

## 3

### Estudo da Barra de Geração

#### 3.1

##### Introdução

No Capítulo 2 tratou-se do máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode chegar à barra de carga, limitando então a máxima carga que pode ser alimentada, e do possível efeito contrário de ações de controle de tensão, por exemplo, quando da conexão de um capacitor na barra de carga. Neste capítulo trata-se do máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode sair da barra terminal do gerador, entrando na rede de transmissão ou distribuição, e do possível efeito contrário de ações de controle de tensão. No caso de geradores e compensadores síncronos, trata-se do controle de tensão através da tensão de excitação [Prada, R.B., Lafitte, J.L, Ferreira, L.F., Medeiros, L., 2006].

Dados os parâmetros da linha de transmissão e a tensão na barra de carga, verifica-se o lugar geométrico da tensão de geração para diferentes níveis de potência ativa e reativa, mantendo o fator de potência constante, saindo da barra de geração.

Para cada fator de potência na geração existe um lugar geométrico das tensões na barra de geração. Essas soluções pertencem à região A, à região B, ou à fronteira. A solução de tensão na barra de geração que pertence à fronteira é um único ponto que corresponde à máxima injeção de potência ativa (e reativa) para aquele fator de potência constante. Portanto, a fronteira é formada por um conjunto de pontos, cada um correspondendo à injeção máxima para cada fator de potência na geração.

#### 3.2

##### Potência Ativa e Reativa Saindo da Barra de Geração

Utilizando-se o circuito de 2 barras mostrado na Figura 3.1, deduz-se as equações da potência ativa e reativa "saindo" da barra de geração.

$$\dot{S}_{GL}^* = P_{GL} - jQ_{GL} = \dot{V}_G^* \cdot (\dot{i}_{GL} + \dot{i}_{GT}) \quad (3.1)$$

$$\dot{V}_G^* = V_G \cdot \angle -\theta_G \quad (3.2)$$

$$\dot{i}_{GL} = \frac{(V_G \cdot \angle \theta_G - V_L \angle \theta_L)}{Z_t \angle \alpha_t} \quad (3.3)$$

$$\dot{i}_{GT} = \frac{V_G \cdot \angle \theta_G}{Z_g \angle \alpha_g} \quad (3.4)$$

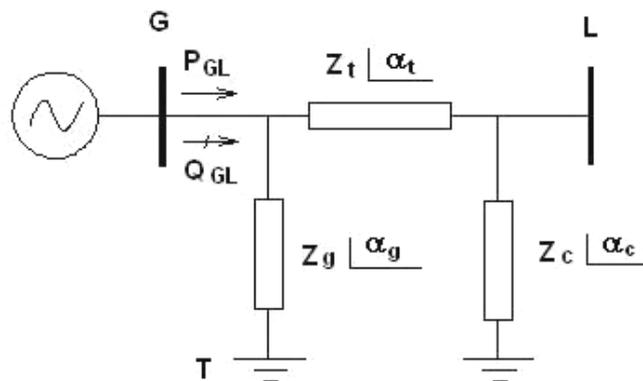


Figura 3.1 - Potência Ativa e Reativa Saindo da Barra de Geração num Circuito de Duas Barras

Substituindo-se (3.2), (3.3) e (3.4) em (3.1), e separando a parte real e imaginária da potência aparente, fica:

$$P_{GL} = V_G^2 \cdot \left[ \frac{\cos \alpha_t}{Z_t} + \frac{\cos \alpha_g}{Z_g} \right] - \left( \frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.5)$$

$$Q_{GL} = V_G^2 \cdot \left[ \frac{\text{sen} \alpha_t}{Z_t} + \frac{\text{sen} \alpha_g}{Z_g} \right] - \left( \frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \right) \cdot \text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.6)$$

De (3.5) e (3.6) é definido a equação da potência aparente de geração:

$$S_{GL} = \sqrt{(P_{GL})^2 + (Q_{GL})^2} \quad (3.7)$$

Para cada  $P_{GL}$  constante, variando-se  $\theta_{GL}$  em (3.5), pode-se calcular  $V_G$  e, portanto, traçar-se a curva para P constante no plano  $\theta V$ .

Para cada  $Q_{GL}$  constante, variando-se  $\theta_{GL}$  em (3.6), pode-se calcular  $V_G$  e, portanto, traçar-se a curva para  $Q$  constante no plano  $\theta V$ .

A tangente do ângulo do fator de potência na geração é:

$$\tan \phi = \frac{Q_{GL}}{P_{GL}} \quad (3.8)$$

Substituindo-se (3.5) e (3.6) em (3.8) e colocando-se em evidência a tensão na barra de geração  $V_G$ :

$$V_G = \frac{V_L \cdot [\text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) - \tan(\phi) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t)]}{\left[ \text{sen}(\alpha_t) - \tan(\phi) \cdot \cos(\alpha_t) - \tan(\phi) \cdot \frac{Z_t}{Z_g} \cdot \cos(\alpha_g) + \frac{Z_t}{Z_g} \cdot \text{sen}(\alpha_g) \right]} \quad (3.9)$$

Para  $\phi$  constante, variando-se  $\theta_{GL}$  em (3.9), pode-se calcular  $V_G$  e, portanto, traçar-se a curva para  $\phi$  constante no plano  $\theta V$ .

### 3.3

#### Tensão Crítica na Barra de Geração

Se os fluxos de potência ativa  $P_{GL}$  e reativa  $Q_{GL}$  correspondem à máxima potência saindo da barra de geração para ângulo do fator de potência  $\phi$ , isto pode ser traduzido matematicamente: os vetores gradiente  $\nabla P_{GL}$  e  $\nabla Q_{GL}$  estão alinhados sob a mesma direção, como mostrado na Figura 3.2. Então, a seguinte relação pode ser escrita, onde  $\lambda$  é um escalar:

$$\nabla P_{GL} - \lambda \nabla Q_{GL} = 0 \quad (3.10)$$

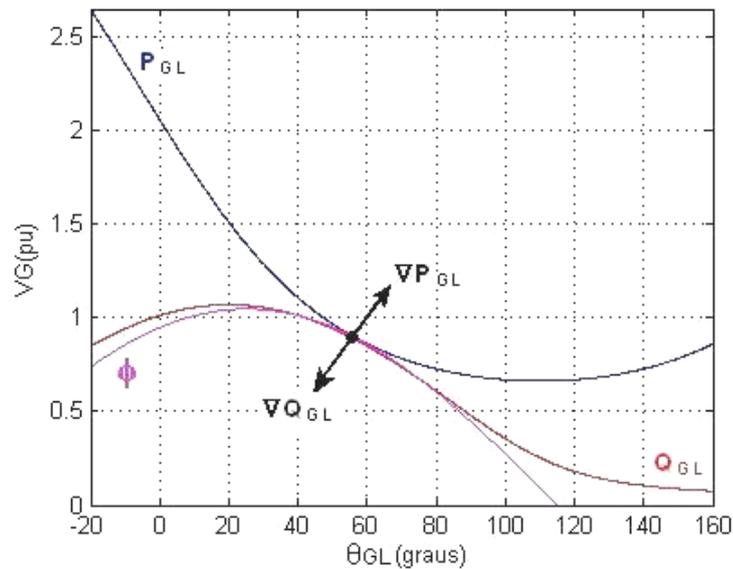


Figura 3.2 - Gradientes  $\nabla P_{GL}$  e  $\nabla Q_{GL}$  alinhados no Máximo Carregamento

A condição de otimalidade "gradientes alinhados" do problema "maximizar  $P(V_G, \theta_G)$  e  $Q(V_G, \theta_G)$  sujeito a  $\phi = \arctg(Q_{GL}/P_{GL}) = \text{constante}$ " pode, então, ser reescrita como:

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial \theta_G} - \lambda \frac{\partial Q_{GL}}{\partial \theta_G} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial V_G} - \lambda \frac{\partial Q_{GL}}{\partial V_G} = 0 \quad (3.12)$$

Isto é equivalente ao determinante da matriz Jacobiano das duas equações de fluxo de carga correspondente à barra de geração, ser igualado a zero, isto é:

$$\left( \frac{\partial P_{GL}}{\partial \theta_G} * \frac{\partial Q_{GL}}{\partial V_G} \right) - \left( \frac{\partial P_{GL}}{\partial V_G} * \frac{\partial Q_{GL}}{\partial \theta_G} \right) = 0 \quad (0.13)$$

Os componentes do vetor gradiente de potência ativa em relação ao ângulo e ao módulo da tensão na barra de geração são:

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial \theta_G} = \left( \frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \right) \text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial P_{GL}}{\partial V_G} = 2 \cdot V_G \cdot \left[ \frac{\cos \alpha_t}{Z_t} + \frac{\cos \alpha_g}{Z_g} \right] - \left( \frac{V_L}{Z_t} \right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.15)$$

Os componentes do vetor gradiente de potência reativa em relação ao ângulo e ao módulo da tensão na barra de geração são:

$$\frac{\partial Q_{GL}}{\partial \theta_G} = -\left(\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t}\right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial Q_{GL}}{\partial V_G} = 2 \cdot V_G \cdot \left[ \frac{\text{sen} \alpha_t}{Z_t} + \frac{\text{sen} \alpha_g}{Z_g} \right] - \left(\frac{V_L}{Z_t}\right) \cdot \text{sen}(\theta_{GL} + \alpha_t) \quad (3.17)$$

Substituindo-se (3.14), (3.15), (3.16) e (3.17) em (3.13) fica:

$$V_G^C = \frac{V_L}{2 \cdot \left[ \cos(\theta_{GL}) + \left(\frac{Z_t}{Z_g}\right) \cdot \cos(\theta_{GL} + \alpha_t - \alpha_g) \right]} \quad (3.18)$$

que é o módulo da tensão na barra de geração quando o fluxo de potência que sai dela é máximo.

Para obter-se o valor do ângulo da tensão nessa condição de máximo, substitui-se o módulo da tensão crítica de (3.18) na outra condição de otimalidade do problema, ou seja, em (3.9).

Após manipulações algébricas e trigonométricas (ver Apêndice B) chega-se à fórmula:

$$\text{tg}(2 \cdot \theta_{GL}^C) = \left( \frac{\text{sen}(-\phi + \alpha_t) + (Z_t / Z_g) \cdot \text{sen}(-\phi + 2 \cdot \alpha_t - \alpha_g)}{-\cos(-\phi + \alpha_t) - (Z_t / Z_g) \cdot \cos(-\phi + 2 \cdot \alpha_t - \alpha_g)} \right) \quad (3.19)$$

A defasagem angular crítica entre a barra terminal do gerador e a barra de carga  $\theta_{GL}^C$  pode ocorrer em qualquer dos quatro quadrantes, mas somente uma está associada à condição da máxima potência gerada e que garante alimentar a carga. Tudo depende do ângulo do fator de potência da geração e dos parâmetros do circuito  $\pi$ , como analisado a seguir.

### 3.3.1

#### Análise das Soluções de Ângulo na Barra Terminal de Geração

Considerando as impedâncias dos ramos paralelos infinitos no circuito  $\pi$  de duas barras da Figura 3.1, é possível tratar o circuito como série. Assim, (3.19) é reduzido a:

$$\operatorname{tg}(2.\theta_{GL}^C) = \left( \frac{\operatorname{sen}(-\phi + \alpha_t)}{-\operatorname{cos}(-\phi + \alpha_t)} \right) \quad (3.20)$$

Conforme o desenvolvimento mostrado no Apêndice B, é possível transformar (3.20) numa equação quadrática:

$$AX^2 + BX + C = 0 \quad (3.21)$$

onde:

$$X = \operatorname{tg}(\theta_{GL}^C) \quad (3.22)$$

Os valores das constantes A, B e C foram definidos, respectivamente, em (B.36), (B.37) e (B.38). As quatro soluções de ângulo crítico foram deduzidas de (B.42) a (B.45).

A análise foi feita considerando tensão constante na barra de carga  $V_L = 0,95$  pu, e simulando-se variações da geração.

#### 3.3.1.1

##### Primeiro Caso

Considerou-se os parâmetros: impedância da linha  $Z_t = 0,2 \angle 70^\circ$  pu e ângulo do fator de potência na geração  $\phi = 185^\circ$ .

No ponto "a<sub>1</sub>" da Figura 3.3 se obtém graficamente os valores críticos da máxima potência gerada:  $P_{GL}^C = 3,8928$  pu, da tensão do gerador na barra terminal

$V_G^C = 0,8848$  pu e da defasagem angular entre a barra terminal do gerador e a barra de carga  $\theta_{GL}^C = 57,5^\circ$ .

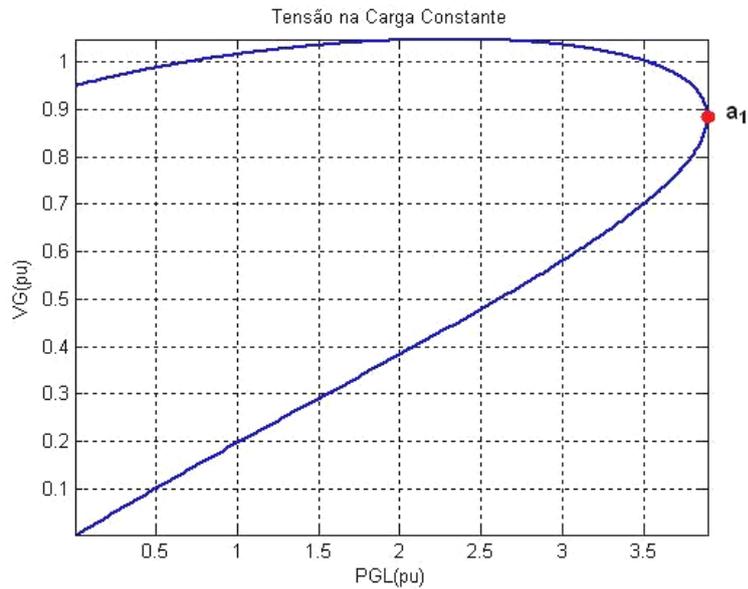


Figura 3.3 - Caso 1: Ponto de Máximo no Plano PV

Quando o ângulo da linha de transmissão  $\alpha_t < 90^\circ$ , que é o usual, é importante notar na Figura 3.4, que as curvas para P constante no plano  $\theta V$ , crescem "de dentro para fora".

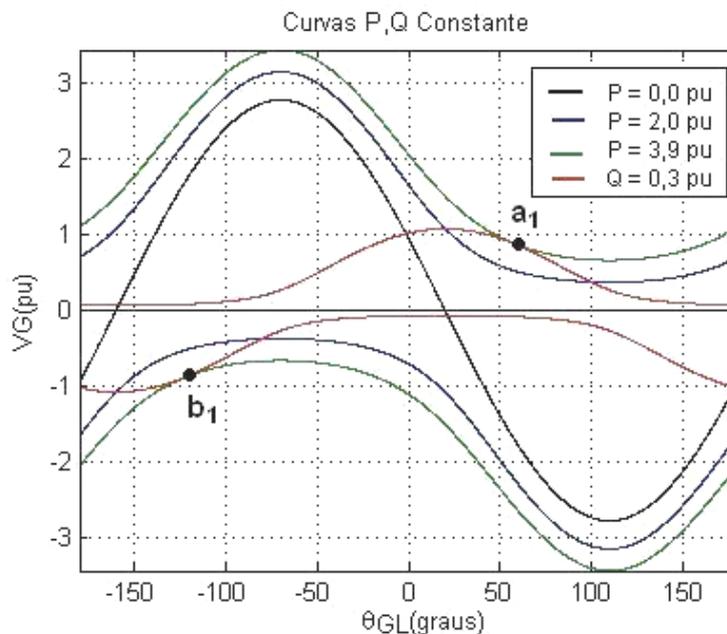


Figura 3.4 - Caso 1: Candidatos a Ponto de Máximo no Plano  $\theta V$

Numericamente, de (3.21) e (3.22), pode-se encontrar os valores da defasagem angular entre a barra terminal do gerador e a barra de carga e que correspondem as mesmas soluções de ângulo deduzidas em (B.44) como  $\theta_{GL-3}$  e (B.45) como  $\theta_{GL-4}$ . As soluções de ângulo  $\theta_{GL-1}$  em (B.42) e  $\theta_{GL-2}$  (B.43) são descartadas porque produzem pontos de máxima potência negativa, significando que o gerador passou a trabalhar como carga.

$$A=-2,1445$$

$$B=+2$$

$$C=+2,1445$$

$$\theta_{GL-3}=\text{arctg}\left[\frac{-B-\sqrt{B^2-4.A.C}}{2.A}\right]=+57,5^\circ \quad (\text{ponto "a}_1\text{" da Figura 3.4})$$

$$\theta_{GL-4}=\text{arctg}\left[\frac{-B-\sqrt{B^2-4.A.C}}{2.A}\right]-180^\circ=-122,5^\circ \quad (\text{ponto "b}_1\text{" da Figura 3.4})$$

Pode-se deduzir da Figura 3.4 que:

- $\theta_{GL}^C = +57,5^\circ$  é solução porque é o ponto de máxima geração  $P_{GL}^C = 3,8929$  pu com tensão do gerador na barra terminal  $V_G=0,8841$  pu. É o ponto "a<sub>1</sub>" nas Figuras 3.3 e 3.4.
- $\theta_{GL}^C = -122,5^\circ$  não é solução porque, apesar de ser um ponto de máxima geração  $P_{GL}^C = 3,8929$  pu, tem tensão negativa na barra terminal do gerador  $V_G=-0,8841$  pu.

### 3.3.1.2

#### Segundo Caso

Se entre o gerador e a carga houver uma linha de transmissão, então  $\alpha_t$  será sempre menor ou igual a  $90^\circ$ . No entanto, se houver um circuito equivalente de parte de uma rede, então é possível ter-se  $\alpha_t$  maior que  $90^\circ$  [Kimbark, E.W.,1968]. A partir desta premissa foi feita a simulação considerando os

parâmetros: impedância da linha  $Z_t = 0,2 \angle 95^\circ$  pu e ângulo do fator de potência na geração  $\phi = 185^\circ$ .

No ponto "a<sub>2</sub>" da Figura 3.5 se obtém graficamente os valores críticos da máxima potência gerada  $P_{GL}^C = 2,2477$  pu, da tensão do gerador na barra terminal  $V_G^C = 0,6718$  pu e da defasagem angular entre a barra terminal do gerador e a barra de carga  $\theta_{GL}^C = 45,0^\circ$ .

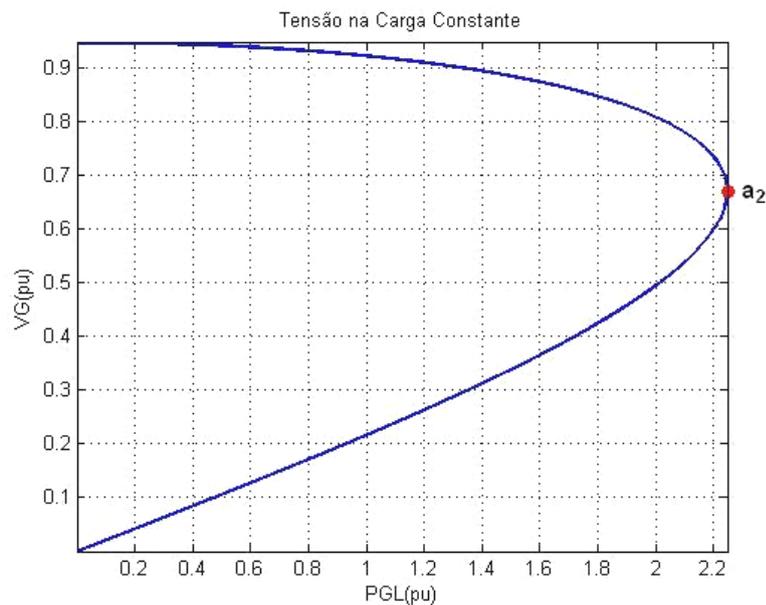
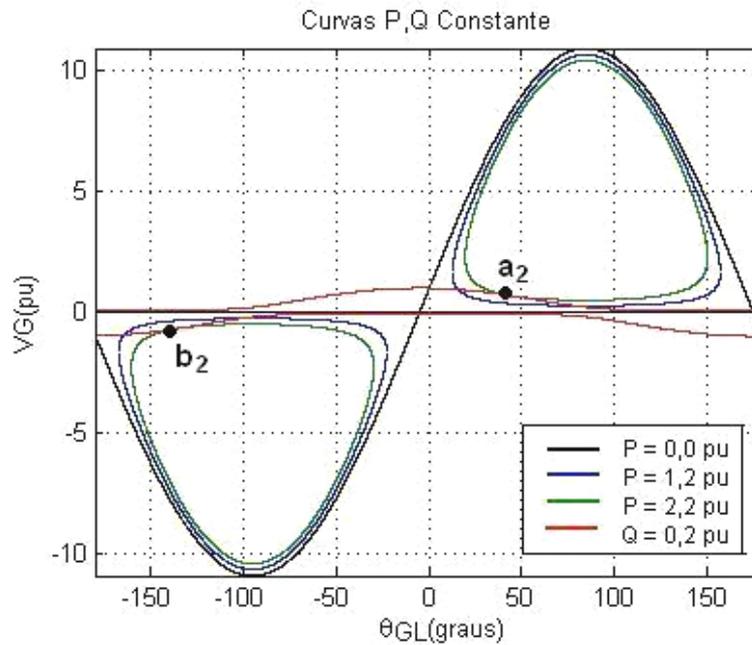


Figura 3.5 - Caso 2: Ponto de Máximo no Plano PV

Quando o ângulo da linha de transmissão  $\alpha_t > 90^\circ$  as curvas de P constante no gráfico  $\theta V$  referente à barra de geração, crescem no sentido "de fora para dentro", como se pode observar na Figura 3.6.



Numericamente, de (3.21) e (3.22), pode-se encontrar os valores da defasagem angular entre a barra terminal do gerador e a barra de carga e que correspondem as mesmas soluções de ângulo deduzidas em (B.44) como  $\theta_{GL-3}$  e (B.45) como  $\theta_{GL-4}$ . As soluções de ângulo  $\theta_{GL-1}$  em (B.42) e  $\theta_{GL-2}$  (B.43) são descartadas porque produzem pontos de máxima potência negativa, significando que o gerador passou a trabalhar como carga.

$$A = -57,2899$$

$$B = +2$$

$$C = +57,2899$$

$$\theta_{GL-3} = \arctg \left[ \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4.A.C}}{2.A} \right] = +45,0^\circ \quad (\text{ponto "a}_2\text{" da Figura 3.6})$$

$$\theta_{GL-4} = \arctg \left[ \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4.A.C}}{2.A} \right] - 180^\circ = -135,0^\circ \quad (\text{ponto "b}_2\text{" da Figura 3.6})$$

Pode-se deduzir na Figura 3.6 que:

- $\theta_{GL}^C = +45,0^\circ$  é solução porque é o ponto de máxima geração  $P_{GL}^C = 3,2477$  pu com tensão positiva na barra terminal do gerador  $V_G^C = 0,6718$  pu. É o ponto "a<sub>2</sub>" nas Figuras 3.5 e 3.6.
- $\theta_{GL}^C = -135,0^\circ$  não é solução porque, apesar de ser um ponto de máxima geração  $P_{GL}^C = 3,2477$  pu, tem tensão negativa na barra terminal do gerador  $V_G = -0,6718$  pu.

Conclui-se, a partir da análise dos dois casos anteriores e de (3.20), que para um circuito série de duas barras, a defasagem angular crítica entre a barra do gerador e a barra de carga pode ser calculada como:

$$\theta_{GL}^C = \frac{(\phi - \alpha_t)}{2} \quad (3.23)$$

Deve-se notar que em (3.23) o ângulo do fator de potência na geração  $\phi$ , encontra-se no segundo ou terceiro quadrante. A análise foi feita considerando que a barra G e a barra L, respectivamente, trabalham como gerador e carga; e só assim a relação (3.23) é correta.

Tanto gráfica como numericamente foi possível verificar os valores críticos da máxima potência gerada, e do módulo e ângulo de tensão na barra terminal do gerador.

Deve-se tomar cuidado na interpretação da questão do fator de potência em barras de geração: quando o fator de potência é capacitivo significa que o gerador está absorvendo potência reativa do sistema e quando o fator de potência é indutivo o gerador está gerando potência reativa para o sistema. Logo, o sentido de crescimento da potência reativa é "de dentro para fora", do mínimo Q capacitivo até o máximo Q indutivo, independente se  $\alpha_t$  é maior ou menor que  $90^\circ$ .

### 3.4

#### Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão em Barras de Tensão Controlada

A avaliação das chamadas "condições de estabilidade de tensão" consiste em comparar a geração no ponto de operação em análise com a geração máxima possível que poderia estar entrando na rede. Também é importante determinar se o ponto de operação está na parte superior (região normal de operação) ou inferior da curva SV (região anormal de operação).

Em [Ferreira, L.C.A., 2008] defende-se que a confiança em somente uma das técnicas de análise estática baseadas em curvas PV ou PQ, não é suficiente para a avaliação segura da estabilidade de tensão, sendo cada tipo de análise importante e necessária para complementar uma o resultado da outra. Desta maneira, garantindo que o sistema é transitória e dinamicamente estável e que o colapso de tensão não é causado por uma instabilidade angular, o método proposto recomenda o uso de ambas as análises PV e PQ, no cálculo das margens de estabilidade de tensão.

Usando-se os valores de tensão em módulo e ângulo crítico definidos, respectivamente, em (3.18) e (3.19) é fácil determinar os valores da máxima geração, substituindo-os em (3.5) e (3.6):

$$P_{GL}^C = V_G^C{}^2 \cdot \left[ \frac{\cos \alpha_t}{Z_t} + \frac{\cos \alpha_g}{Z_g} \right] - \left( \frac{V_L \cdot V_G^C}{Z_t} \right) \cdot \cos(\theta_{GL}^C + \alpha_t) \quad (3.24)$$

$$Q_{GL}^C = V_G^C{}^2 \cdot \left[ \frac{\sen \alpha_t}{Z_t} + \frac{\sen \alpha_g}{Z_g} \right] - \left( \frac{V_L \cdot V_G^C}{Z_t} \right) \cdot \sen(\theta_{GL}^C + \alpha_t) \quad (3.25)$$

De (3.24) e (3.25) é definido a máxima potência aparente de geração:

$$S_{GL}^C = \sqrt{(P_{GL}^C)^2 + (Q_{GL}^C)^2} \quad (3.26)$$

Então, para saber as condições de carregamento do circuito, calcula-se a "distância" entre a geração no ponto de operação em análise e máxima geração, como já dito. Utiliza-se o conceito de "margem de potência":

$$M = (S_{GL}^C - S_{GL}) \text{ em MVA} \quad (3.27)$$

A margem pode ser expressa em valores por unidade para dar significado à comparação entre diferentes pontos de operação:

Se o ponto de operação em análise está na parte superior da curva SV, tem-se:

$$M = \left( 1 - \frac{S_{GL}}{S_{GL}^C} \right) \text{ em pu de } S_m \quad (3.28)$$

Se o ponto está na parte inferior da curva SV, tem-se:

$$M = \left( \frac{S_{GL}^C}{S_{GL}} - 1 \right) \text{ em pu de } S_i \quad (3.29)$$

Obviamente  $M=0$  se  $S_{GL}^C = S_{GL}$  na “ponta do nariz” da curva SV. Para determinar se o ponto de operação pertence à parte superior ou inferior da curva SV, o seguinte procedimento resolve a questão:

- Substitui-se  $\theta_{GL}$  do ponto de operação em análise na fórmula do módulo da tensão crítico  $V_G^C$  em (3.18), como ilustrado nas Figuras 3.7 e 3.8.
- Compara-se o valor encontrado  $V_G^{C*}$  com o módulo de tensão  $V_G$  no ponto de operação em análise. Se  $V_G > V_G^{C*}$  o ponto pertence à parte superior da curva SV, como na Figura 3.7 ou se  $V_G < V_G^{C*}$ , pertence à parte inferior, como na Figura 3.8 ou se  $V_G = V_G^{C*}$  o ponto pertence à máxima potência que sai da barra do gerador. Nesse último caso, também se tem  $\theta_G = \theta_G^C$  e  $V_G = V_G^{C*} = V_G^C$ .

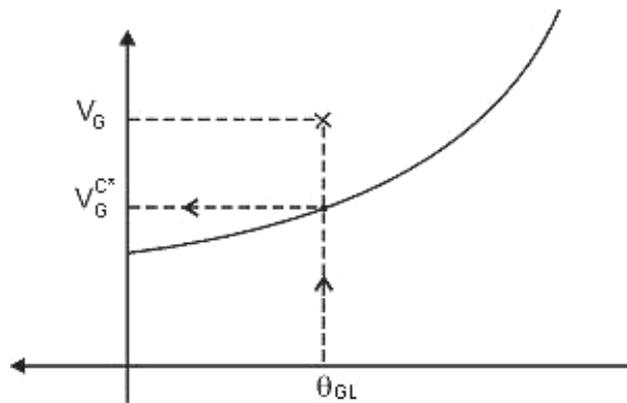


Figura 3.7 - Localização do Ponto de Operação na Parte Superior da Curva SV

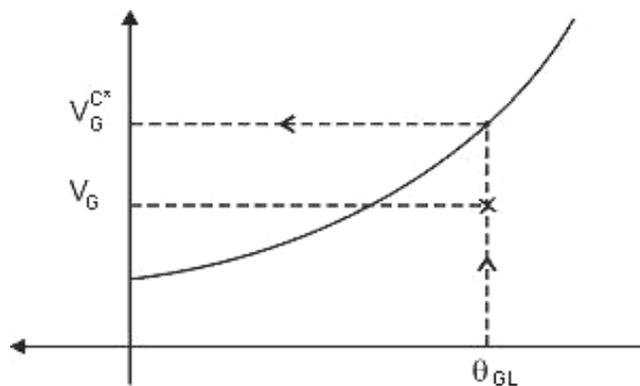


Figura 3.8 - Localização do Ponto de Operação na Parte Inferior da Curva SV

### 3.5

#### Simultaneidade da Máxima Geração e da Máxima Carga

Nesta seção estuda-se a possibilidade da máxima carga alimentada estar limitada pelo fluxo de potência que sai do gerador ou pelo que chega a ela. Mesmo para um sistema série de duas barras sem compensação reativa, deve-se notar que o fator de potência dos fluxos que chegam à carga não pode ser considerado igual ao dos fluxos que deixam a geração por causa das perdas na transmissão.

Considerando o circuito de duas barras da Figura 3.1 como série, com impedância da linha igual a  $Z_t=0,2$  pu e  $\alpha_t=70^\circ$ , foi traçado o LET da carga, usando (2.26) e (2.33), e o LET da geração, usando (3.18) e (3.23), como mostrados nas Figuras 3.9, 3.10 e 3.11. Utilizou-se  $V_G=1,0000$  pu e  $\theta_G=0^\circ$ .

Como o objetivo é verificar a ocorrência do máximo da carga e do máximo da geração, o procedimento adotado foi traçar a curva  $P_L V_L$  para certo fator de potência na carga  $\phi_L$ , e localizar um ponto de operação na carga, nomeado como

“1”. Ao ponto de operação “1” corresponde uma certa tensão na barra de carga  $V_L$  e um certo fator de potência na geração  $\phi_G$ . Com esses dados, foi traçada a curva  $P_G V_G$  e localizado o ponto “3” correspondente ao ponto de operação “1”. O ponto “2” é uma estimativa da máxima geração (onde curva  $P_G V_G$  cruza o LET da geração) para aquele certo fator de potência na geração  $\phi_G$  no caso das Figuras 3.9 e 3.10. No caso da Figura 3.11 é uma estimativa da máxima carga (onde curva  $P_L V_L$  cruza o LET da carga) para aquele fator de potência na carga  $\phi_L$ .

Na Figura 3.9 é mostrada a curva  $P_L V_L$  para  $\phi_L=5,00^\circ$  e a curva  $P_G V_G$  para  $\phi_G=217,58^\circ$  com  $V_L=0,5915$  pu. Os valores das grandezas elétricas dos pontos “1”, “2” e “3” são mostrados na Tabela 3.1.

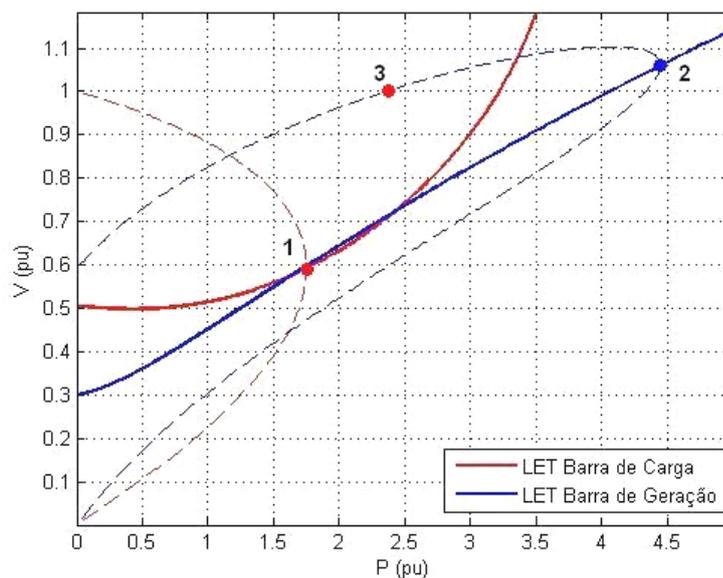


Figura 3.9 - Máxima Carga Limitada pela Potência que Chega na Barra de Carga

Na Tabela 3.1, pode se ver que o ponto “3”, com  $\phi_G=217,58^\circ$ , correspondente ao ponto de operação de máxima carga “1”, com  $\phi_L=5,00^\circ$ , encontra-se na região superior da curva  $P_G V_G$  com  $P_G=2,3539$  pu e  $V_G=1,0000$  pu, ainda afastado do ponto da máxima geração com  $P_G^C=4,4401$  pu e  $V_G^C=1,0695$  pu. Conclui-se, então, que a máxima carga que pode ser atendida é limitada pelo fluxo de potência que chega à barra de carga.

Tabela 3.1 - Pontos de Operação 1, 2 e 3 da Figura 3.9

Ponto: 1				Ponto: 2				Ponto: 3			
$\phi_L$ (graus)	$P_L^C$ (pu)	$V_L^C$ (pu)	$\theta_{LG}^C$ (graus)	$\phi_G$ (graus)	$P_G^C$ (pu)	$V_G^C$ (pu)	$\theta_{GL}^C$ (graus)	$\phi_G$ (graus)	$P_G$ (pu)	$V_G$ (pu)	$\theta_{GL}$ (graus)
5,00	1,7506	0,5915	-32,58	217,58	4,4401	1,0695	73,79	217,58	2,3539	1,0000	32,58

Na Figura 3.10 é mostrada a curva  $P_L V_L$  para  $\phi_L = -50,00^\circ$  e a curva  $P_G V_G$  para  $\phi_G = 190,00^\circ$  com  $V_L = 1,0000$  pu. Os valores das grandezas elétricas dos pontos “1”, “2” e “3” são mostrados na Tabela 3.2.

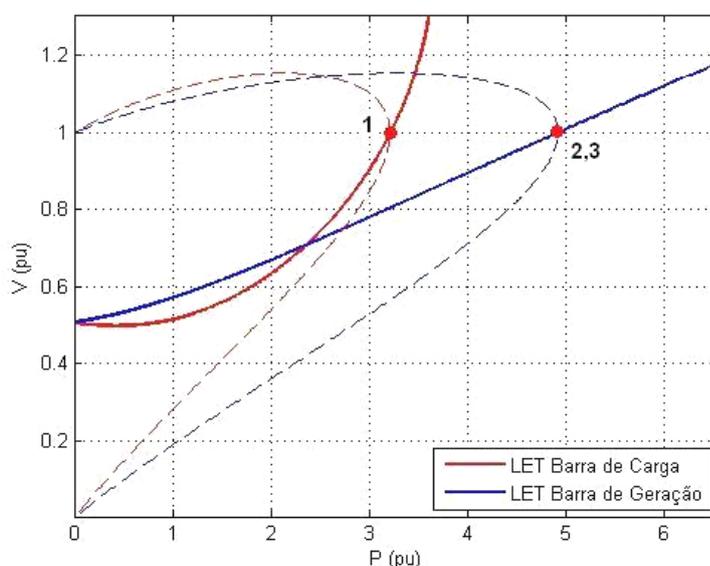


Figura 3.10 - Máxima Carga Limitada Simultaneamente pela Potência que Sai da Barra de Geração e pela que Chega na Barra de Carga

Na Tabela 3.2 são mostrados os pontos “2” e “3” coincidentes e correspondentes ao ponto de operação da máxima carga “1”. Isso indica que o ponto “3” representa a máxima geração com  $P_G^C = 4,9240$  pu e  $V_G^C = 1,0000$  pu, e portanto, também pertence à curva do LET da geração. Conclui-se, então, que o fluxo de potência que sai do gerador e o fluxo de potência que chega na carga atingem seus máximos simultaneamente, limitando a carga que pode ser alimentada.

Tabela 3.2 - Pontos de Operação 1, 2 e 3 da Figura 3.10

Ponto: 1				Ponto: 2, 3			
$\phi_L$ (graus)	$P_L^C$ (pu)	$V_L^C$ (pu)	$\theta_{LG}^C$ (graus)	$\phi_G$ (graus)	$P_G^C$ (pu)	$V_G^C$ (pu)	$\theta_{GL}^C$ (graus)
-50,00	3,2139	1,0000	-60,00	190,00	4,9240	1,0000	60,00

Na Figura 3.11 é mostrada a curva  $P_L V_L$  para  $\phi_L = -70,00^\circ$  e a curva  $P_G V_G$  para  $\phi_G = 149,87^\circ$  com  $V_L = 1,5315$  pu. Os valores das grandezas elétricas dos pontos “1”, “2” e “3” são mostrados na Tabela 3.3.

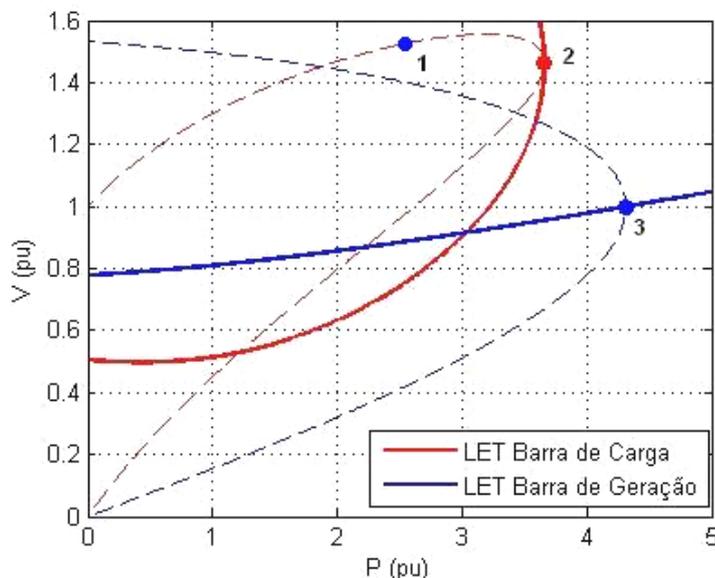


Figura 3.11 - Máxima Carga Limitada pela Potência que Sai da Barra de Geração

Na Tabela 3.3 pode se ver que o ponto de operação “1”, com  $P_L = 2,6119$  pu e  $V_L = 1,5315$  pu, encontra-se na região superior da curva  $P_L V_L$  ainda afastado do ponto “2” de máxima carga, com  $P_L^C = 3,6548$  pu e  $V_L^C = 1,4617$  pu. O ponto “3”, com  $\phi_G = 149,87^\circ$ , correspondente ao ponto de operação de carga “1”, com  $\phi_L = -70^\circ$ , é a máxima geração com  $P_G^C = 4,3129$  pu e  $V_G^C = 1,0000$  pu. Conclui-se, então, que a máxima carga que pode ser atendida é limitada pelo fluxo de potência que sai do gerador.

Tabela 3.3 - Pontos de Operação 1, 2 e 3 da Figura 3.11

Ponto: 1				Ponto: 2				Ponto: 3			
$\phi_L$ (graus)	$P_L$ (pu)	$V_L$ (pu)	$\theta_{LG}$ (graus)	$\phi_L$ (graus)	$P_L^C$ (pu)	$V_L^C$ (pu)	$\theta_{LG}^C$ (graus)	$\phi_G$ (graus)	$P_G^C$ (pu)	$V_G^C$ (pu)	$\theta_{GL}^C$ (graus)
-70,00	2,6119	1,5315	-39,93	-70,00	3,6548	1,4617	-70,00	149,87	4,3129	1,0000	39,93

Na ocorrência simultânea da máxima carga e da máxima geração, as defasagens angulares críticas para a barra de carga  $\theta_{LG}$  e para a barra de geração  $\theta_{GL}$  são iguais em módulo. Igualando (2.33) a (3.23), obtém-se:

$$\phi_G = 2\alpha_t - \phi_L \quad (3.30)$$

Para um certo fator de potência na carga  $\phi_L$ , a ocorrência da simultaneidade entre a máxima carga e a máxima geração, somente é verificada para um fator de potência na geração  $\phi_G$  que satisfaça (3.30).

Pode-se concluir que a máxima carga alimentada é limitada por uma das três condições a seguir:

- pelo fluxo de potência que chega à barra de carga,
- pelo fluxo de potência que sai do gerador,
- pelo fluxo de potência que sai do gerador e pelo que chega à barra de carga simultaneamente.