

# Capítulo 8

## Introdução à Estabilidade de Tensão

### 8.1 Introdução

Além dos fenômenos de estabilidade angular já estudados, a possibilidade de ocorrência de problemas ligados à estabilidade de tensão vem se tornando, no passado recente, um assunto de grande preocupação nas empresas de energia elétrica do mundo inteiro. Os fenômenos de estabilidade de tensão estão intrinsecamente ligados ao fluxo de potência reativa sobre a rede, ao comportamento das cargas face a variações de tensão, à ação de dispositivos automáticos de controle de tensão e limitação de sobre-excitação de geradores, etc..

Este capítulo pretende introduzir os principais conceitos ligados à estabilidade de tensão e apresentar um método de análise qualitativa do fenômeno baseado no uso das características  $P - V$  da rede elétrica e das cargas.

### 8.2 Transmissão de Potência Reativa

#### 8.2.1 Análise Utilizando Modelos Simplificados

Para o modelo simplificado de sistema de potência da Fig. 1, verificamos que a potência aparente entregue ao terminal receptor é:

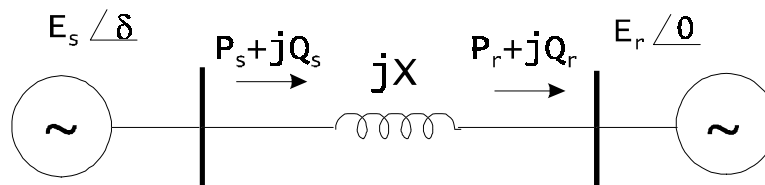


Figura 1: Modelo simplificado de sistema de potência.

$$S_r = P_r + jQ_r = \dot{E}_r \dot{I}^* = \dot{E}_r \left( \frac{E_s \angle \delta - E_r}{jX} \right)^*$$

ou

$$S_r = \frac{E_s E_r}{X} \text{sen } \delta + j \left( \frac{E_s E_r}{X} \text{cos } \delta - \frac{E_r^2}{X} \right)$$

e portanto:

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{E_s E_r}{X} \operatorname{sen} \delta \\ Q_r &= \frac{E_s E_r}{X} \cos \delta - \frac{E_r^2}{X} \end{aligned} \quad (8.1)$$

Para o terminal gerador, seguindo o mesmo procedimento, obteríamos:

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{E_s E_r}{X} \operatorname{sen} \delta \\ Q_s &= \frac{E_s^2}{X} - \frac{E_s E_r}{X} \cos \delta \end{aligned} \quad (8.2)$$

Observe que o fato de que  $P_s = P_r$  confirma o fato de que o sistema simplificado é sem perdas. Os resultados para potência ativa são as expressões familiares utilizadas na análise de estabilidade via curvas potência-ângulo. Para a potência reativa, verificamos que  $Q_s \neq Q_r$ . Deve ser também observado que valores positivos de  $Q_s$  e  $Q_r$  seguem o sentido indicado na Fig. 1.

Para avaliar a variação da magnitude das potências ativa e reativa no tempo, suponhamos inicialmente que  $E_s = E_r$ . Definamos também

$$P_{\max} \triangleq \frac{E_s E_r}{X}$$

Neste caso, verificamos facilmente que

$$Q_s = -Q_r = \frac{E^2 - E^2 \cos \delta}{X} \quad (8.3)$$

As curvas de potência ativa e potência reativa em função do ângulo  $\delta$  estão mostradas na Fig. 2. Como sabemos, a operação estável só é possível para  $\delta < 90^\circ$ . Não obstante, observamos a grande variação da potência reativa para valores altos de  $\delta$ . Para  $\delta = 90^\circ$ , verificamos que a potência reativa *a ser gerada em cada um dos terminais, do gerador e da carga* (observe o sinal de  $Q_r$ ) é igual a  $P_{\max}$ !

Estaremos entretanto mais interessados nesta seção em situações em que as magnitudes de tensão nos extremos da linha são variáveis, e especialmente quanto à potência reativa que pode ser transmitida por uma linha ou um transformador quando a tensão na carga sofre um afundamento durante uma situação emergencial. Para melhor distinguir esta situação, denotaremos a partir de agora as tensões complexas nos dois extremos da linha por  $V_s \angle \theta$  e  $V_r \angle 0$ . Logo, as Eqs. (8.1) e (8.2) são agora re-escritas como:

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{V_s V_r}{X} \operatorname{sen} \delta & P_s &= \frac{V_s V_r}{X} \operatorname{sen} \delta \\ Q_r &= \frac{V_s V_r}{X} \cos \delta - \frac{V_r^2}{X} & Q_s &= \frac{V_s^2}{X} - \frac{V_s V_r}{X} \cos \delta \end{aligned} \quad (8.4)$$

Também re-definiremos  $P_{\max} \triangleq V_s V_r / X$ . Note que, para defasagens pequenas entre  $\dot{V}_s$  e  $\dot{V}_r$ , podemos escrever:

$$P_r = P_s \approx P_{\max} \theta$$

Seção 8.2 Transmissão de Potência Reativa

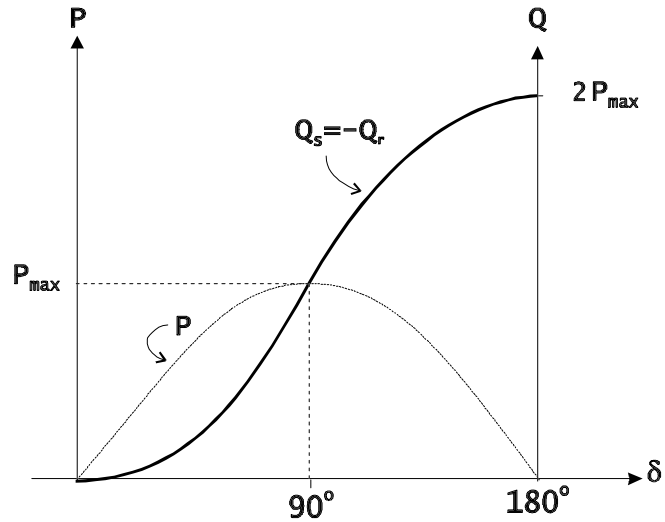


Figura 2: Variação das potências ativa e reativa em função de  $\delta$ .

o que confirma o fato bem conhecido de que a transferência de potência ativa depende principalmente da diferença angular entre  $\tilde{V}_s$  e  $\tilde{V}_r$ . Para baixos valores de  $\theta$ , a potência reativa pode ser aproximada por:

$$Q_r \approx \frac{V_r(V_s - V_r)}{X}$$

$$Q_s \approx \frac{V_s(V_s - V_r)}{X}$$

de onde concluímos que a transmissão de potência reativa depende principalmente das magnitudes de tensão, e que flui da tensão mais alta para a tensão mais baixa. As observações acima apenas confirmam que

$P$  e  $\theta$  são fortemente acoplados, e  
 $Q$  e  $V$  são fortemente acoplados.

Contudo, estas relações falham durante situações em que o sistema é muito exigido, e estas situações são as que mais nos interessam, já que é nelas que os fenômenos de instabilidade de tensão costumam ocorrer. Para ilustrar estas situações, considere o exemplo abaixo.

**Exemplo** - Sejam  $\theta = 30^\circ$ ,  $V_s = 1,0 \text{ pu}$  e  $V_r = 0,9 \text{ pu}$ . Logo:

$$Q_s = \frac{1,0^2 - 1,0 \times 0,9 \times 0,866}{X} = \frac{0,22}{X}$$

$$Q_r = \frac{1,0 \times 0,9 \times 0,866 - 0,9^2}{X} = -\frac{0,03}{X}$$

Logo, uma grande quantidade de potência reativa é injetada na linha, porém nada chega à carga! Pelo contrário, a linha solicita ainda  $Q = 0,03/X$  do terminal receptor. Ou seja, a

linha de transmissão é um “dreno” de potência reativa, e consome neste caso  $0,25/X$  pu.

### 8.2.2 Relação entre os Consumos de Potência Ativa e Reativa em Situações Realísticas

Considere uma linha de transmissão real de  $500$  kV e  $160$  km de comprimento, para a qual:

$$\begin{aligned} r &\approx 0 \\ x_L &= 0,2064 \text{ pu} \\ b_{shunt} &= 0,2023 \text{ pu} \end{aligned}$$

onde a potência-base considerada é de  $100$  MVA. Note que a única simplificação considerada é supor que a linha não tem perdas ativas. Consideramos, por exemplo, a capacidade da linha gerar potência reativa, já que não desprezamos as capacitâncias em derivação do circuito equivalente  $\pi$ .

O método dos *diagramas circulares de potência*, muito usados no planejamento da operação antes do advento dos computadores digitais, permite analisar a relação entre as potências ativa e reativa sobre a linha, em ambos os extremos, em função das tensões  $V_s$  e  $V_r$ . Analisaremos duas situações:

**Caso a:**  $V_s = 1,0$  pu,  $V_r = 0,95$  pu;

**Caso b:**  $V_s = 1,0$  pu,  $V_r = 0,9$  pu.

A Fig. 3 representa os diagramas circulares para o terminal gerador e o terminal receptor, parametrizados pela tensão  $V_r$ . Antes de iniciar a análise, observamos que os limites máximos de transmissão de potência ativa para os dois valores de  $V_r$  são:

$$\begin{aligned} P_{\max}|_{V_r=0,95} &= \frac{1,0 \times 0,95}{0,2064} = 4,60 \text{ pu} \\ P_{\max}|_{V_r=0,90} &= \frac{1,0 \times 0,90}{0,2064} = 4,36 \text{ pu} \end{aligned}$$

Entretanto, estes valores não consideram os limites de transmissão de potência reativa.

Concentrando a atenção nas curvas para o terminal receptor na Fig. 3, verificamos que, no caso em que  $V_r = 0,95$  pu, a potência reativa torna-se negativa a partir de  $P = 1700$  MW. Isto significa que, a partir deste valor (compare-o com o limite máximo de transmissão de potência ativa) é necessário injetar potência reativa a partir do terminal da carga, caso se deseje manter o nível especificado de tensão na carga. Em outras palavras, a linha torna-se um “dreno” de potência reativa. Para  $V_r = 0,90$  pu, isto ocorre a partir de  $P = 2250$  MW.

Vemos também que, se  $P$  for muito alto, tanto  $Q_s$  quanto  $Q_r$  serão bastante altos, isto é, exige-se altos valores de  $Q$  para altos carregamentos de  $P$ . Além disso, para valores altos de  $P$  as curvas tornam-se mais inclinadas, significando que se exige mais potência reativa por unidade de  $P$ .

### 8.2.3 Dificuldades para a Transmissão de Potência Reativa

O último exemplo da seção anterior ilustra uma das dificuldades para a transmissão de potência reativa: mesmo quando se tem valores substanciais de gradiente de tensão,  $Q$  não pode

Seção 8.3 Definições e Conceitos Básicos sobre Estabilidade de Tensão

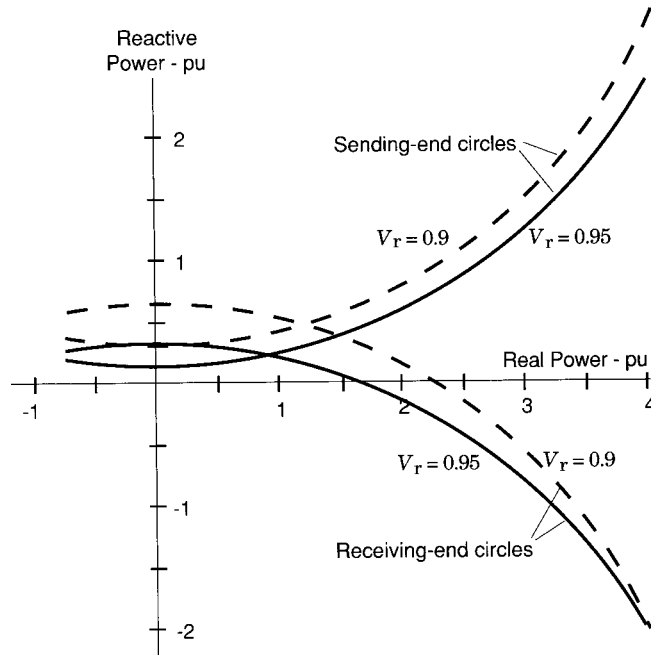


Figura 3: Relações entre potências ativas e reativas transmitidas para distintos valores de  $V_r$ .

ser transmitida quando o ângulo de defasagem entre as tensões,  $\theta$ , é elevado. Isto ocorre para linhas longas, em condições de carga pesada. O problema é agravado porque não se pode ter diferenças muito grandes de magnitudes de tensão, já que normalmente se exige que  $V = 1,0 \pm 0,05 pu$ .

Esta não é a única razão que limita o transporte de potência reativa sobre a rede. Do ponto de vista econômico, as *perdas de transmissão* são uma função direta do quadrado da potência reativa transmitida, e uma função inversa do quadrado da tensão. Portanto, para minimizar perdas devemos minimizar o transporte de potência reativa sobre as linhas de transmissão, além de manter as tensões elevadas.

Finalmente, devemos mencionar outra desvantagem do transporte de potência reativa, ligada à ocorrência de sobretensões na rede. Se a potência reativa transmitida é considerável e um disjuntor próximo à carga abre, desenvolvem-se sobretensões no lado da carga cujas magnitudes são maiores quanto maior for a potência reativa transmitida. Tais sobretensões são indesejáveis, pois podem colocar em risco a integridade de equipamentos e levar a interrupções no suprimento de energia elétrica.

### 8.3 Definições e Conceitos Básicos sobre Estabilidade de Tensão

Os termos *instabilidade de tensão* e *colapso de tensão* são frequentemente usados indistintamente para designar o mesmo tipo de fenômeno. A análise do problema tem se baseado tanto em métodos estáticos (fluxo de potência) quanto em abordagens dinâmicas, que levam em conta a resposta no tempo dos diversos componentes e dispositivos envolvidos. Um dos aspectos fundamentais para a estabilidade de tensão é a capacidade (ou as limitações) para transferir potência reativa das fontes de produção até os centros de consumo. As seguintes definições tem sido associadas à estabilidade de tensão.

Um sistema de potência operando em um dada condição de operação é *estável do ponto de vista de tensão para pequenas perturbações* se, após qualquer pequena perturbação, as tensões próximas às cargas assumem valores idênticos ou próximos aos valores anteriores à perturbação.

Um sistema de potência operando em um dada condição de operação e sujeito a uma dada perturbação é *estável do ponto de vista de tensão* se as tensões próximas às cargas assumem valores de equilíbrio após a perturbação.

Um sistema de potência operando em um dada condição de operação e sujeito a uma dada perturbação sofre um *colapso de tensão* se as tensões após a perturbação estão abaixo de limites aceitáveis. Um colapso de tensão pode ser total ou parcial.

Os fenômenos de instabilidade de tensão são quase sempre aperiódicos (não-oscilatórios), diferentemente dos fenômenos de instabilidade angular.

Os principais fatores que afetam a estabilidade da tensão são:

- Comportamento das cargas face a variações de tensão;
- Variação automática de taps de transformadores;
- Operação de limitadores de sobre-excitação de geradores;
- Ação de dispositivos de controle de cargas térmicas (termostatos);
- Sistemas de potência “estressados”, devido à falta de reforço de transmissão e falta de investimentos em geração;
- Uso excessivo de bancos de capacitores para compensação de potência reativa que, embora estendam os limites de transferência de potência, tornam o sistema de potência mais inclinado a sofrer problemas de instabilidade de tensão.

Há diversos métodos de análise estática de estabilidade de tensão: curvas  $P - V$ , curvas  $V - Q$ , métodos dinâmicos, etc. O primeiro método citado é o mais utilizado e será apresentado na seção seguinte.

### 8.4 Curvas $P - V$

Um dos métodos de análise de estabilidade de tensão mais usados baseia-se na utilização das curvas  $P - V$ . Este método determina os limites de carregamento em regime permanente que estão relacionados com a estabilidade de tensão. O método pode ser usado em conexão com programas de fluxo de potência para a realização de análises aproximadas.

#### Seção 8.4 Curvas $P - V$

A análise conceitual baseada nas curvas  $P - V$  considera as características da carga como função da tensão. Para uma carga resistiva, por exemplo, podemos escrever:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Para uma carga que pode ser modelada como do tipo potência constante, a representação é ainda mais simples: a característica é uma reta vertical no plano  $P - V$ .

Em contraste com a característica da carga, trabalharemos também com as *características PV da rede elétrica*, que dizem respeito à capacidade da rede de manter o necessário equilíbrio entre tensão e potência ativa e reativa supridas.

Para desenvolver as características  $P - V$  da rede, consideremos o caso de uma rede elétrica entregando potência a uma carga que pode ser modelada como impedância constante. Por simplicidade, consideraremos que as perdas da rede podem ser desprezadas. A Fig. 4 ilustra o problema em questão.

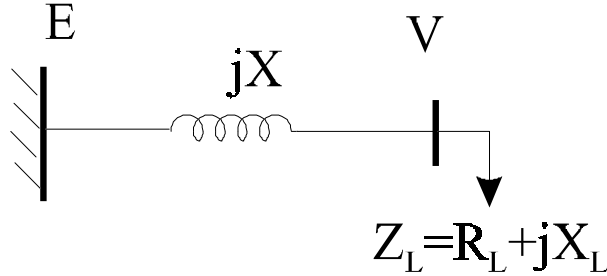


Figura 4: Rede elétrica sem perdas alimentando carga de impedância constante.

Um teorema fundamental da teoria de circuitos nos garante que a máxima transferência de potência ocorre quando a magnitude da impedância da carga é igual à magnitude da impedância da fonte. Chamaremos a tensão correspondente à potência máxima de *tensão crítica*.

Para a Fig. 4, escreveremos a tensão em  $pu$  da tensão da barra geradora e as potências em  $pu$  da potência de curto-circuito,  $E^2/X$ , definido:

$$p \triangleq \frac{P X}{E^2} \quad q \triangleq \frac{Q X}{E^2} \quad v \triangleq \frac{V}{E}$$

Da Seção 8.2.1, as expressões para as potências ativa e reativa são reproduzidas e normalizadas em  $pu$  conforme abaixo:

$$\begin{aligned} P &= \frac{E V}{X} \sin \delta & \Rightarrow & \quad p = v \sin \delta \\ Q &= \frac{E V}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} & \Rightarrow & \quad q = v \cos \delta - v^2 \end{aligned}$$

Usando o fato de que  $v^2 \sin^2 \delta + v^2 \cos^2 \delta = v^2$ , temos que:

$$v^2 = p^2 + (q - v^2)^2$$

e portanto:

$$p = \sqrt{v^2 - (q - v^2)^2} \quad (8.5)$$

Neste ponto, consideremos o caso particular correspondente a *fator de potência unitário*, isto é,  $q = 0$ . Neste caso a Eq. (8.5) pode ser re-escrita como:

$$p = \sqrt{v^2(1 - v^2)} \quad (8.6)$$

Para achar a condição de máxima transferência de potência, calculemos  $dp/dv = 0$ , que fornece:

$$\frac{v_{crit}(1 - 2v_{crit})}{\sqrt{v_{crit}^2(1 - v_{crit}^2)}} = 0$$

ou seja,

$$v_{crit} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707 \quad (8.7)$$

e portanto

$$V_{crit} = v_{crit} E = \frac{\sqrt{2} E}{2}$$

Das Eqs. (8.6) e (8.7), obtemos a potência máxima que pode ser transmitida:

$$p_{máx} = 0,5 \Rightarrow P_{máx} = \frac{p_{máx} E^2}{X} = \frac{0,5 (\sqrt{2} V_{crit})^2}{X} = \frac{V_{crit}^2}{X}$$

Mas da Fig. 4 verificamos também que:

$$P_{máx} = \frac{V^2}{R}$$

e portanto confirmamos que a máxima transferência de potência se dá quando a impedância da carga (que neste caso de fator de potência unitário é igual a  $R$ ) é igual à reatância  $X$ .

A representação da característica  $P - V$  da rede neste caso particular de fator de potência unitário é mostrada na Fig. 5.

O desenvolvimento acima, feito para fator de potência unitário, pode ser generalizado para diferentes valores de fator de potência. Obtém-se assim a família de curvas  $P - V$  mostradas na Fig. 6. Observe que todas as curvas tem basicamente a mesma forma da curva construída para  $\cos \varphi = 1$ .

As seguintes observações podem ser feitas em relação às curvas da Fig. 6:

- Para uma dada carga abaixo do máximo carregamento possível há *duas* soluções: uma delas para tensão mais alta e baixa corrente, e a outra para tensão mais baixa e alta corrente. a primeira corresponde às condições de operações normais, com tensão mais próxima à tensão do gerador,  $E$ . A operação permanente nas soluções do ramo inferior da curva são em geral inaceitáveis.



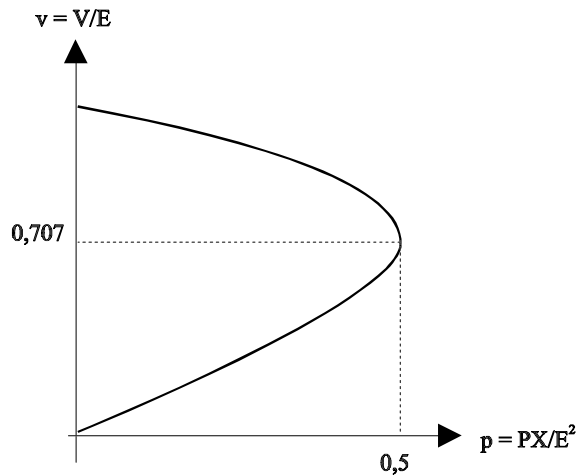


Figura 5: Característica  $P - V$  da rede para sistema sem perdas com carga de fator de potência unitário.

- À medida que a carga é mais e mais compensada (o que corresponde a menores valores de  $tg \phi$ ) a potência máxima aumenta. Contudo, a tensão para a qual o máximo ocorre também aumenta. Esta situação indica um aumento de risco, já que a máxima capacidade de transferência de potência pode ser atingida para tensões próximas a valores normais de operação. Observe também que, para um alto grau de compensação e uma potência ativa próxima do máximo, as duas soluções de tensão aproximam-se uma da outra. Torna-se assim difícil dizer, sem uma análise mais detalhada, qual das soluções é considerada “normal”.
- Para cargas sobre-compensadas ( $tg \phi < 0$ ), há uma parte do ramo superior da curva  $P - V$  ao longo da qual a tensão aumenta com a potência da carga. A explicação é que, sob fator de potência negativo, quanto mais potência ativa é consumida, mais potência reativa é produzida pela carga. Em cargas baixas, a queda de tensão devida ao aumento de potência ativa é compensada pelo aumento de tensão devido ao aumento da potência reativa. Este efeito é mais pronunciado quanto mais negativo for  $tg \phi$ .

## 8.5 Análise de Algumas Situações que Levam à Instabilidade de Tensão

Os pontos de operação possíveis no plano  $P - V$  correspondem às interseções entre as características da rede, investigadas na seção anterior, e as características das cargas. Antes de prosseguir, é importante ressaltar que algumas idealizações foram feitas na análise anterior. Por exemplo, foi suposto que as fontes de tensão tem magnitude constante. Na prática, porém,

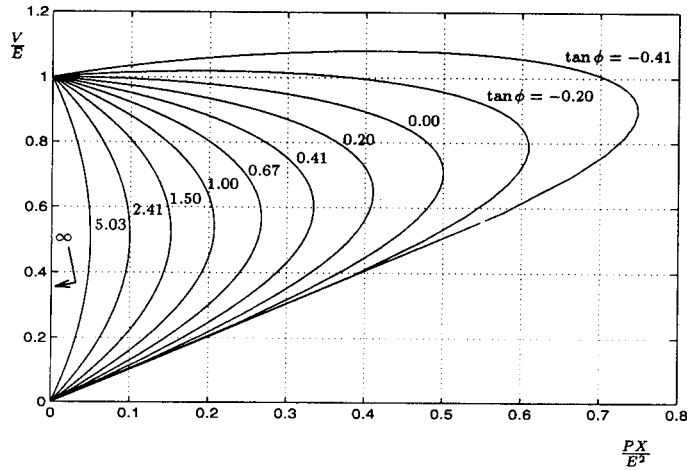


Figura 6: Curvas  $P - V$  da rede para diferentes valores de fator de potência.

isto não acontece. Os geradores estão sujeitos à ação de dispositivos de proteção, como por exemplo os limitadores de sobre-excitação, que podem limitar sua capacidade de produção de potência reativa. O efeito de dispositivos como estes serão ilustrados na próxima seção.

Iniciaremos entretanto considerando situações que ignoram a ação de dispositivos de controle e proteção. Sejam as curvas  $P - V$  da rede e as características da carga, estas últimas indicadas por linhas tracejadas na Fig. 7.

Cada linha tracejada na figura corresponde a um valor de carga inicial,  $P_0$ .  $A$  e  $B$  são dois pontos de operação caracterizados por diferentes demandas iniciais. Consideremos o efeito de um pequeno incremento em demanda para cada um dos pontos  $A$  e  $B$ . No ponto  $A$ , um aumento de demanda causa uma pequena queda de tensão mas resulta em um aumento de potência para a carga. Este é o modo de operação esperado em um sistema de potência.

No ponto  $B$ , entretanto, o aumento de demanda é acompanhado por um *decremento* tanto da tensão quanto da potência ativa fornecida à carga. Se a carga for *puramente estática*, o ponto de operação é possível, embora seja talvez inviável devido à baixa tensão e alta corrente; isto, por si só, não implicaria em instabilidade. Por outro lado, considere que a carga pode não ser puramente estática: é possível que exista um mecanismo inerente à própria carga que tenda a aumentar a demanda para obter um consumo especificado, ou que exista um controlador no lado da carga com o mesmo objetivo. Neste caso, como se verifica na Fig. 7, o ponto de operação  $B$  torna-se claramente *instável*. Motores de indução, mecanismos automáticos de ajuste de tapas de transformadores, termostatos de aquecimento, etc., exibem o comportamento descrito acima que tende a levar à instabilidade.

Seção 8.5 Análise de Algumas Situações que Levam à Instabilidade de Tensão

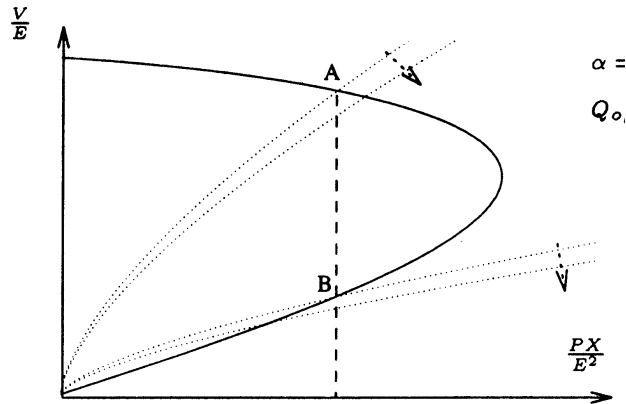


Figura 7: Características da rede e da carga.

Muitos tipos de carga apresentam comportamentos distintos ao longo do tempo com respeito a variações de tensão. Por exemplo, é possível que uma carga se comporte instantaneamente conforme descrito na discussão acima, porém tenda dinamicamente a uma característica de regime permanente, como por exemplo uma característica de potência constante (uma reta vertical no gráfico  $P - V$ ). Esta é chamada *característica de equilíbrio da carga*, ou *característica da carga em regime permanente*. As curvas  $P - V$ , por outro lado, correspondem às características em regime permanente de geradores e sistemas de transmissão. Para operação estável, é obviamente necessário que as características da carga e da rede se interceptem, de modo a caracterizar a existência de um ponto de equilíbrio.

Considere agora a Fig. 8a, na qual um aumento em demanda faz com que a característica da carga em regime permanente, do tipo  $P$  constante neste exemplo, varie até que finalmente ela acabe por não mais interceptar a característica da rede. Claramente neste caso não existe ponto de equilíbrio, dando origem a uma situação de instabilidade de tensão.

Uma situação mais frequente, e portanto mais importante, ocorre quando uma contingência de geração ou transmissão leva a uma mudança significativa na característica  $P - V$  da rede. A Fig. 8b ilustra esta situação. No nosso modelo simplificado de rede elétrica, isto corresponde a um decréscimo em  $E$  ou a um aumento acentuado em  $X$ . Vê-se que a perturbação provoca um encolhimento acentuado na curva  $P - V$  da rede pós-perturbação, de modo que a mesma não mais intercepta a característica da carga.

A Fig. 9 ilustra as mesmas situações, considerando um modelo mais realístico para o comportamento em regime permanente para a carga.

As situações mostradas nas figuras acima indicam que existe um *limite de carregamento* do sistema, que corresponde ao ponto em que a curva de carga torna-se tangente à curva  $P - V$

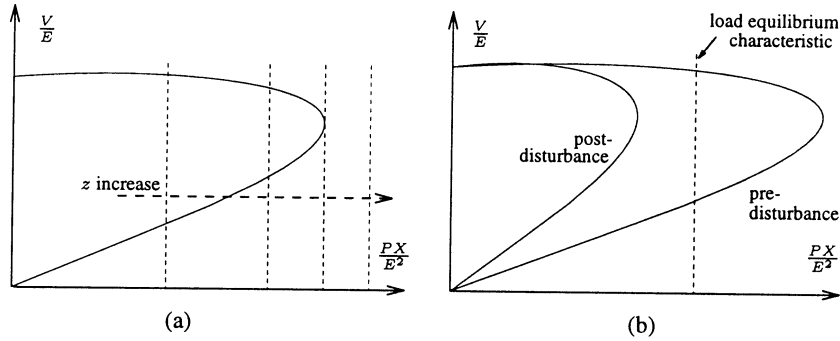


Figura 8: Mecanismos que levam à instabilidade de tensão: (a) Aumento de demanda; (b) Perda de equipamento de geração ou transmissão.

da rede. Na Fig. 8a, este ponto de tangência corresponde à máxima potência que pode ser entregue pela rede, já que se supõe que a carga se restabelece segundo uma característica de potência constante. Contudo, a Fig. 9a mostra que nem sempre o ponto de máximo carregamento coincide com a máxima potência que a rede pode fornecer, pois o ponto de tangência depende da característica estática da carga em regime permanente. É ainda possível que alguns destes pontos de operação não sejam viáveis, devido a níveis de tensão inaceitavelmente baixos.

Finalmente, deve-se mencionar que as situações analisadas até agora não consideram o comportamento dinâmico de cada componente do sistema, tais como o efeito de controles do gerador, de mecanismos de variação de tapes de transformadores. etc.

## 8.6 Efeitos de Controles e Composição da Carga

Nesta seção, examinaremos o problema de estabilidade de tensão usando as curvas  $P - V$  levando em conta variações na composição da carga e efeitos de mudanças de tapes de transformadores e limitadores de corrente de geradores.

Nosso sistema exemplo é mostrado na Fig. 10. a carga é formada por motores de indução e por carga resistiva. Na faixa de tensão considerada, os motores de indução terão seu comportamento aproximado como carga de potência constante. Também será suposto que a demanda reativa dos motores é satisfeita por compensação em derivação local. Duas situações diferentes serão investigadas, dependendo da composição da carga. A resistência (ou condutância,  $G$ ) da parcela resistiva da carga é refletida para o lado de alta tensão do transformador com comutação automática de tape sob carga (*Load Tap Changing*, ou *LTC*). A faixa

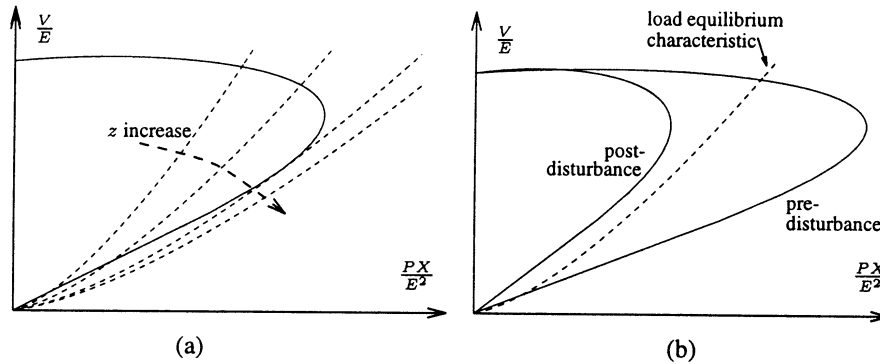


Figura 9: Situações de instabilidade de tensão para características realísticas da carga em regime permanente: (a) Aumento de carga; (b) Contingência de geração/transmissão.

típica do variador de tape é de  $\pm 10\%$ .

### 8.6.1 Caso 1: Carga Preponderantemente Industrial

Supomos inicialmente que 75% da carga é composta por motores de indução, enquanto os restantes 25% são de carga resistiva. A equação da carga é portanto do tipo:

$$P = 0,75 + 0,25 n^2 G V^2$$

A Fig. 11 ilustra três diferentes características do sistema e duas características distintas para a carga. As três características do sistema correspondem às situações:

- S1) Antes da perturbação;
- S2) Após a perturbação, porém antes da ação do dispositivo limitador de corrente de campo do gerador;
- S3) Após a perturbação, mas agora considerando a ação do dispositivo limitador de corrente de campo do gerador.

As duas características da carga referem-se a:

- C1) Característica inicial da carga, e
- C2) Característica da carga supondo uma variação de tape de 10%.

Após a perturbação ocorrida no sistema de transmissão ou geração, haverá uma queda de tensão e a característica da carga interceptará uma das duas características pós-perturbação do sistema. A queda em tensão reduzirá a carga resistiva até que o LTC atue no lado de baixa tensão do transformador.

A Fig. 11 mostra que as características da carga, neste caso, são bastante desfavoráveis.

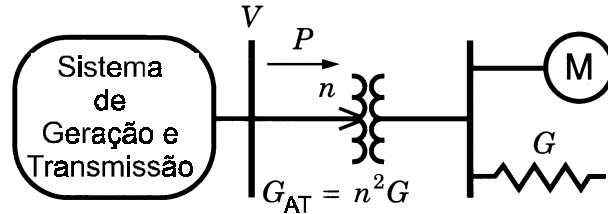


Figura 10: Sistema-exemplo para ilustração dos efeitos de composição da carga e de controles.

Com variação de *tape* e limitação de corrente no gerador, não há praticamente ponto de operação bem definido, o que configura o início de um colapso de tensão. Muito provavelmente, estudos dinâmicos apontariam que haveria instabilidade dos motores de indução antes da instabilidade prevista pela análise em regime permanente.

### 8.6.2 Caso 2: Carga Preponderantemente Resistiva

Neste caso, as características do sistema e da carga são mostradas na Fig. 12. A equação da carga é considerada do tipo:

$$P = 0,25 + 0,75 n^2 G V^2$$

onde  $G$  é  $1,0 pu$  para as curvas (a) e (b) e  $1,2 pu$  para a curva (c). A curva (a) difere de (b) em que, no primeiro caso,  $n = 1,0$  e no segundo  $n = 1,1$ . A curva (c) considera  $n = 1,1$  e, além disso, supõe-se a existência de uma condutância adicional que poderia ser devida a regulação termostática de parte da carga resistiva. Supõe-se também que a característica *em regime permanente* da carga não ultrapassará o valor inicial de  $1,0 pu$ , isto é, não ficará à direita da linha vertical indicada na figura.

Sem limitação de corrente do gerador, o ponto de operação após a perturbação é a interseção da linha vertical e a característica pós-perturbação do sistema. a carga é plenamente restabelecida e o valor do *tape* correspondente é  $n = 1,03$ .

Com limitação de corrente mas sem condutância adicional, o ponto de operação se deslocará para a interseção da curva (b) e da curva pós-perturbação com limitação de corrente de campo do gerador. Com a condutância extra, o ponto de operação passa a ser o ponto *A*.

Verificamos portanto que esta característica da carga é mais favorável e torna o colapso de tensão improvável. É possível que a estabilização ocorra em níveis de tensão anormalmente baixos, na parte inferior da curva  $P - V$ . Na prática, isto dependerá do desempenho dos motores, da atuação do sistema de proteção e do nível de regulação automática da carga.

Observamos também que a curva (b) intercepta a característica do sistema no “nariz” da curva, no caso em que se considera regulação de corrente do gerador. Qualquer atuação

Seção 8.6 Efeitos de Controles e Composição da Carga

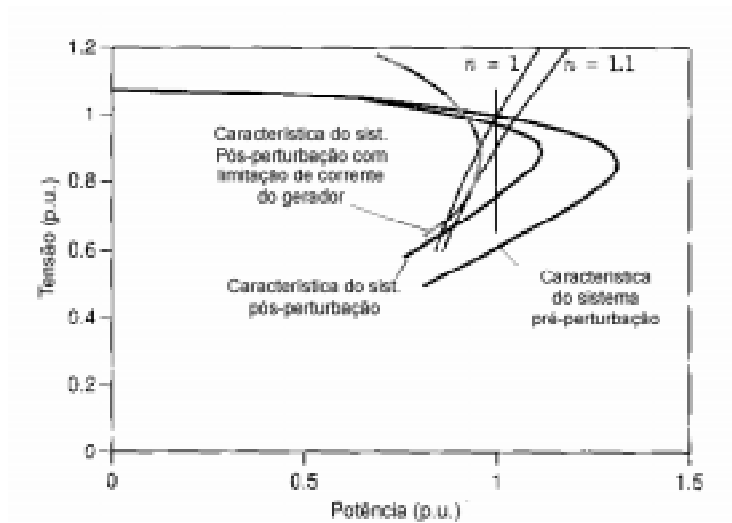


Figura 11: Características do sistema e da carga para carga composta de 75% de motores de indução e 25% de carga resistiva.

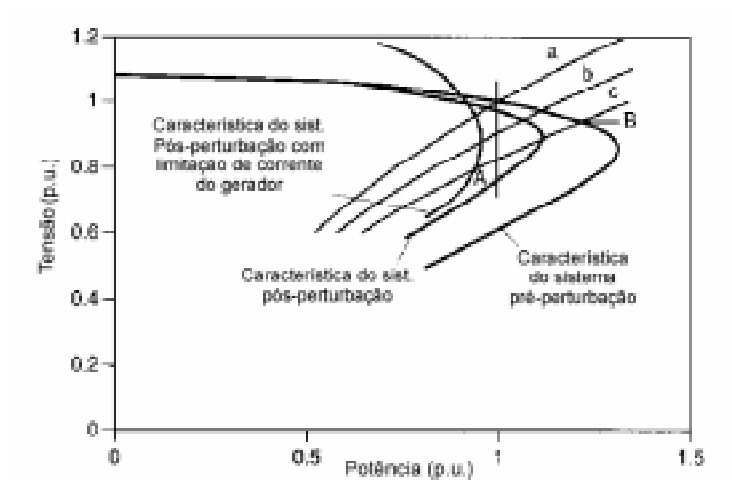


Figura 12: Características do sistema e da carga para carga predominantemente resistiva.

## *Capítulo 8 Introdução à Estabilidade de Tensão*

adicional do LTC decresceria a potência entregue à carga, isto é, a variação de tape abaixaria, ao invés de aumentar, a tensão no lado da carga do sistema. Isto poderia ser caracterizado como uma instabilidade de atuação do variador de tape.

Finalmente, considere que o sistema opera no ponto  $A$  com tapes em seus limites e condutância máxima devido à ação de termostatos. Suponha agora que as condições originais do sistema são restabelecidas (por exemplo, via religamento de linhas de transmissão). Vemos da figura que o novo ponto de operação tenderia transitoriamente a migrar para  $B$ , com potência maior que a potência original e possível sobretensão no lado da carga do LTC. Os reguladores de tensão dos geradores atuariam nesta situação, visando fazer a tensão retornar ao valor normal.