2. Avaliação e Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão

2.1 Avaliação Nodal do Carregamento da Rede de Transmissão

A metodologia de avaliação das condições de estabilidade de tensão a ser apresentada nesta seção, foi desenvolvida pelo pesquisador responsável pela orientação deste projeto, juntamente com os pesquisadores referenciados em [20].

O problema de estabilidade de tensão é oriundo do uso cada vez mais intenso da geração e linhas de transmissão existentes, o que foi possibilitado através da instalação de compensação de potência reativa [3]. Estabilidade de tensão é um problema de estabilidade inerente aos sistemas dinâmicos quando a rede de transmissão está operando muito carregada. Parece óbvio que a habilidade em manter a estabilidade de tensão depende de ferramentas capazes de avaliar as condições de carregamento da rede. A análise baseada em "menores autovalores" [21] ou em "valores singulares mínimos" [22] é adequada para estudos de planejamento da expansão e para o planejamento da operação. Seus pesquisadores e usuários não encorajam o uso dessas técnicas na operação propriamente dita, principalmente na operação em tempo real, exceto se conjugadas com outra técnica que forneça, pelo menos, margens de segurança e uma medida dos efeitos de ação de controle. Para atender a essa necessidade, nesta seção apresenta-se uma abrangente ferramenta de avaliação do carregamento da rede de transmissão, composta por três índices com significado físico, e que é propícia para uso em estudos operacionais.

2.1.1 Método de Análise

O objetivo é identificar se a solução de tensão para uma carga conectada à barra i está na parte superior, na inferior e a distância até o vértice, ponto de máximo carregamento, da curva SV. A parte superior é a região normal de operação, enquanto que a parte inferior é a região anormal onde ações de controle de tensão podem ter efeito contrário ao esperado se a carga se comporta como um modelo de potência constante. O vértice da curva corresponde à máxima quantidade de potência ativa e reativa que pode ser transmitida para a carga (ou a partir de um gerador). A tensão neste ponto de máximo é a tensão mínima para a operação normal [23].

O sistema linearizado das equações estáticas de fluxo de carga é[1]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] * \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

Permutando a posição das equações e variáveis relacionadas com a barra em análise e, posicionando-as nas duas últimas linhas e colunas respectivamente, (2.1) fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \hline \Delta \mathrm{P_i} \\ \Delta \mathrm{Q_i} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array}\right] * \begin{bmatrix} \Delta\theta' \\ \Delta V' \\ \hline \Delta\mathrm{\theta_i} \\ \Delta \mathrm{V_i} \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

onde, as submatrizes *A*, *B*, *C* e *D* são partições da matriz Jacobiano [*J*].

Assume-se uma variação de carga (ou geração) incremental ΔP_i e ΔQ_i somente para a barra i de um sistema multi-nó, isto é, $\Delta P' = \Delta Q' = 0$, e então o sistema (2.2) pode ser reduzido para:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathrm{P_i} \\ \Delta \mathrm{Q_i} \end{bmatrix} = [D'] * \begin{bmatrix} \Delta\mathrm{\theta_i} \\ \Delta \mathrm{V_i} \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

onde, com dimensão (2 x 2):

$$[D'] = [D] - [C] * [A]^{-1} * [B] \tag{2.4}$$

Portanto, as relações de sensibilidade entre as injeções de potência ativa e reativa e a magnitude e o ângulo da tensão na barra i, levando em consideração o restante do sistema, podem ser avaliadas por (2.3) [24]. É demonstrado a seguir

[1] As variáveis em itálico representam vetores ou matrizes.

que o módulo e o sinal do determinante da matriz [*D'*] indicam respectivamente, a distância até o ponto de máximo e a região de operação da curva SV.

A influência que a modelagem de carga exerce na determinação dos índices de estabilidade de tensão em sistemas reais foi analisada em [25]. Nesse estudo foi demonstrado que variações de modelagem de carga não apresentam impactos sobre a avaliação da estabilidade de tensão pelo método de análise apresentado neste capítulo, que consiste em determinar o fluxo máximo de potência que pode ser transmitido para as barras da rede elétrica. Portanto, o carregamento máximo depende exclusivamente das características do sistema de transmissão, considerando-se que o fator de potência da carga seja constante. Desta forma, o modelo de carga não influencia no estabelecimento do ponto de máximo carregamento. No entanto, na parte inferior da curva SV, as ações de controle de tensão têm efeito oposto ao esperado somente se a carga for modelada por potência constante.

2.1.1.1 Magnitude do Determinante da Matriz [*D'*]

Em um sistema de duas barras o fluxo de potência que chega na barra i é igual à carga consumida. Com o intuito de conhecer o significado da magnitude do valor do determinante, desenvolve-se a expressão que o calcula:

$$\det[D'] = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \tag{2.5}$$

onde:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \cos\theta_{ik} + B_{ik} \operatorname{sen}\theta_{ik}) \tag{2.6}$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i V_k (G_{ik} \operatorname{sen}\theta_{ik} - B_{ik} \cos\theta_{ik}) \tag{2.7}$$

Resolvendo (2.5) com (2.6) e (2.7), obtém-se:

$$\begin{aligned}\det[D'] = {} & -V_i V_k^2 (G_{ik}^2 + B_{ik}^2) + 2V_i^2 B_{ii} (V_k G_{ik} \operatorname{sen}\theta_{ik} - V_k B_{ik} \cos\theta_{ik}) \\ & -2V_i^2 G_{ii} (V_k G_{ik} \cos\theta_{ik} + V_k B_{ik} \operatorname{sen}\theta_{ik})\end{aligned} \tag{2.8}$$

Fazendo $Y_{ik}^2 = (G_{ik}^2 + B_{ik}^2)$ e multiplicando ambos os lados de (2.8) por V_i:

$$\det[D'] * V_i = -[V_i V_k Y_{ik}]^2 + 2V_i^2 B_{ii}[V_i V_k (G_{ik} \mathrm{sen}\theta_{ik} - B_{ik}\cos\theta_{ik})] - 2V_i^2 G_{ii}[V_i V_k (G_{ik}\cos\theta_{ik} + B_{ik}\mathrm{sen}\theta_{ik})] \quad (2.9)$$

Por outro lado, a potência aparente injetada na barra i é dada por $S_i = P_i + jQ_i$. De (2.6) e (2.7), escreve-se:

$$S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 = V_i^4 (G_{ii}^2 + B_{ii}^2) + V_i^2 V_k^2 Y_{ik}^2 + 2V_i^2 G_{ii} V_i V_k (G_{ik}\cos\theta_{ik} + B_{ik}\mathrm{sen}\theta_{ik}) - 2V_i^2 B_{ii} V_i V_k (G_{ik}\mathrm{sen}\theta_{ik} - B_{ik}\cos\theta_{ik}) \quad (2.10)$$

Fazendo $S_{io} = V_i^2 * Y_{ii}$ e comparando (2.9) com (2.10), obtém-se finalmente:

$$\det[D'] * V_i = S_{io}^2 - S_i^2 \quad (2.11)$$

O resultado obtido em (2.11) é muito importante para o estudo do carregamento da rede. O termo S_{io}^2 é função do elemento diagonal da matriz admitância de barra e do módulo da tensão na barra i. Supondo tensão constante na barra i, e aumentando gradativamente o valor da potência injetada S_i, o máximo será alcançado quando S_i^2 for igual a S_{io}^2 fazendo com que o produto $\det[D'] * V_i$ seja igual a zero.

Dessa forma, pode-se dizer que para um sistema de duas barras, onde se tem $[D'] \equiv [D] \equiv [J]$:

- S_i é a potência injetada na barra i (no ponto de operação em análise);
- S_{io} é a potência aparente máxima que pode fluir para a barra i, para um certo módulo da tensão constante (dado por $S_{io} = V_i^2 * Y_{ii}$);
- $\det[D'] * V_i$ é o indicador da distância de S_i^2 a S_{io}^2.

O importante resultado obtido em (2.11) para um sistema de duas barras agora é estendido ao sistema multi-nó. Seja [*D*] a matriz que relaciona linearmente as injeções de potência ativa e reativa com o ângulo e módulo da tensão na barra i, então, tem-se:

$$[D]=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \dfrac{\partial P_i}{\partial V_i}\\ \dfrac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \dfrac{\partial Q_i}{\partial V_i}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x & z\\ y & u\end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Seja:

$$\left[-C*A^{-1}*B\right]=\begin{bmatrix}b_1 & b_3\\ b_2 & b_4\end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Como em (2.4): $[D'] = [D] - [C*A^{-1}*B]$, e usando (2.12) e (2.13) pode-se escrever:

$$\det[D']=\det\left[\begin{pmatrix}x & z\\ y & u\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}b_1 & b_3\\ b_2 & b_4\end{pmatrix}\right] \tag{2.14}$$

De (2.14), obtém-se:

$$\det[D']=[xu-yz]+[xb_4-yb_3]+[b_1u-b_2z]+[b_1b_4-b_2b_3] \tag{2.15}$$

Como

$$\det[D]=[xu-yz] \tag{2.16}$$

então

$$\det[D']=\det[D]+[x.b_4-yb_3]+[b_1u-b_2z]+[b_1b_4-b_2b_3] \tag{2.17}$$

O resultado obtido em (2.11) para um sistema de duas barras, onde $[D']\equiv[D]$, aqui repetido por comodidade, $\det[D]*V_i=S_{io}^2-S_i^2$ pode ser estendido. Pode-se escrever (2.17), multiplicando todos termos por V_i, na forma:

$$\det[D']*V_i=\det[D]*V_i-\Delta\det*V_i \tag{2.18}$$

onde

$$\Delta\det*V_i=-V_i\{[xb_4-yb_3]+[b_1u-b_2z]+[b_1b_4-b_2b_3]\} \tag{2.19}$$

De (2.11), (2.18) pode ser re-escrita como:

$$\det[D']*V_i=S_{io}^2-S_i^2-\Delta\det*V_i \tag{2.20}$$

A expressão (2.20) é a generalização de (2.11) para um sistema multi-nó. O novo termo S_{is}^2 é, comparando (2.11) com (2.20):

$$S_{is}^2=(\det[D]-\det[D'])*V_i \tag{2.21}$$

Dessa forma pode-se dizer que para um sistema multi-nó:

- S_i é a potência injetada na barra i (no ponto de operação em análise);
- S_{io} é a máxima potência que pode ser injetada na barra i para módulo da tensão constante (dado por $S_{io} = V_i^2 * Y_{ii}$);
- $\Delta\det * V_i$ está relacionada à potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i (dado por $\Delta\det * V_i = (\det[D] - \det[D']) * V_i$);
- $S_m = \text{sinal de } \left[S_{io}^2 - \Delta\det * V_i\right] (\left|S_{io}^2 - \Delta\det * V_i\right|)^{1/2}$ é a máxima potência aparente que pode ser injetada na barra i.

Portanto, $S_m - S_i$ é a distância em potência aparente entre o que está sendo injetado e o máximo calculado naquele ponto de operação.

2.1.1.2 Sinal do Determinante da Matriz [*D'*]

Usando-se um sistema de referência cartesiano, pode-se exprimir os vetores gradientes de potência ativa e reativa na barra i por:

$$\dot{\nabla} P = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} * i + \frac{\partial P_i}{\partial V_i} * j + 0 * k$$

$$\dot{\nabla} Q = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} * i + \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} * j + 0 * k \tag{2.22}$$

Assim, o produto vetorial é:

$$\dot{\nabla} P x \dot{\nabla} Q = \left[\left(\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial V_i}\right) - \left(\frac{\partial P_i}{\partial V_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i}\right)\right] * k \tag{2.23}$$

e então,

$$\dot{\nabla} P x \dot{\nabla} Q = \det[D'] \tag{2.24}$$

Como

$$\dot{\nabla} P x \dot{\nabla} Q = |\nabla P| * |\nabla Q| * \operatorname{sen}\beta \tag{2.25}$$

tem-se,

$$\det[D'] = |\nabla P| * |\nabla Q| * \operatorname{sen}\beta \tag{2.26}$$

onde β é o ângulo entre ∇P e ∇Q.

Como o sinal de $\det[D']$ é função somente do seno de β, tem-se:

$\det[D'] > 0$, se sen $\beta > 0$ isto é $0^0 < \beta < 180^0$

$\det[D'] < 0$, se sen $\beta < 0$ isto é $0^0 < \beta < -180^0$

$\det[D'] = 0$, se sen $\beta = 0$ isto é $\beta = \pm 180^0$

Observa-se na Figura 2.1 que, tomando ∇P_i como eixo de referência, na região normal de operação sempre ocorre $0^0 < \beta < 180^0$, e na região anormal sempre ocorre $0^0 < \beta < -180^0$. No ponto máximo, os vetores gradientes ∇P_i e ∇Q_i estão alinhados, e então o ângulo β formado por esses dois vetores é 180^o. Portanto, $\det[D'] > 0$ caracteriza a parte superior da curva SV e $\det[D'] < 0$ caracteriza a parte inferior da mesma curva, enquanto que obviamente, $\det[D'] = 0$ caracteriza a fronteira entre essas duas regiões, isto é, o ponto de máximo carregamento, como se queria demonstrar [20].

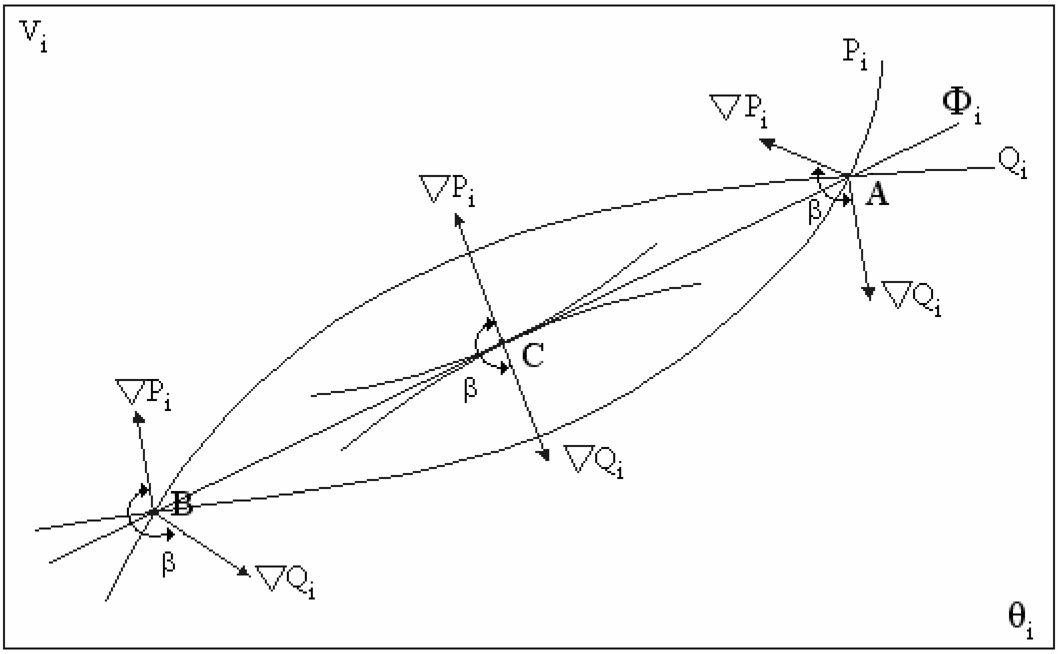

Figura 2.1 – Localização dos Vetores Gradientes de P_i e Q_i no Plano $V\theta$

E é fácil perceber também, que o ângulo β pode complementar a avaliação do carregamento da rede, indicando a região de operação e a distância angular até o máximo.

De acordo com a equação de Schür, se det[*D'*] = 0, então det[*J*] = 0. Esta condição tem sido extensamente usada como característica do colapso de tensão [e.g. 21, 22], e foi primeiramente proposta por Venikov [26]. Embora teoricamente correto, é numericamente verificável somente se a carga é exatamente a máxima e se o processador numérico usado nos cálculos do determinante tenha infinitas casas decimais. Portanto, det[*J*] não é um índice adequado para ser usado em grandes sistemas. Outra possibilidade de obter-se numericamente det[*J*] = 0 seria através da ocorrência de problemas de carregamento em toda a rede. Como são normalmente confinados dentro de uma determinada área, mais uma vez o índice global det[*J*] não é capaz de apontar numericamente o problema. Portanto, o índice nodal det[*D'*] é recomendado.

2.1.1.3 Interpretação dos Índices

Os valores obtidos têm validade instantânea, porque são calculados com base em um único ponto de operação, inclusive os da margem de potência entre a injeção no momento de análise S_i e a máxima injeção S_m. Eles podem ficar sem sentido no minuto seguinte porque geração e carga mudam, compensação reativa e tapes de LTCs atingem limites, o sistema é não-linear, etc. Portanto, a análise deve ser efetuada com o devido cuidado, especialmente em relação às margens. Esse tipo de cuidado tem sido tomado em vários outros tipos de estudo e de análise, por exemplo, em estudos de estabilidade de pequenos sinais através da análise modal. Infelizmente, não existe índice baseado em um ponto de operação capaz de realizar predição.

O valor $(S_m - S_i)$ é a diferença de potência em MVA entre a potência que está sendo injetada e a máxima potência estimada para o ponto de operação em análise. O problema de interpretação do tamanho do índice é resolvido usando-se S_i e S_m. A margem é grande ou pequena? Pode ser grande em uma barra e pequena para outra? Por exemplo, se S_m = 10 e S_i = 1, então, a margem é nove vezes o que está sendo injetado. Se, por outro lado, S_i = 99 e S_m = 100, então a margem é aproximadamente 0,01 do que está sendo injetado.

O problema da importância relativa entre as barras como, por exemplo, para a localização de ações de controle de tensão ou corte de carga, é resolvido pelo índice $S_m - S_i$ (quanto menor pior é a situação), dividido pelo índice S_m (quanto maior mais importante é a barra). Portanto, a barra crítica é aquela com a menor margem, e então, a ordenação das barras por seu grau de carregamento é direta.

O valor do ângulo β traduz a dificuldade do sistema em suportar a injeção na barra. Quando está próximo de 180° significa que o máximo também está próximo, mesmo quando o valor da margem de potência é elevado. Neste caso, um aumento na injeção S_i acarretaria em diminuição substancial de S_m.

2.1.2 Margem de Potência

Como só é possível avaliar se a margem $S_m - S_i$ é grande ou pequena quando comparada com S_i, pode-se definir uma margem em pu. Esta margem seria igual à unidade quando a injeção S_i for nula, e igual a zero quando a injeção for máxima ($S_i = S_m$) [27]. Esta margem é definida como:

$$M_i = 1 - \frac{S_i}{S_m} \tag{2.27}$$

onde:

- M_i potência aparente em pu de S_m que ainda pode ser injetada na barra i;
- S_i potência aparente injetada na barra i, no ponto de operação em análise;
- S_m máxima potência aparente que pode ser injetada na barra i, calculada no ponto de operação em análise.

Na Figura 2.2 pode-se observar que a margem é positiva na Região A normal de operação, negativa na Região B anormal e nula no ponto de máximo.

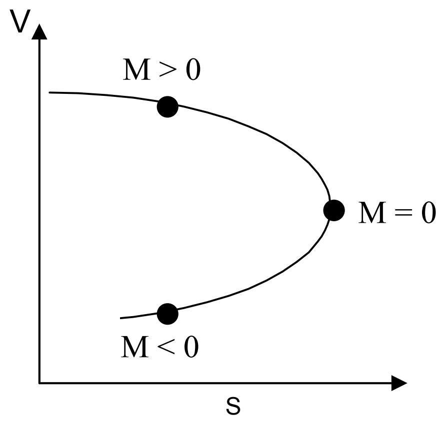

Figura 2.2 – Sinal da Margem na Curva SV

2.1.3 Índice de Influência

Um outro índice que pode ser útil relaciona as margens de potência entre dois pontos de operação, por exemplo, antes e depois de uma ação de controle, caracterizando a eficácia ou não desta ação. Esse índice também pode ser usado para avaliar variações de carga ou qualquer outro evento [27]. É definido como:

$$II_i = \left| \frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} - 1 \right| \qquad (2.28)$$

onde:

II_i índice de influência da ação de controle sobre a margem da barra i;

M_{0_i} margem de potência na barra i no ponto de operação de referência;

M_{1_i} margem de potência na barra i num outro ponto de operação.

A definição do índice também pode ser escrita como:

$$II_i = \frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} - 1 \qquad \text{quando} \quad M_{0_i} > 0 \qquad (2.29)$$

$$II_i = 1 - \frac{M_{1_i}}{M_{0_i}} \qquad \text{quando} \quad M_{0_i} < 0 \qquad (2.30)$$

O movimento do ponto de operação descrito na curva SV da Figura 2.3, corresponde à deterioração do sistema e, conseqüentemente, do índice de influência. Obviamente o movimento contrário ao da Figura 2.3 corresponde à melhoria das condições do sistema [27].

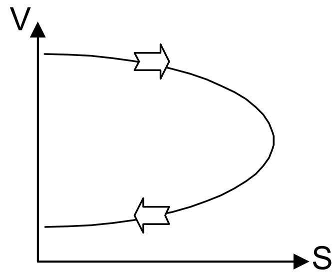

Figura 2.3 – Movimento dos Pontos de Operação na Curva SV

Se o ponto B da Figura 2.4 é o ponto de operação de referência, uma ação de controle eficaz faz com que o ponto se desloque na direção do ponto A; a margem M_1 é maior que a margem original M_0 e o índice II é positivo. Se a ação deteriora o sistema, o ponto de operação se aproxima do ponto C; a margem M_1 é menor que a margem original M_0 e o índice II é negativo (II = –1 em C).

Se o ponto D da Figura 2.4 é o ponto de operação de referência, uma ação de controle eficaz faz com que o ponto se desloque na direção do ponto C; a margem M_1 é maior (menos negativa) que a margem original M_0 e o índice II é positivo (II = +1 em C). Se a ação deteriora o sistema, o ponto de operação se aproxima do ponto E; a margem M_1 é menor (mais negativa) que a margem original M_0 e o índice II é negativo.

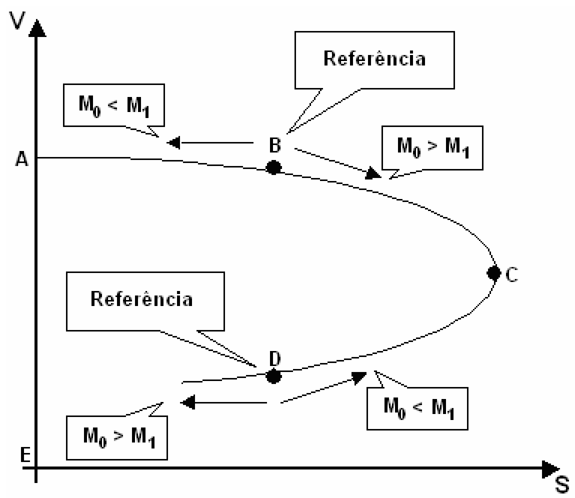

Figura 2.4 – Curva SV para Análise do Índice de Influência

2.2 Determinação de Ações de Controle

Uma vez que a avaliação do carregamento da rede de transmissão detectou uma barra de carga crítica em um determinado ponto de operação, a função “reforço” consiste do cálculo de ações de controle para aumentar a distância entre o (novo) ponto de operação e o (novo) máximo permitido. Muitas vezes isso pode ser conseguido através da alteração do perfil de tensão, isto é, através do redespacho de potência reativa e ações de controle de tensão. Muitas outras vezes, por exemplo, no caso de linhas longas de transmissão transportando grandes blocos de potência, o redespacho de potência ativa torna-se necessário.

Uma barra de carga pode receber potência de mais de um caminho de transmissão. Suponha, por exemplo, dois geradores distintos conectados por duas linhas de transmissão distintas a uma única barra de carga. A medida em que a carga cresce, toda a geração necessária vem de um único gerador carregando um único caminho de transmissão. A potência transmitida por esse caminho chega ao máximo. Obviamente que a carga pode continuar a crescer, desde que a potência passe a ser produzida no outro gerador e, conseqüentemente, a fluir pelo outro caminho de transmissão [27].

A idéia então é, uma vez detectada uma barra de carga crítica, verificar os diferentes caminhos de transmissão existentes, identificar um ou mais caminhos muito carregados, redirecionar o fluxo de potência destes para outros caminhos menos carregados. Inicialmente pode-se optar por redirecionar os fluxos por redespacho de potência reativa e, depois, se necessário, por redespacho de potência ativa [27].

2.2.1 Transformação do Sistema Multi-nó

O primeiro passo é determinar a parte da rede de transmissão realmente usada para transportar a potência ativa dos geradores até a barra crítica.

A sub-rede é encontrada após verificar o sinal dos fluxos de potência ativa. As barras j conectadas a barra crítica i pertencem à sub-rede se $P_{ij} < 0$. A barra k ligada à barra j, pertence à sub-rede se $P_{jk} < 0$. A barra ℓ conectada a barra k, pertence à sub-rede se $P_{k\ell} < 0$. A busca acaba em barras geradoras m de potência ativa. A sub-rede está determinada.

A isolação da sub-rede do restante do sistema é feita através da transformação dos fluxos de potência ativa que deixam a sub-rede em admitâncias a partir dos nós intermediários, assim como os fluxos de potência reativa que saem e que chegam à sub-rede[2] nos nós intermediários.

O resultado até o momento é um sistema de dimensão reduzida; composto por uma barra de carga ligada por meio de uma rede de transmissão, com vários nós intermediários, a um ou mais geradores.

O segundo procedimento consiste em determinar todos os caminhos de transmissão radiais entre a barra de carga e cada gerador, e posteriormente, eliminar as barras intermediárias.

A cada barra j, conectada a barra terminal i por um único ramo de transmissão, é definido um caminho de transmissão radial. Note-se que $P_{ij} < 0$. Se existem nj barras j, são definidos nj caminhos. Para cada barra j existem nk barras k, com $P_{jk} < 0$, a ela conectadas, e são definidos nk–1 novos caminhos. Para cada barra k existem nℓ barras ℓ, com $P_{k\ell} < 0$, a ela conectadas, e são definidos $n\ell - 1$ novos caminhos. Cada caminho termina em um gerador m de potência ativa.

São definidos então, vários caminhos radiais contendo a barra crítica i, uma barra j, uma barra k, uma barra ℓ, etc., e uma barra geradora m. Esses caminhos radiais não são necessariamente independentes, podendo o mesmo ramo de transmissão aparecer em vários caminhos diferentes.

Para isolar um caminho radial de transmissão do resto do sistema é necessário transformar em admitâncias todos os fluxos de potência ativa e reativa que

[2] Por definição de sub-rede, não há fluxos de potência ativa chegando até ela.

entram e saem do caminho em suas barras intermediárias. Transformando-se as cargas das barras intermediárias em admitâncias e eliminando-se essas barras, tem-se um circuito equivalente de duas barras, como se queria obter.

O resultado consiste em vários circuitos compostos por gerador, circuito π equivalente de transmissão e barra de carga. É possível que um mesmo gerador esteja conectado à barra de carga por mais de um circuito π de transmissão. A individualidade de cada caminho de transmissão é mantida.

A carga de cada um dos vários circuitos de duas barras é o fluxo de potência ativa e reativa que chega à barra de carga através do caminho de transmissão correspondente. A geração de cada um dos vários circuitos de duas barras resultantes é o fluxo de potência ativa e reativa que sai da barra de geração através do caminho de transmissão correspondente.

As grandezas que mantêm o mesmo valor no circuito intacto e no circuito de duas barras são as tensões nodais em módulo e argumento no gerador e na carga, e a geração (fluxo de potência entrando na rede reduzida), e a carga (fluxo de potência saindo da rede reduzida).

A rede reduzida depende das admitâncias da rede completa, e também da tensão nodal das barras intermediárias, quando os fluxos de potência entrando e saindo desses nós são transformados em impedância. Logo, a rede reduzida é válida somente no ponto de operação em análise.

Os ramos de transmissão são fictícios, mas o interesse é observar o "esforço de transmissão" (quedas do módulo e defasagem angular da tensão), e o esforço é o mesmo na rede inteira e na reduzida.

O terceiro procedimento é a comparação da tensão na carga no ponto de operação em análise com a tensão crítica calculada pelas expressões (2.31) e (2.32). Com esta comparação é possível determinar se o ponto de operação em análise se encontra na parte superior ou inferior da curva SV, e ainda, a "distância" até o ponto de máxima carga. Evidentemente, esse resultado é válido somente no ponto de operação em análise.

Para um sistema de duas barras composto por um gerador, uma carga e um circuito π equivalente de transmissão, sabe-se que módulo e ângulo da tensão na carga, quando está é máxima, são dados por [27]:

$$V_{\ell}^{c} = \frac{V_g}{2\cos(\theta_{\ell}^{c} - \theta_g) + 2 * \left(\frac{Z_t}{Z_s}\right) * \cos(\theta_{\ell}^{c} - \theta_g + \alpha_t - \alpha_s)} \tag{2.31}$$

$$\theta_{\ell}^{c} = \frac{1}{2}\text{arctg}\left[\frac{\text{sen}(-\phi + \alpha_t) + \left(\frac{Z_t}{Z_s}\right) * \text{sen}(-\phi + 2\alpha_t - \alpha_s)}{-\cos(-\phi + \alpha_t) - \left(\frac{Z_t}{Z_s}\right) * \cos(-\phi + 2\alpha_t - \alpha_s)}\right] + \theta_g \tag{2.32}$$

onde:

V_{ℓ}^{c} e θ_{ℓ}^{c} módulo e ângulo da tensão na carga quando esta é máxima;

V_g e θ_g módulo e ângulo da tensão no gerador;

Z_t e α_t módulo e ângulo da impedância do ramo série de transmissão;

Z_s e α_s módulo e ângulo da impedância do ramo paralelo de transmissão conectado à barra de carga;

ϕ ângulo do fator de potência da carga.

2.2.2 Reforço em Barras com Tensão Controlada

O problema tratado nesta seção é a relação oposta entre a potência reativa gerada e a magnitude da tensão em barras com tensão controlada quando o sistema de transmissão da área encontra-se muito carregado. Neste caso, a capacidade nominal de um SVC, por exemplo, não seria útil para manter a tensão controlada. Devido à relação oposta, a inserção de admitância capacitiva iria reduzir a tensão. O controle automático iria continuar a agir reduzindo ainda mais a tensão [28]. Este mecanismo pode levar o sistema ao colapso e foi verificado em um ponto de operação real do sistema brasileiro [8].

2.2.2.1 Reforço em Barras de Geração

Quando barras de carga são analisadas, é óbvio que, para reforçar as condições de segurança de tensão, é necessário diminuir os fluxos de potência em ramos mais carregados transferindo-os para ramos menos carregados. Quando uma barra de geração é analisada, parece coerente que, para reforçar as condições de segurança de tensão, seja necessário desviar sua geração de ramos mais carregados para ramos menos carregados. Quando existe um único tronco de transmissão conectando a barra de geração crítica ao resto do sistema, por exemplo, no caso de transmissão de um grande bloco de energia a partir de um gerador hidráulico remoto, a única possibilidade é diminuir a geração, primeiramente a reativa e, se necessário, a ativa.

Sabe-se que essa era a atitude tomada pelos operadores do sistema brasileiro S-SE durante épocas de carga pesada: diminuir (somente 100 a 200 MW) a geração de Itaipu 60 Hz (5.600 MW), para tornar possível alcançar um maior FRJ, sigla que representa o somatório dos fluxos de potência ativa chegando à Área Rio [29].

2.2.2.2 Reforço em Barras com Compensação Reativa

As barras com compensação reativa variável são barras de tensão controlada. A operação na parte inferior da curva QV já foi notada várias vezes, que corresponde a operar na parte esquerda da curva VQ, denotando uma relação pouco usual. Ferreira et alli [29] estudaram as condições de segurança na Área Rio. O controle de tensão nesta área é feito de forma a manter uma reserva de potência reativa nos compensadores síncronos de Grajaú, devido à fundamental importância que estes equipamentos têm para o desempenho da área. Inclusive, a geração destes equipamentos constitui-se referência para ações que costumam ter elevado custo para o sistema, como a elevação de geração térmica ou corte de carga.

Na Figura 2.5 [29] mostram-se as curvas VQ associadas à barra de 500 kV de Grajaú. Cada curva corresponde a um diferente carregamento (FRJ). Foram construídas medindo-se a potência reativa gerada por um compensador fictício conectado a esta barra para vários valores de tensão. Como sempre, o lado direito da curva corresponde aos pontos de operação onde a relação VQ é a usual. Nos pontos do lado esquerdo, a relação é oposta a usual. O ponto de mínimo de cada curva separa o lado direito do lado esquerdo. Portanto, quanto mais à direita do ponto de mínimo, mais seguro é o ponto de operação. Observando-se a figura pode-se concluir que:

i. para um dado FRJ, uma ação de controle que leva o ponto de operação mais para a direita é aumentar o valor da tensão na barra;

ii. para uma dada tensão na barra, uma ação de controle que leva o ponto de operação mais para a direita é diminuir o FRJ;

iii. para uma dada geração reativa, por exemplo, Qg = 0, o ponto de operação estará tanto mais à direita quanto menor for o FRJ.

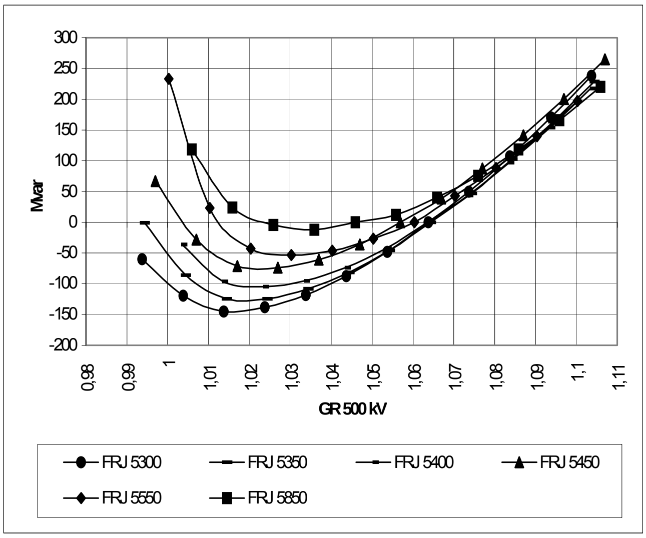

Figura 2.5 – Curvas VQ para a Barra de Grajaú 500 kV

Portanto, para reforçar uma barra com compensação reativa e conseguir que as ações de controle tenham o efeito esperado, é preciso aumentar o valor da tensão controlada e, se necessário, reduzir o fluxo de potência ativa no caminho de transmissão ao qual está conectado o equipamento de compensação de potência reativa.

2.2.3 Aplicação em um Sistema-Teste de 5 Barras

Os resultados da avaliação são baseados nos índices descritos nas seções 2.1.2 e 2.1.3. O objetivo é identificar na rede de transmissão o caminho crítico de transmissão e tentar fazer o respectivo reforço nesse caminho para melhorar as condições de estabilidade de tensão do sistema.

O sistema teste de 5 barras é mostrado na Figura 2.6. Os dados de barra e os de linha do sistema são mostrados na Tabela 2.1.

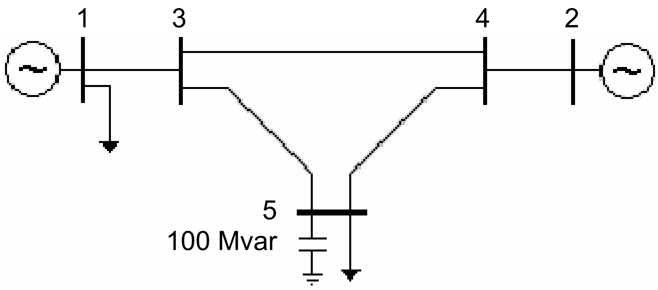

Figura 2.6 – Diagrama Uniflilar do Sistema-Teste de 5 barras

Tabela 2.1 – Dados de Barra e de Linha do Sistema-Teste de 5 Barras

Barra		*Tensão*		*Geração*		*Carga*		*Shunt*
No.	*Tipo*	*V (pu)*	*θ (graus)*	*P (MW)*	*Q (Mvar)*	*P (MW)*	*Q (Mvar)*	*Q (Mvar)*
1	Vθ	1,050	0,0	1299,0	–999 +999	500,0	200,0	–
2	PV	1,010	–	1,0	–999 +999	–	–	–
3	PQ	1,000	–	–	–	–	–	–
4	PQ	1,000	–	–	–	–	–	–
5	PQ	1,000	–	–	–	800,0	700,0	100,0

De	*Para*	*Resistência (%)*	*Reatância (%)*	*Susceptância (%)*
1	3	0,00	2,00	0,00
2	4	0,00	2,00	0,00
3	4	0,00	4,00	0,00
3	5	0,00	4,00	0,00
4	5	0,00	4,00	0,00

Os valores de geração e carga são mostrados na Tabela 2.2, enquanto que na Tabela 2.3 [28], mostram-se os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos de transmissão (não há perdas de potência ativa).

Tabela 2.2 – Geração e Carga / Caso-Base

Barra	*Tensão*	*Geração*		*Carga*		*Shunt*
		P (MW)	*Q (Mvar)*	*P (MW)*	*Q (Mvar)*	*Q (Mvar)*
1	1,050	1299,0	1185,0	500,00	200,00	-
2	1,010	1,0	697,8	-	-	-
3	0,876	-	-	-	-	-
4	0,872	-	-	-	-	-
5	0,618	-	-	800,00	700,00	38,20

Tabela 2.3 – Fluxos de Potência nas Linhas / Caso-Base

F 1_3		*F 2_4*		*F 3_4*		*F 3_5*		*F 4_5*		*Perdas*
P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	Q
799,1	985,0	1,0	697,8	297,4	31,8	501,2	661,3	298,1	587,5	1021,5

2.2.3.1 Aplicação do Programa EstabTen

Os resultados da avaliação das condições de estabilidade de tensão usando o programa computacional EstabTen [30], são mostrados na Tabela 2.4. Dos índices β e M (margem de potência), pode-se observar que a barra 2 se encontra na Região B de operação. Porém, o interesse neste exemplo é analisar a barra 5 de carga, cujos resultados mostram que esta barra encontra-se praticamente no vértice da curva VS. A margem de potência aparente muito pequena impediria um eventual crescimento de carga nessa barra. Portanto, o próximo passo é determinar os caminhos críticos associados a esta barra.

Tabela 2.4 – Índices de Avaliação da Estabilidade / Caso-Base

Barra	*Tensão*	*S_i (pu)*	*S_m (pu)*	*β(graus)*	*M (%)*
1	1,050	12,68	12,70	0,0	0,0
2	1,010	6,98	19,50	–61,5	–379,1
3	0,876	0,00	28,40	121,4	1,0
4	0,872	0,00	17,00	136,8	1,0
5	0,618	10,63	11,60	168,1	8,7

2.2.3.2 Aplicação do Programa CaTrans

Quando se estuda o sistema equivalente de duas barras para determinar os caminhos associados à determinada barra, o interesse é comparar o valor atual da tensão na carga, em módulo e ângulo, com valores críticos calculados por (2.31) e (2.32). Portanto, a redução do valor do módulo da tensão e da defasagem angular entre a tensão do gerador e da tensão da carga, podem ser considerados como o “esforço” da transmissão de potência ativa e reativa entre as duas barras. A responsável pelo esforço é a impedância existente entre as fontes e as cargas do sistema elétrico. Na Tabela 2.5, mostram-se os caminhos associados à barra crítica calculados pelo programa CaTrans, cuja lógica foi descrita na Seção 2.2 [28].

Tabela 2.5 – Caminhos Associados à Barra de Carga / Caso-Base

Caminhos	*Tensão no Gerador*		*Tensão na Carga*		*Tensão Crítica na Carga*	
	Módulo	*Ângulo*	*Módulo*	*Ângulo*	*Módulo*	*Ângulo*
C_5-3-1	1,050	0,00	0,618	–31,75	0,63	–33,20
C_5-4-2	1,010	–18,96	0,618	–31,75	0,57	–35,06
C_5-4-3-1	1,050	0,00	0,618	–31,75	0,99	–26,71

Observando a Tabela 2.5, verifica-se que o caminho crítico é aquele que envolve as barras 5, 4, 3 e 1 (C_5-4-3-1), por estar mais afastado do valor do módulo da tensão crítica na carga. Portanto, é preciso reforçar este caminho por ser o mais carregado e/ou desviar os fluxos para outro caminho [28].

2.2.3.3 Aplicação do Programa FLUPOT

O FLUPOT[3] é um programa que tem por objetivo calcular um estado de uma rede CA em regime permanente, por meio da otimização de uma função objetivo e, satisfazendo uma série de restrições físicas operacionais. É baseado no método dos pontos interiores com utilização do algoritmo primal-dual de barreira logarítmica [31].

O programa disponibiliza diversas funções objetivo, dentre as quais foi usada no trabalho apresentado em [28], a de “Mínima Transferência de Potência”. Esta função objetivo é aplicada aos ramos do caminho crítico determinado pelo programa CaTrans.

O redespacho de potência ativa foi proibido através da fixação da geração de potência ativa na barra 2. Por conseqüência, o reforço das condições de carregamento só é possível através da alteração do perfil de tensão [28].

[3] Cedido pelo CEPEL para fins de ensino e pesquisa.

A análise da rede de transmissão e dos fluxos de potência, conduz a escolha que consiste em minimizar o fluxo de potência ativa da barra 3 para a barra 4. Nas Tabelas 2.6 e 2.7, mostram-se os resultados da geração, carga e fluxo nas linhas após a realização do redespacho de potência reativa [28]. Observa-se uma diminuição na geração de potência reativa e, portanto, uma considerável diminuição das perdas reativas na rede, assim como um melhor uso (82,81%) da fonte de potência reativa instalada na barra 5.

Tabela 2.6 – Geração e Carga / Caso "Mínima Transferência de Potência" (MTP)

Barra	*Geração*		*Carga*		*Shunt*
	P (MW)	*Q (Mvar)*	*P (MW)*	*Q (Mvar)*	*Q (Mvar)*
1	1299,1	993,0	500,0	200,0	-
2	1,0	311,6	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	-	-	800,0	700,0	82,81

Tabela 2.7 – Fluxo nas Linhas / Caso "Mínima Transferência de Potência"

F 1_3		*F 2_4*		*F 3_4*		*F 3_5*		*F 4_5*		*Perdas*
P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	Q
799,0	793,0	1,0	311,6	276,0	104,4	523,0	512,5	277,0	369,7	486,6

Na Tabela 2.8 mostra-se o resultado da avaliação das condições de operação do sistema após a alteração do perfil de tensão. A forma de se avaliar se essa ação foi bem sucedida ou não, é analisando-se o "Índice de Influência" (II). No caso exemplificado a ação foi bem sucedida, especialmente para a barra 5, que praticamente teve sua margem de potência quintuplicada, como mostra o Índice de Influência da Tabela 2.8. Note-se também que a barra 2 passou a operar na região A após a elevação do perfil de tensão do sistema.

Tabela 2.8 – Índices de Avaliação da Estabilidade / Caso “Mínima Transferência de Potência”

Barra	*Tensão*	S_i *(pu)*	S_m *(pu)*	β *(graus)*	*M (%)*	*II*
1	1,200	11,23	11,30	180,0	0,0	1,950
2	1,100	3,12	15,80	110,6	80,4	2,181
3	1,077	0,00	66,60	103,5	-	0,000
4	1,043	0,00	40,00	105,0	-	0,000
5	0,908	10,63	22,60	125,4	53,0	5,380

A melhora das condições de operação após a ação de controle pode ser constatada através da análise da situação dos caminhos associados à barra de carga. Pode-se observar na Tabela 2.9 que a tensão na barra 5 tem seu módulo superior aos respectivos valores críticos, assim como seu ângulo é menor que os respectivos ângulos críticos.

Tabela 2.9 – Caminhos Associados à Barra de Carga / Caso “Mínima Transferência de Potência”

Caminhos	*Tensão no Gerador*		*Tensão na Carga*		*Tensão Crítica na Carga*	
	Módulo	*Ângulo*	*Módulo*	*Ângulo*	*Módulo*	*Ângulo*
C_5-3-1	1,200	0,00	0,91	–19,53	0,71	–31,27
C_5-4-2	1,100	–12,77	0,91	–19,53	0,64	–32,07
C_5-4-3-1	1,200	0,00	0,91	–19,53	0,79	–26,31

O procedimento de reforço é encerrado quando os valores de margem forem adequados. Caso contrário, seria necessário realizar novas medidas de controle, desta vez promovendo o redespacho de potência ativa.

O resultado promissor deste teste numérico incentivou a aplicação da ferramenta CaTrans em sistemas de grande porte. Aqui, o ramo a ter seu fluxo de potência reduzido foi escolhido com base na "experiência com o sistema". Na referência [27] esse ramo é determinado analiticamente.

2.3 Conclusões

Os índices baseados em det [*D'*], margem M e ângulo β, não são capazes de determinar a sensibilidade entre a ação de controle e a tensão controlada, pois a matriz [*D'*] relaciona as potências ativa e reativa injetadas com o ângulo e módulo da tensão na barra i, conforme pode ser constatado através do sistema de equações dado em (2.3). Portanto, deve-se estabelecer um método através do qual se possa fazer a representação dos controles de tensão de forma a identificar esta relação de sensibilidade. Esse método será apresentado detalhadamente nos Capítulos 3 e 4.

O método para reforço das condições de segurança de tensão descrito neste capítulo consiste em encontrar barras críticas em um determinado ponto de operação e, então, realizar o redespacho de potência e ações de controle de tensão, obtendo um novo ponto de operação de maneira que as barras consideradas críticas sejam retiradas, ou afastadas, da região de instabilidade.

A questão é, dado o novo perfil de tensão desejado, como chegar até ele sem levar em consideração a possibilidade de equipamentos controladores de tensão apresentarem efeito de ações de controle de tensão de modo contrário ao esperado? A resposta será apresentada no Capítulo 5.