

## 2

### Estabilidade de Tensão

#### 2.1

#### Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão

##### 2.1.1

##### Introdução

Considere que o sistema elétrico apresentado na Figura 2.1 não apresenta qualquer limitação: capacidade ilimitada de geração de potência ativa, capacidade ilimitada de geração e absorção de potência reativa, linha de transmissão sem limite térmico, barras sem limitações de tensão máxima ou mínima, sistema sem problemas de estabilidade transitória e angular etc.

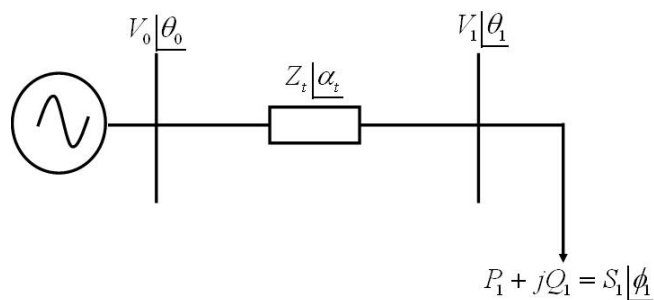


Figura 2.1: Sistema de 2 Barras sem Qualquer Limitação

As seguintes equações são válidas para esse circuito:

$$P_1 = -\frac{V_1^2}{Z_t} \cos(\alpha_t) + \frac{V_1 V_0}{Z_t} \cos(\theta_{10} + \alpha_t) = f(V_1, \theta_1) \quad (2.1)$$

$$Q_1 = -\frac{V_1^2}{Z_t} \text{sen}(\alpha_t) + \frac{V_1 V_0}{Z_t} \text{sen}(\theta_{10} + \alpha_t) = g(V_1, \theta_1) \quad (2.2)$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (2.3)$$

Considerando-se que a tensão do gerador e a impedância da linha de transmissão são dados do problema, as expressões para  $P_1$  e  $Q_1$  são funções da  $V_1$  e de  $\theta_1$ , como indicado em (2.1) e (2.2). Sendo assim, fixando-se  $P_1$  ou  $Q_1$ , é possível obter os valores para  $V_1$  quando  $\theta_1$  varia.

Na Figura 2.2 são apresentadas diversas curvas  $P_1$  constante no plano  $\theta_1 V_1$ . Os valores de  $P_1$  variam de zero até um valor máximo,  $P_{1max}$ . A área ocupada por  $P_1=0$  é o lugar geométrico das tensões na barra 1, em módulo e ângulo, para todas as cargas (ativa e reativa) do sistema apresentado na Figura 2.1. Quanto maior for a carga  $P_1$ , menor é o lugar geométrico para  $\theta_1$  e  $V_1$ . Observa-se ainda que, para cada valor de  $\theta_1$ , tem-se duas soluções de módulo de tensão. No limite, isto é em  $P_{1max}$ , o lugar geométrico se resume a um único ponto, ou seja, as soluções para as tensões coincidem. Não é possível transmitir potência para alimentar a carga maior que  $P_{1max}$  porque não existirá lugar geométrico para  $\theta_1$  e  $V_1$ .

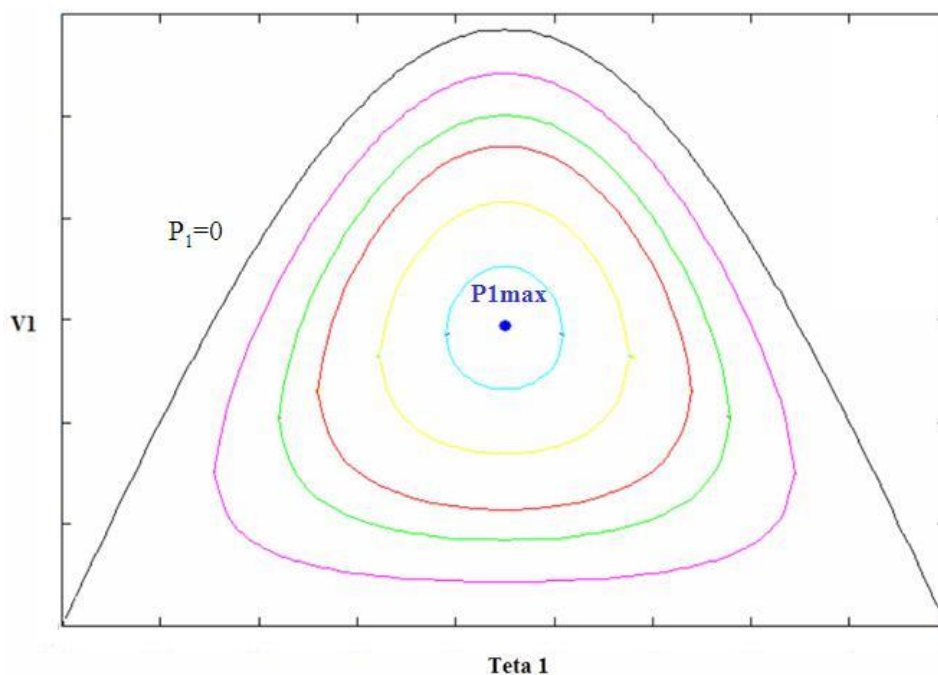


Figura 2.2: Curvas  $P_1$  Constante no plano  $\theta_1 V_1$

Na Figura 2.3 são apresentadas diversas curvas  $Q_1$  constante no plano  $\theta_1 V_1$ , seguindo o mesmo raciocínio apresentado anteriormente. Os valores de  $Q_1$  variam de determinado valor capacitivo até um valor máximo indutivo, que corresponde a um ponto ( $Q_{1max}$ ), passando  $Q_1=0$ . É interessante notar, a partir

das Figuras 2.2 e 2.3, que apesar de o sistema de duas barras apresentado na Figura 2.1 não apresentar qualquer limitação, foram observadas potências ativa e reativa máximas. Esse é um indicativo da existência de um fenômeno no simples circuito elétrico sob análise, como será estudado.

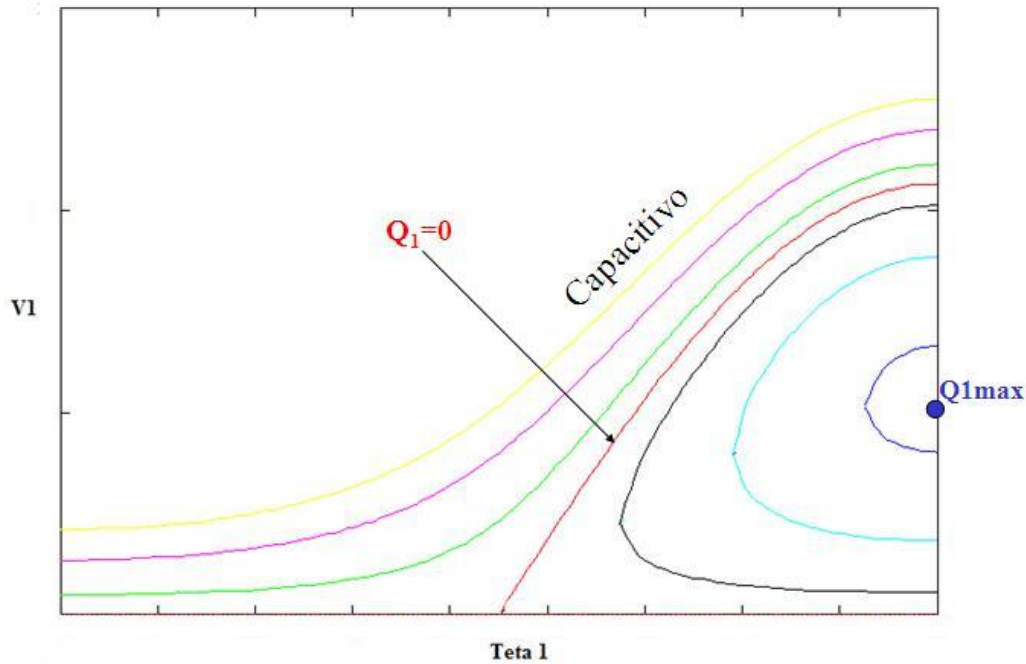


Figura 2.3: Curvas  $Q_1$  Constante no plano  $\theta_1 V_1$

Ainda em relação ao circuito elétrico apresentado na Figura 2.1, sendo  $\phi_l$  o ângulo referente ao fator de potência da carga, tem-se, a partir de (2.1) e (2.2):

$$\operatorname{tg}(\phi_l) = \frac{\frac{V_1^2}{Z_l} \operatorname{sen}(\alpha_l) - \frac{V_1 V_0}{Z_l} \operatorname{sen}(\theta_{10} + \alpha_l)}{\frac{V_1^2}{Z_l} \cos(\alpha_l) - \frac{V_1 V_0}{Z_l} \cos(\theta_{10} + \alpha_l)} = h(V_1, \theta_1)$$

De forma análoga ao que foi apresentado para  $P_l$  e  $Q_l$ , na Figura 2.4 são apresentadas diversas curvas  $\phi_l$  constante no plano  $\theta_1 V_1$ , sendo que os valores do fator de potência ( $\cos \phi_l$ ) variam de valores capacitivos até valores indutivos,

passando pelo fator de potência unitário. Cabe mencionar que o ponto de encontro das curvas refere-se ao ponto de operação em vazio ( $V_0|\theta_0$ ) para os diferentes ângulos de fator de potência da carga.

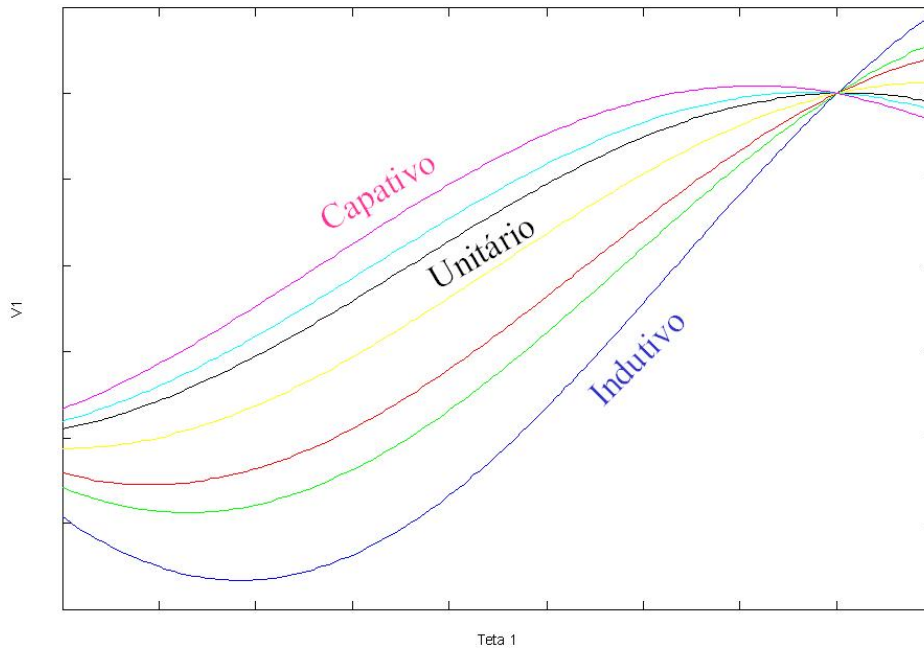


Figura 2.4: Curvas  $\phi_1$  Constante no plano  $\theta_1 V_1$

Para uma certa carga inicial do sistema ( $P_{li} + jQ_{li}$ ), na Figura 2.5 apresenta-se as curvas  $P_{li}$ ,  $Q_{li}$  e  $\phi_1$  constantes. Observa-se que, para esse carregamento, tem-se duas soluções de módulo de tensão (pontos A e B). Aumentando-se o carregamento, mantendo-se constante  $\phi_1$ , as duas soluções de tensão se aproximam, até um determinado carregamento máximo no qual as duas soluções de tensão coincidem (ponto C), conforme apresentado na Figura 2.6. Aumentando-se mais ainda o carregamento do sistema, passa-se a não ter mais solução, conforme apresentado na Figura 2.7.

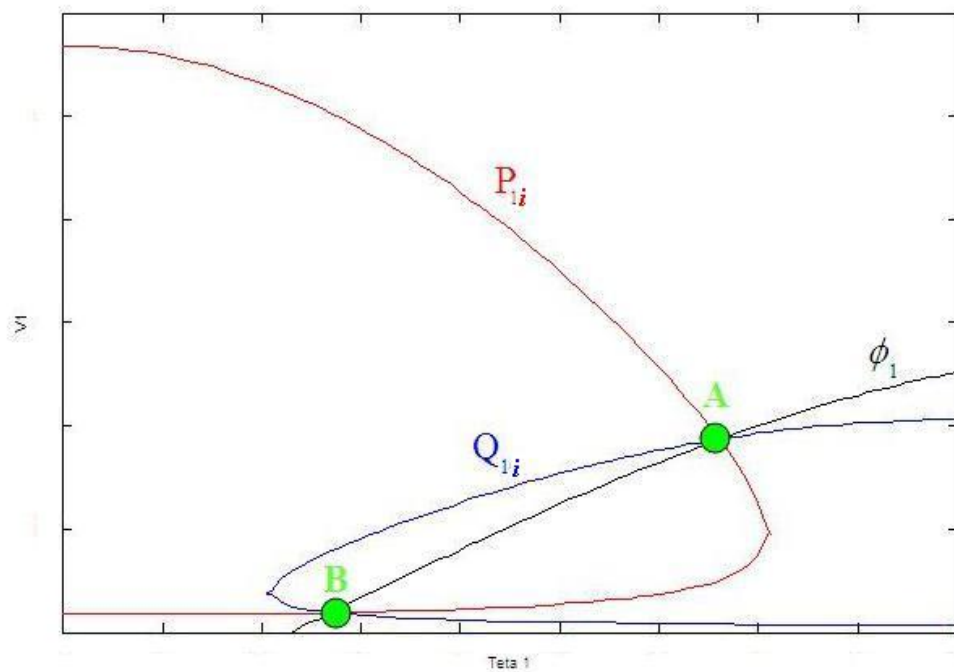


Figura 2.5: Curvas  $P_1$ ,  $Q_1$  e  $\phi_1$  Constantes no Plano  $\theta_1 V_1$

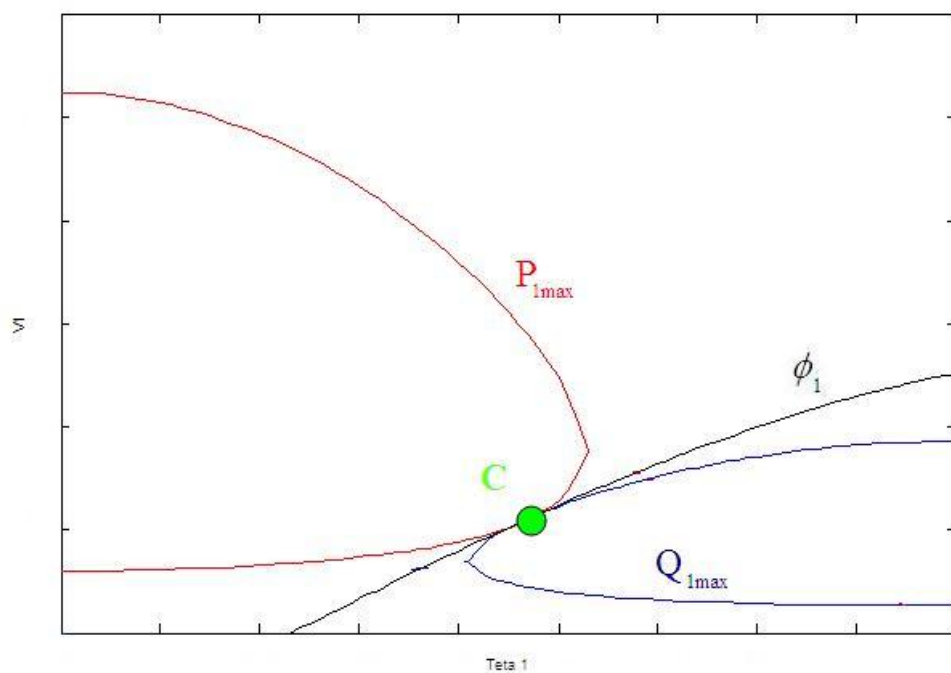


Figura 2.6: Curvas  $P_{1max}$ ,  $Q_{1max}$  e  $\phi_1$  Constantes no Plano  $\theta_1 V_1$

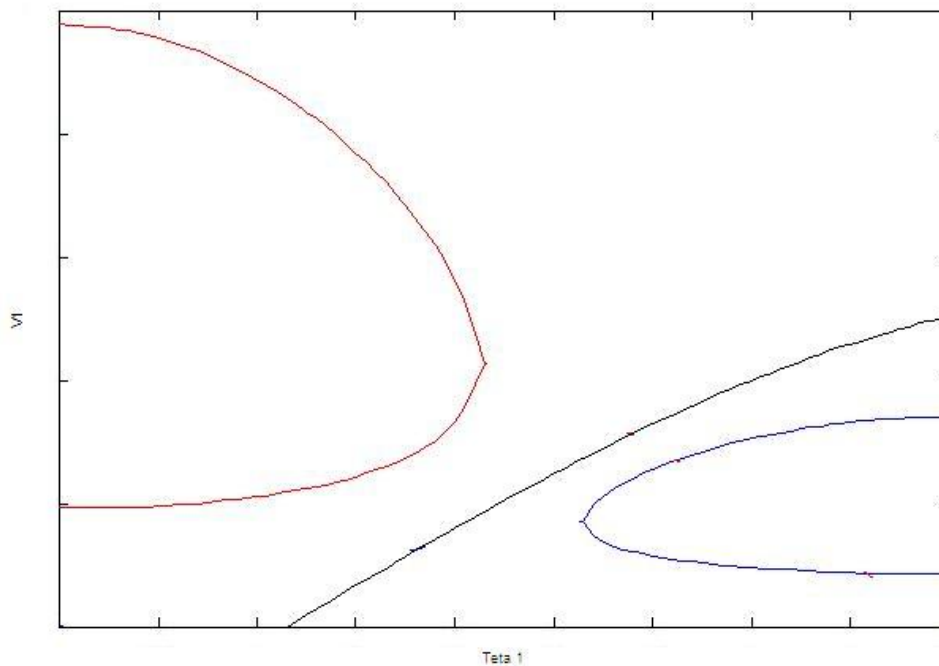


Figura 2.7: Curvas  $P_1$ ,  $Q_1$  e  $\phi_1$  Constante no Plano  $\theta_1 V_1$  com Carregamento Maior que o Máximo

### 2.1.2

#### Curvas $\phi_1$ Constante no Plano $S_1 V_1$

Outra forma de se efetuar a análise apresentada é traçar curvas com  $\phi_1$  constante, nos planos  $P_1 V_1$ ,  $Q_1 V_1$  ou  $S_1 V_1$ , utilizando-se (2.1), (2.2) ou (2.3). Na Figura 2.8 apresenta-se a curva referente à potência aparente, que será a mais utilizada neste trabalho. Essas curvas, também conhecidas como “curvas do nariz”, possuem soluções na região normal (com tensão elevada e baixa corrente) e soluções na região anormal (com tensão baixa e elevada corrente), para cada carregamento.

Os pontos A (região normal) e B (região anormal), apresentados na Figura 2.5, também podem ser visualizados na Figura 2.8. Através desta Figura também pode ser observado que, na medida em que o carregamento vai aumentando, as soluções de tensão vão se aproximando até um ponto em que coincidem (ponto C), que corresponde ao ponto de máximo carregamento do sistema, também apresentado na Figura 2.6.

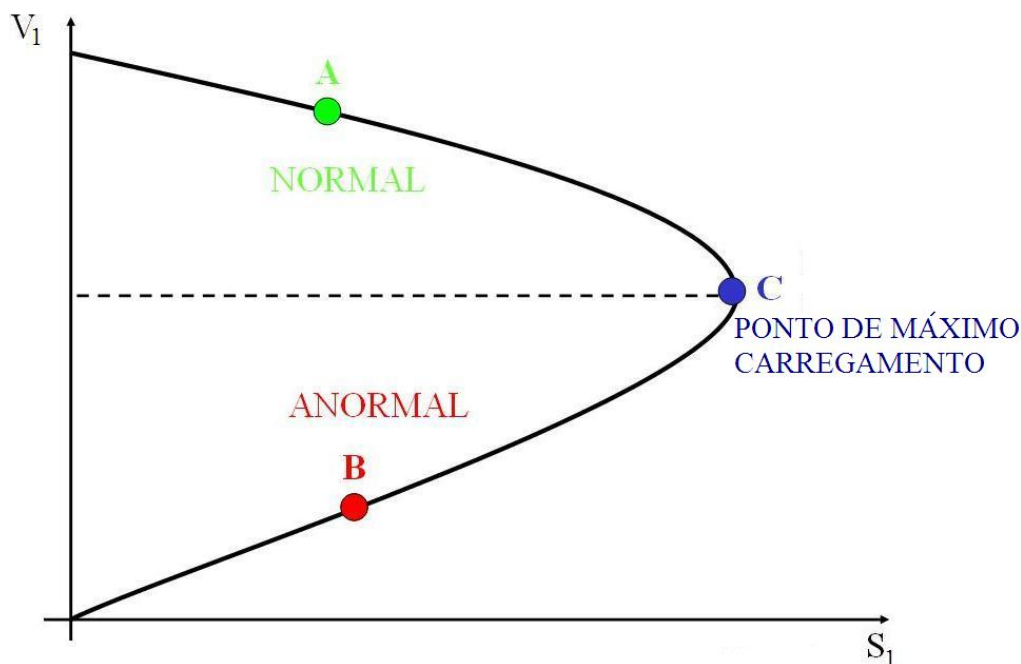


Figura 2.8: Curvas  $\phi_1$  Constante no Plano  $S_1V_1$

Os valores de  $P_1$ ,  $Q_1$  ou  $S_1$  correspondem ao fluxo de potência chegando na barra de carga. Curvas semelhantes às apresentadas podem ser obtidas, de modo análogo, analisando-se os fluxos de potência saindo da barra de geração.

Aqui, chega-se ao primeiro ponto para se caracterizar o fenômeno de estabilidade de tensão que é a **existência de um fluxo máximo de potência ativa e reativa chegando na barra de carga e saindo da barra de geração**, apesar de o sistema-teste da Figura 2.1 não apresentar qualquer limitação.

Destaca-se que a maioria dos artigos sobre estabilidade de tensão aborda somente a questão referente à potência reativa, desconsiderando também a análise das barras de geração.

### 2.1.3

#### Ações para Aumento da Máxima Capacidade de Transmissão e de Controle de Tensão

Considere agora a inserção de um capacitor na barra de carga, conforme Figura 2.9. A equação para  $P_1$  não muda, porém a equação para  $Q_1$  passa a ser:

$$Q_1 = -V_1^2 \left( \frac{\text{sen}(\alpha_i)}{Z_i} - \frac{1}{Xc} \right) + \frac{V_1 V_0}{Z_i} \text{sen}(\theta_{10} + \alpha_i)$$

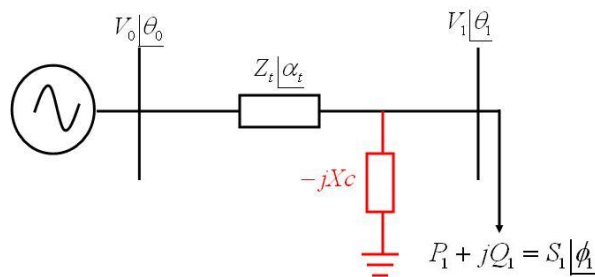


Figura 2.9: Sistema de 2 Barras com Capacitor

Através da Figura 2.10, observa-se que a introdução do capacitor faz com que o ponto de máximo carregamento aumente. Pode ser observado ainda que, se o sistema opera no ponto de operação A (região normal) e é inserido capacitor no circuito com o objetivo de se elevar a tensão, essa ação de controle tem efeito esperado tanto para carga S constante (novo ponto de operação será A') quanto para carga Z constante (novo ponto de operação será A'').

Por outro lado, conforme apresentado na Figura 2.11, se o sistema opera no ponto de operação B (região anormal) e é inserido capacitor no circuito com o objetivo de se elevar a tensão, essa ação de controle tem efeito oposto ao esperado para carga S constante (novo ponto de operação será B'), ou seja, a tensão diminui quando o capacitor é inserido. Se o modelo da carga é Z constante, porém, a ação de controle terá efeito esperado (novo ponto de operação ponto de operação será B'').

A inserção de capacitor foi apenas um exemplo de ação de controle de tensão e de aumento da máxima capacidade de transmissão. Através de outras ações, como as apresentadas a seguir, também é possível chegar às mesmas conclusões qualitativas apresentadas anteriormente:

- aumento do valor de  $V_0$ ;
- inserção de outra linha de transmissão paralela à já existente;
- inclusão de compensação série capacitiva;
- corte de carga (apenas como ação de controle de tensão);
- inclusão de transformador com troca de *taps*, como será abordado nesta tese;



Chega-se então ao segundo ponto importante na caracterização do fenômeno de estabilidade de tensão que é a **possibilidade de uma ação de controle de tensão ter efeito oposto ao esperado** na região anormal, dependendo do modelo da carga.

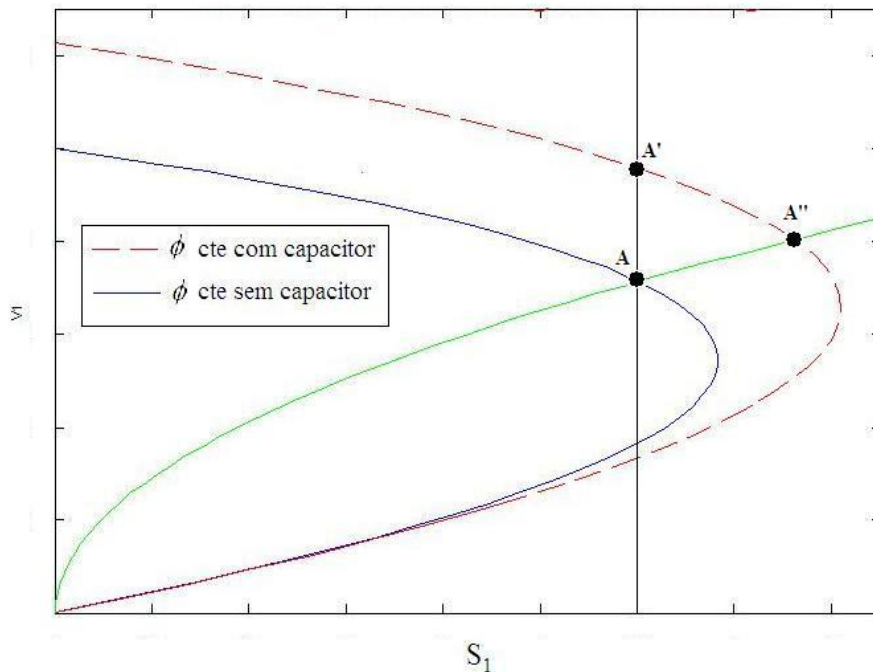


Figura 2.10: Curvas para as Situações Com e Sem Capacitor e Análise da Ação de Controle de Tensão com Ponto de Operação na Região Normal

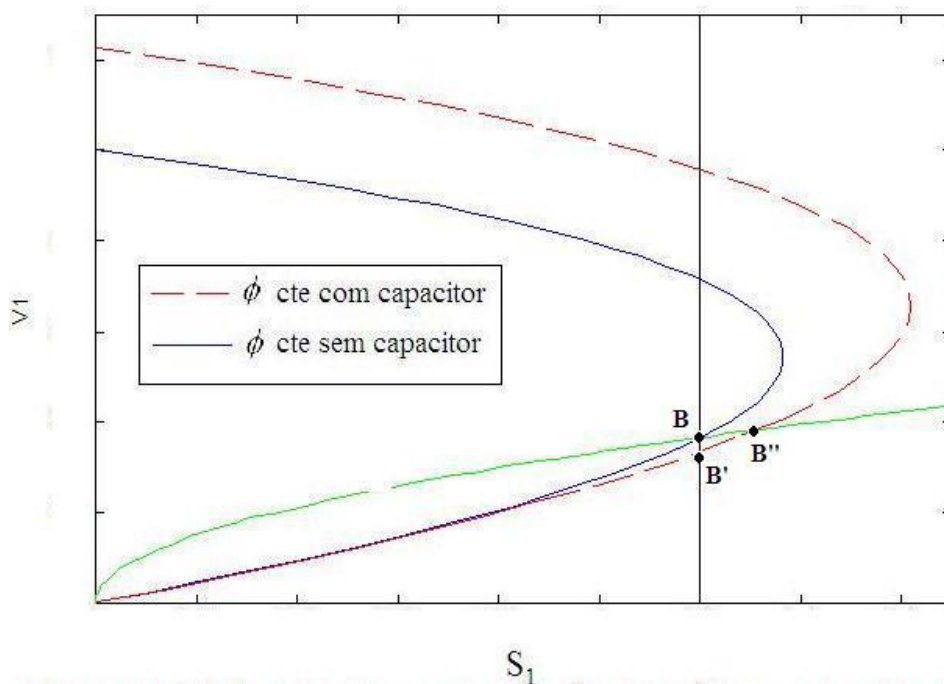


Figura 2.11: Curvas para as Situações Com e Sem Capacitor e Análise da Ação de Controle de Tensão com Ponto de Operação na Região Anormal

Ainda em relação às regiões de operação, conclui-se que a região normal (com tensões elevadas e correntes baixas), chamada na literatura de região estável, é uma região de controlabilidade das tensões, independente do modelo de carga. Por outro lado, a região anormal (com tensões baixas e correntes elevadas), chamada na literatura de região instável, é uma região de possibilidade de incontabilidade das tensões, dependendo do modelo da carga. Diversos artigos apresentados na literatura mencionam que a região anormal é teórica. Em [12] é apresentada operação real do sistema brasileiro nesta região. Além disso, através de testes em laboratório é possível obter pontos de operação na região anormal, conforme apresentado no Capítulo 6 e em [13]. É importante registrar, porém, que não é desejável que o sistema opere na região anormal, devido à possibilidade de ações de controle de tensão terem efeitos opostos aos desejados, como explicado.

#### 2.1.4

#### **Problema de Estabilidade de Tensão Devido ao Suporte Excessivo de Potência Reativa**

Na Figura 2.12 apresenta-se diversas curvas  $\phi_l$  constante no plano  $S_l V_l$ , obtidas de uma situação inicial, sem compensação reativa, a partir da qual foram efetuadas três inserções de bancos de capacitores gradativas, no sistema de 2 barras apresentado na Figura 2.9. Após a entrada de cada banco, observa-se que os pontos de máximo carregamento aumentam e que as tensões se elevam na região normal de operação, tanto se a carga é modelada como potência constante quanto impedância constante.

Percebe-se que, na situação inicial (sem capacitores), o problema de estabilidade de tensão não se manifestaria na prática, devido aos baixos valores de tensão nas proximidades do ponto de máximo carregamento e na região anormal, que levariam à atuação de proteção no sistema devido à sub-tensão, antes da ocorrência do fenômeno. Na medida em que são inseridos capacitores, porém, torna-se possível a operação próxima ao ponto de máximo carregamento e na região anormal, uma vez que os valores de tensão, nessas regiões, permanecem dentro da faixa usual de operação das tensões.

Diversos trabalhos apresentados na literatura mencionam que o problema de estabilidade de tensão é causado pela falta de suporte de potência reativa. De fato, a falta de potência reativa é um aspecto importante a ser avaliado, mas o suporte excessivo de potência reativa faz com que o problema de estabilidade de tensão seja observado na prática, podendo causar sérios problemas à operação dos sistemas elétricos de potência. Todavia, essa é uma questão difícil de ser monitorada na operação em tempo real.

É possível explicar, então, porque os problemas de estabilidade de tensão começaram a ser observados somente no final da década de 70. Os sistemas elétricos de potência originalmente operavam com baixo carregamento. Assim, o problema de estabilidade de tensão era apenas teórico. Devido ao crescimento da carga, não acompanhado por investimentos em transmissão, compensação de potência reativa começou a ser usada para aumentar a capacidade das linhas de transmissão, levando o ponto de máximo carregamento e até mesmo a região anormal da curva  $\phi$  constante no plano  $SV$  para a faixa usual de operação das tensões. Em função disso, o fenômeno começou a ser observado na prática.

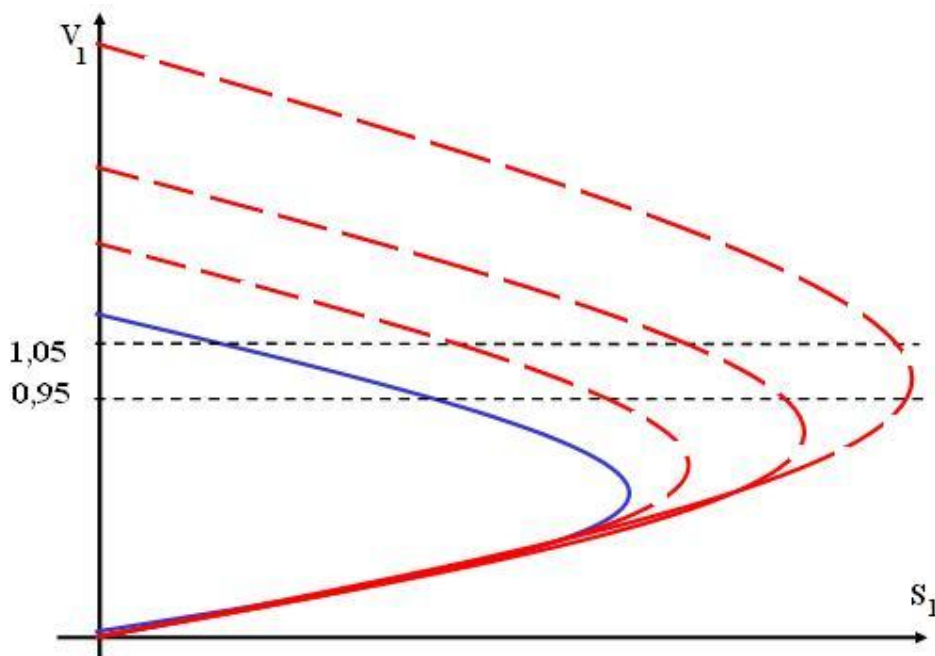


Figura 2.12: Excesso de Compensação de Potência Reativa Levando o Ponto de Máximo Carregamento e a Região Anormal para a Faixa Usual de Operação das Tensões

### 2.1.5

#### Impedância Equivalente da Carga no Ponto de Máximo Carregamento

Na Figura 2.13 é apresentado o circuito da Figura 2.1, com a carga modelada como impedância constante. Nessa situação, de acordo com [14], o módulo da impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento, vale  $Z_c$ . Ou seja, quando o módulo da impedância da carga  $Z_l$  for igual ao módulo da impedância da linha de transmissão  $Z_t$ , a potência transmitida para a carga é a máxima.

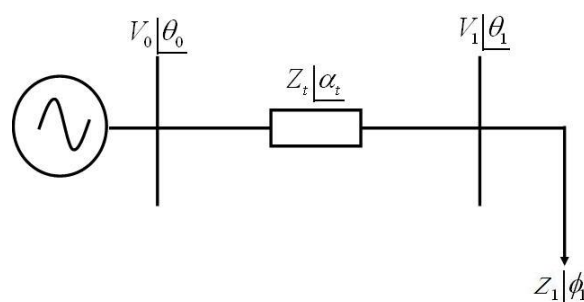


Figura 2.13: Sistema de 2 Barras com Carga Modelada como Impedância Constante

Por outro lado, se a representação do circuito de 2 barras for genérica, com impedâncias em paralelo ao gerador e à carga, conforme Figura 2.14; obtendo-se o circuito equivalente de Thevenin visto da carga, apresentado na Figura 2.15, o mesmo raciocínio pode ser utilizado. Nesse caso, então, analogamente ao que foi apresentado no sistema de 2 barras apresentado na Figura 2.13, o módulo da impedância da carga no ponto de máximo carregamento será  $Z_{th}$ . Ou seja, quando o módulo da impedância da carga  $Z_l$  for igual ao módulo da impedância equivalente de Thevenin vista dos terminais da carga ( $Z_{th}$ ), a potência transmitida é máxima.

As duas situações apresentadas podem ser observadas no circuito de 2 barras nas situações sem ou com capacitor na barra 1, representado na Figura 2.9. Na Figura 2.16 representa-se esse circuito, com a carga modelada como impedância constante, de forma que a curva  $\phi_1$  constante no plano  $S_1V_1$  é obtida variando-se a carga de  $Z_l = \infty$ , onde  $V_1=V_0$ , até  $Z_l=0$ , onde  $V_1=0$ . Nesse caso, o módulo da impedância da carga no ponto de máximo carregamento, na situação

sem capacitor, vale  $Z_t$  e na situação com capacitor vale  $Z_{th} = \left| \dot{Z}_t // -jX_c \right|$ , como indicado na Figura 2.17.

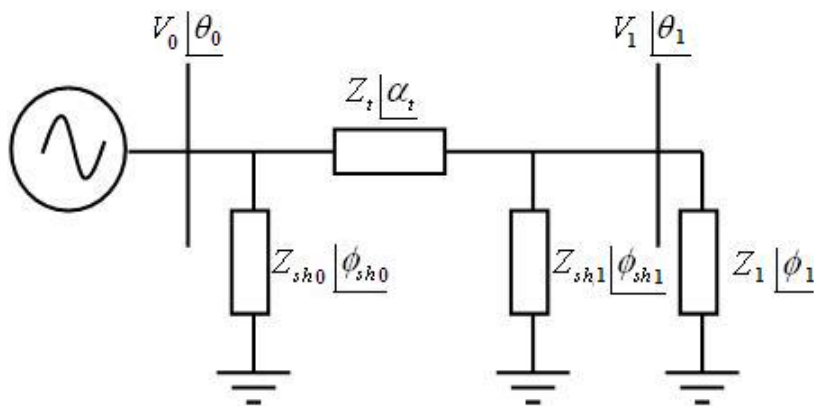


Figura 2.14: Sistema Genérico de 2 barras

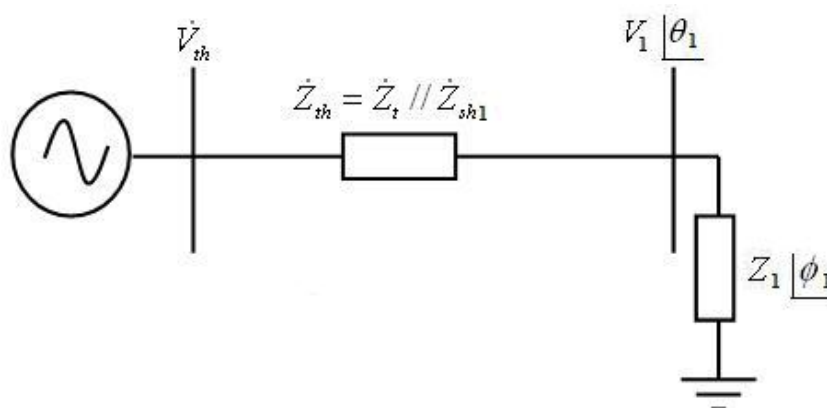


Figura 2.15 - Equivalente de Thevenin do Sistema Genérico

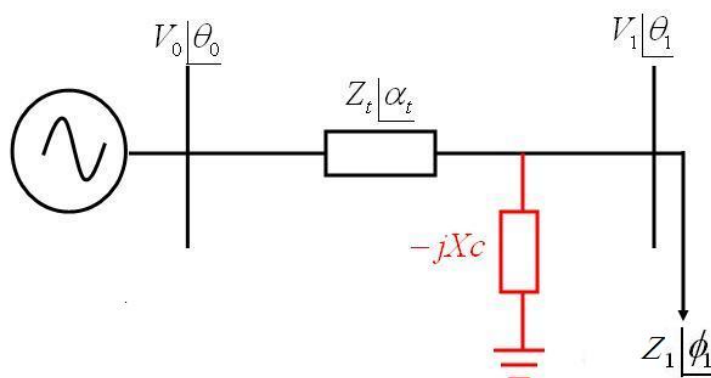


Figura 2.16 – Sistema de 2 Barras com Capacitor com Carga Modelada como Impedância Constante

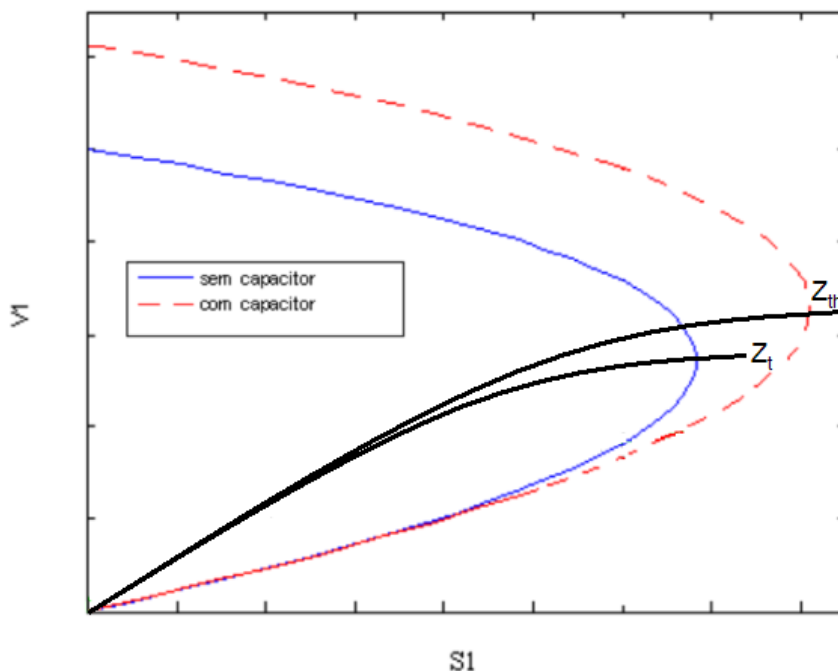


Figura 2.17: Indicação das Impedâncias no Ponto de Máximo Carregamento nas Situações Sem e Com Capacitor

### 2.1.6

#### Existência de uma Potência “Maximum Maximorum”

Considerando-se novamente o circuito da Figura 2.9 e supondo-se que sucessivos bancos de capacitores são inseridos na barra 1, observa-se que os pontos de máximo carregamento vão aumentando gradualmente até certo valor, a partir do qual o ponto de máximo carregamento começa a diminuir, conforme indicado na Figura 2.18. Chega-se, então, ao terceiro ponto importante para caracterizar o fenômeno de estabilidade de tensão: **mesmo havendo capacidade infinita de suporte de potência reativa, existe uma máxima potência ativa que pode chegar às barras de carga (ou de sair das barras de geração)**. Há que se registrar, também, que esse  $P_{max}$ , que corresponde ao valor indicado na Figura 2.2, não pode ser obtido na prática, devido à violação de limites de estabilidade angular.

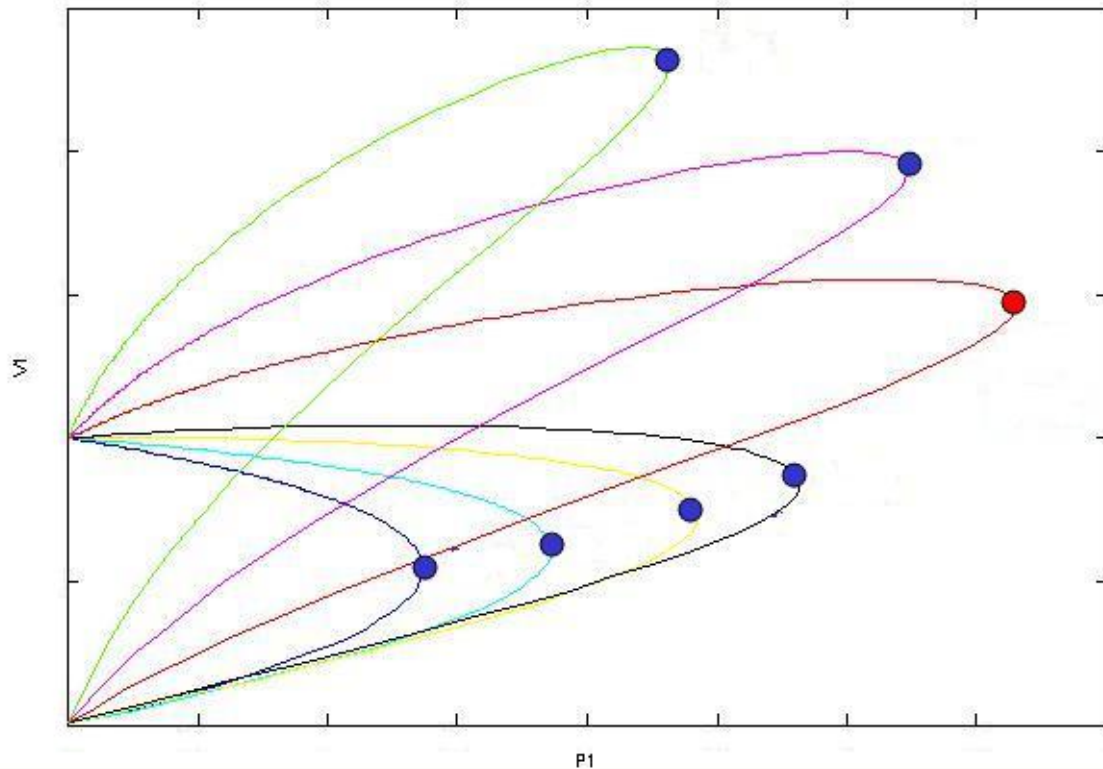


Figura 2.18: Existência de uma Potência Máxima mesmo com Capacidade Infinita de Suporte de Potência Reativa

### 2.1.7

#### Resumo

O fenômeno de estabilidade de tensão deve-se a fluxos de potência ativa e reativa excessivos em linhas e transmissão. Resumidamente, é caracterizado por:

- 1) existência de um fluxo de potência ativa e reativa máximo chegando na barra de carga e saindo da barra de geração;
- 2) possibilidade de uma ação de controle de tensão ter efeito oposto ao esperado na região anormal, dependendo do modelo da carga;
- 3) mesmo havendo capacidade infinita de suporte de potência reativa, existe uma máxima potência ativa (teórica) que pode chegar às barras de carga (ou sair das barras de geração).

## 2.2

### Avaliação e Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão

As análises de estabilidade de tensão podem ser divididas em duas partes: avaliação (indicação de barras críticas) e, se necessário, reforço das condições de estabilidade de tensão (ações de controle na operação do sistema elétrico, com o objetivo de melhorar as condições das barras críticas).

No que tange à avaliação, o aspecto referente à estabilidade de tensão mais abordado na literatura é a margem de estabilidade de tensão,  $M=Sm-Si$ , de curvas  $\phi$  constante no plano  $SV$ , ou seja, a "distância" entre a injeção de potência no ponto de operação atual  $Si$  ao ponto de máximo carregamento da barra de carga sob análise  $Sm$ . É importante a obtenção dessa margem, uma vez que não é desejável a operação próxima ao ponto C, pois pequenos aumentos da carga provocam uma queda de tensão acentuada. Várias ferramentas podem ser utilizadas para estimar essa margem, como o fluxo de potência continuado [15 e 16] e o método do ponto de colapso [17 e 18].

Outro aspecto de bastante relevância em estudos de estabilidade de tensão, raramente abordado na literatura, é avaliar se a solução da tensão está na região normal ou na região anormal, onde ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado. O método da matriz  $D'$  [19] tanto estima a margem de estabilidade de tensão (para barras de carga ou de geração), quanto informa se o ponto de operação está na região normal ou anormal.

Detectadas as barras críticas na avaliação (barras com margens negativas ou positivas, mas menores que certo valor pré-estabelecido), inicia-se o reforço das condições de estabilidade de tensão. Nesta etapa, são calculadas ações de controle na operação do sistema elétrico com o objetivo de aumentar a margem das barras críticas, atuando na origem do problema: fluxos de potência ativa e reativa excessivos em ramos de transmissão.

A estratégia para aumentar a margem da barra crítica, apresentada em [20], é descobrir qual é o ramo mais carregado e diminuir o fluxo de potência através dele, desviando esse fluxo para outros ramos, menos carregados. Assim a carga continuará sendo atendida, porém, parte do fluxo será desviado para outra parte da rede menos carregada.



As ações de controle para diminuir o fluxo de potência no ramo crítico (ramo mais carregado), com o objetivo de aumentar a margem da barra crítica são as seguintes:

- alteração do perfil de tensão (redespacho de potência reativa);
- se necessário e adequado, redespacho de potência ativa;
- se necessário e adequado, chaveamento em subestações;
- e, como último recurso, corte de carga.