Π equivalente.

Em [11] é apresentado o circuito Π referente ao modelo usual, mencionando que esse modelo foi desenvolvido em [7] e denominando o mesmo de delta-ressonante, como explicado no Apêndice I. O circuito Π apresentado em [7] e [11] é mais genérico comparado ao apresentado na Figura 3.9, uma vez que são representados *taps* nos dois lados do transformador. Nas discussões apresentadas em [7] sobre [6] não são apresentados detalhes sobre o modelo usual.

Analisando-se diretamente [6], verifica-se que o modelo usual é utilizado no trabalho, não sendo apresentado como foi desenvolvido o circuito. Esta referência menciona, entretanto, que o modelo usual foi desenvolvido ao mesmo tempo em [4] e em [5]. Nesses dois artigos é apresentado o circuito Π referente ao modelo usual com valores das impedâncias iguais aos apresentados na Figura 3.9. É possível verificar, ainda, nesses artigos que o circuito Π é equivalente a um circuito com transformador ideal em série com impedância total e constante referida ao lado de alta tensão, obtida através de teste de curto-circuito. A referência [5] apresenta, ainda, circuito T equivalente ao modelo usual.

3.2

Modelo Usual de Transformador com *Tap* Variável em Estudos de Estabilidade de Tensão

Considerando-se a representação usual de transformador com *tap* variável, conforme mostrado nas Figuras 3.4 e 3.9, observa-se que se gerador está conectado à barra k e carga na barra m , a máxima transferência de potência ocorre quando $Z_m = Z_{th} = Z$, conforme apresentado na Seção 2.1.5, onde Z_m é a impedância equivalente da carga, Z_{th} é a impedância de Thevenin vista da barra m e Z é a impedância total do transformador (no lado m), todas em p.u.. Nesse caso,

observa-se que a impedância no ponto de máximo carregamento não é modificada quando o *tap* é alterado.

Por outro lado, invertendo-se o sentido do fluxo de potência, ou seja, com o gerador na barra *m* e carga na barra *k*, a máxima transferência de potência ocorre quando $Z_k = Z_{th} = \frac{Z}{a^2}$, onde Z_k é a impedância equivalente da carga e $\frac{Z}{a^2}$ é a impedância total do transformador refletida para o lado *k*. Nessa situação, ao contrário do caso anterior, observa-se que a impedância no ponto de máximo carregamento é modificada quando o *tap* é alterado.

Assim, dependendo do sentido do fluxo de potência, a impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento pode variar ou não quando o *tap* é alterado. Essa dependência com o sentido do fluxo de potência também ocorre com a máxima capacidade de transmissão, como será mostrado.

Considerando-se ainda, os circuitos usuais das Figuras 3.4 e 3.9, pode-se traçar as curvas para ϕ (ângulo do fator de potência) constante no plano *SV* para dois valores diferentes de *taps* do transformador com *tap* variável, assim como a curva da impedância equivalente da carga que passa pelos pontos de máximo carregamento. Verifica-se na Figura 3.11 que, se o fluxo de potência flui da barra *k* para a barra *m*, ao alterar o *tap* do transformador, a impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento permanece a mesma, como já dito. Entretanto, o ponto de máximo carregamento varia.

Por outro lado, conforme mostrado na Figura 3.12, se o fluxo de potência flui da barra *m* para a barra *k*, ocorre o oposto, ou seja, o ponto de máximo carregamento permanece o mesmo e a impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento varia. É importante observar que o fato de o ponto de máximo carregamento não variar com o *tap* está incoerente com a teoria apresentada na Seção 2.1.3.

Curvas como a apresentada na Figura 3.12 são apresentadas em [36] e [37]. Em [38] é apresentada uma outra forma de se abordar o problema, mas também indicando que o ponto de máximo carregamento permanece constante com a variação do *tap*. No Apêndice 2 é apresentado maior detalhamento sobre essa bibliografia.

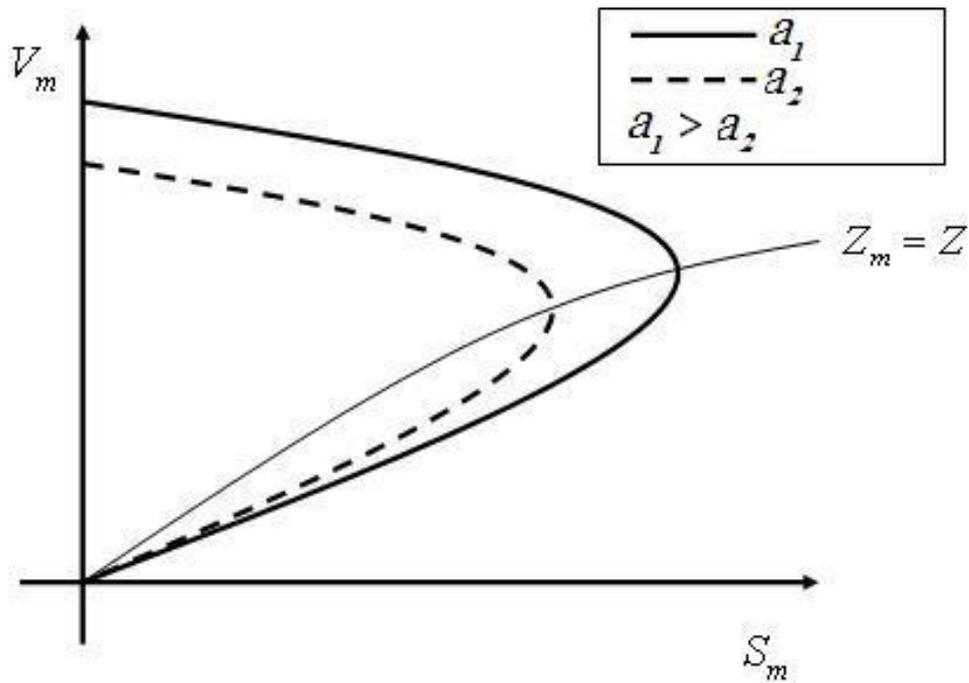


Figura 3.11: Curvas ϕ e Z Constante para Dois Valores de Tap com o Modelo Usual e com Fluxo da Barra k para a Barra m

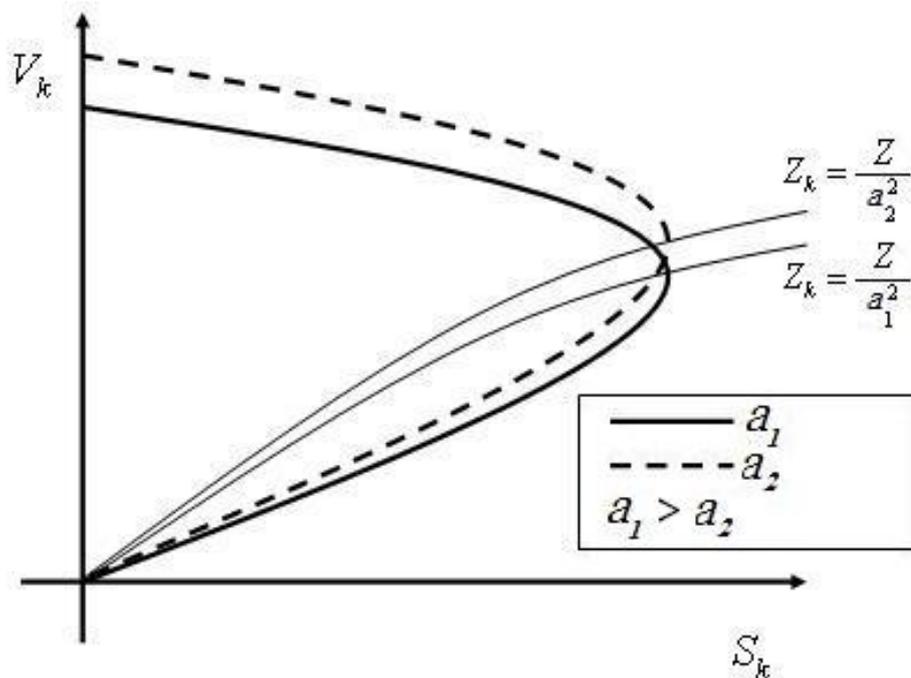


Figura 3.12: Curvas ϕ e Z Constantes para dois Valores de Tap com o Modelo Usual e com Fluxo da Barra m para a Barra k

É inesperado que o sentido do fluxo de potência tenha como consequência as diferenças citadas. Conjeturou-se que, tanto a impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento, quanto o ponto de máximo carregamento,

variariam com a modificação do *tap*, independente do sentido do fluxo de potência. Essa intuição foi comprovada através de ensaios em laboratório [13], apresentados na Seção 6.1, através dos quais verificou-se que, tanto o ponto de máximo carregamento, quanto a impedância equivalente da carga neste ponto, variam quando o *tap* é alterado, independente do sentido do fluxo de potência. Sendo assim, o modelo de transformador com *tap* variável utilizado mundialmente em programas de fluxo de potência apresenta resultados qualitativamente incorretos em estudos de estabilidade de tensão (como será mostrado neste trabalho).