

## 2

### **Demonstração e Visualização dos Mecanismos Causadores da Instabilidade de Tensão**

#### 2.1

##### **Introdução**

Esta seção tem como objetivo demonstrar a ocorrência de estados de instabilidade de tensão associados com a ausência de solubilidade e a perda de controlabilidade. A ocorrência dos dois mecanismos causadores da instabilidade de tensão será demonstrada usando-se um sistema de duas barras. Os resultados obtidos com o sistema de duas barras são organizados da seguinte forma:

- i) Seção 2.2: demonstra-se a ocorrência de estados instáveis associados com a perda de controlabilidade;
- ii) Seção 2.3: mostra-se qualitativamente a ocorrência de estados de perda de controlabilidade usando curvas de nível das cargas ativa e reativa na barra 2;
- iii) Seção 2.4: apresenta-se uma visualização dos dois mecanismos de instabilidade de tensão através da curva PV;
- iv) Seção 2.5: mostra-se como problemas de instabilidade de tensão podem se manifestar na faixa de operação normal das tensões.

#### 2.2

##### **Instabilidade de Tensão Causada pela Ausência de Solubilidade**

O sistema de duas barras mostrado na Figura 2.1 será usado para demonstrar a ocorrência de problemas de instabilidade de tensão causados pela ausência de solubilidade. O limite de carregamento para o sistema da Figura 2.1 pode ser obtido através da solução do seguinte problema de otimização:

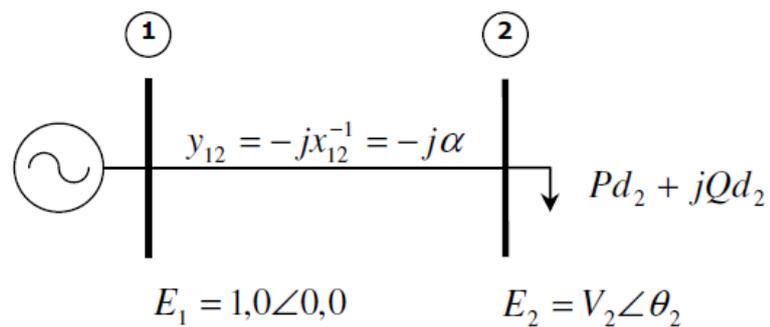


Figura 2.1 – Diagrama unifilar do sistema de duas barras

$$\text{Maximizar } Pd_2^2 + Qd_2^2 \quad (2.1)$$

sujeito a:

$$P_2(\theta_2, V_2) + Pd_2 = 0 \quad (2.2)$$

$$Q_2(\theta_2, V_2) + Qd_2 = 0 \quad (2.3)$$

onde:

$$P_2(\theta_2, V_2) = \alpha V_2 \text{sen}(\theta_2);$$

$$Q_2(\theta_2, V_2) = -\alpha V_2 \text{cos}(\theta_2) + \alpha V_2^2.$$

A função Lagrangeano para o problema (2.1)-(2.3) é:

$$L = Pd_2^2 + Qd_2^2 - \lambda_1 [P_2(\theta_2, V_2) + Pd_2] - \lambda_2 [Q_2(\theta_2, V_2) + Qd_2]$$

As condições de optimalidade para o problema (2.1)-(2.3) são:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = 0 \Rightarrow \lambda_1 \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} + \lambda_2 \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial V_2} = 0 \Rightarrow \lambda_1 \frac{\partial P_2}{\partial V_2} + \lambda_2 \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P d_2} = 0 \Rightarrow \lambda_1 = 2 P d_2 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q d_2} = 0 \Rightarrow \lambda_2 = 2 Q d_2 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = 0 \Rightarrow P_2(\theta_2, V_2) + P d_2 = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = 0 \Rightarrow Q_2(\theta_2, V_2) + Q d_2 = 0 \quad (2.9)$$

Escrevendo-se (2.4)-(2.7) em notação matricial:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} P d_2 \\ Q d_2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Substituindo-se (2.11) em (2.10):

$$\begin{bmatrix} J^T \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P d_2 \\ Q d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

onde:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{bmatrix} \text{ é matriz Jacobiana das equações de fluxo de carga.}$$

A solução trivial de (2.12) é  $[0 \ 0]^T$ . Embora este ponto satisfaça as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), ele não é um máximo da função  $Pd_2^2 + Qd_2^2$ . Consequentemente, a única alternativa para satisfazer a condição (2.12) é considerar que a matriz  $J^T$  é singular, pois para este tipo de matriz  $J^T x = 0$ , para qualquer  $x$ . Assumindo-se que  $J^T$  é singular, tem-se que  $\det[J^T] = 0$ , ou seja:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow \begin{vmatrix} \alpha V_2 \cos \theta_2 & \alpha V_2 \sin(\theta_2) \\ \alpha \sin(\theta_2) & -\alpha \cos \theta_2 + 2\alpha V_2 \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow V_2 \cos \theta_2 = 0,5 \quad (2.13)$$

Substituindo-se (2.13) em (2.8) e (2.9) (equações de balanço de potência ativa e reativa), resulta em:

$$Qd_2 = 0,5\alpha - \alpha V_2^2 \quad (2.14)$$

$$Pd_2^2 = \alpha^2 V_2^2 - 0,25\alpha^2 \quad (2.15)$$

Explicitando-se  $V_2^2$  em (2.14) e substituindo-se a expressão resultante em (2.15), resulta em:

$$Pd_2^2 + \alpha Qd_2 - 0,25\alpha^2 = 0 \quad (2.16)$$

A equação (2.16) define a máxima carga que pode ser conectada a barra 2. Em outras palavras, (2.16) define a fronteira de solubilidade para as equações de fluxo de potência. Além disso, pode-se observar que, para um dado fator de potência, (2.16) define os valores máximos de  $Pd_2$  e  $Qd_2$ . Por exemplo, considerando-se que  $\text{tg } \varphi = Qd_2/Pd_2 = 0,5$  e  $\alpha = 1/x_{12} = 10$ , tem-se:

$$Pd_2^2 + 10(0,5)Pd_2 - 0,25(100) = 0$$

$$Pd_2^2 + 5Pd_2 - 25 = 0$$

$$Pd_2 = \frac{-5 \pm \sqrt{125}}{2} \text{ e } Qd_2 = \frac{-5 \pm \sqrt{125}}{4}$$

Visto que valores negativos de  $Pd_2$  e  $Qd_2$  representam geração de potência na barra 2, tem-se que:

$$Pd_2 = (-5 + \sqrt{125})/2 \text{ e } Qd_2 = (-5 + \sqrt{125})/4$$

O gráfico de (2.16), para  $\alpha=10$  pu, é apresentado na Figura 2.2. Nesta figura, também são mostradas as seguintes informações:

- i) pontos  $(Pd_2, Qd_2)$  da Tabela 2.1;
- ii) lugar geométrico para fator de potência constante associado com a restrição  $Qd_2 = 0,5 Pd_2$ ;
- iii) região onde as equações de fluxo de potência são solúveis (área de cor verde);
- iv) região onde as equações de fluxo de potência são insolúveis (área de cor castanho claro).

A partir da Figura 2.2, pode-se concluir que:

- i) as equações de fluxo de potência têm solução real para os pontos A, B e C, pois estes estão localizados dentro da região solúvel;
- ii) as equações de fluxo de potência, não possuem solução real para o ponto D, pois este ponto está localizado na região insolúvel.

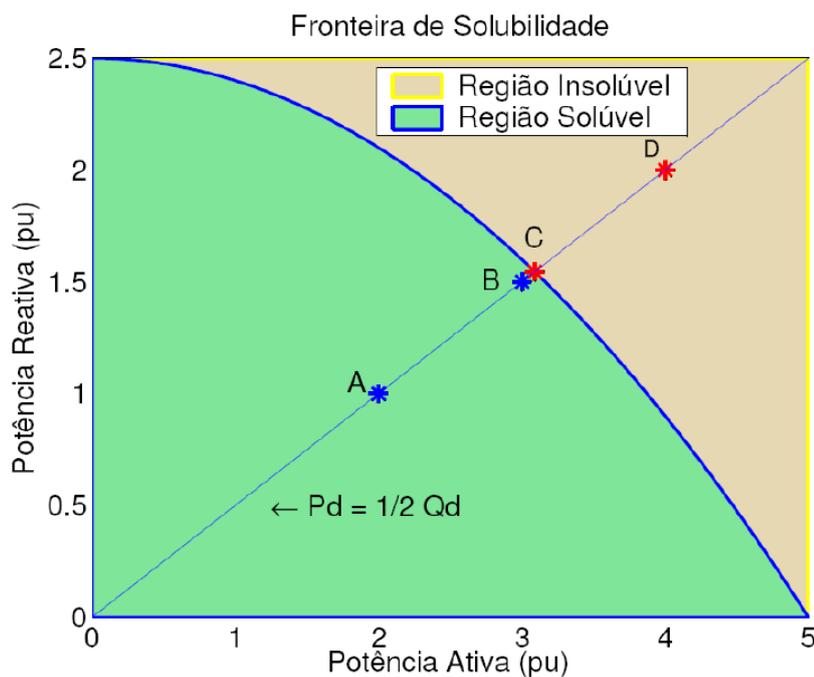


Figura 2.2 – Fronteira de solubilidade para o sistema de duas barras

Tabela 2.1 – Valores de  $P_{d_2}$  e  $Q_{d_2}$  para  $tg\varphi = 0,5$

Ponto	$P_{d_2}$ (pu)	$Q_{d_2}$ (pu)
A	2,0	1,0
B	3,0	1,5
C	$(-5 + \sqrt{125})/2$	$(-5 + \sqrt{125})/4$
D	4,0	2,0

As soluções de (2.2) e (2.3), para os níveis de carga mostrados na Tabela 2.1, podem ser obtidas através dos seguintes procedimentos algébricos [Alves, 2000], [Barbosa, 2006]:

i) Dividindo-se membro a membro (2.2) e (2.3), pode-se expressar  $\theta_2$  da forma:

$$\frac{\text{sen}\theta_2}{\text{cos}\theta_2} = -\frac{P_{d_2}}{Q_{d_2} + \alpha V_2^2}$$

$$\operatorname{tg}\theta_2 = -\frac{Pd_2}{Qd_2 + \alpha V_2^2}$$

$$\theta_2 = \operatorname{tg}^{-1}\left[\frac{-Pd_2}{Qd_2 + \alpha V_2^2}\right] \quad (2.17)$$

ii) Elevando-se ambos os membros de (2.2) e (2.3) ao quadrado:

$$Pd_2^2 = \alpha^2 V_2^2 \operatorname{sen}^2 \theta_2 \quad (2.18)$$

$$(Qd_2^2 + \alpha V_2^2)^2 = \alpha^2 V_2^2 \cos^2 \theta_2 \quad (2.19)$$

iii) Somando-se membro a membro (2.18) e (2.19):

$$Pd_2^2 + (Qd_2 + \alpha V_2^2)^2 = \alpha^2 V_2^2$$

$$\alpha^2 V_2^4 + (2\alpha Qd_2 - \alpha^2)V_2^2 + (Pd_2^2 + Qd_2^2) = 0 \quad (2.20)$$

iv) Finalmente, calcula-se  $V_2$  a partir da solução da equação biquadrática (2.20), ou seja:

$$V_2 = \sqrt{\frac{(\alpha^2 - 2\alpha Qd_2) \pm \sqrt{(2\alpha Qd_2 - \alpha^2)^2 - 4\alpha^2(Pd_2^2 + Qd_2^2)}}{2\alpha^2}} \quad (2.21)$$

A partir de (2.21), pode-se observar que para cada ponto  $(Pd_2, Qd_2)$  existe uma solução com tensão baixa e uma solução com tensão alta. Estes níveis de tensão estão associados com os sinais  $-$  e  $+$  em (2.21), respectivamente. Os valores numéricos das soluções associadas com os níveis de carga da Tabela 2.1 são mostrados na Tabela 2.2 para  $\alpha = 10.0$ . Nesta Tabela,  $V_2^H$  ( $V_2^L$ ) e  $\theta_2^H$  ( $\theta_2^L$ ) são o módulo e a fase, respectivamente, da solução com tensão alta (baixa).

Tabela 2.2 – Solução do fluxo de potência para as cargas da Tabela 2.1

$Pd_2$ (pu)	$Qd_2$ (pu)	$V_2^H$ (pu)	$\theta_2^H$ (rad)	$V_2^L$ (pu)	$\theta_2^L$ (rad)
2,0	1,0	0,8854	-0,2360	0,2614	-0,8711
3,0	1,5	0,6708	-0,4636	0,5000	-0,6435
$(-5 + \sqrt{125})/2$	$(-5 + \sqrt{125})/4$	0,5878	-0,5536	0,5878	-0,5536
4,0	2,0	$0,6112+j0,2713$	$-0,5536+j0,2815$	$0,6112-j0,2713$	$-0,5536-j0,2815$

A partir da Tabela 2.2, pode-se observar que a solução das equações de fluxo de carga para pontos fora da região solúvel é complexa, ou seja, não possui significado físico, já que  $V_2$  foi definido como um valor real. Os gráficos das curvas de valor de contorno de  $Pd_2$  e  $Qd_2$ , para as potências da Tabela 2.1 no plano  $V_2\theta_2$  são mostrados nas Figuras de 2.3-2.6. Nestes gráficos, são também mostradas as direções dos gradientes de  $P_2(V_2, \theta_2)$  e  $Q_2(V_2, \theta_2)$ .

A partir das Figuras 2.3-2.6 pode-se concluir que:

- i) para níveis de carga menores que o limite de máximo carregamento, as curvas de  $Pd_2$  e  $Qd_2$  se interceptam em dois pontos: as soluções com tensão alta e baixa;
- ii) as soluções das equações de fluxo de potência se aproximam quando a carga na barra 2 é aumentada;
- iii) no ponto de máximo carregamento as soluções convergem para um único ponto, ou seja, no ponto de máximo carregamento a solução das equações de fluxo de potência é única;
- iv) para níveis de carga maiores que o limite de máximo carregamento, as curvas de  $Pd_2$  e  $Qd_2$  não se interceptam em nenhum ponto, ou seja, não há solução real para as equações de fluxo de potência;
- v) os gradientes de  $P_2$  e  $Q_2$  tendem a se alinhar quando a carga do sistema é aumentada;
- vi) no ponto de máximo carregamento, os gradientes de  $P_2$  e  $Q_2$  são colineares, ou seja,  $\nabla P_2$  e  $\nabla Q_2$  são linearmente dependentes. Este resultado foi demonstrado analiticamente em (2.12).

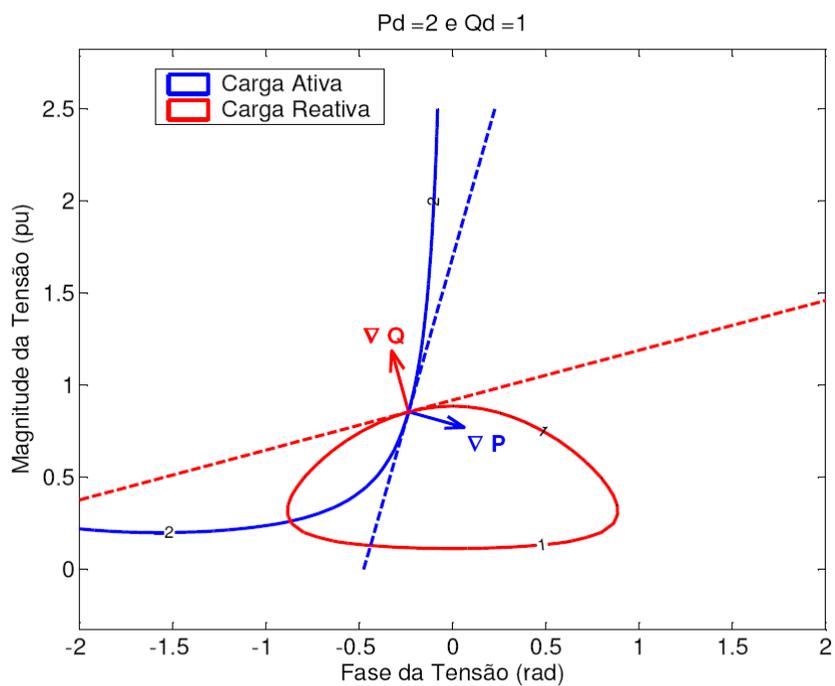


Figura 2.3 – Contornos de  $P_{d2}$  e  $Q_{d2}$  no ponto A

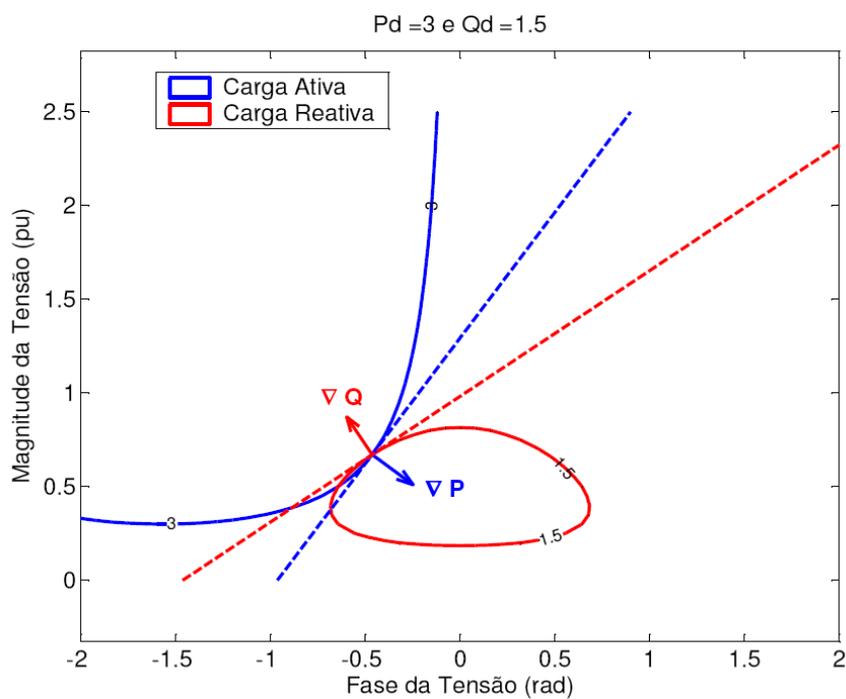


Figura 2.4 – Contornos de  $P_{d2}$  e  $Q_{d2}$  no ponto B

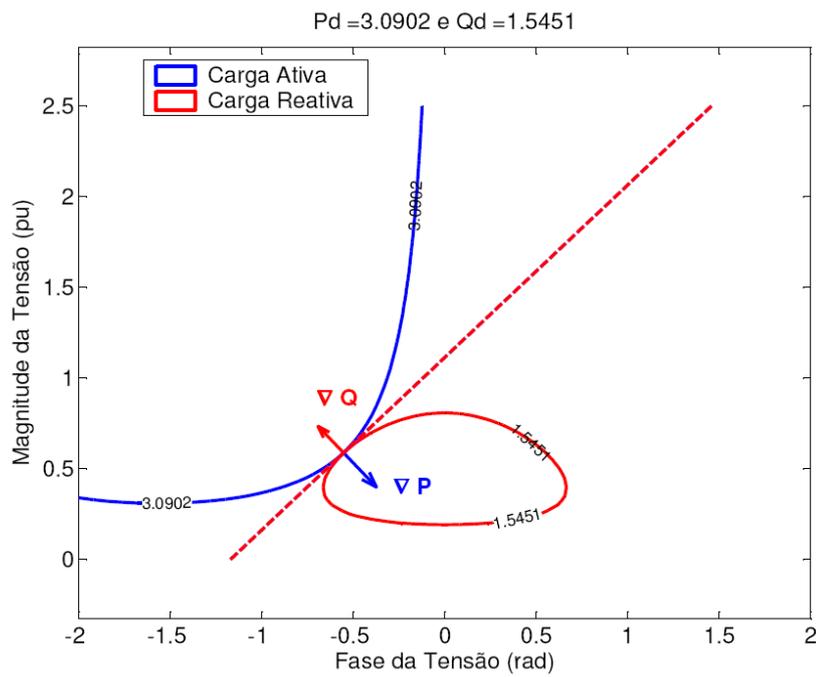


Figura 2.5 – Contornos de  $Pd_2$  e  $Qd_2$  no ponto C

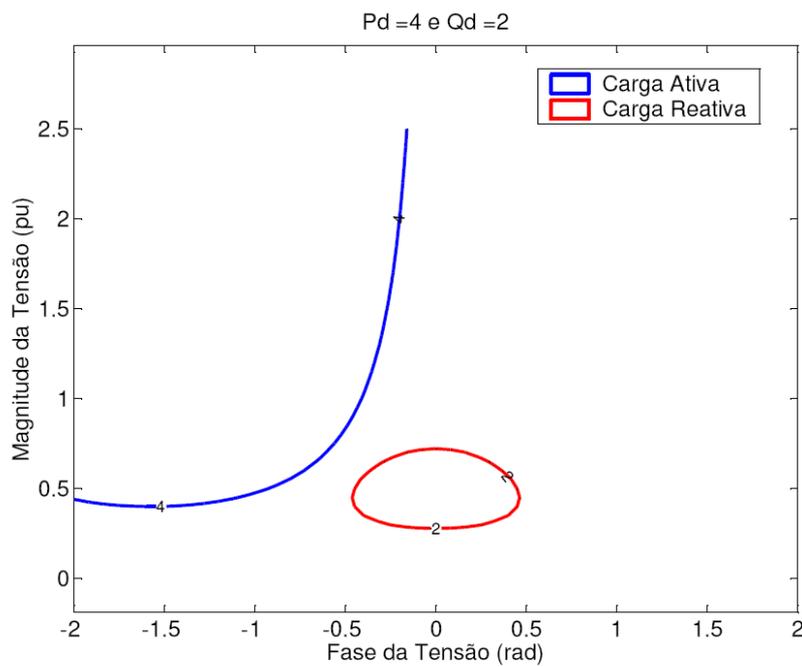


Figura 2.6 – Contornos de  $Pd_2$  e  $Qd_2$  no ponto D

Finalmente, deve-se observar que quando a condição de fluxo máximo de potência ativa e reativa que pode chegar à barra de carga é obtida, o ponto de operação resultante não é mais viável. Neste ponto, qualquer aumento na carga implica em ausência de solução, isto é, ausência de um ponto de equilíbrio. Consequentemente, o sistema perde a estabilidade, e entra em colapso [Prada, 1992].

## 2.3

### Instabilidade de Tensão Causada pela Perda de Controlabilidade

Nesta subseção, o sistema de duas barras mostrado na Figura 2.1 será usado para demonstrar a ocorrência de problemas de instabilidade de tensão causados pela perda de controlabilidade. Este mecanismo de instabilidade de tensão será avaliado considerando-se os seguintes parâmetros para o sistema de duas barras:  $z_{12} = y_{12}^{-1} = 0,2 \angle 70^\circ \text{ pu}$  e  $Pd_2 + jQd_2 = 1,0 + j0,5 \text{ pu}$ . A avaliação da perda de controlabilidade será realizada analisando-se o impacto das seguintes ações de controle no perfil de tensão da barra de carga [Prada, 1992]:

- i) chaveamento de bancos de capacitores na barra 2,
- ii) operação de *taps* de transformadores,
- iii) variação no módulo da tensão terminal em barras de geração (barra 1),
- iv) corte de carga com fator de potência constante na barra 2.

A operação de *taps* de transformadores mencionada no item (ii), será simulada pela substituição da linha de transmissão entre as barras 1 e 2 por um transformador com variação de *taps* em fase, cuja impedância série será igual a  $z_{12}$ . Este procedimento resulta no circuito mostrado na Figura 2.7.

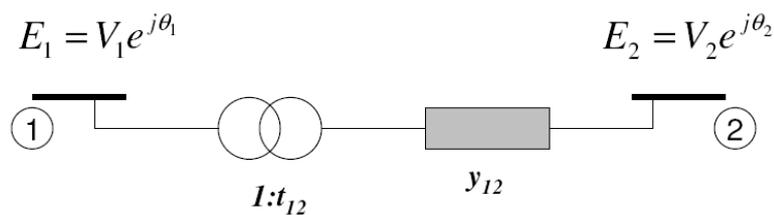


Figura 2.7 – Sistema de duas barras com transformador em fase

A eficiência das ações de controle descritas nos itens (i)-(iv) será analisada de forma qualitativa usando as curvas de nível de  $Pd_2$  e  $Qd_2$  no plano definido pelas variáveis  $\theta_2$  e  $V_2$ . Estas curvas serão utilizadas para visualizar as duas soluções das equações de fluxo de potência do sistema de duas barras: a solução com tensão baixa e a solução com tensão alta para o sistema de duas barras da Figura 2.1. Em seguida, estas soluções serão usadas como ponto de referência para analisar o perfil de tensão na barra 2, obtido após a realização de uma determinada ação de controle. Desta forma, para cada novo ponto de operação, obtido após a atuação de um controle, serão construídas novas curvas de nível para  $Pd_2$  e  $Qd_2$ . Conseqüentemente, em cada gráfico serão mostradas quatro soluções: duas no ponto de operação de referência e duas no novo ponto de operação. Embora a análise qualitativa descrita acima seja bastante simples, ela será suficiente para fornecer uma explicação adequada do mecanismo de perda de controlabilidade. As soluções das equações de fluxo de potência para o sistema de duas barras, associadas com as ações de controle dos itens de (i) a (iv), são mostradas nas Figuras de 2.8 a 2.11, respectivamente.

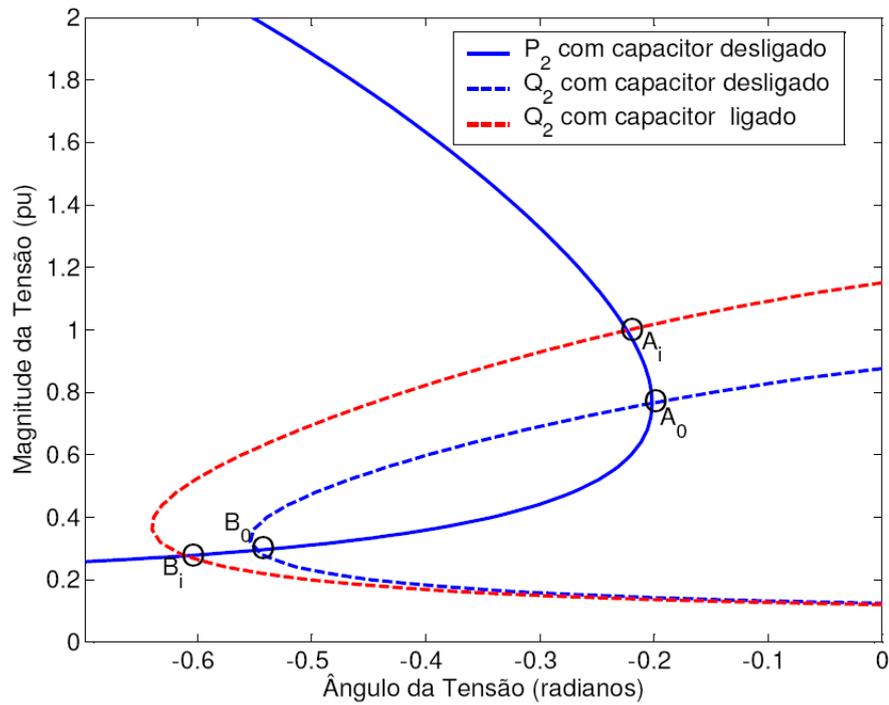


Figura 2.8 – Efeito sobre o módulo da tensão na carga devido ao chaveamento de um banco de capacitores em paralelo, com susceptância de 1,0 pu na barra 2

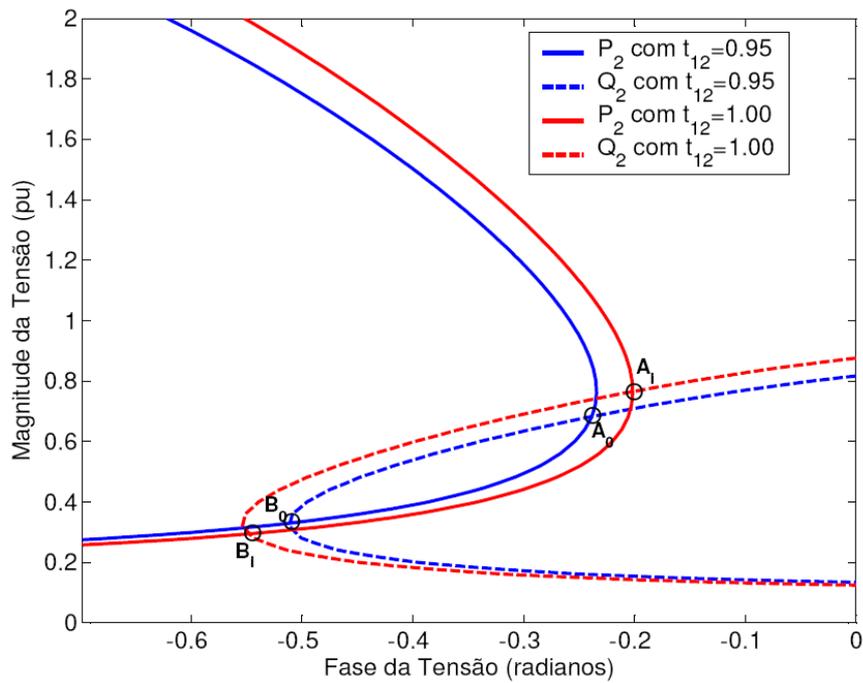


Figura 2.9 – Efeito sobre o módulo da tensão na carga devido à troca de taps entre o gerador e a carga

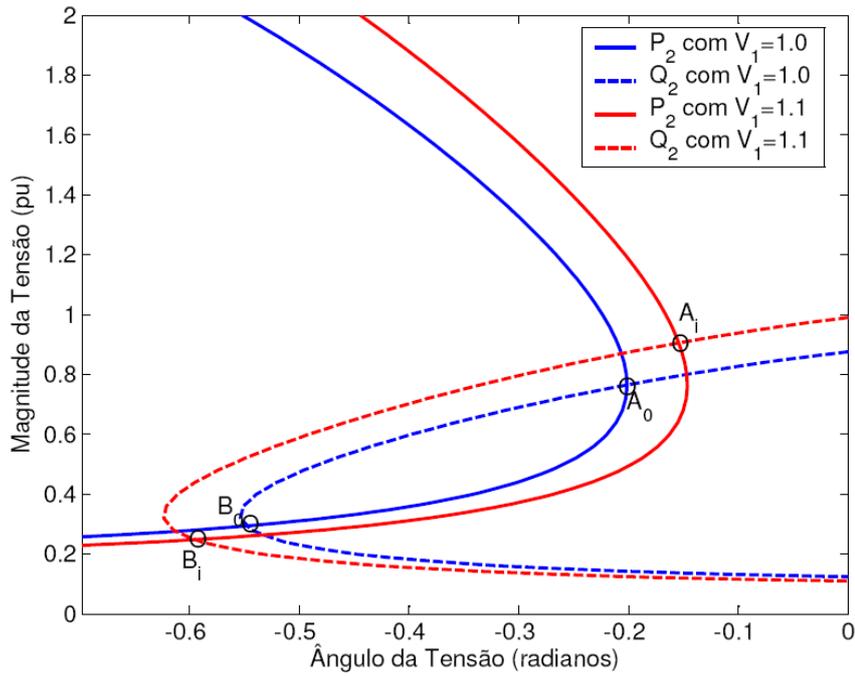


Figura 2.10 – Efeito sobre o modulo da tensão na carga devido a variação da tensão nos terminais do gerador

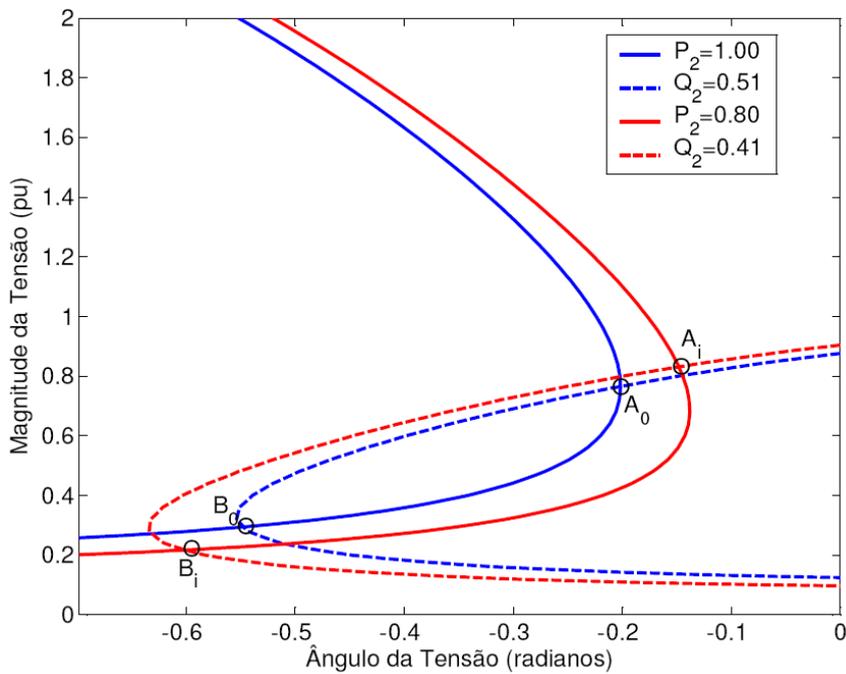


Figura 2.11 – Efeito sobre o modulo da tensão na carga devido ao corte de carga com fator de potência constante

Nos gráficos das Figuras de 2.8 a 2.11 foram utilizadas as seguintes notações:

- i) as linhas contínuas e tracejadas estão associadas com as curvas de  $Pd_2$  e  $Qd_2$ , respectivamente;
- ii) os pontos  $A_0$  e  $B_0$  indicam as soluções com tensão alta e baixa, respectivamente, antes da atuação dos controles;
- iii) os pontos  $A_i$  e  $B_i$  indicam as soluções com tensão alta e baixa, respectivamente, após a atuação dos controles;
- iv) as curvas de cor azul estão associadas com o ponto de operação de referência (antes da atuação dos controles);
- v) as curvas de cor vermelha estão associadas com o ponto de operação obtido após a atuação dos controles;
- vi) Na Figura 2.8 a linha contínua de cor azul está associada com  $Pd_2$  antes e após o chaveamento do banco de capacitor.

A partir das Figuras de 2.8 a 2.11 pode-se concluir que [Prada, 1992]:

- i) *Quando o ponto de operação de referência é a solução com tensão alta, as ações de controle têm o efeito esperado.* Por exemplo, na Figura 2.8 o chaveamento do banco de capacitor eleva a tensão na barra 2, quando o ponto de operação é a solução associada com  $A_0$ . Isto é, uma das soluções das equações de fluxo de potência se desloca do ponto  $A_0$  para ponto  $A_i$ , cujo módulo da tensão é mais elevada.
- ii) *Quando o ponto de operação de referência é a solução com tensão baixa, as ações de controle têm o efeito oposto ao esperado.* Por exemplo, na Figura 2.8 o chaveamento do banco de capacitor reduz a tensão na barra 2, quando o ponto de operação é a solução associada com  $B_0$ . Isto é, uma das soluções das equações de fluxo de potência se desloca do ponto  $B_0$  para ponto  $B_i$ , cujo módulo da tensão é mais baixa.
- iii) Existem duas regiões de operação para o sistema de duas barras:

- a) Região estável (soluções com tensão elevada): nesta região as ações de controle têm o efeito esperado.
- b) Região instável (soluções com tensão baixa): nesta região as ações de controle têm o efeito oposto ao esperado.
- iv) O efeito de uma ação de controle é determinado apenas pelo ponto de operação de referência do sistema. Isto é, o efeito de uma ação de controle é independente da sua natureza ou da sua magnitude (a quantidade de Mvar de compensação capacitiva, o número de *taps* trocados, o tamanho do aumento da tensão no gerador, e finalmente, o percentual de carga cortada).

A ocorrência de problemas de instabilidade de tensão associados com a perda de controlabilidade no sistema de duas barras é dependente do modelo de carga utilizado. Por exemplo, se a carga conectada na barra 2 é do tipo impedância constante, ou seja:  $Pd_2 = Pn_2V_2^2$  e  $Qd_2 = Qn_2V_2^2$ , onde  $Pn_2$  ( $Qn_2$ ) é o valor nominal da potência ativa (reativa) da carga na barra 2, pode-se escrever (2.20) da forma:

$$\alpha^2V_2^4 + (2\alpha Qn_2V_2^2 - \alpha^2)V_2^2 + (Pn_2^2V_2^4 + Qn_2^2V_2^4) = 0$$

$$[(\alpha^2 + 2\alpha Qn_2 + Pn_2^2 + Qn_2^2)V_2^2 - \alpha^2]V_2^2 = 0 \quad (2.22)$$

A solução trivial de (2.22) é  $V_2 = 0$ . As outras soluções são obtidas resolvendo-se:

$$(\alpha^2 + 2\alpha Qn_2 + Pn_2^2 + Qn_2^2)V_2^2 - \alpha^2 = 0$$

isto é:

$$V_2 = \pm \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 2\alpha Qn_2 + Pn_2^2 + Qn_2^2}}$$

Visto que as soluções de interesse prático devem satisfazer a restrição  $V_2 \geq 0$ , a única solução associada com  $V_2$  é:

$$V_2 = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 2\alpha Qn_2 + Pn_2^2 + Qn_2^2}}$$

Considerando-se que  $Qn_2 = tg\varphi Pn_2$  tem-se:

$$V_2 = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 2\alpha Pn_2 tg\varphi + Pn_2^2 + Pn_2^2 tg^2\varphi}}$$

Desta forma, pode-se observar que  $V_2$  sempre diminuirá (aumentará) quando  $Pn_2$  for aumentado (reduzido). Desta forma, a região de operação instável não existe para um sistema de duas barras com uma carga do tipo impedância constante. Entretanto, em um sistema multi-nó as equações de fluxo de potência tem múltiplas soluções. Conseqüentemente, não é possível garantir que todas as soluções não apresentem problemas de instabilidade de tensão associados com a perda de controlabilidade. Além disso, a perda de controlabilidade tem se manifestado em diversos distúrbios em sistemas elétricos reais, tais como aqueles ocorridos na França em 1979 [Prada, 1992] sistema brasileiro Sul/Sudeste (S/SE) em abril de 1997 [José da Silva, 2006], [Prada, 2002].

No caso do *blackout* da França, inicialmente não houve problemas de estabilidade entre máquinas e a freqüência se manteve aproximadamente constante. Entretanto, após a primeira contingência, tentativas de elevar o perfil de tensão não surtiram efeito. Pelo contrário, as ações de controle deterioraram ainda mais o perfil de tensão. Devido a isto, na França, já não se utiliza mais a troca de *taps* de transformadores em algumas situações.

No distúrbio do sistema brasileiro S/SE, o consumo de potência ativa estava para superar o recorde (estabelecido nove dias antes). A análise do ponto de operação às 18:00, antes do distúrbio, revelou que diversas barras com tensão controlada estavam operando com uma relação de sensibilidade V-Q negativa [Prada, 2002]. Em outras palavras, o módulo da tensão diminui quando a injeção de potência reativa é aumentada. Esta condição de operação resultou em um afundamento de tensão em alguns estados da região sudeste, que teve como conseqüência a perda de geração de potência ativa associada com elos CC de Itaipu. Estas perdas de geração acionaram esquemas de corte de carga que impediram o colapso de tensão total do sistema e permitiram que o mesmo

operasse com 85% de sua carga total. É importante enfatizar que neste evento não houve registro de qualquer perturbação ou anormalidade que originasse o afundamento de tensão. Entretanto, o sistema interligado estava operando sem importantes equipamentos de suporte de reativos na área de São Paulo (um total aproximado de 700 Mvar). Além disso, as ocorrências evidenciaram a utilização total dos recursos disponíveis de controle de tensão no sistema interligado Sul, Sudeste e Centro-Oeste [José da Silva, 2006].

A partir dos eventos descritos acima, pode-se concluir que é importante considerar a perda de controlabilidade como um dos mecanismos causadores da instabilidade de tensão.

## 2.4

### **Visualização dos Mecanismos Causadores da Instabilidade de Tensão através da Curva PV**

Os mecanismos causadores da instabilidade de tensão também podem ser visualizados através de uma curva denominada PV, embora a denominação correta seja *curva para fator de potência constante no plano PV*. Nesta curva, o eixo das abscissas é associado com níveis de carga ativa em uma barra e o eixo das ordenadas com os módulos das tensões das soluções obtidas para um nível de carga. A curva PV para o sistema de duas barras usado na Seção 2.2 é mostrada na Figura 2.12.

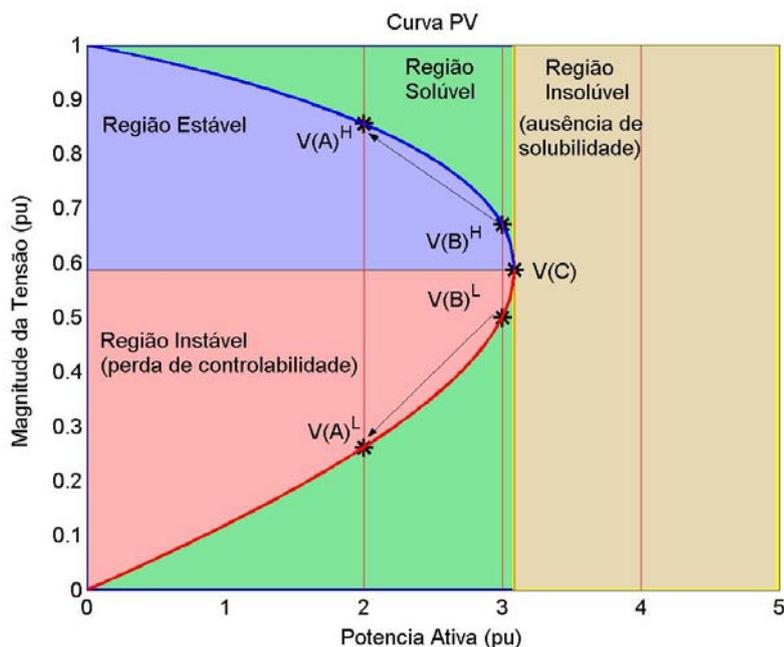


Figura 2.12 – Curva PV para o sistema de duas barras

Nesta figura, são também mostradas as cinco soluções reais das soluções das equações de fluxo de carga apresentadas na Tabela 2.2. Estas soluções são identificadas da seguinte forma:

- i)  $V(A)^H$  e  $V(A)^L$ : soluções com tensão alta e baixa para o nível de carga A da Tabela 2.1;
- ii)  $V(B)^H$  e  $V(B)^L$ : soluções com tensão alta e baixa para o nível de carga B da Tabela 2.1;
- iii)  $V(C)$ : solução única associada com o nível de carga C da Tabela 2.1.

A partir da Figura 2.12, pode-se concluir que:

- i) Para níveis de carga menores que o máximo ( $Pd_2 = \frac{-5 + \sqrt{125}}{2}$ ), a curva PV intercepta a ordenada associada com um nível de carga em dois pontos, ou seja, as soluções com tensão alta e baixa.

- ii) No ponto de máximo carregamento, a curva PV intercepta a ordenada associada com um nível de carga em único ponto, ou seja, a solução das equações de fluxo de potência é única ( $V(C)$ ).
- iii) *Para níveis de carga maiores que o máximo ( $Pd_2 = 4.0$ ), a curva PV não intercepta a ordenada associada com o nível de carga, ou seja, a instabilidade de tensão é causada pelo mecanismo de ausência de solubilidade (as equações de fluxo de potência não tem solução real).*
- iv) *Quando o corte de carga é realizado em um ponto de operação localizado na região superior da curva PV o módulo da tensão é aumentado, ou seja, as ações de controle tem o efeito esperado.* Por exemplo, quando o sistema opera na solução  $V(B)^H$ , um corte de carga de 1.0 pu eleva a tensão na barra 2 para  $V(A)^H$ .
- v) *Quando o corte de carga é realizado em ponto de operação localizado na região inferior da curva PV o módulo da tensão é reduzido, ou seja, as ações de controle tem o efeito oposto ao esperado.* Por exemplo, quando o sistema opera na solução  $V(B)^L$ , um corte de carga de 1.0 pu reduz a tensão na barra 2 para  $V(A)^L$ . Neste caso, é caracterizado um cenário de instabilidade de tensão cujo mecanismo causador é a perda de controlabilidade.
- vi) *A fronteira entre as regiões estável (ações de controle tem o efeito esperado) e instável (ações de controle tem efeito oposto ao esperado) é determinada pelo ponto de máximo carregamento da rede elétrica.*

Na próxima seção, será mostrado como problemas de instabilidade de tensão podem ocorrer em redes elétricas com tensões na faixa normal de operação.

## 2.5

### Ocorrência de Problemas de Instabilidade de Tensão na Faixa de Operação Normal das Tensões

Nas Seções 2.2 a 2.4, um sistema de duas barras foi utilizado para explicar os mecanismos causadores da instabilidade de tensão. Nestas seções, o objetivo foi facilitar a compreensão do fenômeno de instabilidade de tensão. Desta forma, não houve preocupação com os valores quantitativos das diversas grandezas envolvidas nos gráficos mencionados. Por exemplo, considerou-se para o módulo das tensões valores bem afastados de 1.0 pu.

Neste ponto, deve-se questionar se os mecanismos causadores da instabilidade de tensão podem se manifestar na faixa de operação das tensões. Esta questão será respondida traçando-se as curvas de nível associadas com o sistema de duas barras da Seção 2.3, para os valores de carga ativa e reativa mostrados na Tabela 2.3. Estes valores foram selecionados visando obter um perfil de tensão no intervalo de 0,85 a 1,15, pois em estados de contingências podem ser encontradas tensões nodais fora do intervalo de 0,95 a 1,05. As curvas associadas com os valores de  $Pd_2$  e  $Qd_2$  da Tabela 2.3 são mostrados na Figura 2.13.

A partir da Figura 2.13, pode-se concluir que [Prada, 1992]:

- i) Para uma carga  $Pd_{2,i} + jQd_{2,i}$ , com  $i=1,\dots,4$ , somente uma solução está na faixa de operação. A outra solução está fora da faixa de operação e não é mostrada na figura.
- ii) Para níveis de carga associados com  $i=1,\dots,4$  não existe risco de colapso de tensão causado por ausência de solubilidade e perda de controlabilidade, porque o ponto de máximo carregamento para aquele fator de potência está bem abaixo da faixa de operação. Além disso, a solução na faixa de operação pertence a região estável (solução com tensão alta).
- iii) Para níveis de carga associados com  $i=6,\dots,8$ , existe dupla solução de tensão na carga dentro da faixa de operação. Estas soluções se aproximam a medida que a carga aumenta.

- iv) Para valores de carga associados com  $i=6, \dots, 8$ , existe risco de colapso de tensão associado com a perda de controlabilidade pois o sistema pode estar operando na região de operação instável. Ou seja, a solução com tensão baixa pertence a faixa de operação normal das tensões.
- v) Para valores de carga associados com  $i=6, \dots, 8$ , existe risco de colapso de tensão causado pela ausência de solubilidade, pois aumentando-se  $Pd_2$  e  $Qd_2$ , o ponto de máximo carregamento seria obtido dentro da faixa de operação. Isto é, a solução única estaria dentro da faixa de operação normal.

Tabela 2.3 – Valores de  $Pd_2$  e  $Qd_2$  para a análise de estabilidade de tensão com valores de tensão na faixa de operação, onde  $Pd_{2,i}$  ( $Qd_{2,i}$ ) é o  $i$ -ésimo valor de  $Pd_2$  ( $Qd_2$ )

$Pd_{2,1} = 0,0$	$Qd_{2,1} = 0,0$
$Pd_{2,2} = 0,2$	$Qd_{2,2} = 0,1$
$Pd_{2,3} = 0,4$	$Qd_{2,3} = 0,2$
$Pd_{2,4} = 0,6$	$Qd_{2,4} = 0,3$
$Pd_{2,5} = 2,8$	$Qd_{2,5} = -2,2$
$Pd_{2,6} = 3,0$	$Qd_{2,6} = -3,0$
$Pd_{2,7} = 3,2$	$Qd_{2,7} = -4,0$
$Pd_{2,8} = 3,4$	$Qd_{2,8} = -5,2$
$Pd_{2,1} = 0,0$	$Qd_{2,1} = 0,0$

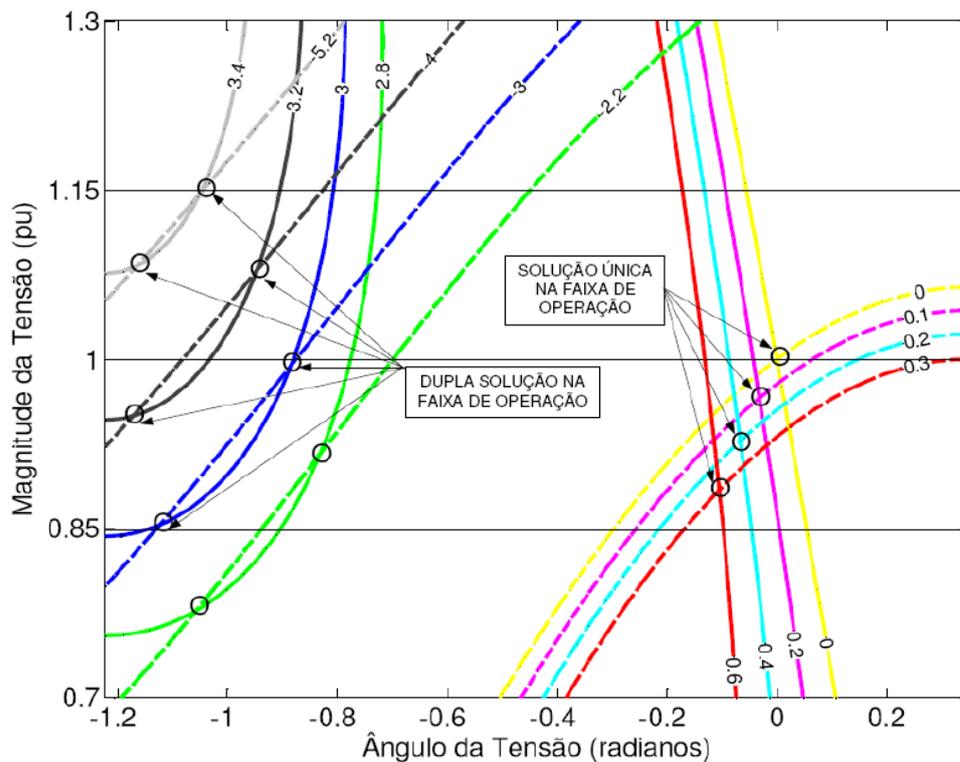


Figura 2.13 – Lugar geométrico da tensão na carga com valores dentro da faixa de operação

Finalmente, pode-se concluir que:

- i) em barras de carga muito compensadas podem ocorrer problemas de estabilidade de tensão na faixa de operação das tensões;
- ii) o uso excessivo de compensação reativa em paralelo resulta em uma rede propensa a problemas de instabilidade de tensão, inclusive na faixa de operação normal das tensões.

Nos dois capítulos seguintes serão apresentados os métodos usados nesta tese para analisar estados de instabilidade de tensão associados com a ausência de solubilidade e a perda de controlabilidade: FPO Não-Linear (Capítulo 3) e o MMD (Capítulo 4), respectivamente.

## 2.6

### Comentários Finais

Neste capítulo foi demonstrada a ocorrência dos dois mecanismos de instabilidade de tensão em um sistema de duas barras. Estas demonstrações foram baseadas nos seguintes resultados:

- i) curvas de valores de contorno das injeções de potência ativa e reativa no plano definido pelo módulo e pela fase da tensão;
- ii) gráfico da fronteira de solubilidade;
- iii) curva PV;

A partir dos resultados acima, foi possível concluir que:

- i) podem ocorrer problemas de instabilidade de tensão, na faixa de operação normal das tensões, em redes elétricas que fazem uso excessivo de compensação reativa em paralelo;
- ii) todas as ações de controle (chaveamento de bancos de capacitores, mudanças de *taps* de transformadores, ajustes das tensões em barras de geração e corte de carga), usadas para corrigir o perfil de tensão, tem efeito oposto ao esperado quando o sistema opera na região instável da curva PV (soluções com tensão baixa localizadas na metade inferior da curva PV);
- iii) As ações de controle só têm o efeito esperado quando o sistema opera na região estável da curva PV (soluções com tensão alta localizadas na metade superior da curva PV);
- iv) A ausência de solubilidade das equações de fluxo de potência é causada pela violação da máxima transferência de potência para as barras de carga.