

4

O Fenômeno da Estabilidade de Tensão [6]

4.1.

Introdução

Estabilidade de tensão é a capacidade de um sistema elétrico em manter tensões aceitáveis em todas as barras da rede sob condições normais e após ser submetido a distúrbios. A perda da estabilidade de tensão ocorre em um sistema quando uma perturbação, um aumento na demanda de carga ou outro tipo de alteração nas suas condições provoque um declínio progressivo e incontrolável na tensão.

Problemas de estabilidade de tensão na operação de sistemas elétricos são originados pelo uso de linhas de transmissão perto de sua capacidade máxima, o que foi possível a partir do uso extensivo de compensação de potência reativa.

O fenômeno de estabilidade de tensão em redes elétricas está associado às condições nodais do sistema, relacionando o máximo fluxo de potência ativa e reativa transmitida dos geradores para as cargas e ações de controle de tensão tendo o efeito oposto ao esperado.

4.2.

Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão

Para a compreensão do fenômeno de estabilidade de tensão será estudado o comportamento estático de um sistema elétrico com duas barras, conforme mostrado na Figura 4.1, composto por um gerador com capacidade infinita de geração, uma carga modelada por potência constante e uma linha de transmissão sem limite térmico. Os valores das admitâncias shunt da linha de transmissão serão desprezados sem perda da generalidade.

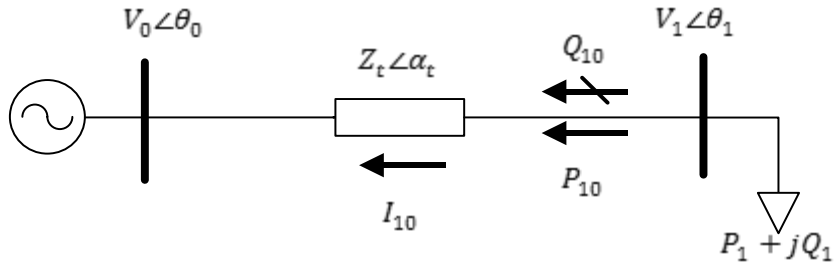


Figura 4.1: Circuito de Duas Barras

A caracterização do fenômeno foi desenvolvida considerando:

$$\begin{aligned}
 V_0 &= 1 \text{ pu} \\
 \theta_0 &= 0^\circ \\
 Z_t &= 0.2 \text{ pu} \\
 \alpha_t &= 70^\circ \\
 -\infty &< P_0 < \infty \\
 -\infty &< Q_0 < \infty
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

A análise se inicia a partir das equações de fluxo de potência ativa e reativa saindo da barra de carga. A potência aparente saindo da barra de carga é:

$$S_{10}^* = P_{10} - jQ_{10} = V_1^* I_{10} \tag{4.2}$$

Onde

$$I_{10} = \frac{V_1 \angle \theta_1 - V_0 \angle \theta_0}{Z_t \angle \alpha_t} \tag{4.3}$$

$$V_1^* = V_1 \angle -\theta_1 \tag{4.4}$$

Substituindo-se (4.3) e (4.4) em (4.2):

$$S_{10}^* = \frac{V_1^2 \cos(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} - j \left(\frac{V_1^2 \sin(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \right) \quad (4.5)$$

Comparando-se (4.5) e (4.2), e separando as partes real e imaginária:

$$P_{10} = -P_1 = \frac{V_1^2 \cos(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (4.6)$$

$$Q_{10} = -Q_1 = \frac{V_1^2 \sin(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (4.7)$$

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

$$\tan(\phi) = \frac{Q_{10}}{P_{10}} = \frac{\frac{V_1^2 \sin(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t}}{\frac{V_1^2 \cos(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t}} \quad (4.7)$$

Em (4.6) e (4.7) a potência na barra de carga é função de duas variáveis: o módulo e o ângulo de sua tensão. Na Figura 4.2 [6] é mostrado o gráfico para a potência ativa dada por (4.6).

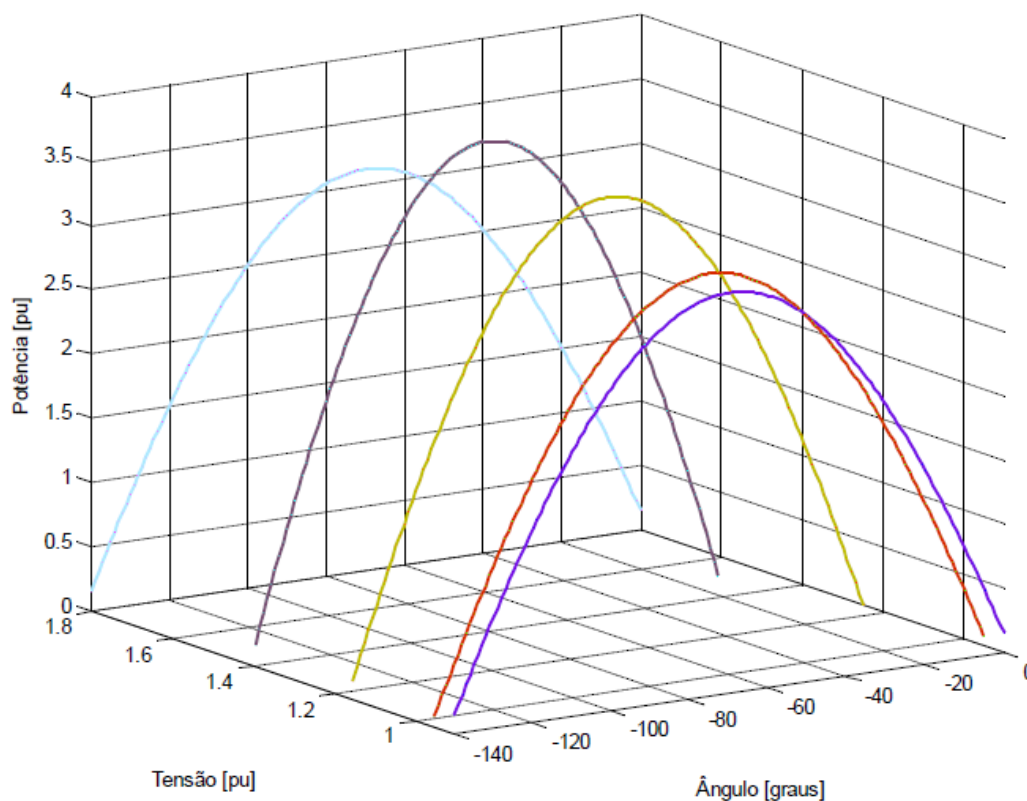


Figura 4.2: Curvas no R^3 de P_I como Função m

Analisando-se as curvas da Figura 4.2, pode-se observar que há uma máxima potência para cada valor de módulo de tensão. Variando-se θ_l em (4.6) e mantendo V_l constante, pode-se calcular P_I e, portanto, traçar a curva para V_l constante no plano $P_I \theta_l$. Na Figura 4.3, tem-se as curvas para cinco valores de V_l . Verifica-se que são as projeções das curvas da Figura 4.2 no plano θP .

Vale lembrar que para V_l constante no valor desejado necessita-se de certo suporte de potência reativa pela instalação de capacitores shunt que são compostos com carga Q_I para cada variação de P_I .

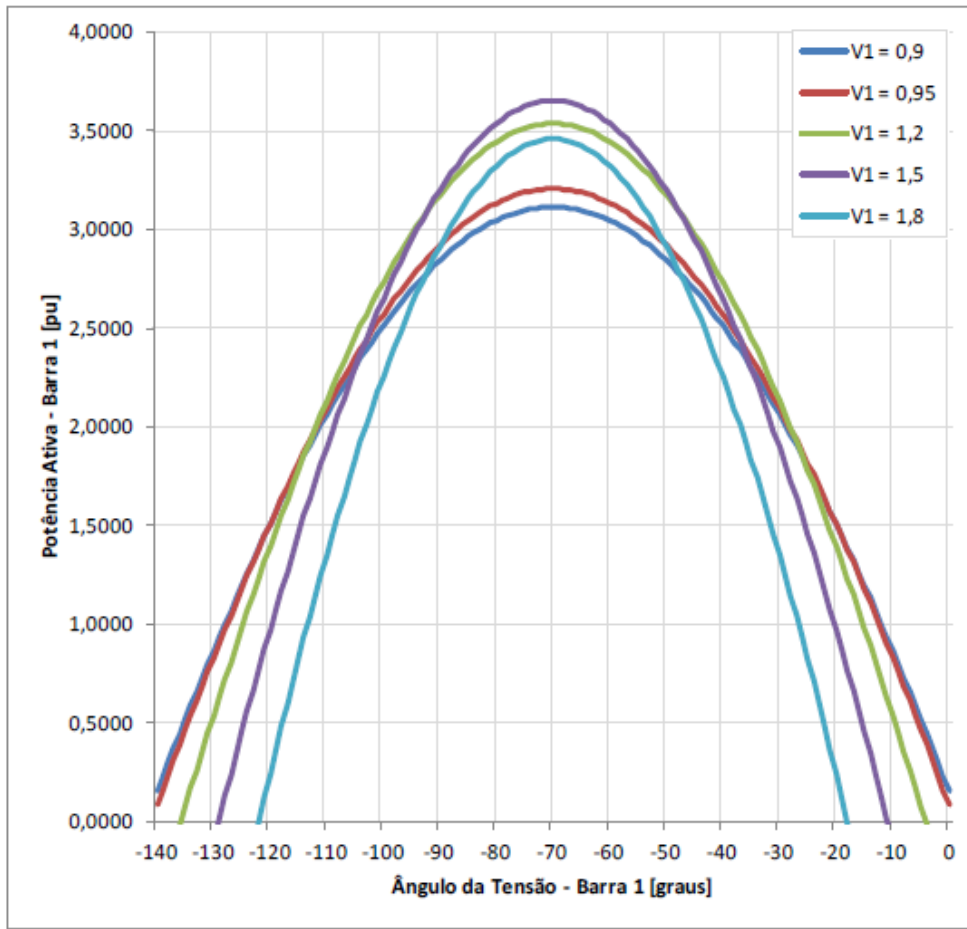


Figura 4.3: Curvas de V_1 Constante no Plano $\theta_1 P_1$

Pode-se constatar que há uma carga “*maximum maximorum*” P_1 que pode ser alimentada pela rede. Este resultado vale mesmo com a capacidade ilimitada de compensação de potência reativa na barra de carga.

Além disso, constata-se que o máximo ocorre quando o ângulo de tensão na carga é igual ao negativo do ângulo da impedância da linha de transmissão, $\theta_l = -\alpha_l$. Verifica-se este resultado pela simples análise da primeira derivada $(\partial P_1 / \partial \theta_l) = 0$ e a segunda derivada $\partial^2 P_1 / \partial \theta_l^2 < 0$ no ponto de máximo. O valor de V_l no qual P_1 é a carga “*maximum maximorum*” é calculado pelas derivadas $(\partial P_1 / \partial V_l) = 0$ e $\partial^2 P_1 / \partial \theta_l^2 < 0$ fazendo-se $\theta_l = -\alpha_l$. Este resultado é importante e será discutido com mais profundidade.

Da mesma forma como foram traçadas curvas no plano $\theta_1 P_1$, pode-se traçar curvas no plano $\theta_1 V_1$. Fazendo-se P_1 constante e variando θ_1 em (4.6), pode-se calcular V_1 e, portanto, traçar a curva P_1 constante no plano $\theta_1 V_1$. Analogamente, variando-se θ_1 em (4.7), pode-se calcular V_1 e, portanto a curva Q_1 constante no plano $\theta_1 V_1$.

Na Figura 4.4 são apresentadas as curvas de nível para quatro valores de P_1 e Q_1 constantes.

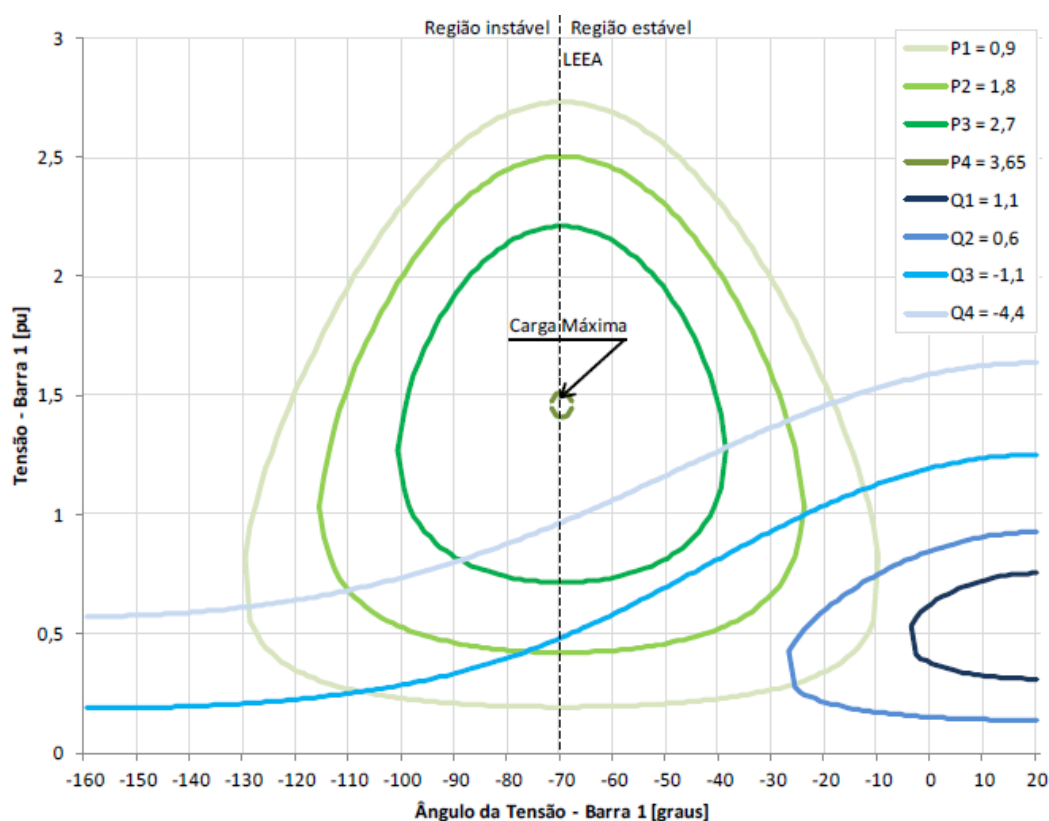


Figura 4.4: P_1 e Q_1 Constantes no Plano $\theta_1 V_1$ para Diferentes Valores de P_1 e Q_1

Observa-se novamente a existência de uma máxima carga que pode ser atendida - “*maximum maximorum*” mesmo com compensação ilimitada de potência reativa. Há uma correspondência entre as curvas das Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, todas indicam uma máxima potência que pode ser transmitida para uma carga.

Os pontos de operação formados por pares $\theta_1 V_1$ com $\theta_1 = -\alpha_i$ formam uma reta chamada Limite de Estabilidade Estática Angular - LEEA. Pode-se obter o

LEEA fazendo V_I constante (é necessário suporte de potência reativa) e calculando o ponto de máximo de (4.6) através de $(\partial P_I / \partial \theta_I) = 0$ para $\theta_I = -\alpha_t$.

Por outro lado, a partir da análise das curvas da Figura 4.4, verifica-se que para uma carga $P_I + jQ_I$ podem-se ter duas soluções de tensão V_I^A e V_I^B (com módulo de valor real positivo, por definição). Aumentando-se a carga $P_I + jQ_I$ (Q_I mais indutivo) com fator de potência constante, as soluções V_I^A e V_I^B se aproximam até coincidirem em um único ponto $V_I^A \equiv V_I^B$. Se P_I e Q_I continuarem aumentando, as curvas “ P_I constante no plano $\theta_I V_I$ ” e “ Q_I constante no plano $\theta_I V_I$ ” não mais se cruzam, ou seja, não há solução de tensão. Desta forma, para certo fator de potência ϕ , há uma máxima carga ativa e reativa que pode ser alimentada.

Portanto, pôde-se verificar a existência de duas, uma ou nenhuma solução para a tensão ao aumentar o carregamento do sistema. Quando há duas soluções para a tensão em uma barra do sistema, uma delas pertencerá à região normal de operação e a outra à região anormal de operação, onde ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado.

Como exemplo numérico, considerando os dados da rede da Figura 4.1, as equações (4.6) e (4.7) podem ser reescritas:

$$V_1^2 \left[\frac{\cos(\alpha_t)}{Z_t} \right] - V_1 \left[\frac{V_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \right] + [P_1] = 0 \quad (4.8)$$

$$V_1^2 \left[\frac{\text{sen}(\alpha_t)}{Z_t} \right] - V_1 \left[\frac{V_0 \text{sen}(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \right] + [Q_1] = 0 \quad (4.9)$$

$$V_1 = \frac{V_0 [\text{sen}(\theta_{10} + \alpha_t) - \tan(\phi) \cos(\theta_{10} + \alpha_t)]}{\text{sen}(\alpha_t) - \tan(\phi) \cos(\alpha_t)} \quad (4.10)$$

Utilizando-se (4.8), (4.9) e (4.10), as curvas no plano $\theta_I V_I$ para diferentes valores de P , Q e ϕ constantes podem ser traçadas. A curva ϕ constante no plano $\theta_I V_I$ é traçada variando-se θ_I em (4.10) e calculando V_I .

Na Figura 4.5 são mostradas as curvas para fator de potência na carga $\phi=41,18^\circ$ indutivo. Estão representados três níveis de potência ativa e reativa na carga. Para $P_1 = 0,800 \text{ pu}$ e $Q_1 = 0,700 \text{ pu}$, duas soluções para a tensão na carga se apresentam em $V_1^A = 0,0741 \text{ pu}$ e $V_1^B = 0,287 \text{ pu}$ (curva P_1 constante e Q_1 constante se cruzam em dois pontos). À medida que P_1 e Q_1 crescem, mantendo ϕ constante, as duas soluções se aproximam até que em $P_2 = 1,000 \text{ pu}$ e $Q_2 = 0,875 \text{ pu}$ a solução é única em $V_1^C = 0,516 \text{ pu}$ (curva P_2 constante e Q_2 constante se tocam em um único ponto). Para cargas maiores, por exemplo, $P_3 = 1,200 \text{ pu}$ e $Q_3 = 1,050 \text{ pu}$ não existe solução para tensão (curva P_3 e Q_3 constantes não se tocam em nenhum ponto). Conclui-se graficamente que existe um limite máximo para cada fator de potência na carga.

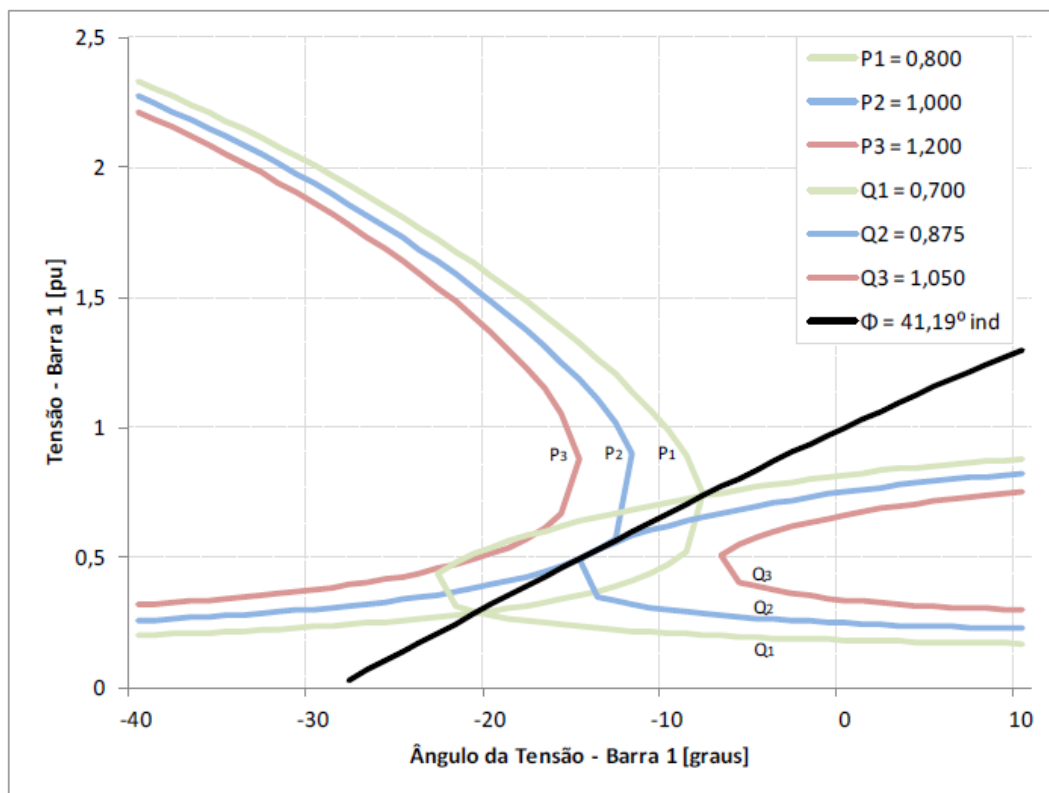


Figura 4.5: Soluções de Tensão na Carga com o Mesmo Fator de Potência

Em complemento aos gráficos apresentados, a curva da Figura 4.6 é construída aumentando-se o valor do carregamento do sistema e mantendo $\phi=41,18^\circ$ constante na carga. Deve-se notar que o ponto de máximo carregamento

de P_1 assinalado na Figura 4.6 corresponde às curvas $P_2 = 1,000 \text{ pu}$ e $Q_2 = 0,875 \text{ pu}$ da Figura 4.5 que se tocam em um único ponto.

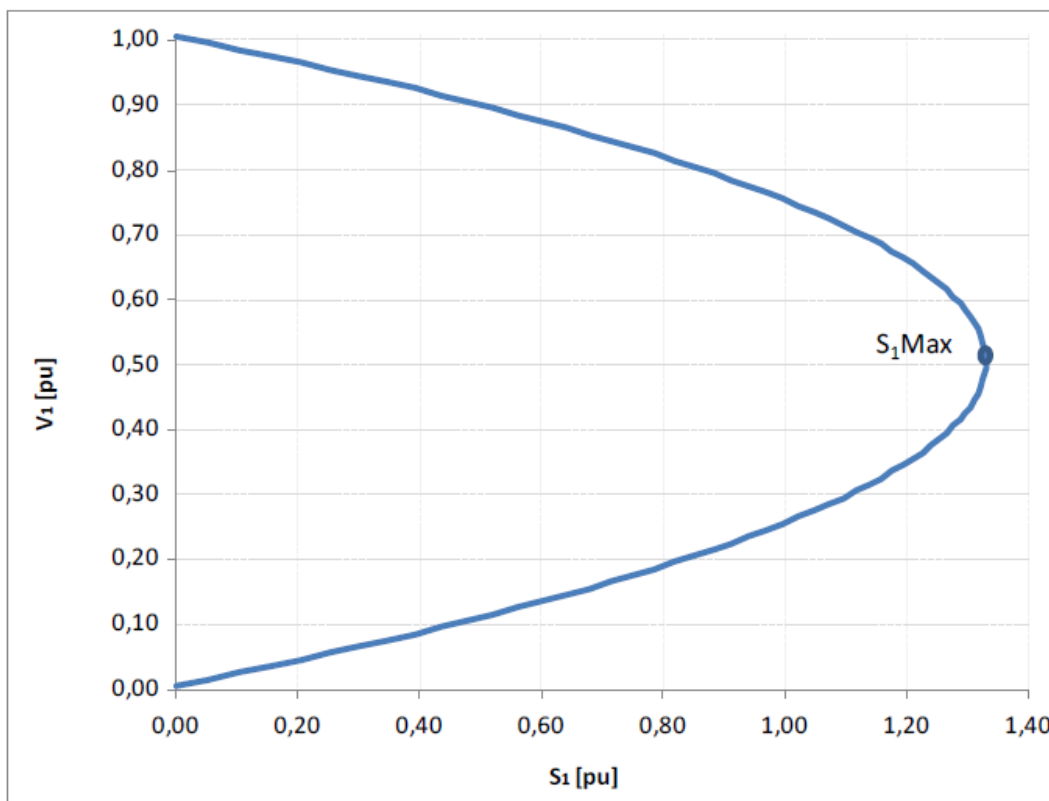


Figura 4.6: Curva para ϕ Constante no Plano S_1V_1

4.3.

Impedância de Carga no Máximo Carregamento

A máxima potência que pode ser transmitida para uma carga, para cada fator de potência, está estreitamente relacionada ao valor de sua impedância equivalente. Este ponto de máximo satisfaz a condição de que a impedância da carga é igual à impedância da linha de transmissão, a ser visto.

Utiliza-se o mesmo circuito da Figura 4.1, mas com outra representação, como mostrado na Figura 4.7.

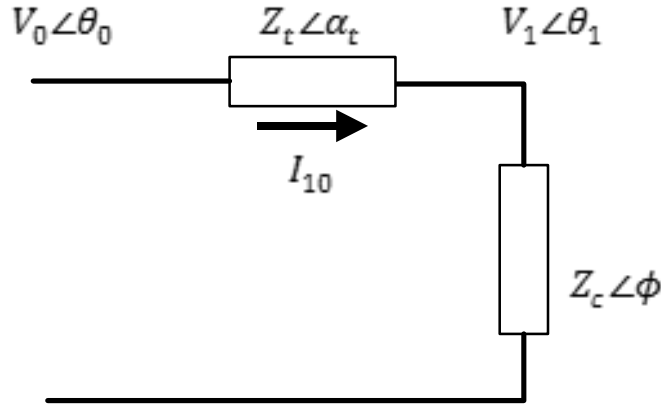


Figura 4.7: Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga

A corrente que flui da barra 0 para a barra 1 pela linha de transmissão da Figura 4.7 é:

$$\dot{I}_{10} = \frac{\dot{V}_0}{Z_t \angle \alpha_t + Z_c \angle \phi} \quad (4.11)$$

$$I_{10} = \frac{V_0}{\sqrt{(Z_t \cos(\alpha_t) + Z_c \cos(\phi))^2 + (Z_t \sin(\alpha_t) + Z_c \sin(\phi))^2}} \quad (4.12)$$

A potência ativa que flui a partir da barra de carga, que é igual ao negativo da potência consumida na carga, é:

$$P_{10} = -P_1 = -I_{01}^2 Z_c \cos(\phi) \quad (4.13)$$

Substituindo-se (4.12) em (4.13), calcula-se a potência elétrica injetada na barra terminal 1:

$$P_{10} = -P_1 = -\frac{V_0^2 Z_c \cos(\phi)}{Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \phi)} \quad (4.14)$$

De (4.14) encontra-se p valor de Z_c que maximiza a potência ativa na carga através de $\partial P_1 / \partial Z_c = 0$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_1}{\partial Z_c} = & \frac{V_0^2 \cos(\phi) \left[Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \phi) \right]}{\left[Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \phi) \right]^2} \\ & - \frac{V_0^2 Z_c \cos(\phi) \left[2Z_c + 2Z_t \cos(\alpha_t - \phi) \right]}{\left[Z_t^2 + Z_c^2 + 2Z_t Z_c \cos(\alpha_t - \phi) \right]^2} = 0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Operando (4.15):

$$V_0^2 Z_t^2 \cos(\phi) = V_0^2 Z_c^2 \cos(\phi) \quad \therefore \quad Z_c = Z_t \quad (4.16)$$

Calcula-se $\partial^2 P_1 / \partial Z_c^2$ para conferir se o valor encontrado é efetivamente um máximo:

$$\frac{\partial^2 P_1}{\partial Z_c^2} \Big|_{(Z_c=Z_t)} < 0 \quad (4.17)$$

De (4.16) e (4.17), conclui-se que P_1 é máximo quando a impedância da linha de transmissão Z_t , é igual à impedância da carga Z_c .

$$Z_C = Z_t \quad (4.18)$$

4.4.

Limite de Estabilidade de Tensão

A partir do desenvolvimento anterior chega-se a uma relação analítica que identifica se o ponto de operação em análise está no máximo carregamento para o

sistema de duas barras em estudo. O conjunto dos pontos que satisfazem esta relação faz parte de um lugar geométrico chamado Limite de Estabilidade de Tensão – LET.

Como visto, para o ponto de máximo carregamento, o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão. Percebe-se que P_{10} é mínimo quando P_I é máximo. Substituindo-se (4.18) em (4.14), tem-se:

$$P_{10}^{\min} = -\frac{V_0^2 Z_c \cos(\phi)}{2Z_c^2 [1 + \cos(\alpha_t - \phi)]} = -\frac{V_0^2 \cos(\phi)}{4Z_c \cos^2\left(\frac{\alpha_t - \phi}{2}\right)} \quad (4.19)$$

que é reduzido à:

$$P_1^{\max} = \frac{V_0^2 \cos(\phi)}{4Z_c \cos^2\left(\frac{\alpha_t - \phi}{2}\right)} \quad (4.20)$$

Para P_I^{\max} e uma dada impedância de carga Z_c com fator de potência ϕ :

$$V_1 = Z_c I_{01} \therefore V_1 = \frac{V_0 Z_c}{\sqrt{2Z_t^2 (1 + \cos(\alpha_t - \phi))}} \quad (4.21)$$

$$V_{1 \text{ Critico}} = \frac{V_0}{2 \cos\left(\frac{\alpha_t - \phi}{2}\right)} \quad (4.22)$$

De (4.18), sabe-se que $Z_c = Z_t$, então:

$$\dot{V}_1 = \dot{Z}_c \dot{I}_{01} \quad (4.23)$$

$$V_1 \angle \theta_1 = Z_c \angle \phi \frac{\dot{V}_0}{Z_t \angle \alpha_t + Z_c \angle \phi} \quad (4.24)$$

Considerando só a parte real:

$$V_1^c = \frac{V_0}{2 \cos(\theta_1)} \quad (4.25)$$

Igualando-se (4.22) e (4.25):

$$\frac{V_0}{2 \cos(\theta_1)} = \frac{V_0}{2 \cos\left(\frac{\alpha_t - \phi}{2}\right)} \quad (4.26)$$

E de (4.26) calcula-se o ângulo crítico na barra terminal:

$$\theta_1^c = \frac{\alpha_t - \phi}{2} \quad (4.27)$$

O LET é o lugar geométrico das tensões em módulo e ângulo (V_l^c e θ_l^c), onde o módulo da impedância equivalente da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão série. O LET representa os pontos da máxima transmissão de potência à carga, uma para cada fator de potência (o que depende de eventual compensação reativa da carga). Em outras palavras, variando-se ϕ e utilizando-se (4.25) e (4.27) traça-se o LET sobre as curvas de ϕ constante no plano SV .

Na Figura 4.8 é mostrado um exemplo onde estão representadas diferentes curvas, uma para cada fator de potência.

O LET passa pelas “pontas” de todas as curvas para ϕ constante no plano SV , isto é, une todos os pontos de máximo carregamento. Além disso, o LET separa as duas regiões de operação: a região superior da curva para ϕ constante, e a parte onde se tem controle sobre a tensão, e a região inferior da curva para ϕ constante, é onde as ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado.

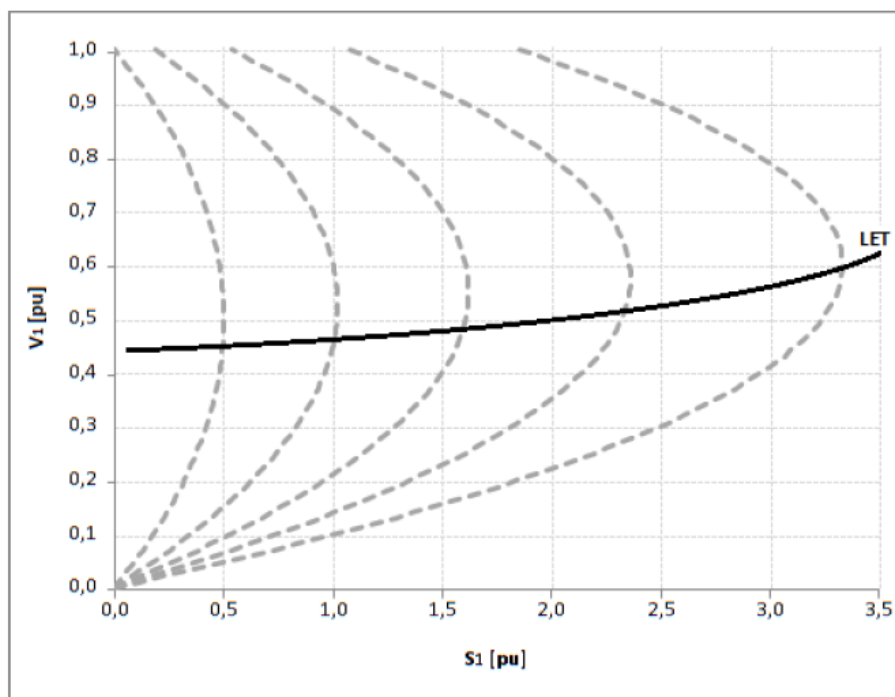


Figura 4.8: LET sobre as Curvas ϕ Constante no Plano SV

4.5. Capacitor em Paralelo na Barra de Carga

Considere um capacitor na barra de carga do sistema de duas barras apresentado na Figura 4.1, conforme na Figura 4.9, e as equações de potência ativa e reativa injetadas na barra terminal.

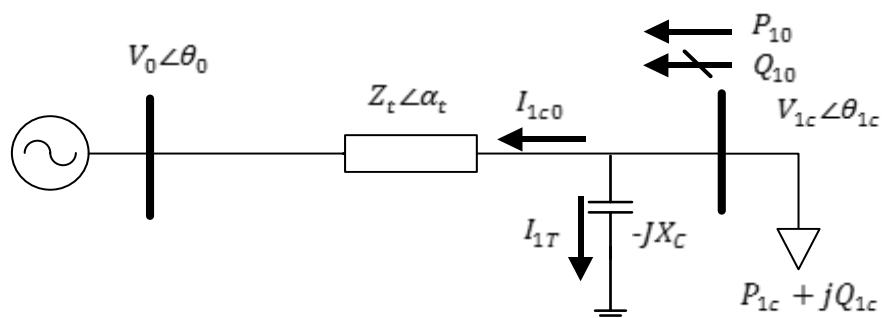


Figura 4.9: Sistema de Duas Barras com Capacitor na Barra Terminal

O sistema representado na Figura 4.9 pode ser usado para ilustrar que a adição de capacitores em paralelo com a carga pode aumentar a capacidade de transmissão.

O capacitor adicionado compõe com a potência reativa da carga e, então, o fator de potência do conjunto fica menos indutivo (ou mais capacitivo). Porém, o efeito benéfico da adição de capacitores é restrito a uma determinada região de operação. Deve-se deixar claro que sua adição ao sistema pode reduzir a tensão ou reduzir a capacidade de transmissão, como será visto.

Com base na Figura 4.9 pode-se escrever:

$$S_{1c0}^* = P_{1c0} - jQ_{1c0} = V_{1c0}^* (I_{1c0} + I_{1T}) \quad (4.28)$$

$$I_{1c0} = \frac{V_{1c0} \angle \theta_{1c} - V_0 \angle \theta_0}{Z_t \angle \alpha_t} \quad (4.29)$$

$$I_{1T} = \frac{V_{1c} \angle \theta_{1c}}{-jX_c} \quad (4.30)$$

$$V_{1c}^* = V_{1c} \angle -\theta_{1c} \quad (4.31)$$

Substituindo-se (4.29), (4.30) e (4.31) em (4.28):

$$S_{1c0}^* = \frac{V_{1c}^2 \cos(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_{1c} V_0 \cos(\theta_{1c0} + \alpha_t)}{Z_t} - j \left(\frac{V_{1c}^2 \sin(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_{1c} V_0 \sin(\theta_{1c0} + \alpha_t)}{Z_t} \right) \quad (4.32)$$

Separando-se em (4.32) a parte real e a parte imaginária da potência aparente injetada:

$$P_{1c0} = -P_{1c} = \frac{V_{1c}^2 \cos(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_{1c} V_0 \cos(\theta_{1c0} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (4.33)$$

$$Q_{1c0} = -Q_{1c} = V_{1c}^2 \left(\frac{\sin(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{1}{X_c} \right) - \frac{V_{1c} V_0 \sin(\theta_{1c0} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (4.34)$$

Substituindo-se (4.33) e (4.34) em (4.7) e colocando-se em evidência a tensão na barra terminal:

$$V_{1c} = \frac{-X_c V_0 [\cos(\theta_{1c0} + \alpha_t) \tan(\phi) - \sin(\theta_{1c0} + \alpha_t)]}{X_c \sin(\alpha_t) - Z_t - X_c \tan(\phi) \cos(\alpha_t)} \quad (4.35)$$

Em (4.35) mostra-se como calcular o módulo da tensão na barra de carga em um sistema de duas barras com capacitor em função do ângulo do fator de potência na carga. Para cada ϕ constante, variando-se θ_{1c0} em (4.35), pode-se calcular V_{1c} e, portanto, traçar a curva para ϕ constante no plano SV.

Assim como foi feito na Seção 4.2 pode-se traçar a curva ϕ constante no plano θV . Fazendo-se variar θ_{1c0} em (4.33) calcula-se V_{1c} para cada valor de P_{1c0} constante.

Da mesma forma, para Q_{1c0} constante, variando-se θ_{1c0} em (4.34), pode-se calcular V_{1c} e, portanto, traçar a curva para ϕ constante no plano θV .

Na Figura 4.10 têm-se as curvas para ϕ constante no plano $S_1 V_1$ sem e com a instalação de um capacitor. Constata-se que, se o ponto de operação pertence à região superior da curva, chamada região normal de operação, a compensação reativa faz com que a tensão aumente. Se estiver operando na região inferior da curva, chamada de região anormal de operação, onde ações de controle podem ter efeito oposto ao esperado, a instalação do capacitor faz a tensão diminuir.

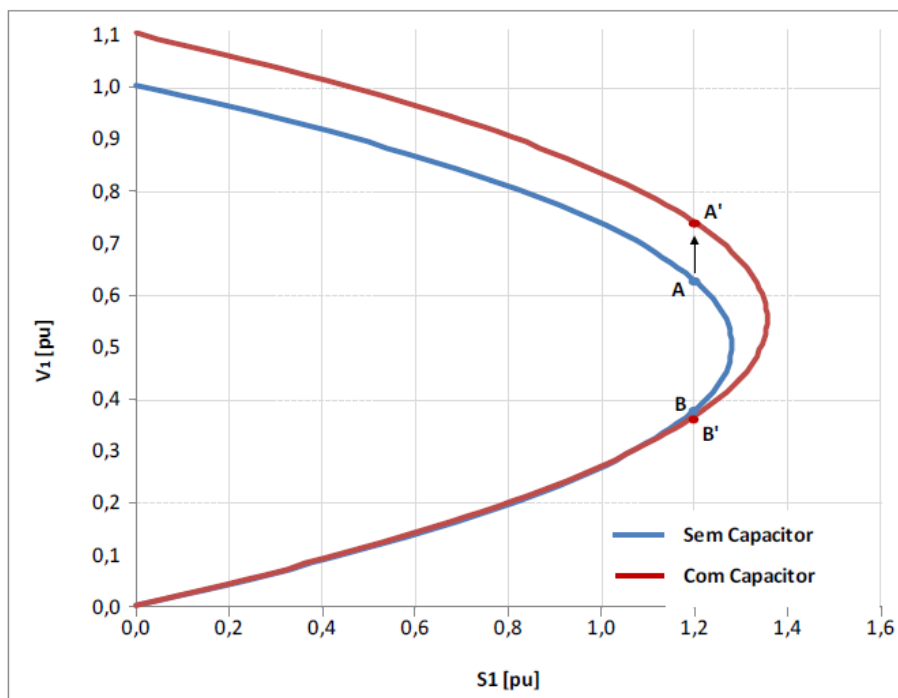


Figura 4.10: Aumento e Diminuição da Tensão Devido à Introdução de um Capacitor

Esta análise supõe que as potências ativa e reativa consumidas na carga independem da tensão (modelo de potência constante). Se as potências ativa e reativa consumidas na carga variam com o quadrado da tensão (modelo de impedância constante), só há uma solução de tensão. Portanto, a tensão irá subir com a instalação do capacitor estando o ponto de operação na parte superior ou inferior da curva para ϕ constante no plano SV, como se mostra na Figura 4.11.

Para cargas mistas, isto é, uma parcela do consumo de potência ativa e reativa independe da tensão e outra variável com o quadrado da tensão, a instalação do capacitor poderá diminuir a tensão caso o ponto de operação esteja na parte inferior da curva para ϕ constante no plano SV.

Em todos os casos anteriores, a instalação de capacitores aumentou a capacidade de transmissão. No entanto, isso deixa de acontecer a partir de certo valor de capacitor.

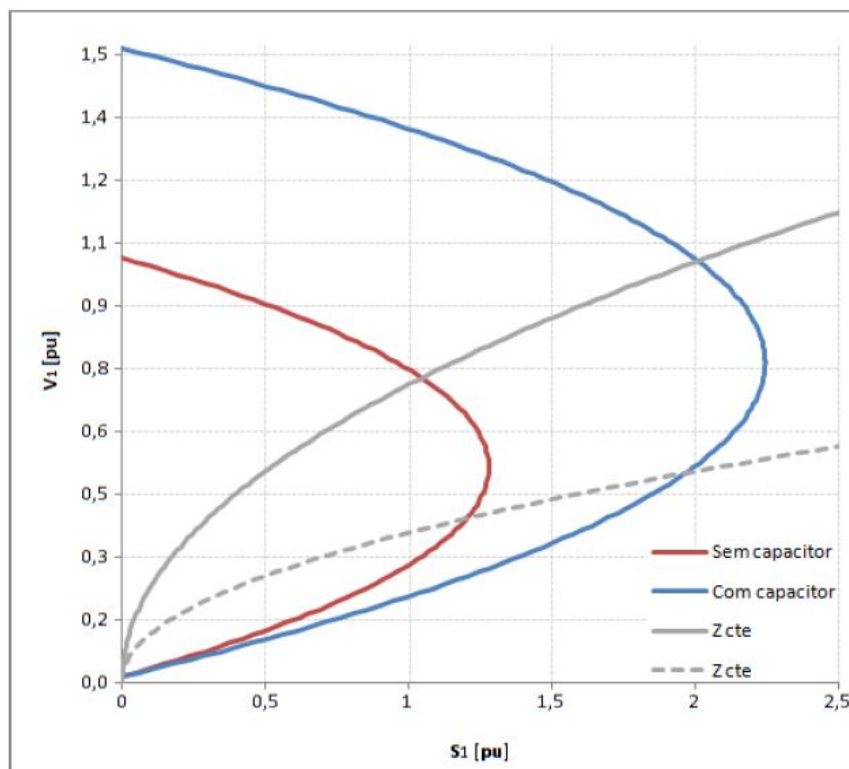


Figura 4.11: ϕ e Z_c Constantes no Plano SV com e sem Capacitor

O ponto de máximo carregamento “*maximum maximorum*” está no cruzamento do LET com o LEEA. Portanto, ao se passar para a região instável do ponto de vista angular, limitada pelo LEEA, está se reduzindo a capacidade de transmissão mesmo com mais injeção de potência reativa através de capacitores.

Conforme a Figura 4.12 para certa carga ativa P_1 constante e ponto de operação na parte superior da curva para ϕ constante no plano SV, a instalação de capacitores aumenta a tensão na carga quando $\theta_l > -\alpha_t$ e diminui a tensão na carga quando $\theta_l < -\alpha_t$. Para o ponto de operação na parte inferior da curva para ϕ constante no plano SV, a instalação de capacitores diminui a tensão na carga quando $\theta_l > -\alpha_t$ e aumenta a tensão na carga quando $\theta_l < -\alpha_t$.

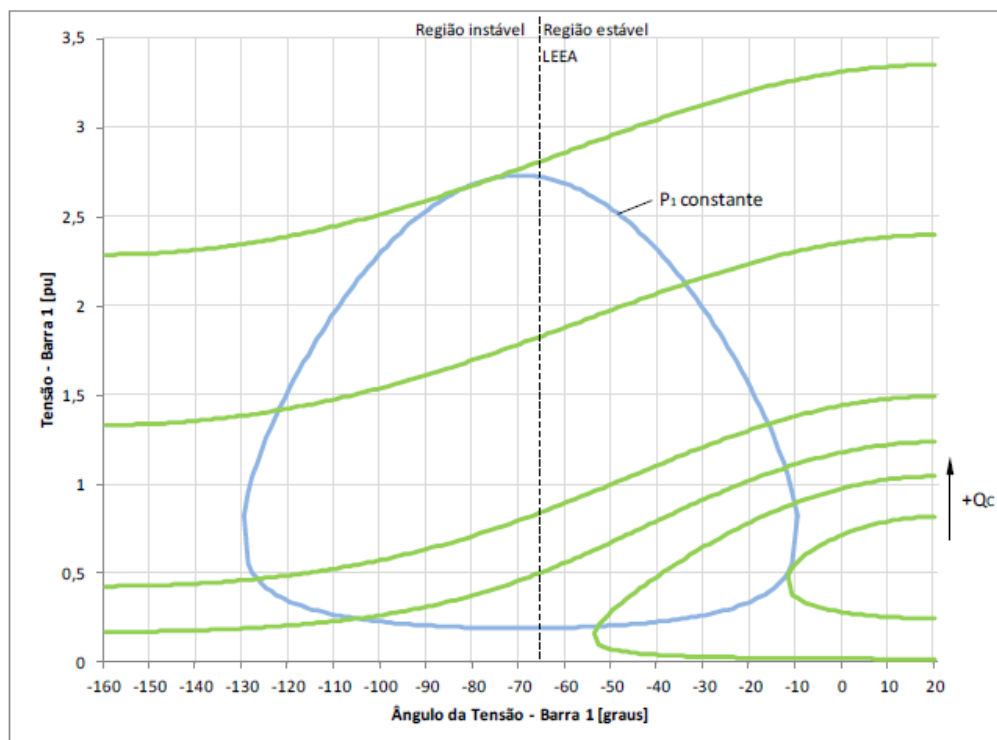


Figura 4.12: Ângulo de Tensão Barra 1 (graus)

4.6. Sumário do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o fenômeno da estabilidade de tensão, que está associado às condições nodais do sistema, relacionando o máximo fluxo de potência ativa e reativa transmitida dos geradores para as cargas e ações de controle de tensão tendo o efeito oposto ao esperado.

A caracterização do fenômeno foi desenvolvida a partir de um circuito de duas barras, observando-se que existe uma máxima potência para cada valor de módulo de tensão. Mesmo com a capacidade ilimitada de compensação de potência reativa na barra de carga, pode-se constatar que há uma carga máxima que pode ser alimentada pela rede. O limite de estabilidade estática angular foi definido como o ângulo da tensão para o qual a potência é máxima.

Observou-se que para um fator de potência constante, podem existir duas, uma ou nenhuma solução para a tensão ao aumentar o carregamento do sistema. Havendo duas, uma delas pertencerá à região normal de operação e a outra à região anormal de operação, onde ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao

esperado, caso a carga se comporte como o modelo de potência constante. Desta forma foi definida a curva para ϕ constante no plano SV. O limite de estabilidade de tensão é representando pelos pontos de máxima transmissão de potência à carga no plano SV.

Com a instalação de um capacitor na barra de carga do sistema de duas barras foi possível constatar que, se o ponto de operação pertence à região superior da curva, chamada região normal de operação, a compensação reativa faz com que a tensão aumente. Caso o ponto de operação pertença à região inferior da curva, chamada de região anormal de operação, a instalação do capacitor faz a tensão diminuir.