

3

LTC – *Load Tap Change*

3.1

Introdução

Taps ou *tapes* (termo em português) de transformadores são recursos largamente utilizados na operação do sistema elétrico, sejam eles de transmissão, subtransmissão e distribuição. Sua função básica é alterar a relação de transformação dos equipamentos, permitindo que seja controlado o fluxo de energia reativa, controlando desta forma a tensão dos barramentos. São, portanto, recursos de otimização do fluxo de potência reativa, não gerando ou absorvendo esse tipo de potência. A maioria dos transformadores que dispõem de trocador de *tapes*, o faz em carga e são estes equipamentos que realmente apresentam alguma serventia no controle de tensão do sistema, já que trocar *tapes* com o desligamento do equipamento não costuma ser um recurso eficaz de controle. O dispositivo de mudança da relação de transformação com o equipamento em funcionamento é conhecido como *Load Tap Changer* (LTC) ou Trocador de *Tapes* em Carga (não há siglas em português, é adotada a mesma sigla do inglês).

3.2

Modelagem dos LTCs para Análises de Regime Permanente [8]

3.2.1

LTCs com Variação de *Tapes* no Primário

A modelagem dos LTCs é similar à modelagem π clássica das linhas de transmissão, mostrada na Figura 3.1.

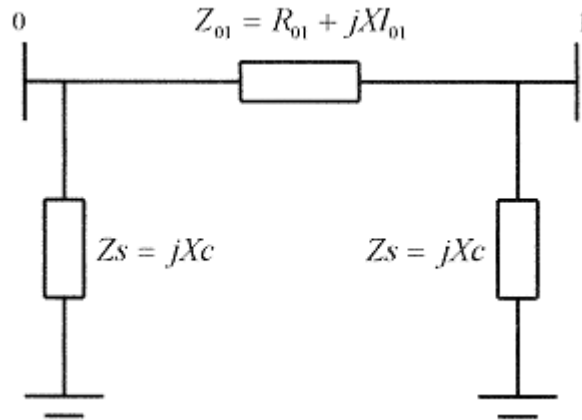


Figura 3.1 – Modelagem π clássica de linhas de transmissão

A Figura 3.2 ilustra a representação de um transformador com taps variáveis no seu primário. Basicamente, a modelagem é composta de uma admitância série Y_{01} em série com um transformador ideal.

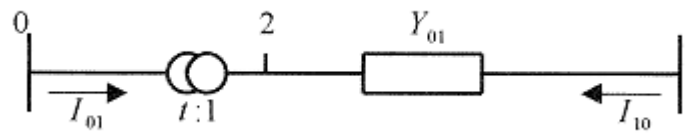


Figura 3.2 – Modelagem de LTCs com variação de taps no primário

A relação entre as magnitudes das tensões dos terminais 0 e 2 do transformador ideal é:

$$\frac{V_2}{V_0} = \frac{1}{t} \quad (3.1)$$

Sendo ideal o transformador, não há dissipação de potência ativa e reativa entre os nós 0 e 2, então:

$$V_0 I_{01} + V_2 I_{10} = 0 \quad (3.2)$$

$$V_0 I_{01} = -V_2 I_{10} \quad (3.3)$$

$$-\frac{I_{01}}{I_{10}} = \frac{V_2}{V_0} = \frac{1}{t} \quad (3.4)$$

De (3.4) é fato que I_{01} e I_{10} estão defasadas de 180° e suas magnitudes estão na razão 1:t.

A modelagem das admitâncias A, B e C é feita identificando as correntes I_{01} e I_{10} do modelo da Figura 3.2 com as correspondentes do modelo π equivalente, como o da Figura 3.3, onde:

$$I_{01} = (V_0 - V_1)A + V_0B = (A + B)V_0 - AV_1 \quad (3.5)$$

$$I_{10} = (V_1 - V_0)A + V_1C = (A + C)V_1 - AV_0 \quad (3.6)$$

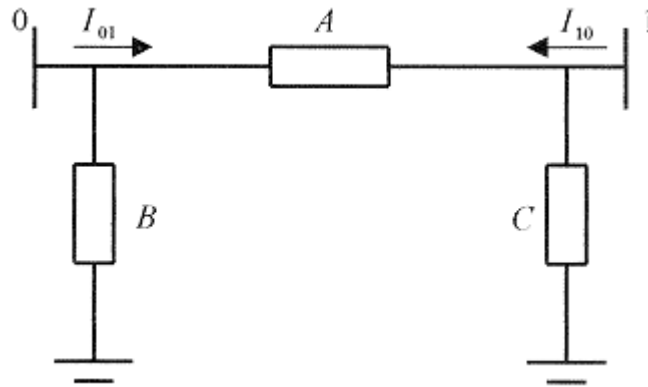


Figura 3.3 – Circuito π equivalente de um LTC

Da Figura 3.2:

$$I_{01} = (V_2 - V_1) \frac{1}{t} Y_{01} \quad (3.7)$$

$$I_{10} = (V_1 - V_2) Y_{01} \quad (3.8)$$

Aplicando (3.1) em (3.7):

$$I_{01} = \left(\frac{1}{t} V_0 - V_1 \right) \frac{1}{t} Y_{01} = \frac{Y_{01}}{t^2} V_0 - \frac{Y_{01}}{t} V_1 \quad (3.9)$$

Aplicando (3.1) em (3.8):

$$I_{10} = \left(V_1 - \frac{1}{t} V_0 \right) \frac{1}{t} Y_{01} = Y_{01} V_1 - \frac{Y_{01}}{t} V_0 \quad (3.10)$$

Aplicando (3.5) em (3.9):

$$(A+B)V_0 - AV_1 = \left(\frac{1}{t}V_0 - V_1 \right) \frac{1}{t}Y_{01} = \frac{Y_{01}}{t^2}V_0 - \frac{Y_{01}}{t}V_1 \quad (3.11)$$

Aplicando (3.6) em (3.10):

$$(A+C)V_1 - AV_0 = \left(V_1 - \frac{1}{t}V_0 \right) \frac{1}{t}Y_{01} = Y_{01}V_1 - \frac{Y_{01}}{t}V_0 \quad (3.12)$$

De (3.11) e (3.12):

$$A = \frac{Y_{01}}{t} \quad (3.13)$$

$$B = \frac{Y_{01}}{t^2} - \frac{Y_{01}}{t} = \frac{1}{t} \left(\frac{1}{t} - 1 \right) Y_{01} \quad (3.14)$$

$$C = \left(1 - \frac{1}{t} \right) Y_{01} \quad (3.15)$$

Através das equações (3.13), (3.14) e (3.15) pode ser feita a análise do efeito de transformação $t:1$ sobre as magnitudes das tensões V_0 e V_1 . Considerando inicialmente $t=1$, as admitâncias B e C são nulas e o circuito π equivalente fica reduzido à admitância série Y_{01} . Se for alterada a relação de transformação para um valor $t>1$, B terá sinal contrário a Y_{01} e será do tipo capacitivo, enquanto C será indutivo. Isto significa que V_1 tenderá a diminuir e V_0 a aumentar. Por outro lado, se $t<1$, ocorrerá o oposto e V_1 tenderá a aumentar e V_0 a diminuir. Se uma das barras tiver tensão regulada ou estiver eletricamente próxima a uma barra deste tipo, somente a outra barra sofrerá os efeitos das alterações na relação de transformação.

A Figura 3.4 mostra o circuito π equivalente com os parâmetros expressos em função da admitância e da relação de transformação.

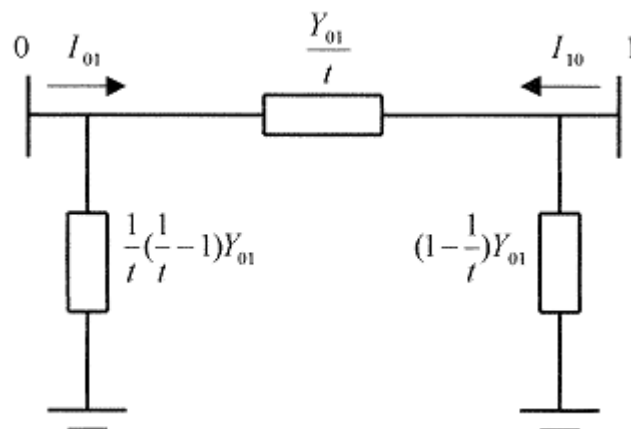


Figura 3.4 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da admitância e relação de transformação

A Figura 3.5 mostra o circuito π equivalente com os parâmetros expressos em função da impedância e da relação de transformação.

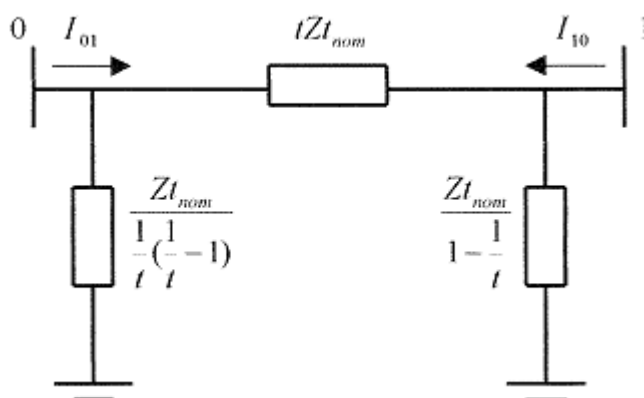


Figura 3.5 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da impedância e relação de transformação

3.2.2 LTCs com Variação de Tapes no Secundário

A Figura 3.2 ilustra a representação de um transformador com tapes variáveis no seu secundário. A única alteração em relação à modelagem do item 3.2.1 é a relação de transformação, neste caso 1:t.

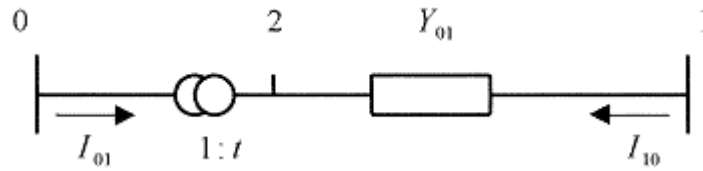


Figura 3.6 – Modelagem de LTCs com variação de tapes no secundário

A relação entre as magnitudes das tensões dos terminais 0 e 2 do transformador ideal é:

$$\frac{V_2}{V_0} = t \quad (3.16)$$

Sem dissipação de potência ativa e reativa entre os nós 0 e 2 e conforme (3.2) e (3.3):

$$-\frac{I_{01}}{I_{10}} = \frac{V_2}{V_0} = t \quad (3.17)$$

De (3.17) é fato que I_{01} e I_{10} estão defasadas de 180° e suas magnitudes estão na razão $t:1$.

Para este caso, os valores de I_{01} e I_{10} são os mesmos do caso do item 3.2.1, segundo (3.5) e (3.6).

Da Figura 3.6:

$$I_{01} = (V_2 - V_1)tY_{01} \quad (3.18)$$

$$I_{10} = (V_1 - V_2)Y_{01} \quad (3.19)$$

Aplicando (3.16) em (3.18):

$$I_{01} = (tV_0 - V_1)tY_{01} = Y_{01}t^2V_0 - Y_{01}tV_1 \quad (3.20)$$

Aplicando (3.16) em (3.19):

$$I_{10} = (V_1 - tV_0)tY_{01} = Y_{01}tV_1 - Y_{01}t^2V_0 \quad (3.21)$$

Aplicando (3.5) em (3.20):

$$(A+B)V_0 - AV_1 = \left(\frac{1}{t}V_0 - V_1 \right) \frac{1}{t}Y_{01} = Y_{01}t^2V_0 - Y_{01}tV_1 \quad (3.22)$$

Aplicando (3.6) em (3.21):

$$(A+C)V_1 - AV_0 = Y_{01}V_1 - Y_{01}tV_0 \quad (3.23)$$

De (3.22) e (3.23):

$$A = Y_{01}t \quad (3.24)$$

$$B = Y_{01}t^2 - Y_{01}t = t(t-1)Y_{01} \quad (3.25)$$

$$C = (1-t)Y_{01} \quad (3.26)$$

Através das equações (3.24), (3.25) e (3.26) pode ser feita análise similar a do item 3.2.1 do efeito de transformação 1:t sobre as magnitudes das tensões V_0 e V_1 . Considerando inicialmente $t=1$, as admitâncias B e C são nulas e o circuito π equivalente fica reduzido à admitância série Y_{01} . Se for alterada a relação de transformação para um valor $t < 1$, B terá sinal contrário a Y_{01} e será do tipo capacitivo, enquanto C será indutivo. Isto significa que V_1 tenderá a diminuir e V_0 a aumentar. Por outro lado, se $t > 1$, ocorrerá o oposto e V_1 tenderá a aumentar e V_0 a diminuir. Se uma das barras tiver tensão regulada ou estiver eletricamente próxima a uma barra deste tipo, somente a outra barra sofrerá os efeitos das alterações na relação de transformação.

A Figura 3.7 mostra o circuito π equivalente com os parâmetros expressos em função da admitância e da relação de transformação.

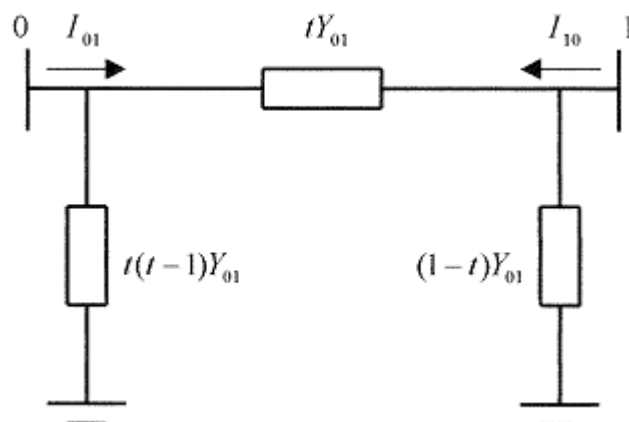


Figura 3.7 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da admitância e relação de transformação

A Figura 3.8 mostra o circuito π equivalente com os parâmetros expressos em função da impedância e da relação de transformação.

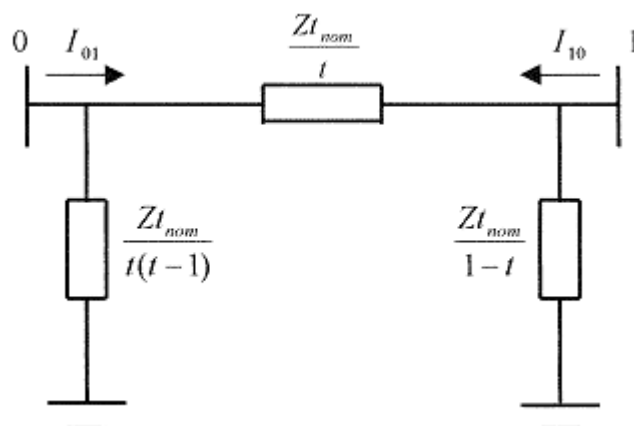


Figura 3.8 – Circuito π equivalente de um LTC com parâmetros expressos em função da impedância e relação de transformação

3.3

Modelagem de um LTC nos Programa de Fluxo de Carga [9]

Nas seções 3.2.1 e 3.2.2, foi verificada a relação entre o tape do LTC e a tensão controlada por ele. A tensão controlada pode ser de uma das barras onde o LTC está conectado (controle de tensão local) ou outra barra próxima (controle de tensão remoto). Como visto nestas seções, a ação de controle pode ter efeito oposto ao esperado e, então, o sistema pode ir ao colapso.

Nos programas atuais de fluxo de carga, o controle de tensão por LTC é feito fixando o valor desejado de tensão e calculando valor do tape necessário. Caso o valor do tape extrapole o valor inferior ou superior, ele é congelado no limite e a barra passa a ser considerada como uma barra de carga¹. Se houver convergência do algoritmo de Newton e se a lógica deste controle estiver embutida no sistema linearizado de equações, é possível verificar se o tape variou para o lado esperado ao variar o valor da tensão controlada. Entretanto, se a lógica do controle for externa, quando então está programada a relação usual entre a variação de tapes e a variação da tensão a ser controlada, só haverá meios de se alcançar o valor da tensão a ser controlada se o sistema estiver na região normal de operação. Por outro lado, se o sistema estiver na região anormal de operação, a relação entre a variação de tapes e a variação da tensão a ser controlada é oposta a usual, e não haverá meios de se alcançar o valor da tensão a ser controlada. Há duas possibilidades: ou o algoritmo não converge ou o tape atinge um limite e o algoritmo converge com outro valor da tensão controlada.

3.4 Representação dos Controles e Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão [7,9]

3.4.1 Índice Tape do LTC x Tensão da Barra Controlada Localmente

Este caso será estudado através do sistema de 3 barras mostrado na Figura 3.9, onde o tape do LTC entre as barras 0 e 1 controla a tensão na barra 1.

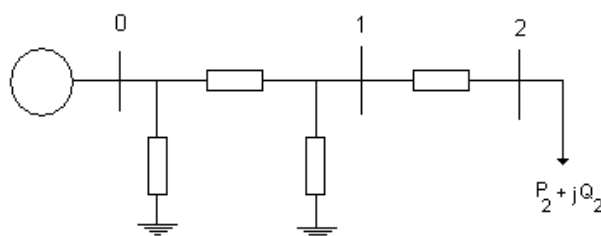


Figura 3.9 - Sistema de 3 Barras com LTC

¹ Barra onde são inserido os valores das potências ativa e reativa, carga ativa e reativa e os valores da tensão e ângulo são calculados pelo algoritmo de fluxo de potência

O sistema linearizado das equações de fluxo de carga, na estrutura atual da matriz Jacobiana, é mostrado em (3.27), onde a variável V_1 é considerada enquanto existir o controle do módulo da tensão na barra 1 através da equação (3.28).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \frac{\partial P_1}{\partial t_{01}} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & 0 \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial t_{01}} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta t_{01} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\Delta V_1 = V_1^{\text{esp}} - V_1^{\text{calc}} \quad (3.28)$$

Considerando $\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta Q_1 = \Delta Q_2 = 0$ e colocando ΔV_1 para baixo, conforme mostrado em (3.30), o sistema (3.27) pode ser reduzido para dimensão (1x1) (3.31), utilizando (3.29). A matriz reduzida $[D]'$ obtida é mostrada em (3.32).

$$[D]' = [C][A^{-1}][B] \quad (3.29)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & \\ & A & & & \\ & & B & & \\ & & & & \\ C & & D & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta t_{01} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$[\Delta V_1] = [D]' [\Delta t_{01}] \quad (3.31)$$

$$[D'] = \left[\left(\frac{\partial V_1}{\partial t_{01}} \right)' \right] \quad (3.32)$$

A matriz $[D']$ resultante desta redução é o índice que relaciona a tensão da barra 1 com o tape do LTC entre as barras 0 e 1, conforme (3.31).

No ponto de operação da Tabela 3.1 [7], é obtido:

$$[\Delta V_1] = [1,6490][\Delta t_{01}] \quad (3.33)$$

Tabela 3.1 - Ponto de operação com a barra controlada na região anormal de operação

t_{01}	1,0000
V_0	1,0000 pu
θ_0	0°
V_1	0,4885 pu
θ_1	$-34,973^\circ$
V_2	0,4636 pu
θ_2	$-37,602^\circ$
Z_{trafo}	$0,2 \angle 90^\circ$ pu
Z_{linha}	$0,01 \angle 70^\circ$ pu
P_2	-1,1400 pu
Q_2	-0,8083

Como o modelo de LTC usado no programa ANAREDE tem variação de tapes no lado primário e relação de transformação t:1 (quando o tape aumenta a tensão do secundário diminui) é trocado o sinal do índice, conforme mostrado em (3.34). Desta forma, sinal positivo indica ação de controle bem sucedida e sinal negativo, ação de controle mal sucedida.

$$\frac{\Delta V_1}{-\Delta t_{01}} = -[D'] \quad (3.34)$$

Logo,

$$\frac{\Delta V_1}{-\Delta t_{01}} = -1,6490 \quad (3.35)$$

Isto indica que a ação de controle tem efeito oposto ao esperado.

Repetindo o exercício numérico para o ponto de operação mostrado na Tabela 3.2 [7], é obtido (3.36) e (3.37), indicando que a ação de controle tem o efeito esperado:

$$[\Delta V_2] = [-4,1011] [\Delta t_{01}] \quad (3.36)$$

$$\frac{\Delta V_2}{-\Delta t_{01}} = [-D'] = 4,1011 \quad (3.37)$$

Tabela 3.2 - Ponto de operação com a barra controlada na região normal de operação

t_{01}	1,0000
V_0	1,0000 pu
θ_0	0^0
V_1	0,6618 pu
θ_1	$-25,028^0$
V_2	0,6433 pu
θ_2	$-26,423^0$
Z_{trafo}	$0,2 \angle 90^0$ pu
Z_{linha}	$0,01 \angle 70^0$ pu
P_2	-1,1400 pu
Q_2	-0,8083

3.4.2

Índice Tape do LTC x Tensão da Barra Controlada Remotamente

Para tal, será utilizado o mesmo sistema de três barras da Figura 3.9, com o tape do LTC entre as barras 0 e 1 controlando remotamente a tensão na barra 2. Este controle é representado no sistema linearizado com a substituição de (3.28) por (3.39), conforme mostrado em (3.38).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \frac{\partial P_1}{\partial t_{01}} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & 0 \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial t_{01}} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta t_{01} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$\Delta V_2 = V_2^{\text{esp}} - V_2^{\text{calc}} \quad (3.39)$$

Como no item 3.4.1, é desejado verificar somente as variações da tensão da barra controlada e as variações de t_{01} . Por isso, é feito inicialmente

$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta Q_1 = \Delta Q_2 = 0$. Utilizando (3.29), o sistema (3.38) é reduzido para dimensão (1x1), como mostrado em (3.40).

$$[\Delta V_2] = [D'] [\Delta t_{01}] \quad (3.40)$$

No ponto de operação da Tabela 3.1, são obtidas as equações (3.41) e (3.42), indicando que a ação de controle tem o efeito oposto ao esperado.

$$[\Delta V_2] = [1,7465] [\Delta t_{01}] \quad (3.41)$$

$$\frac{\Delta V_2}{-\Delta t_{01}} = [-D'] = -1,7465 \quad (3.42)$$

Repetindo o exercício numérico para o ponto de operação mostrado na Tabela 3.2 [7], são obtidas (3.43) e (3.44), indicando que a ação de controle tem o efeito esperado.

$$[\Delta V_2] = [-4,2251] [\Delta t_{01}] \quad (3.43)$$

$$\frac{\Delta V_2}{-\Delta t_{01}} = 4,2251 \quad (3.44)$$

3.5 Equações da Matriz Jacobiana

As equações (3.45), (3.46), (3.47) e (3.48) definem algumas das equações utilizadas para o Jacobiano do sistema de 3 barras, que podem ser adaptadas para outros circuitos.

$$P_1 = V_1 ((V_1 (B_{11} \sin(q_1 - q_1) + G_{11} \cos(q_1 - q_1))) + (V_2 (B_{12} \sin(q_1 - q_2) + G_{12} \cos(q_1 - q_2))) + \dots + (V_3 (B_{13} \sin(q_1 - q_3) + G_{13} \cos(q_1 - q_3)))) \quad (3.45)$$

$$Q_1 = V_1 ((V_1 (G_{11} \sin(q_1 - q_1) + B_{11} \cos(q_1 - q_1))) + (V_2 (G_{12} \sin(q_1 - q_2) + B_{12} \cos(q_1 - q_2))) + \dots + (V_3 (G_{13} \sin(q_1 - q_3) + B_{13} \cos(q_1 - q_3)))) \quad (3.46)$$

$$P_1 = \left(\frac{V_1^2}{t^2 Z_t} \right) \cos(at) - \left(\frac{V_1 V_0}{t Z_t} \right) \cos(q_1 - q_0 + at) \quad (3.47)$$

$$Q_1 = \left(\frac{V_1^2}{t^2 Z_t} \right) \sin(at) - \left(\frac{V_1 V_0}{t Z_t} \right) \sin(q_1 - q_0 + at) \quad (3.48)$$

3.6 Análise dos Resultados

Na seção 3.2 foi caracterizada, de forma teórica, a resposta normal do sistema para manobras de tapes de transformadores. Na região normal de operação, se o transformador tiver trocador de tapes no primário, quando o mesmo é movimentado produzindo uma relação de transformação maior do que a nominal, há um acréscimo da tensão primária e um decréscimo na secundária, caso nenhuma destas tensões seja controlada remotamente. No caso da diminuição da relação de transformação, ocorre o inverso. Como os programas de simulação utilizados neste trabalho só oferecem a opção de trocar tapes no primário, este foi o foco principal deste capítulo.