

6 Circuito Equivalente de Thévenin em Estabilidade de Tensão

O teorema de Thévenin estabelece que qualquer sistema elétrico linear, de determinada complexidade, pode ser representado, a partir de dois terminais a e b , por um sistema de 2 barras, composto por uma fonte de tensão em série com uma impedância, conforme mostrado na Figura 6.1. O comportamento deste circuito equivalente visto dos seus terminais a e b , é equivalente ao circuito original, tomando também a resposta entre os mesmos dois terminais.

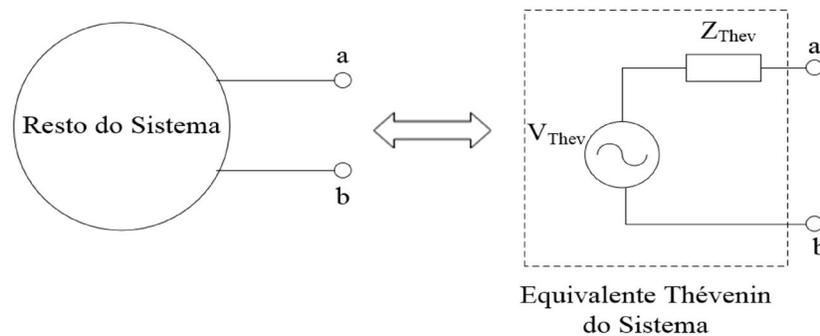


Figura 6.1 – Circuito Equivalente de Thévenin

Ao conjunto de componentes V_{Thev} e Z_{Thev} dá-se a designação de Equivalente de Thévenin, onde V_{Thev} é igual à tensão do circuito aberto medida entre a e b e Z_{Thev} é aquela vista entre a e b , com as fontes de tensão curto-circuitadas e as fontes de corrente abertas.

Este teorema funciona corretamente para sistemas lineares. Entretanto, nos sistemas elétricos de potência, o uso das equações de fluxo de carga é muito comum e elas são não lineares. Este teorema é usado no cálculo de correntes de curto-circuito. Nos últimos anos, há várias tentativas de aplicar este teorema à análise da estabilidade de tensão [7][8] [10] [12].

Na Seção 6.1 são estudados alguns dos métodos existentes para a obtenção do circuito equivalente de Thévenin. Na Seção 6.2 estes métodos são validados através de exemplos numéricos. Na Seção 6.3 eles são aplicados na análise da estabilidade de tensão.

6.1. Métodos para o Cálculo do Equivalente de Thévenin

6.1.1. Métodos Usando o Ponto de Operação em Estudo

6.1.1.1. Método 1 - Curto-Circuito [5][6]

Para encontrar o equivalente de Thévenin visto desde uma barra de carga, é usado o procedimento descrito no Capítulo 4 comumente empregado em análise de curto-circuito. O sistema é o resultado de duas combinações: uma sem considerar a corrente de carga I_k e outra considerando o efeito da corrente de carga, assemelhando-se, desta maneira, ao caso do estudo de curto-circuito.

Para encontrar V_{Thev} é executado um fluxo de potência considerando as potências ativa e reativa da barra em estudo iguais a zero para obter-se $V_{Thev} = V_{OC}$.

Para a formação da matriz de impedância de barra Z_{BUS} , são substituídos os geradores por uma fonte de tensão em série com sua reatância síncrona. Em estudos de curto-circuito é usual admitir que todos os geradores do sistema estão operando com uma tensão de 1.0 pu atrás de suas reatâncias internas, como já foi mencionado no Capítulo 4. Este ponto comum é usado como referência para a formação de dita matriz. Finalmente, a impedância do equivalente de Thévenin, vista desde a barra k em estudo, é $Z_{kk} \angle \beta_k$ da matriz de impedância de barra Z_{BUS} .

6.1.1.2.**Método 2 - Barras do Tipo PV e PQ Como Fontes de Tensão Constantes [5]**

Da mesma maneira ao que é feito no Método 1, é executado um fluxo de potência, considerando as potências ativa e reativa da barra em estudo iguais a zero, obtendo-se V_{Thev} .

Para uma determinada barra k em estudo, a impedância Z_{Thev} é igual ao elemento $Z_{kk} \angle \beta_k$ obtido da matriz Z_{BUS} . Para a formação da matriz Z_{BUS} , as barras do tipo PV e PQ são transformadas em fontes de tensão constantes. A justificativa é que o módulo da tensão nas barras PQ sofre pequenas variações em relação às tensões nominais, para mudanças em qualquer barra de carga em particular (a tensão em barras PV é constante, é claro).

6.1.1.3.**Método 3 - Linearização do Ponto de Operação [6]**

Em [6] é proposto que, para calcular o equivalente de Thévenin, sejam linearizadas as equações de fluxo de carga. Conhecendo-se o perfil de tensão e a potência de cada barra, representam-se as extrações e injeções de potência como elementos shunts, com exceção das injeções da barra *slack*.

Uma vez linearizado o sistema de equações, para obter a tensão de Thévenin é executado um fluxo de potência sem considerar o elemento shunt da barra em estudo e tomando as demais barras do sistema, com exceção da barra *slack*, como barras do tipo PQ (com $P=0$ e $Q=0$).

Em seguida, é montada a matriz de impedância de barra Z_{BUS} do sistema linearizado. Finalmente, Z_{Thev} é obtida como o elemento $Z_{kk} \angle \beta_k$ da matriz Z_{BUS} .

6.1.2.**Métodos Usando Medições dos Fasores de Tensão e Corrente****6.1.2.1.****Método 4 - Equacionamento do Circuito Equivalente de Thévenin [7] [8]**

Considerando que na Figura 6.1 o terminal a é a barra de carga k em estudo e o terminal b a referência de tensão ($V=0$), obtém-se a configuração do circuito equivalente para uma barra k monitorada mostrada na Figura 6.2.

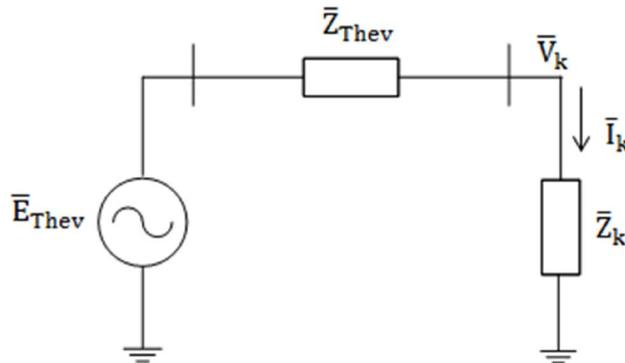


Figura 6.2 – Circuito Equivalente de Thévenin – Barra k Monitorada

onde, no instante de tempo t :

\bar{V}_k é o fasor de tensão na barra k ;

\bar{I}_k é a corrente equivalente na barra k ;

\bar{Z}_k é a impedância equivalente da carga;

\bar{E}_{Thev} é a tensão do circuito equivalente Thévenin;

\bar{Z}_{Thev} é a impedância equivalente Thévenin.

A impedância equivalente da carga é calculada como a razão entre os fasores de tensão e corrente.

$$\bar{Z}_k = \frac{\bar{V}_k}{\bar{I}_k} \quad (6.1)$$

Partindo do circuito da Figura 6.2, aplicando lei de Kirchhoff de tensões, tem-se:

$$\bar{E}_{Thev} = \bar{V}_k + \bar{Z}_{Thev}\bar{I}_k \quad (6.2)$$

Reescrevendo os parâmetros do circuito em números complexos, tem-se:

$$\bar{E}_{Thev} = E_{Thev}\angle\theta_{Thev} = E_{Thev,r} + jE_{Thev,i}$$

$$\bar{V}_k = V_k\angle\theta_{Ek} = V_{k,r} + jV_{k,i}$$

$$\bar{I}_k = I_k\angle\theta_{ik} = I_{k,r} + jI_{k,i}$$

$$\bar{Z}_{Thev} = Z_{Thev}\angle\theta_{ZThev} = R_{Thev,r} + jX_{Thev,i}$$

$$\bar{Z}_k = Z_k\angle\theta_{zk} = R_{k,r} + jX_{k,i}$$

Substituindo os fasores em (6.2) por números complexos, obtém-se:

$$(E_{Thev,r} + jE_{Thev,i}) = (V_{k,r} + jV_{k,i}) + (R_{Thev} + jX_{Thev})(I_{k,r} + jI_{k,i}) \quad (6.3)$$

Operando com (6.3), pode-se separar a parte real e imaginária da tensão na barra k:

$$V_{k,r} = E_{Thev,r} - I_{k,r}R_{Thev} + I_{k,i}X_{Thev} \quad (6.4)$$

$$V_{k,i} = E_{Thev,i} - I_{k,i}R_{Thev} - I_{k,r}X_{Thev} \quad (6.5)$$

Com (6.4) e (6.5) pode-se escrever a tensão na barra k em forma matricial [3]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k,r} & I_{k,i} \\ 0 & 1 & -I_{k,i} & -I_{k,r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k,r} \\ V_{k,i} \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

As equações (6.4) e (6.5) representam a parte real e imaginária da tensão na barra k no instante de tempo t . No entanto, há quatro incógnitas ($E_{Thev,r}$, $E_{Thev,i}$, R_{Thev} , X_{Thev}) com somente duas equações. Para resolver o sistema, fazem-se necessárias mais duas equações, as quais podem ser obtidas através de uma segunda medição no instante de tempo $t+1$.

É importante ressaltar que, para utilizar o sistema linear contendo as duas medições, é necessário considerar que os parâmetros do equivalente de Thévenin se mantêm constantes entre esses dois momentos. Dessa forma, (6.6) fica:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k1,r} & I_{k1,i} \\ 0 & 1 & -I_{k1,i} & -I_{k1,r} \\ 1 & 0 & -I_{k2,r} & I_{k2,i} \\ 0 & 1 & -I_{k2,i} & -I_{k2,r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Thev,r} \\ E_{Thev,i} \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k1,r} \\ V_{k1,i} \\ V_{k2,r} \\ V_{k2,i} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Trata-se de um sistema linear do tipo $Ax = B$, cuja solução é:

$$x = A^{-1}B \quad (6.8)$$

Dado que as medições podem estar afetadas por fenômenos transitórios, oscilações, ruído, entre outros, em [7] é proposto que para resolver (6.4) e (6.5) seja utilizada uma janela de n medições para tentar, mediante técnica de mínimos quadrados, eliminar os erros e encontrar os parâmetros do equivalente de Thévenin. Para o exercício numérico deste trabalho só serão usadas duas medições.

A solução do sistema matricial $Ax = B$ usando mínimos quadrados é:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (6.9)$$

6.1.2.2.

Método 5 – Algoritmo de Identificação Recursiva [9][10][11]

O objetivo é estimar os parâmetros do equivalente de Thévenin \bar{E}_{Thev} e \bar{Z}_{Thev} com base nos fasores de tensão e corrente \bar{V}_k e \bar{I}_k medidos na barra de carga k.

A partir do circuito da Figura 6.2, é obtido o diagrama fasorial mostrado na Figura 6.3, tomando como referência a corrente \bar{I}_k .

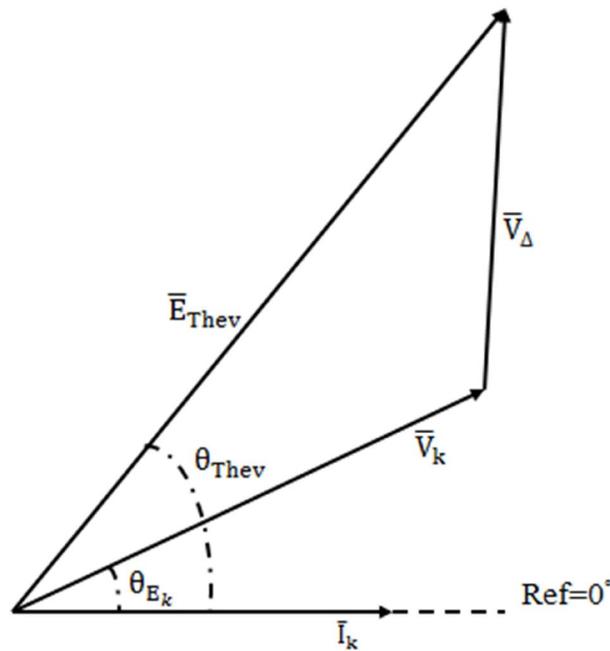


Figura 6.3 – Diagrama Fasorial do Circuito Equivalente de Thévenin

Do diagrama fasorial da Figura 6.3, as seguintes equações podem ser obtidas:

$$\bar{V}_\Delta = \bar{Z}_{Thev} \bar{I}_k = R_{Thev} I_k + jX_{Thev} I_k \tag{6.10}$$

$$\bar{E}_{Thev} = E_{Thev} \angle \theta_{Thev} = \bar{V}_k + \bar{V}_\Delta = V_k \angle \theta_{Ek} + \bar{V}_\Delta \tag{6.11}$$

Substituindo \bar{V}_Δ de (6.10) em (6.11) e separando as partes real e imaginária, tem-se:

$$\begin{aligned} E_{Thev} \cos \theta_{Thev} &= R_{Thev} I_k + V_k \cos \theta_{Ek} \\ E_{Thev} \sin \theta_{Thev} &= X_{Thev} I_k + V_k \sin \theta_{Ek} \end{aligned} \quad (6.12)$$

Em barras de EAT, normalmente, a reatância é muito maior que a resistência de Thévenin ($X_{Thev} \gg R_{Thev}$) e, então, é razoável assumir $R_{Thev} \approx 0$. Logo, uma estimativa para o ângulo θ_{Thev} é obtido de (6.12):

$$\theta_{Thev} = \cos^{-1} \left(\frac{V_k \cos \theta_{Ek}}{E_{Thev}} \right) \quad (6.13)$$

Em (6.13), V_k e θ_{Ek} são valores conhecidos. Então, para estimar o valor de θ_{Thev} , precisa-se atribuir um valor para E_{Thev} .

Do circuito equivalente de Thévenin (Figura 6.2), pode-se escrever E_{Thev} em função das impedâncias:

$$\bar{E}_{Thev} = \frac{\bar{V}_k (\bar{Z}_{Thev} + \bar{Z}_k)}{\bar{Z}_k} = \bar{V}_k \left(\frac{\bar{Z}_{Thev}}{\bar{Z}_k} + 1 \right) \quad (6.14)$$

Sabendo-se que em condições normais de operação $\bar{Z}_{Thev} \ll \bar{Z}_k$, é definido o valor de E_{Thev}^{min} . No ponto de máximo carregamento $|Z_k| = |Z_{Thev}|$ e é encontrado o valor de E_{Thev}^{max} .

$$E_{Thev}^{min} = V_k \quad (6.15)$$

$$E_{Thev}^{max} = V_k \sqrt{2(1 + \sin(\theta_{Ek}))} \quad (6.16)$$

Uma boa estimativa inicial da tensão E_{Thev} é a média aritmética dos valores extremos considerados:

$$E_{Thev}^0 = \frac{E_{Thev}^{min} + E_{Thev}^{max}}{2} \quad (6.17)$$

Conhecendo os valores estimados de E_{Thev} e θ_{Thev} calcula-se a reatância de Thévenin.

$$X_{Thev} = \frac{E_{Thev} \sin \theta_{Thev} - V_k \sin \theta_{Ek}}{I_k} \quad (6.18)$$

No exemplo numérico desenvolvido em [10], para testar os intervalos possíveis de E_{Thev} e X_{Thev} , foi provado que se E_{Thev} é superestimado, X_{Thev} também seria superestimada, e um decréscimo da impedância de carga é acompanhado por um decréscimo no valor estimado de X_{Thev} . No caso de uma subestimação de E_{Thev} , o valor de X_{Thev} também seria subestimado, e um decréscimo da impedância de carga é acompanhado por um acréscimo do valor estimado de X_{Thev} .

Em conclusão, quando as variações da impedância da carga e da impedância de Thévenin seguem a mesma direção, o valor de E_{Thev} é superestimado e deve ser reduzido e, em caso contrário, E_{Thev} é subestimado e deve ser aumentado.

Resultados simétricos são obtidos quando a impedância na carga é aumentada, isto é, quando as variações das impedâncias seguem a mesma direção, o valor de E_{Thev} deve ser aumentado e, em caso contrário, o valor de E_{Thev} deve ser reduzido.

Considerando que seja conhecido em que direção atualizar E_{Thev} , precisa-se estabelecer o valor dessa variação, a qual é calculada como:

$$\varepsilon_E = \min(\varepsilon_{inf}, \varepsilon_{sup}, \varepsilon_{lim}) \quad (6.19)$$

$$\text{onde } \varepsilon_{inf} = |E_{Thev}^{i-1} - V_k^i|, \varepsilon_{sup} = |E_{Thev}^{i-1} - E_{Thev}^{max}| \text{ e } \varepsilon_{lim} = |E_{Thev}^{i-1} \times k|.$$

O parâmetro k é um valor para garantir o equilíbrio entre rapidez e precisão e, como é indicado em [9] e [10], um valor adequado está no intervalo de 0,01% - 0,1% da E_{Thev} a ser atualizada.

Finalmente, é definido um procedimento para encontrar o valor correto de E_{The} e encontrar X_{Thev} .

Algoritmo de identificação X_{Thev}

Passo 1) Estimar os valores iniciais para E_{Thev}^0 e θ_{Thev}^0 com (6.17) e (6.13) respetivamente.

Passo 2) Calcular X_{Thev}^0 com (6.18).

Passo 3) Calcular E_{Thev}^i de acordo com:

Se $(Z_k^i - Z_k^{i-1}) < 0$ então,

$$\text{Se } (X_{Thev}^{i*} - X_{Thev}^{i-1}) < 0, \text{ então } E_{Thev}^i = E_{Thev}^{i-1} - \varepsilon_E$$

$$\text{Se } (X_{Thev}^{i*} - X_{Thev}^{i-1}) > 0, \text{ então } E_{Thev}^i = E_{Thev}^{i-1} + \varepsilon_E$$

$$\text{Se } (X_{Thev}^{i*} - X_{Thev}^{i-1}) = 0, \text{ então } E_{Thev}^i = E_{Thev}^{i-1}$$

Se $(Z_k^i - Z_k^{i-1}) > 0$ então,

$$\text{Se } (X_{Thev}^{i*} - X_{Thev}^{i-1}) < 0, \text{ então } E_{Thev}^i = E_{Thev}^{i-1} + \varepsilon_E$$

$$\text{Se } (X_{Thev}^{i*} - X_{Thev}^{i-1}) > 0, \text{ então } E_{Thev}^i = E_{Thev}^{i-1} - \varepsilon_E$$

$$\text{Se } (X_{Thev}^{i*} - X_{Thev}^{i-1}) = 0, \text{ então } E_{Thev}^i = E_{Thev}^{i-1}$$

Se $(Z_k^i - Z_k^{i-1}) = 0$ então,

$$E_{Thev}^i = E_{Thev}^{i-1}$$

Passo 4) Com E_{Thev}^i atualizada, calcular θ_{Thev}^i com (6.13) e posteriormente, calcular X_{Thev}^i com (6.18).

Passo 5) Incrementar o valor de i e voltar ao passo 3.

No algoritmo é usada a X_{Thev}^{i*} , esta corresponde a um passo intermediário, calculada usando os valores de V_k^i , I_k^i e θ_{Ek}^i atualizados, com a tensão E_{Thev}^{i-1} do passo anterior e θ_{Thev}^{i*} intermediário.

6.2.

Validação dos Métodos de Estimação dos Parâmetros do Equivalente de Thévenin

O objetivo é validar os circuitos equivalentes de Thévenin obtidos com cada um dos métodos mostrados na Seção 6.1. É usado o sistema-teste 3 barras apresentado na Seção 5.3.1 em dois cenários: carga leve e pesada.

Com o resultado do fluxo de potência das Tabelas 5.10 e 5.15 é calculado o equivalente de Thévenin visto desde a barra de carga 3 em estudo, como é apresentado na Figura 6.2. No caso dos Métodos 4 e 5 são realizadas pequenas perturbações na barra em análise ao redor do ponto de operação e com cada perturbação executado um novo fluxo de potência para obter os fasores de tensão e corrente.

Nas Tabelas 6.1 e 6.2 são apresentados os valores de V_{Thev} e Z_{Thev} obtidos em cada um dos métodos com carga leve e carga pesada, respectivamente. O procedimento de cálculo dos circuitos equivalentes de Thévenin é apresentado em detalhes no Apêndice A desta dissertação.

Tabela 6.1 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin - Carga Leve

	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)	angZth (°)
Método 1	0.986	-1.359	0.371	87.138
Método 2	0.986	-1.359	0.250	87.138
Método 3	0.986	-1.378	0.369	86.695
Método 4	0.986	-1.358	0.373	86.722
Método 5	0.984	-1.331	0.367	90.000

Tabela 6.2 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin - Carga Pesada

	Vth (pu)	angVth (°)	Zth (pu)	angZth (°)
Método 1	0.936	-6.599	0.371	87.138
Método 2	0.936	-6.599	0.250	87.138
Método 3	0.915	-9.438	0.359	84.262
Método 4	0.926	-5.334	0.390	89.930
Método 5	0.927	-5.267	0.392	90.000

Com os dados dos circuitos equivalente de Thévenin obtidos nas Tabelas 6.1 e 6.2 é calculada a tensão na barra de carga 3 e, posteriormente, o módulo desta é comparada com a obtida com o fluxo de potência, como é mostrado nas Tabelas 6.3 e 6.4. Na Tabela 6.4 os valores de tensão estão fora da faixa usual de operação e servem para fins ilustrativos somente.

Tabela 6.3 – Validação do Circuito Equivalente de Thévenin - Carga Leve

	Tensão obtida do Equivalente de Thévenin (pu)	Tensão obtida do Fluxo de Potência (pu)	Erro (%)
Método 1	0.9645	0.9641	0.0415
Método 2	0.9716	0.9641	0.7779
Método 3	0.9641	0.9641	0.0000
Método 4	0.9641	0.9641	0.0000
Método 5	0.9643	0.9641	0.0207

Tabela 6.4 – Validação do Circuito Equivalente de Thévenin - Carga Pesada

	Tensão obtida do Equivalente de Thévenin (pu)	Tensão obtida do Fluxo de Potência (pu)	Erro (%)
Método 1	0.5583	0.5420	2.9196
Método 2	0.6575	0.5420	17.5665
Método 3	0.5420	0.5420	0.0000
Método 4	0.5420	0.5420	0.000
Método 5	0.5419	0.5420	0.0185

Os resultados da Tabela 6.3 indicam que o erro obtido ao usar o circuito equivalente de Thévenin é inferior a 1% em todos os métodos, o que poderia ser aceitável. Entretanto, ao observar os resultados detalhadamente, os Métodos 3 e 4 são os que melhor conseguem representar o sistema. O Método 2 não é aceitável.

Já no caso de carga pesada, como é observado na Tabela 6.4, com os Métodos 1 e 2 obtém-se erros superiores ao 1%, não sendo uma boa alternativa para o cálculo do equivalente de Thévenin.

6.3. Circuito Equivalente de Thévenin na Avaliação da Estabilidade de Tensão

O acompanhamento do valor da impedância equivalente do circuito equivalente de Thévenin é um mecanismo para detectar a proximidade do máximo carregamento. É usado em muitos métodos para determinar quão próximo do ponto de máximo carregamento está operando o sistema [7][8][10][13].

No circuito equivalente de Thévenin, quando se tem carga leve, a impedância da carga é muito maior do que a impedância de Thévenin ($|\bar{Z}_k| \gg |\bar{Z}_{Thev}|$) e a tensão na barra de carga próxima ao valor da tensão de Thévenin. A medida que a carga vai aumentando (diminuição da \bar{Z}_k), a queda de tensão na \bar{Z}_{Thev} também aumenta provocando diminuição na tensão da barra de carga. Como foi mostrado no Capítulo 2, no ponto de máxima transferência de potência se cumpre que $|\bar{Z}_k| = |\bar{Z}_{Thev}|$. Após esse instante, mesmo tendo aumento da carga, a potência transferida e a tensão na barra de carga começam a diminuir e a tensão começa a diminuir e se cumpre que $|\bar{Z}_k| \ll |\bar{Z}_{Thev}|$.

Para detectar a proximidade do ponto de operação ao ponto de máximo carregamento, é monitorada a margem de impedância.

Se o ponto de operação em análise pertence à região normal de operação, a margem ($|\bar{Z}_k| - |\bar{Z}_{Thev}|$) representa quanto se pode diminuir na impedância da carga para alcançar o ponto de máximo carregamento, ou em termos de potência, quanta potência poderia ser adicionada para atingir o máximo.

$$M_Z = \left(1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_k|}\right) \text{ em pu. de } |\bar{Z}_k| \quad (6.20)$$

$$M_Z = \left(1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_k|} \right) \times 100\% \text{ em percentual de } |\bar{Z}_k| \quad (6.21)$$

Se o ponto de operação em análise pertence à região anormal de operação, a margem $(|\bar{Z}_k| - |\bar{Z}_{Thev}|)$ representa quanto se deve aumentar a impedância da carga para alcançar o ponto de máximo carregamento, ou em termos de potência, quanta potência deve ser diminuída para atingir o máximo.

$$M_Z = \left(\frac{|\bar{Z}_k|}{|\bar{Z}_{Thev}|} - 1 \right) \text{ em pu. de } |\bar{Z}_{Thev}| \quad (6.22)$$

$$M_Z = \left(\frac{|\bar{Z}_k|}{|\bar{Z}_{Thev}|} - 1 \right) \times 100\% \text{ em percentual de } |\bar{Z}_{Thev}| \quad (6.23)$$

No ponto de operação correspondente ao carregamento máximo, $|\bar{Z}_k| = |\bar{Z}_{Thev}|$, $(|\bar{Z}_k| - |\bar{Z}_{Thev}|)$ é nulo e, logo, não há nada a retirar ou adicionar para atingir o máximo.

É importante ressaltar que, para o cálculo do circuito equivalente de Thévenin, as barras de carga não terminais são estudadas como barras do tipo PQ com carga equivalente igual aos fluxos de potência que saem da barra e que, os fluxos chegando na barra fazem parte do resto do sistema a ser representado pelo equivalente de Thévenin, como é ilustrado na Figura 6.4.

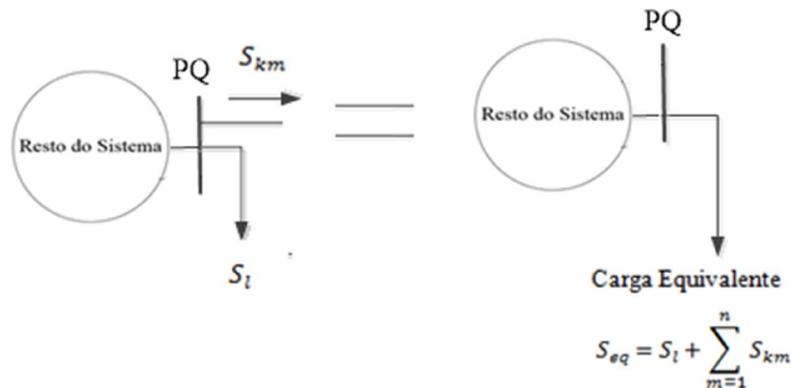


Figura 6.4 – Representação da Carga Equivalente em Barras Intermediárias

Assim, a impedância de carga Z_k usada no cálculo das margens em barras não terminais é dada por (6.24):

$$\bar{Z}_k = \frac{|\bar{V}_k|^2}{(\bar{S}_l + \sum_{m=1}^n \bar{S}_{km})^*} \quad (6.24)$$

E no caso de barras terminais está é calculada com (6.25):

$$\bar{Z}_k = \frac{|\bar{V}_k|^2}{(\bar{S}_l)^*} \quad (6.25)$$

Para verificar a possibilidade de usar o equivalente Thévenin na avaliação das condições de estabilidade de tensão, as margens de impedância, calculadas com (6.20) e (6.22) são comparadas com as margens de potência calculadas com (3.28) que usa o método da matriz $[D']$ considerando o sistema completo.

No caso das barras terminais, a margem de impedância e a margem de potência medem a variação do fluxo de potência correspondente à carga.

No caso das barras não terminais, a margem de impedância mede a variação da impedância da carga e do fluxo que sai da barra em análise, enquanto que a margem de potência mede a variação do fluxo de potência correspondente à carga. Com a finalidade de comparar estas margens, a partir de (6.20) e (6.22) é calculada uma nova margem de impedância, agora medindo a variação da impedância da carga, mantendo fixa, e dada, a impedância do fluxo que sai da barra em análise.

Transformando-se as impedâncias (6.20) em admitâncias, obtém-se:

$$M_Z = \left(\frac{|\bar{Y}_{Thev}| - |\bar{Y}_l + \bar{Y}_{km}|}{|\bar{Y}_{Thev}|} \right) \text{ em pu. de } |\bar{Y}_{Thev}| \quad (6.26)$$

Operando-se com (6.26) e chamando-se $M_{Zl} = \left(1 - \frac{\bar{Y}_l}{\bar{Y}_{Thev}} \right)$, tem-se:

$$M_{Zl} = \left(M_Z - \frac{|\bar{Y}_{km}|}{|\bar{Y}_{Thev}|} \right) \quad (6.27)$$

Onde,

$$|\bar{Y}_{km}| = |\bar{Y}_{Thev}|(1 - M_Z) - |\bar{Y}_l| \quad (6.28)$$

Ou de outra maneira,

se o ponto de operação em análise pertence à região normal de operação:

$$M_{Zl} = \left(1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_l|} \right) \text{ em pu. de } |\bar{Z}_l| \quad (6.29)$$

se o ponto de operação em análise pertence à região anormal de operação:

$$M_{Zl} = \left(\frac{|\bar{Z}_l|}{|\bar{Z}_{Thev}|} - 1 \right) \text{ em pu. de } |\bar{Z}_{Thev}| \quad (6.30)$$

6.3.1.

Avaliação da Barra Terminal do Sistema–Teste de 3 Barras

Na Seção 6.2 foi mostrado que os Métodos 3, 4 e 5 são os mais apropriados para a estimação dos parâmetros do circuito equivalente de Thévenin. Estes métodos serão usados para verificar a possibilidade do seu uso na avaliação das condições de segurança de tensão.

Com os dados dos circuitos equivalentes apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2 e usando (6.20) e (6.22) é calculada a margem. Em seguida, esta margem de impedância é comparada com a margem de potência, definida na Seção 3.5 obtida com o sistema completo, obtendo-se os resultados mostrados nas Tabelas 6.5 e 6.6.

Tabela 6.5 - Avaliação de Estabilidade de Tensão – Barra Terminal – Carga Leve

	M_S (%)	M_Z (%)
Método 3	94.541	95.564
Método 4	94.541	95.518
Método 5	94.541	95.586

Tabela 6.6 - Avaliação de Estabilidade de Tensão – Barra Terminal – Carga Pesada

	M_S (%)	M_Z (%)
Método 3	0.902	8.647
Método 4	0.902	0.738
Método 5	0.902	0.531

No caso da carga leve $|\bar{Z}_k| \gg |\bar{Z}_{Thev}|$ e, conseqüentemente, as margens obtidas usando os circuitos equivalentes de Thévenin mostradas na Tabela 6.5 ficam perto de 100% e similares às obtidas com o sistema completo. Poderia dizer-se que os equivalentes dos Métodos 3, 4 e 5 podem ser usados para avaliar as condições de segurança de tensão do sistema em análise.

No caso de carga pesada, com $|\bar{Z}_k| \approx |\bar{Z}_{Thev}|$, como é mostrado na Tabela 6.6, as margens obtidas com os circuitos equivalentes de Thévenin dos Métodos 4 e 5 e a do sistema completo são muito próximas de zero. Já a margem calculada pelo Método 3 é muito diferente. Logo, o uso desse método não é recomendável.

Baseados nos resultados das Tabelas 6.5 e 6.6, conclui-se que os Métodos 4 e 5 são os mais apropriados para avaliar as condições de estabilidade. O objetivo agora é avaliar seu uso em diferentes pontos de operação.

É usado o sistema-teste de 3 barras mostrado na Figura 5.2. Os dados de barra iniciais e os dados de linha são mostrados nas Tabelas 6.7 e 6.8. Para obter diferentes pontos de operação, aumentou-se a potência nas barras em determinadas proporções. Os casos estudados são mostrados na Tabela 6.9.

Para obter os pseudo-fasores de tensão e corrente, em cada ponto de operação são realizadas pequenas variações na barra em análise e executado um novo fluxo de potência com cada variação. Estas medições são armazenadas e simulam os dados medidos pelas PMUs, os quais são processados por cada um dos métodos para obter os parâmetros do circuito equivalente de Thévenin.

Com os dados dos circuitos equivalentes é calculada a margem. Em seguida, esta margem é comparada com a obtida com o método da matriz $[D']$ que considera o sistema completo.

Tabela 6.7 - Dados de Barra do Sistema-Teste 3 de Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga	
No.	Tipo	V (pu)	Θ (°)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	V Θ	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	10.000	5.000
3	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	10.000	5.000

Tabela 6.8 - Dados de Linha do Sistema-Teste 3 de Barras

De	Para	R(pu)	X(pu)
1	2	0.006	0.120
2	3	0.006	0.120

Tabela 6.9 – Casos Estudados no Sistema-Teste 3 de Barras

	CASOS	PONTOS DE OPERAÇÃO
Dividindo-se a R e X da linha 1-2 sobre 20	Caso 1	Aumentou-se a potência da carga da barra 3 em 40.2%
	Caso 2	Aumentou-se a potência da carga da barra 2 em 920%
Dividindo-se a R e X da linha 2-3 sobre 20	Caso 3	Aumentou-se a potência da carga da barra 3 em 40%
	Caso 4	Aumentou-se a potência da carga da barra 2 em 40.2%

Os resultados obtidos são mostrados na Figura 6.5.

A partir da Figura 6.5 pode-se dizer que o método da matriz $[D']$ e os métodos baseados no circuito equivalente de Thévenin fornecem os mesmos resultados no sistema teste de 3 barras quando são estudadas barras de carga terminais. Diferenças muito pequenas são observadas no Caso 4.

6.3.2.

Avaliação de Barra Não-Terminal do Sistema-Teste de 3 Barras

O objetivo é verificar a possibilidade de usar os equivalentes de Thévenin na avaliação das condições de estabilidade de tensão em barras de carga não terminais.

São considerados os casos de estudo da Tabela 6.9. São calculadas as margens de impedância com (6.20) e com (6.29). Os resultados obtidos são mostrados, respectivamente, nas Figuras 6.6 e 6.7.

Na Figura 6.6 são observadas diferenças significativas entre a margem M_S , obtida com o método que usa a matriz $[D']$ e a margem M_Z , calculada com (6.20). A partir dos resultados da Figura 6.6, poderia chegar-se a conclusões errôneas sobre a efetividade dos métodos baseados no circuito equivalente de Thévenin para avaliação das condições de estabilidade de tensão em barras de carga não terminais. As diferenças existem por que M_S é calculada considerando a potência da barra em análise, enquanto que no cálculo de M_Z é considerada a potência e o fluxo que sai da barra em análise. Desta maneira, pode-se concluir que a margem M_Z não pode ser comparada com a margem M_S .

Já no caso da Figura 6.7, diferenças muito pequenas são observadas entre M_S e M_{ZL} , pois as duas margens estão medindo a variação da potência na barra em análise e podem ser comparadas. A partir destes resultados, pode-se concluir que o método da matriz $[D']$ e os métodos baseados no circuito equivalente de Thévenin fornecem os mesmos resultados no sistema teste de 3 barras quando são estudadas barras de carga não terminais.

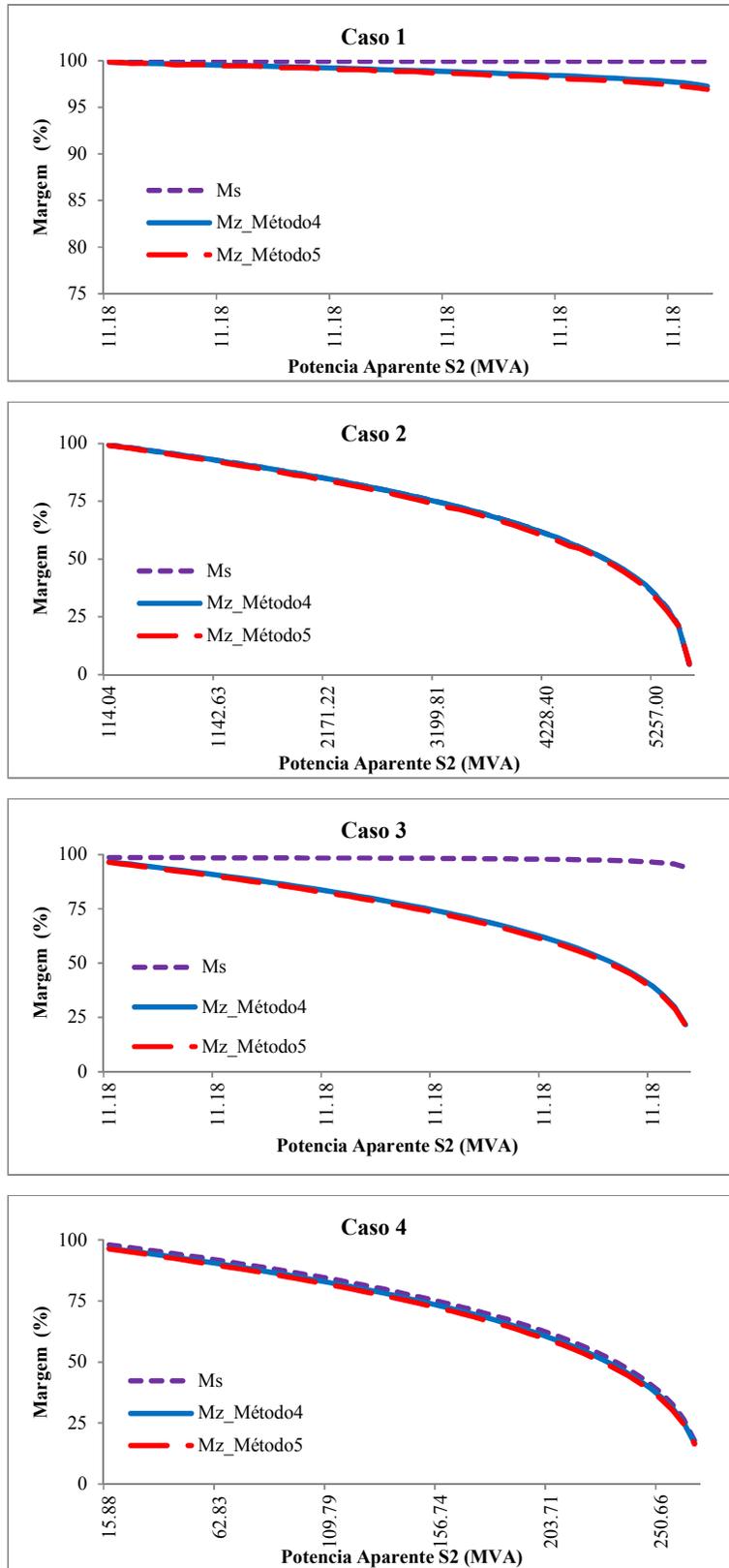


Figura 6.6 – Margem M_Z de Estabilidade de Tensão- Barra de Carga Não-Terminal

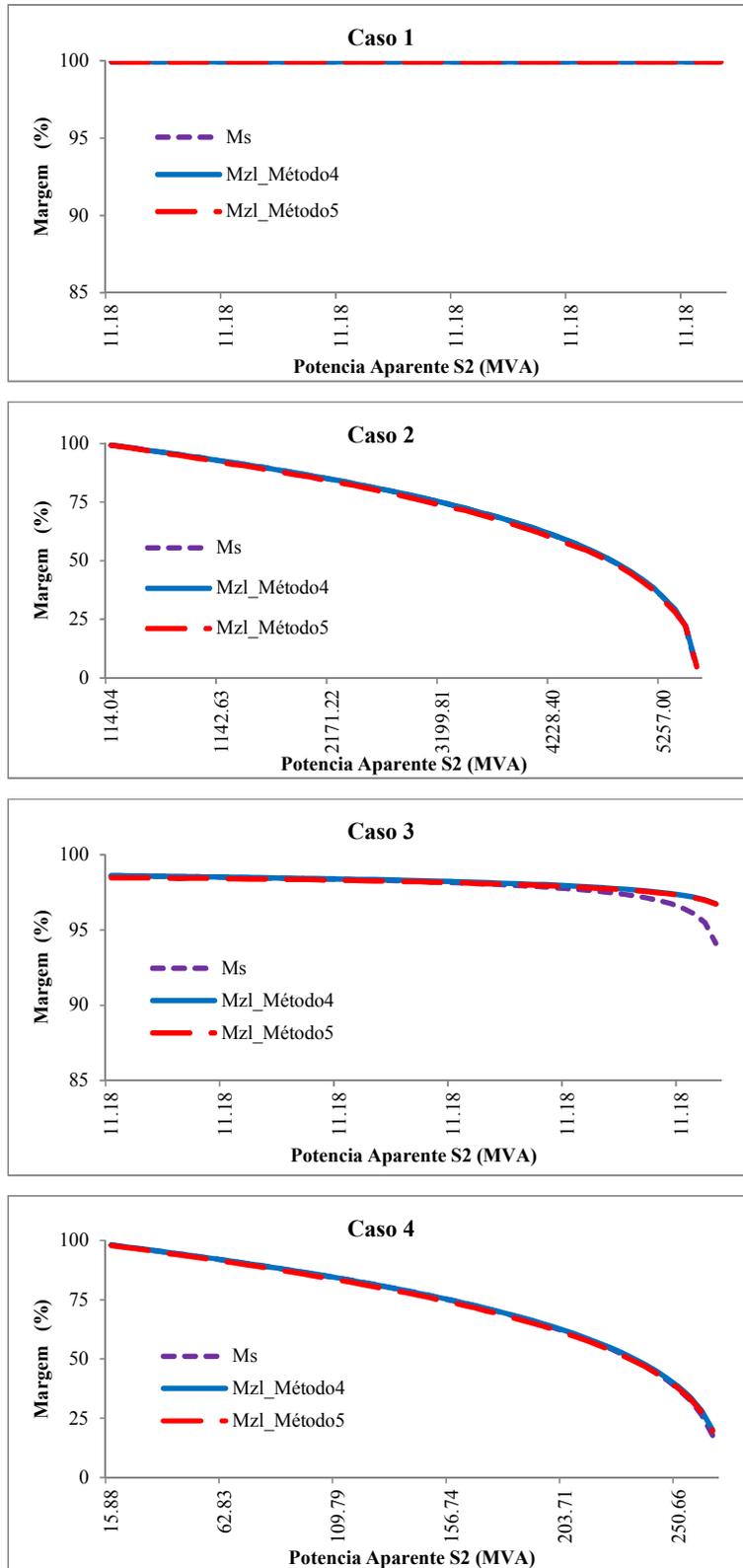
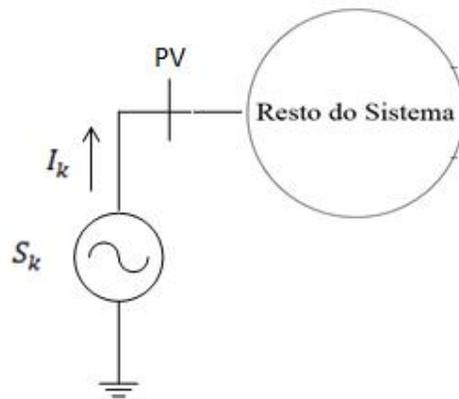


Figura 6.7 – Margem M_{ZI} de Estabilidade de Tensão - Barra de Carga Não Terminal

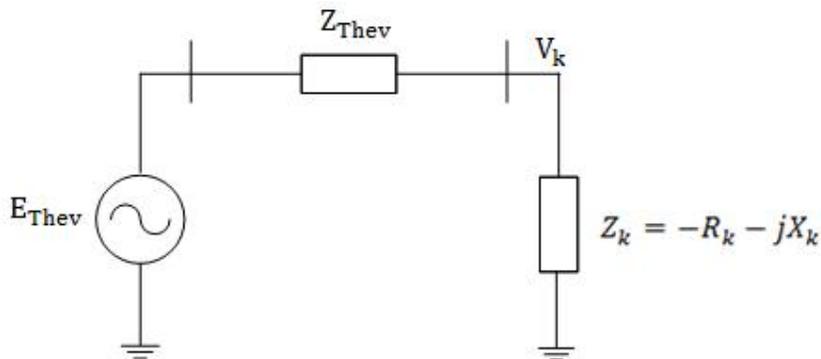
6.3.3. Avaliação de Barras de Tensão Controlada

Na Seção 6.3.2 foi mostrado que os Métodos 4 e 5 são apropriados para avaliar as condições de estabilidade de tensão em barras de carga terminais e não terminais no sistema teste de 3 barras. O objetivo é verificar a possibilidade de usar estes métodos para avaliar as condições de estabilidade de tensão em barras do tipo PV.

A barra é estudada como uma barra terminal com injeções de sinal oposto às injeções correspondentes a uma barra de carga e o resto do sistema é representado pelo equivalente de Thévenin, como mostrado na Figura 6.8 a. É obtido o circuito de Thévenin mostrado na Figura 6.8 b, onde a impedância de carga é negativa.



a) Sistema a ser Representado pelo Equivalente de Thévenin



b) Circuito Equivalente de Thévenin para a Barra de Geração

Figura 6.8 - Representação Equivalente Barra de Tensão Controlada

É usado o sistema-teste de 4 barras mostrado na Figura 5.4. Os dados de barra iniciais e os dados de linha são mostrados nas Tabelas 6.10 e 6.11.

Tabela 6.10 - Dados de Barra do Sistema-Teste de 4 Barras

Barra		Tensão		Geração		Carga	
No.	Tipo	V (pu)	Θ (°)	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	V Θ	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	PV	1.000	0.000	30.000	0.000	0.000	0.000
3	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	17.500	2.500
4	PQ	1.000	0.000	0.000	0.000	17.500	2.500

Tabela 6.11 - Dados de Linha do Sistema-Teste de 4 Barras

De	Para	X(pu)
1	3	0.500
2	3	0.500
2	4	0.500
3	4	0.500

Com a finalidade de observar o comportamento da impedância de Thévenin e as margens de estabilidade de tensão se consideram pontos de operação desde um carregamento leve até um carregamento pesado. Para obter diferentes pontos de operação, a partir dos dados iniciais aumentou-se a potência ativa e reativa nas barras de carga e a potência ativa na barra de geração.

Em cada ponto de operação são simulados os pseudo-fasores de tensão e corrente, para o qual são consideradas as duas modelagens apresentadas a seguir:

- **Modelagem 1: considerando a barra de tensão controlada como do tipo PV**

São realizadas pequenas variações da potência ativa e reativa nas barras de carga e potência ativa na barra geração e, para cada variação é executado um novo fluxo de potência.

- **Modelagem 2: considerando a barra de tensão controlada como do tipo PQ**

No problema de fluxo de carga a barra de tensão controlada sempre mantém a tensão constante. No entanto, no problema de estabilidade de tensão, a tensão controlada não é considerada constante, mas variável, já que é o que ocorre na prática, isto é, variável ao redor do valor especificado devido à variação da carga e à atuação do regulador de tensão.

Para simular estas variações de tensão, são tomados os resultados do fluxo de potência do ponto de operação a ser estudado e, posteriormente, para obter os pseudo-fasores de tensão e corrente, a barra passa do tipo PV para PQ. São, então, realizadas pequenas variações na potência ativa e reativa de todas as barras e, para cada variação, é executado um fluxo de potência.

Os pseudo-fasores são armazenados e posteriormente processados por cada um dos métodos para obter os parâmetros do circuito equivalente de Thévenin. Com os dados dos circuitos equivalentes é calculada a margem M_z . Em seguida, esta margem é comparada com a obtida com o método que usa a matriz $[D']$ que considera o sistema completo.

Na Figura 6.9, apresenta-se o perfil das impedâncias e na Figura 6.10 são apresentadas as margens obtidas para cada método com a modelagem da barra de geração como PV.

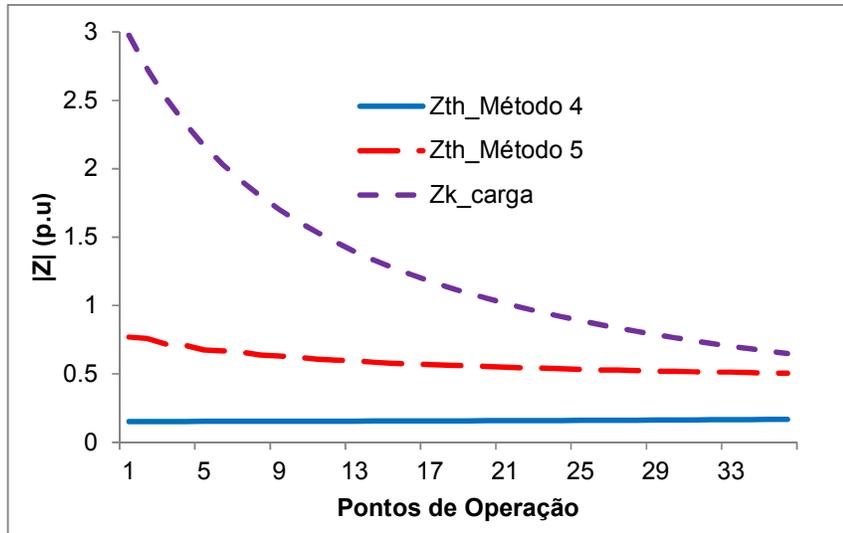


Figura 6.9 – Impedância de Carga e Impedâncias de Thévenin Estimadas - Modelagem 1 – Barra de Geração 2

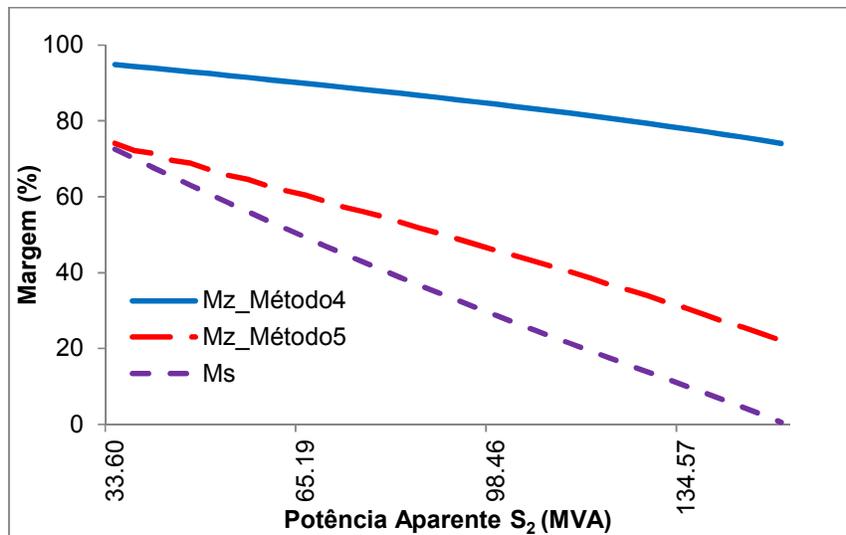


Figura 6.10 – Margens de Estabilidade de Tensão - Modelagem 1 – Barra de Geração 2

Nas Figuras 6.9 e 6.10 são evidenciadas grandes diferenças entre os métodos. Uma das causas é que no método com o sistema completo assume-se que a barra perdeu o controle de tensão e passa a ser do tipo PQ enquanto que nos Métodos 4 e 5 a barra é estudada como barra do tipo PV.

Pode-se concluir que, quando é considerada a modelagem da barra de geração como do tipo PV para obter os pseudo-fasores, os métodos baseados no circuito equivalente de Thévenin e o método da matriz $[D']$ fornecem resultados muito diferentes. Logo, não é recomendável seu uso na avaliação das condições de estabilidade de tensão em barras de geração.

Na Figura 6.11 e 6.12, apresenta-se o perfil das impedâncias e as margens obtidas para cada método com a modelagem da barra de geração como PQ.

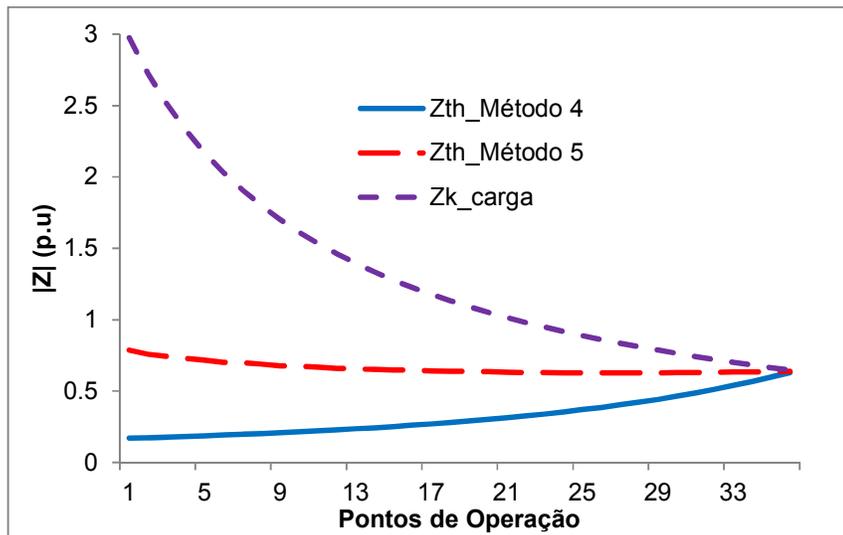


Figura 6.11 – Impedância de Carga e Impedâncias de Thévenin Estimadas - Modelagem 2 – Barra de Geração 2

Com esta modelagem, os resultados são comparáveis. Observa-se que em pontos de carregamento leve os módulos das impedâncias de Thévenin são diferentes e na medida em que o carregamento do sistema aumenta, elas se aproximam até chegar ao ponto de máximo carregamento, onde são iguais ao módulo da impedância de carga.

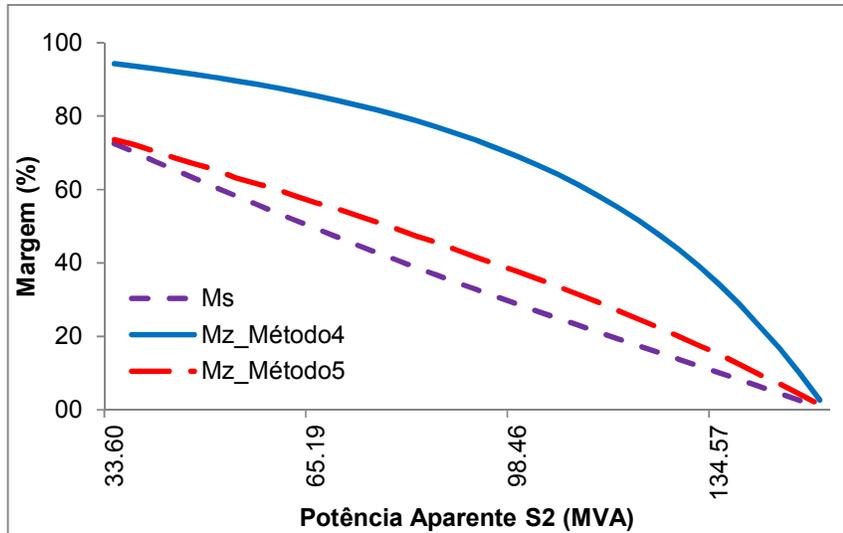


Figura 6.12 – Margens de Estabilidade de Tensão - Modelagem 2 – Barra de Geração 2

Observa-se que as margens do Método 5 são semelhantes às margens de potência obtidas para o sistema completo com o método da matriz $[D']$ e que estas diferem do Método 4, mas a tendência é a mesma em todos os métodos e, no ponto de máximo carregamento, são praticamente iguais.

Na Tabela 6.12, é observado que em carregamento leve e médio, as margens obtidas no Método 5 e o sistema completo são bem aproximadas e diferem muito do Método 4. Já no carregamento pesado, são observadas margens pequenas nos três métodos de cálculo.

Pode-se dizer que o método da matriz $[D']$ e o Método 5 fornecem resultados semelhantes quando os pseudo-fasores são obtidos considerando-se a barra de geração do tipo PQ. Já no caso do Método 4, os resultados são muito diferentes. Logo, não é recomendável seu uso para avaliação das condições de estabilidade de tensão em barras de geração.

Tabela 6.12 – Potência Aparente vs. Margem – Barra de Geração 2

	Barra 2		
	M_S	Método 4	Método 5
S_3 (MVA)		Margem (%)	
33.602	72.557	94.247	73.542
78.243	40.807	80.236	49.276
154.383	0.570	2.609	1.420

Em resumo, com a modelagem tomando a barra de geração como do tipo PQ, os resultados dos métodos comparáveis, enquanto que, com a modelagem como do tipo PV, isto não aconteceu.

A diferença entre as modelagens está nos equivalentes de Thévenin obtidos para cada ponto de operação, os quais são usados para calcular as margens de estabilidade de tensão.

A grandeza que tem maior influência no cálculo dos equivalentes de Thévenin é o módulo da tensão. Com a modelagem da barra de geração como do tipo PV, a tensão é constante e na modelagem da barra de geração como do tipo PQ, a tensão é variável.

Estas afirmações são baseadas nos resultados da análise de estabilidade de tensão, além da observação das grandezas usadas para o cálculo dos equivalentes.

Para explicar isto, é estudado um ponto de operação e, para obter os fasores de tensão e corrente, são realizadas pequenas variações sucessivas na potência ativa e reativa das barras de carga e potência ativa na barra de geração (quando é modelada como do tipo PV) e ativa e reativa (quando é modelada como do tipo PQ).

Nas Figuras 6.13 e 6.14 são mostrados os dados da tensão e potência reativa quando são consideradas as duas modelagens.

Quando a barra é considerada como do tipo PV, a tensão é constante e, para isto, há variações de potência reativa.

Na modelagem como do tipo PQ, são fixas as potências ativa e reativa em um ponto de operação. Para gerar os fasores, são realizadas pequenas variações ao redor do ponto de operação na potência ativa e reativa, e conseqüentemente, a tensão varia, como é mostrado na Figura 6.13, onde o eixo horizontal são as medições realizadas no ponto de operação em análise

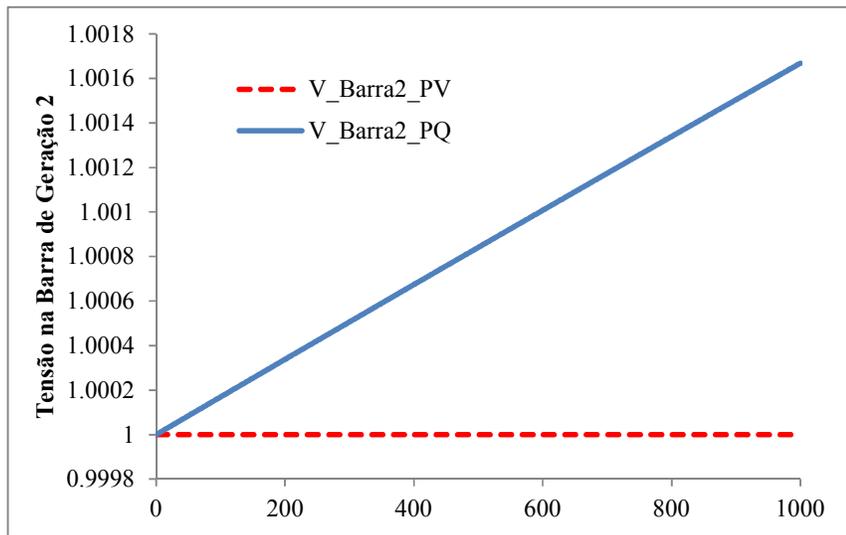


Figura 6.13 – Tensão na Barra de Geração 2

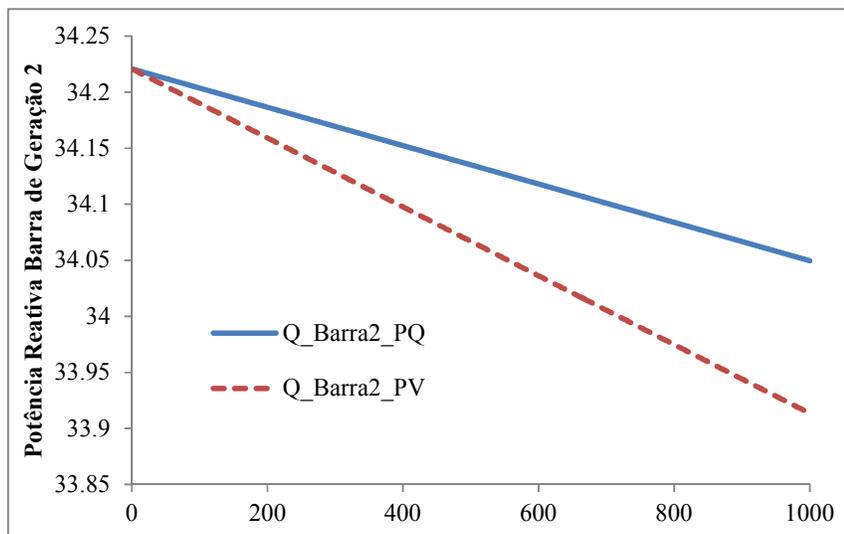


Figura 6.14 – Potência Reativa na Barra de Geração 2

6.4. Conclusões

Neste capítulo, inicialmente foram apresentados alguns métodos para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente de Thévenin visto desde certa barra do sistema em estudo.

Em seguida, usando o sistema-teste de 3 barras em dois cenários, carga leve e pesada, foram calculados os circuitos equivalentes de Thévenin com cada um dos métodos. Posteriormente, foram avaliados através da comparação entre o módulo da tensão obtido com a solução de um fluxo de potência com o sistema completo e com o circuito equivalente de Thévenin.

Através da análise realizada, foi encontrado que os Métodos 3, 4 e 5 conseguiram representar o sistema e são uma boa alternativa para o cálculo do equivalente de Thévenin. Já com os Métodos 1 e 2 foram obtidos erros, mostrando-se incapazes de representar o sistema.

Para verificar a possibilidade do seu uso na avaliação das condições de segurança de tensão do sistema estudado foram calculadas margens de impedância e estas foram comparadas com as margens de potência obtidas com o sistema completo. Foi observado que os equivalentes obtidos com os Métodos 4 e 5 são os mais apropriados para esse fim, considerando a barra em análise como barra de carga terminal.

Em seguida, usando os sistemas-teste de 3 e 4 barras foi verificada a possibilidade de usar estes métodos para avaliar as condições de estabilidade de tensão em diferentes tipos de barras.

Através de diferentes testes realizados, pode-se concluir que:

Quando são estudadas barras de carga terminais no sistema teste de 3 barras, o método da matriz $[D']$ e os métodos baseados no circuito equivalente de Thévenin fornecem resultados muito próximos.

- Quando são estudadas barras de carga não terminais, as margens de impedância podem ser calculadas de duas maneiras: i) medindo a variação da potência e fluxo que sai da barra (M_Z) e ii) medindo a variação da potência da barra (M_{Z1}).

Considerando que o método que usa a matriz $[D']$ no cálculo da margem mede a variação da potência na barra, não foi possível comparar essa margem com a obtida com i), enquanto que ao compará-la com a obtida com ii), encontrou-se que os métodos baseados no circuito equivalente de Thévenin e o método que usa a matriz $[D']$ fornecem os mesmos resultados no sistema teste de 3 barras e, portanto, podem ser usados para avaliar as condições de estabilidade de tensão em barra de carga não terminais.

- No caso das barras de geração, foram estudadas duas modelagens para o cálculo dos pseudo-fasores: i) barra de geração do tipo PV e ii) do tipo PQ.

Com a modelagem i) os resultados obtidos com os métodos baseados no circuito equivalente de Thévenin e o método que usa a matriz $[D']$ foram bem diferentes. Na modelagem ii), o resultados obtidos com o Método 5 foram semelhantes aos obtidos com o método que usa a matriz $[D']$. No caso do Método 4, isto não aconteceu.

Conclui-se que para avaliar as condições de estabilidade de tensão na barra de geração do sistema teste de 4 barras, só pode ser usado o Método 5 e com a modelagem da barra de geração como do tipo PQ.