2 Avaliação do Carregamento da Rede de Transmissão [dos Santos, 2003]

2.1 Introdução

Problemas de estabilidade de tensão são originários do uso cada vez maior das linhas de transmissão existentes, o que foi tornado possível através da instalação de compensação de potência reativa [Taylor, 1994]. 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 modal baseada em “menores autovalores” [Gao, 1992] ou em “valores singulares mínimos” [Löf, 1992] 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 das ações de controle. Para atender a essa necessidade, este capítulo apresenta uma abrangente ferramenta de avaliação do carregamento da rede de transmissão, composta de três índices com significado físico, propícia para uso em estudos operacionais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

2.2 Ferramenta Analítica

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 à extremidade da curva V x S. A parte superior é a região normal de operação, enquanto 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. A extremidade 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 na extremidade da curva é a tensão mínima para a operação normal [Prada, 2002].

O sistema linearizado das equações estáticas de fluxo de carga é:

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

Colocando as equações e variáveis relacionadas com a barra em análise para baixo, (2.1) fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta V' \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

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, i.e. $\Delta P' = \Delta Q' = 0$, e então o sistema (2.2) pode ser reduzido para:

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

onde, com dimensão (2x2):

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

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 [Prada, 2002]. Se apenas uma variação incremental de potência reativa é possível ou desejável, como por exemplo no caso de uma barra somente com compensação reativa, as condições críticas podem ser verificadas pelo det [D'] dividido por d'_{11}, elemento de [D'].

É demonstrado que a magnitude e o sinal do determinante da matriz [D'] indicam, respectivamente, a distância ao máximo carregamento e a região de operação da curva V x S [Prada, 2002].

2.2.1 Magnitude do Determinante da Matriz [D']

Pode-se dizer que para um sistema multi-nó [Prada, 2002]:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

- S_i é a potência injetada na barra i (no ponto de operação em análise).
- S_{io} é a potência aparente máxima que pode ser injetada para a barra i, caso o sistema fosse de duas barras (dado por $S_{io}^2 = V_i^4 * Y_{ii}^2$).
- $\Delta\det * V_i$ está relacionada à potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i (dado por $\Delta\det * V_i = (\det[D] - \det[D']) * V_i$).
- $S_m = \text{sinal de } \left[S_{io}^2 - \Delta\det * V_i\right]\left(\left|S_{io}^2 - \Delta\det * V_i\right|\right)^{1/2}$ é a máxima potência aparente que poderia 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.

2.2.2 Sinal do Determinante da Matriz [D']

Usando-se um sistema de referência cartesiano, o produto vetorial dos vetores gradientes é dado por:

$$\dot{\nabla}P x \dot{\nabla}Q = \left[\left(\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial V_i}\right) - \left(\frac{\partial P_i}{\partial V_i} * \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i}\right)\right] * k \qquad (2.5)$$

e então igual a:

$$\dot{\nabla}P x \dot{\nabla}Q = \det[D'] \qquad (2.6)$$

como,

$$\dot{\nabla}P x \dot{\nabla}Q = |\nabla P| * |\nabla Q| * \text{sen}\beta \qquad (2.7)$$

tem-se que,

$$\det[D'] = |\nabla P| * |\nabla Q| * \text{sen}\beta \qquad (2.8)$$

onde β é o ângulo entre ∇P e ∇Q.

Como o sinal de $\det[D']$ é função somente do seno de β, têm-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 $\beta = \pm 180^0$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

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 0^o ou 180^o. Portanto, $\det[D'] > 0$ caracteriza a parte superior da curva V x S 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, a extremidade da curva, como queria-se demonstrar [Prada, 2002].

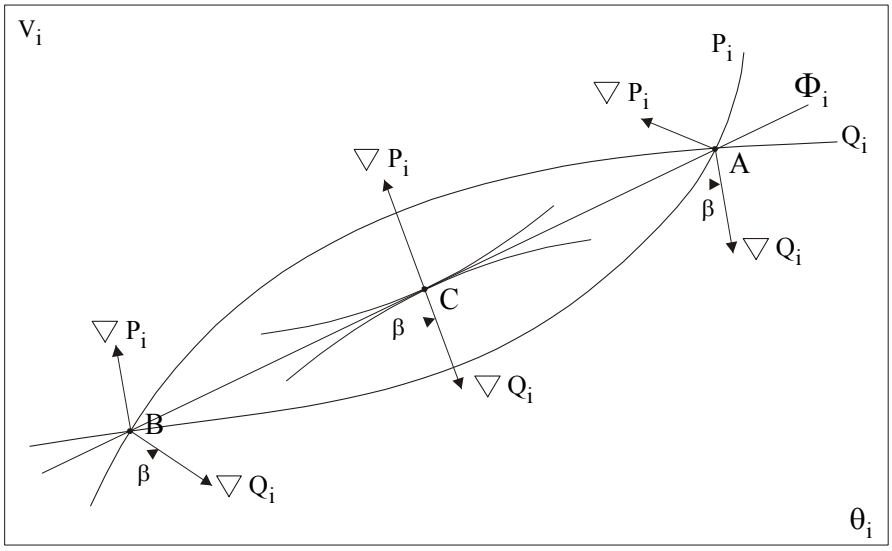

Figura 2.1 – Localização dos Vetores Gradientes de P_i e Q_i no Plano $V \times \theta$

E ainda, é fácil perceber 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 Schur, se det [D'] = 0 então det [J] = 0. Esta condição tem sido extensamente usada como característica do colapso de tensão [Gao, 1992; Löf, 1992], e foi primeiro proposta por [Venikov, 1975]. 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. A outra possibilidade de obter-se numericamente det [J] = 0 é ter-se problemas de carregamento presentes em toda a rede. Como são normalmente confinados dentro

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

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.

2.2.3 Interpretação dos Índices

Todos os valores calculados têm validade instantânea porque são calculados com base em um único ponto de operação, inclusive a 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 por que geração e carga mudam, compensação reativa e taps de LTCs atingem limites, o sistema é não-linear, etc. Portanto, a análise é para 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 9 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, por exemplo para 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.

Na região normal de operação, a margem de potência (S_m - S_i), um valor positivo, deve ser lido como a quantidade em MVA que poderia ser "adicionada" a S_i para atingir a estimativa do máximo S_m. Pode-se definir uma margem em pu ou em percentual. Esta margem será igual à unidade quando a potência injetada na barra "i" (S_i) é nula, e tende a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

zero à medida que a injeção tende ao valor máximo ($S_i = S_m$). Esta margem é definida como:

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) \text{ em pu de } S_m, \tag{2.9}$$

ou

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) * 100\% \text{ em percentual de } S_m \tag{2.10}$$

Na região anormal de operação a margem de potência (S_m - S_i), um valor negativo, deve ser lido como a quantidade em MVA que deveria ser "retirada" de S_i para atingir a estimativa do máximo S_m de uma outra curva V x S. Pode-se definir uma margem em pu ou em percentual. Esta margem será igual a zero quando a injeção é máxima ($S_i = S_m$) e tende a -1 quando S_m tende a zero. Esta margem é definida como:

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right) \text{ em pu de } S_i \tag{2.11}$$

ou

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right) * 100\% \text{ em percentual de } S_i \tag{2.12}$$

No ponto de operação correspondente ao máximo carregamento, (S_m - S_i) é nulo e, portanto, não há nada a adicionar ou retirar de S_i para atingir S_m.

Para um sistema multi-nó, com essa definição de margem, o valor desta varia de +100%, quando a operação é na região normal e $S_i = 0$, passa a zero quando na fronteira e $S_i = S_m$, e adquire valores negativos na região anormal de operação até -100% quando $S_m = 0$. Nos casos em que $S_m < 0$, a margem continua a decrescer além de -100%, o que pode parecer sem sentido. No caso de um sistema de 2 barras, $S_m < 0$ jamais acontece. Entretanto, no caso de um sistema multi-nó, uma situação crítica deste porte em uma certa barra é acompanhada por várias outras barras adjacentes. Uma diminuição da carga (S_i) em algumas dessas barras levariam todas elas a operar em uma situação mais favorável, com $S_m > 0$ e, na melhor das hipóteses com $S_m > S_i$.

Na Figura 2.2 é mostrada que a margem é positiva na região normal de operação, negativa na região anormal de operação, nula no ponto de máximo carregamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

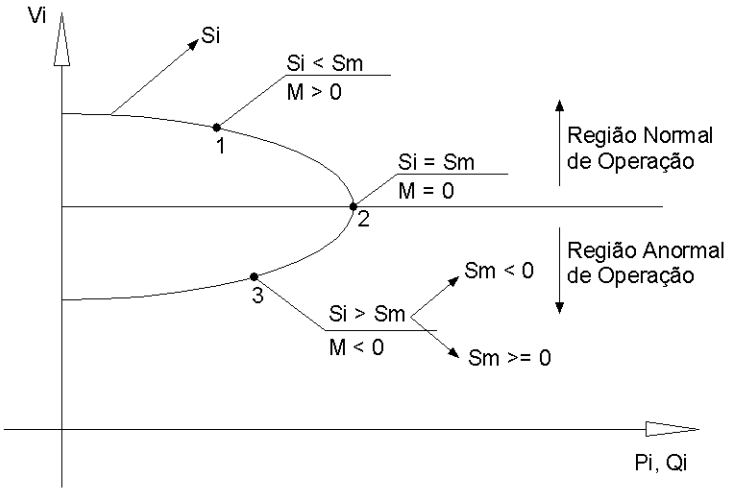

Figura 2.2 – Sinal da Margem na Curva V x S

O ângulo β traduz a dificuldade do sistema em suportar a injeção na barra. Quando está já próximo de 180^o isso significa que o máximo está próximo, mesmo que a margem de potência seja grande. Nesse caso, um aumento da injeção S_i acarretaria em diminuição substancial de S_m.

Um Índice de Influência pode ser definido para traduzir a conseqüência de qualquer evento sobre a margem de potência:

$$II = (\text{sinal de}\,\beta_0)\left[\frac{M_1}{M_0} - 1\right] \tag{2.13}$$

onde M_0 é a margem do caso-base e M_1 é a margem após o evento em análise, ambas em MVA. O evento pode ser de qualquer natureza, como por exemplo, uma ação de controle, um incremento de carga, uma contingência, uma barra perdendo o controle de tensão. Se II é positivo, o evento foi benéfico para a margem. Se II for negativo, o evento deteriorou a margem. Portanto, a conseqüência de uma ação de controle é diretamente avaliada: a comparação das condições de segurança de tensão entre dois pontos de operação é imediata.

O modelo linearizado do sistema (2.1) inclui o controle de tensão local e remoto por LTCs e por fontes variáveis de potência reativa. Sua inclusão afeta os índices S_m e β. A produção / absorção de potência reativa por gerador depende da sua tensão terminal e da sua produção ativa. Quando um limite é atingido, o gerador é modelado por uma fonte de tensão constante atrás da reatância síncrona. A localização e o número de barras de geração swing, responsáveis por suprir a geração incremental para balancear a variação

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

incremental da carga da barra em estudo e a variação incremental das perdas, afeta os índices S_m e β e, portanto, podem ser modeladas em (2.1).

Os valores dos índices S_m e β podem mudar abruptamente quando é perdido o controle de tensão em uma barra perto da barra em análise. Não existe índice capaz de prever isto. Entretanto, como os índices S_m e β foram projetados para a operação em tempo real, e a avaliação das condições de segurança de tensão é executada a cada 10 minutos, por exemplo, é direto o acompanhamento da evolução dos índices e da capacidade de controle de tensão. Além disso, todos os eventos que podem fazer os índices "saltarem" de um valor para outro são incluídos na lista de contingências. Esses eventos incluem exaustão da produção de potência reativa, taps de LTCs atingindo o limite, desconexão de geradores e SVCs.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

2.3 Avaliação das Condições de Segurança de Tensão

Esta seção mostra a evolução dos índices para a avaliação da segurança de tensão. A área Rio de Janeiro e Espírito Santo foi escolhida para observação por ter seu desempenho fortemente influenciado pela coordenação entre os diversos recursos de controle internos e externos e, também por ser um grande centro de carga com sistema de suprimento radial.

A implementação das lógicas destes recursos de controle, caracterizada pela escolha das barras controladas e faixas de tensão, refletiram a experiência acumulada na operação do sistema, respeitando-se todos os limites operativos [Passos Fº, 2003].

Utilizando o módulo de fluxo de potência continuado do ANAREDE (programa de Análise de Redes, do CEPEL), a lógica de controle proposta foi empregada durante o crescimento da carga ativa e reativa na área, mantendo-se o fator de potência inicial e direção de crescimento. O aumento de geração necessário para fazer frente ao aumento de carga e perdas foi concentrado nas usinas geradoras localizadas em São Paulo, conectadas à área estudada através dos troncos de 765 e 500 kV.

De forma a apenas garantir o tempo hábil para as atuações manuais, no recurso mais lento de controle durante o processo de carregamento do sistema – as manobras

manuais de LTC, por parte dos operadores do sistema - foi calculado o máximo incremento de carga no fluxo de potência continuado de forma a atender o tempo necessário para estas operações. Assim, admitindo-se um tempo máximo de 3 minutos para a conclusão de manobras manuais em LTC e, verificada em tempo real, uma taxa máxima de variação de carga de 10 MW/min, o incremento máximo de carga no fluxo de potência continuado deverá ser 30 MW (cerca de 0,5% da carga da área), de forma a garantir um tempo hábil para utilização do recurso mais lento em qualquer momento do processo de crescimento de carga.

As colunas dos relatórios gerados pelo programa computacional mostram as seguintes informações (uma linha do relatório para cada barra):

1ª coluna: Número do caso;

2ª coluna: Módulo da Tensão em pu;

3ª coluna: Potência Injetada na barra S_i em pu;

4ª coluna: É uma estimativa da potência aparente que estaria sendo injetada na barra i, calculada no ponto de operação em análise, caso este fosse o ponto de máxima injeção, dada por:

$$S_m = \text{sinal}\left(S_{io}^2 - \Delta\det * V_i\right)\sqrt{\left|S_{io}^2 - \Delta\det * V_i\right|} \quad \text{em pu de MVA} \tag{2.14}$$

5ª coluna: Ângulo β entre os gradientes ∇P e ∇Q. Indica a região de operação e a distância angular até o ponto de operação correspondente ao máximo carregamento na barra , é dado por:

$$\beta_i = \text{arco sen}\left(\frac{\det[D']}{|\nabla P_i| * |\nabla Q_i|}\right) \text{ em graus} \tag{2.15}$$

6ª coluna: Indica a região de operação para a barra em análise e a distância entre $S_m^2 - S_i^2$, dada por:

$$\det[D'] * V_i = S_{io}^2 - S_i^2 - \Delta\det * Vi \tag{2.16}$$

idêntico a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

$$\det[D'] * V_i = S_m^2 - S_i^2 \quad \text{em pu de MVA}^2 \tag{2.17}$$

7ª coluna: Margem de Potência M indicando a região de operação e a distância ao ponto de operação correspondente ao máximo carregamento da barra. É dada por:

$$M = \left(1 - \frac{S_i}{S_m}\right) * 100\% \text{ em percentual de } S_m, \text{ para } S_i < S_m \tag{2.18}$$

ou

$$M = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1\right) * 100\% \text{ em percentual de } S_i, \text{ para } S_i > S_m \tag{2.19}$$

Na Tabela 2.1 são mostrados os valores dos índices obtidos para a barra 44 que tem a ela conectado um compensador síncrono. Foi a barra da área em estudo que primeiro acusou, já no caso 65, índices negativos; a relação entre a potência reativa gerada e a tensão terminal trocou de sinal e ficou oposta à usual.

Tabela 2.1 – Índices para a Barra 44 com Compensador Síncrono

Barra 44 – GRAJAU-1-1CS						
Casos	V_i	S_i	S_m	β	det[D']$*V_i$	M(%)
59	1,030	0,511	15,300	126,400	226,750	96,660
60	1,029	0,476	14,800	128,600	215,380	96,784
61	1,032	0,564	14,500	130,700	205,750	96,110
62	1,036	0,722	7,900	166,200	60,600	90,861
63	1,044	0,961	6,100	172,200	34,900	84,246
64	1,040	0,768	4,600	175,500	20,800	83,304
65	1,046	1,022	-3,800	-176,800	-15,220	-471,820
66	1,055	1,318	-7,200	-169,600	-51,540	-646,282
67	1,073	1,795	-14,700	-144,800	-206,200	-918,942
68	1,079	1,975	-16,300	-139,000	-250,780	-925,316

Na Tabela 2.2 são mostrados os valores dos índices obtidos para a barra 178 que é a barra que tem a tensão controlada pelo compensador da barra 44 (em barras onde $S_i = 0$, têm-se que M = 100% e det[D'] $*$ V_i = S_m^2; por essa razão det [D'] $*$ V_i e M não são impressos no relatório). Em ambas as barras 44 e 178 a carga S_i vai crescendo seguida

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

da redução de S_m. O ângulo β aumenta, tendendo a 180^o. A margem percentual M diminui. É o comportamento esperado.

Tabela 2.2 – Índices para a Barra 178 Controlada pela Barra 44

Barra 178 – GRAJAU---138				
Casos	V_i	S_i	S_m	β
59	1,007	0,000	39,800	154,100
60	1,007	0,000	38,700	155,600
61	1,007	0,000	37,700	156,900
62	1,007	0,000	25,700	169,400
63	1,007	0,000	23,500	171,200
64	1,007	0,000	22,300	172,000
65	1,007	0,000	19,200	174,200
66	1,007	0,000	15,800	176,100
67	1,007	0,000	-12,600	-177,700
68	1,007	0,000	-16,400	-176,000

A Tabela 2.3 corresponde à geração de Itaipu em 60 Hz. Pode-se observar que já entre os casos 61 e 62 o ângulo β passou por 0^o, det [D'] passou por zero, e a margem M coerentemente também passou por zero. A análise dos componentes θ e V dos vetores ∇P e ∇Q, ou seja, dos quatro elementos da matriz [D'], indica que a relação entre a potência reativa gerada e a tensão terminal trocou de sinal, passando a ser não-usual.

Tabela 2.3 – Índices para a Barra 1107

Barra 1107 – ITAIPU60-8MQ						
Casos	V_i	S_i	S_m	β	det[D']$*V_i$	M(%)
59	1,028	35,194	36,974	8,744	128,485	4,814
60	1,028	35,209	36,437	6,249	87,997	3,371
61	1,029	35,231	35,879	3,406	46,023	1,805
62	1,029	35,261	17,529	-50,853	-936,044	-101,155
63	1,030	35,294	-9,500	-53,309	-1335,866	-271,532
64	1,030	35,298	-19,227	-51,868	-1615,648	-83,582
65	1,031	35,342	-38,411	-41,441	-2724,463	7,990
66	1,031	35,379	-63,968	-23,423	-5343,608	44,693

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

Ainda na Tabela 2.3 observa-se o comportamento da margem de potência. Comparando-se os índices S_i e S_m em todos os casos, percebe-se que a margem é o percentual exato sobre a escala dos índices S_i e S_m. Não há perda de informação numérica e de significado físico da margem. Por exemplo: no ponto de operação referente ao caso 62 da Tabela 2.3, a margem de potência é de aproximadamente -50%, o que pode ser visualizado quando se compara os índices S_i e S_m. S_m é aproximadamente a metade de S_i, indicando a correta informação da margem de potência. A margem de potência determina a região de operação e estima um percentual da distância do ponto de operação atual ao ponto de operação correspondente ao máximo carregamento na curva V x S.

Na Tabela 2.4 são mostrados, a título de comparação com a Tabela 2.3, os índices associados ao pequeno gerador da barra 253 FONTES----3MQ. A tensão controlada nesta barra permaneceu sem alterações, isto é, não participou da estratégia de controle de tensão nas áreas em estudo. Verifica-se a gradual deterioração dos índices até o caso 64, para uma maior alteração nos casos 65 e 66, acompanhando o comportamento da área.

Tabela 2.4 – Índices para a Barra 253

Barra 253 – FONTES---3MQ						
Casos	V_i	S_i	S_m	β	det[D']∗V_i	M(%)
59	1,000	1,458	7,500	84,600	54,000	80,560
60	1,000	1,458	7,400	85,100	52,980	80,297
61	1,000	1,459	7,300	85,700	51,940	80,014
62	1,000	1,460	6,300	97,900	37,250	76,825
63	1,000	1,461	6,000	102,100	33,760	75,650
64	1,000	1,462	5,800	104,600	31,650	74,793
65	1,000	1,463	5,300	113,600	26,100	72,396
66	1,000	1,464	4,500	127,500	18,430	67,467
67	1,000	1,353	-5,100	-131,900	-27,030	-476,940
68	1,000	1,467	-7,200	-113,900	-53,550	-590,798

Nas Tabelas 2.5 e 2.6 estão mostrados, respectivamente, os índices da barra 106, que dita o perfil de tensão da área Rio, e da barra 140 que dita o perfil de tensão da área Espírito Santo. A evolução dos índices mostra a aproximação do ponto de operação ao

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

ponto de máxima injeção de potência devido aos incrementos de carga através da gradativa deterioração dos índices S_m e β. Os índices apresentados mostram coerência em relação às outras tabelas mostradas.

Tabela 2.5 – Índices para a Barra 106

Barra 106 – ADRIANO--500				
Casos	V_i	S_i	S_m	β
59	1,073	0,000	35,300	155,300
60	1,075	0,000	34,200	156,600
61	1,073	0,000	33,100	157,800
62	1,072	0,000	21,000	168,700
63	1,070	0,000	19,000	170,600
64	1,073	0,000	18,100	171,400
65	1,070	0,000	15,300	173,600
66	1,068	0,000	12,500	175,700
67	1,062	0,000	-9,700	-177,400
68	1,061	0,000	-12,500	-175,500

Tabela 2.6 – Índices para a Barra 140

Barra 140 – ADRIANO--345				
Casos	V_i	S_i	S_m	β
59	1,026	0,000	30,800	153,300
60	1,008	0,000	29,800	155,000
61	1,006	0,000	28,900	156,300
62	0,998	0,000	19,200	168,600
63	0,995	0,000	17,400	170,500
64	1,003	0,000	16,500	171,300
65	1,000	0,000	14,000	173,600
66	0,999	0,000	11,400	175,700
67	0,992	0,000	-9,000	-177,400
68	0,990	0,000	-11,500	-175,500

Como pode ser observado em todas as tabelas, os casos 67 e 68 indicam situações extremas pois, além do sinal negativo indicar a região anormal de operação, a margem

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

abaixo de -100% (quando $S_m < 0$ isto implica em $M \leq 100\%$) indica a necessidade de realizar ações também nas barras adjacentes à barra de análise para que a mesma volte à região normal de operação. Uma diminuição da carga S_i em algumas destas barras levariam todas elas a operarem num ponto de operação mais estável, com $S_m > 0$ e, na melhor das hipóteses, $S_m > S_i$.

Conforme foi visto, existem situações críticas que precisam ser avaliadas e ocorrências que podem levar o sistema ao colapso de tensão. A ferramenta computacional para avaliação das condições de segurança de tensão mostrou-se adequada para a operação em tempo real principalmente quando é usada para monitorar a evolução do sistema sujeito a uma seqüência de cenários caracterizados pelo crescimento da demanda. Os valores da margem de potência são consistentes, numérica e fisicamente, para qualquer ponto de operação, estando este na região normal ou na região anormal de operação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

2.4 Casos Especiais

Nesta seção realiza-se uma análise de algumas barras do sistema elétrico brasileiro onde ocorrem índices não esperados. Deseja-se verificar que fatores poderiam estar levando as barras 62, 63, 64, 69, 70, 71, 73 e 74 a operarem na região inferior da curva V x S. Também deseja-se verificar o porquê do índice S_m^2 (definido como $S_m^2 = S_{io}^2 - \Delta \det * V_i$) apresentar valores negativos. Analisando a estrutura física da rede elétrica em questão, mostrada na Figura 2.3, pode-se observar a existência de compensação série e paralela envolvendo as barras mencionadas.

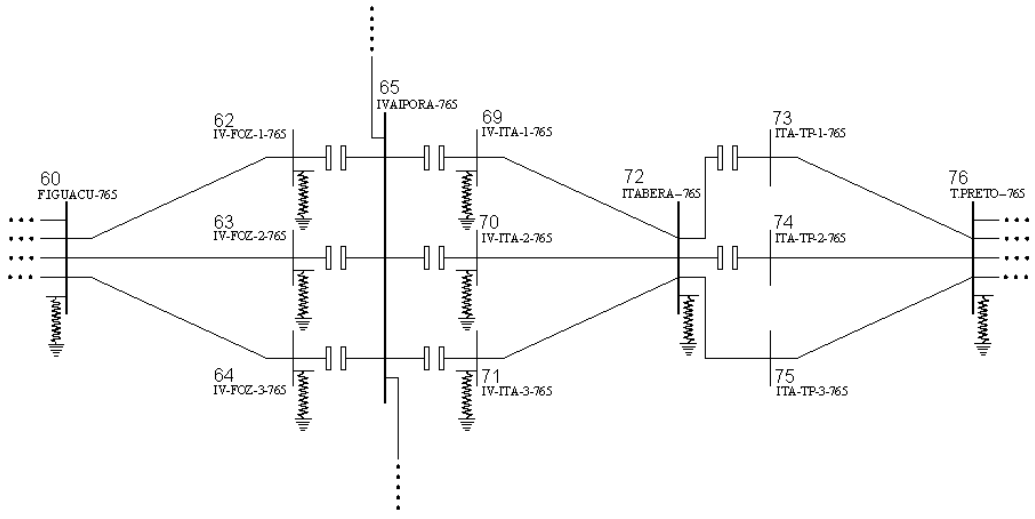

Figura 2.3 – Tronco de Transmissão ITAIPU – T. PRETO

De acordo com a definição, S_m^2 é negativo se $S_{io}^2 < \Delta\det * V_i$.Como $S_{io}^2 = V_i^4 * Y_{ii}^2$, esse termo é pequeno se o módulo da tensão é pequeno ou se o elemento diagonal da matriz admitância de barra é pequeno. Como $\Delta\det * Vi = (\det[D] - \det[D']) * V_i$, esse termo é grande principalmente se $\det[D'] * V_i < 0$. Como o módulo da tensão é o normal, são analisadas as grandeza Y_{ii} e $\det[D'] * V_i$.

2.4.1 Análise do Elemento Diagonal da Matriz Admitância de Barra

Com o objetivo de identificar o problema, foram utilizados os dados de novembro 2001. É importante enfatizar que embora esteja sendo utilizado um caso de carga pesada, os índices nessas barras possuem discrepância em carga leve.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

Tabela 2.7 - Índices para Barras de mesma Classe de Tensão

Barra	V_i	Eq	Tp	S_i	S_m^2	S_{io}^2	$\Delta\det * V_i$	$\det[D'] * V_i$	Y_{ii}	M(%)
60	0,9696	R	0	9,306	5623	557410	551786	5537	794	87,591
62	1,0247	R	0	1,575	-27654	7491	35146	-27657	82	-10658
63	1,0242	R	0	1,573	-27480	7529	35010	-27483	82	-10638
64	1,0210	R	0	1,564	-26662	7667	34329	-26664	83	-10540
65	1,0095	P	0	0,000	4556	281877	277321	4556	521	
69	1,0165	R	0	3,410	-5452	4352	9804	-5464	63	-2265
70	1,0170	R	0	3,413	-5459	4357	9817	-5471	63	-2264
71	1,0161	R	0	3,407	-5489	4405	9894	-5500	64	-2274
72	1,0043	R	0	9,984	3864	*******	*******	3764	9975	83
73	0,9995	P	0	0,000	-7056	3206	10263	-7056	56	
74	0,9999	P	0	0,000	-7064	3209	10273	-7064	56	
75	1,0044	P	0	0,000	3718	*******	*******	3718	****	
76	0,9594	R	0	9,112	4307	517574	513267	4224	781	86

Legenda da Tabela 2.7: 3ª coluna: Eq (equipamento conectado à barra) onde G – Gerador, L – Carga, R – Reator, C – Capacitor, Q – Compensador, P - Passagem (nenhum equipamento conectado); 5ª coluna: Tp (tipo da barra), onde 1 - Barra de tensão controlada, 2 - Barra "swing", 0 - Barra de carga

Na Tabela 2.7 são mostradas várias grandezas associadas às barras 62, 63, 64, 69, 70, 71, 73 e 74 (hachurado). Inicialmente o objetivo é comparar Y_{ii} das barras mencionadas como críticas a outras barras de mesma classe de tensão (em preto). Analisando-se a

tabela, conclui-se que Y_{ii} para as barras críticas são pequenos. Para que Y_{ii} seja pequeno é necessário que a soma das admitâncias dos elementos referentes às linhas de transmissão conectadas à barra seja pequena. Isso ocorre quando a reatância da compensação série capacitiva se somar com a reatância indutiva das linhas conectadas à barra. Por outro lado, a compensação paralela indutiva tende a aumentar o valor de Y_{ii}.

Através dos dados de linha e dos dados de barra pode-se chegar à Figura 2.4, referente à barra 62. Somando todas as admitâncias, tem-se o elemento diagonal da matriz admitância de barra: $Y_{62,62}$ = 82.426 pu, que é um valor pequeno quando comparado ao de outras barras.

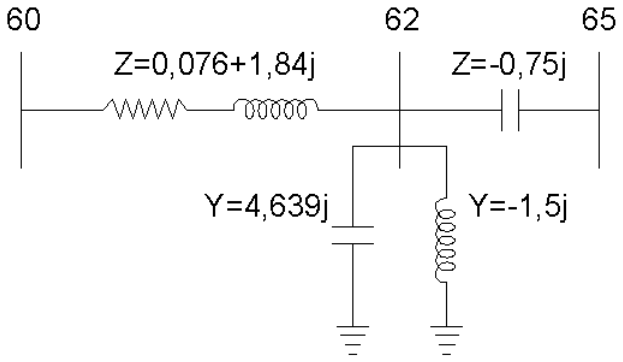

Figura 2.4 – Detalhe da Estrutura Física da Barra 62 - IV-FOZ-1-765

Para garantir que realmente é o compensador série que está tornando o elemento Y_{ii} pequeno, testa-se uma redução da compensação série fazendo-se $Z_{62,65}$ = - j0.15%. Somando todas as admitâncias, tem-se o elemento diagonal da matriz admitância de barra: $Y_{62,62}$ = 615,55 pu. Conclui-se que para barras que possuem compensação série, o elemento diagonal da matriz admitância de barra torna-se muito pequeno comparado às barras adjacentes de mesma classe de tensão, e isto resulta na discrepância no valor da margem de potência.

2.4.2 Análise do Determinante da Matriz [D']

Em uma segunda análise numérica, verifica-se a barra 62, desta vez com o crescimento de carga descrito na Seção 2.3. O problema dos índices não usuais acontece nos casos 59, 60 e 61 como mostrado na Tabela 2.8. Pode ser explicado como um excesso de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

compensação reativa para a carga do sistema. Os índices voltam a seus valores usuais nos casos 62 ao 66, com carga mais elevada. Pode ser explicado como devido à redução do efeito capacitivo paralelo e aumento do efeito indutivo série da própria linha associado ao aumento da produção de potência reativa em ITAIPU.

Tabela 2.8 – Índices para a Barra 62

Barra 62 - IV-FOZ-1-765										
Casos	V_i	S_i	S_m^2	S_{io}^2	Δdet*V_i	β	det[D]*V_i	det[D']*V_i	Y_{ii}	M(%)
59	0,987	1,462	-69442	6451	75894	-34	6449	-69444	82	-18124
60	0,986	1,459	-92825	6426	99252	-31	6424	-92827	82	-20982
61	0,985	1,455	-145180	6392	151572	-26	6389	-145182	82	-26287
62	0,983	1,450	13549	6348	-7201	103	6346	13547	82	98
63	0,981	1,445	9434	6302	-3131	107	6300	9432	82	98
64	0,981	1,444	7829	6296	-1533	109	6294	7827	82	98
65	0,979	1,437	4862	6239	1376	110	6237	4860	82	97
66	0,977	1,432	2852	6193	3340	108	6191	2850	82	97

Tabela 2.9 – Índices para a Barra 62 com a Compensação Série Atenuada

Barra 62 - IV-FOZ-1-765										
Casos	V_i	S_i	S_m^2	S_{io}^2	Δdet*V_i	β	det[D]*V_i	det[D']*V_i	Y_{ii}	M(%)
59	0,975	1,426	3187	342608	339420	70	342606	3185	615	97
60	0,975	1,424	2021	341684	339662	71	341682	2019	615	96
61	0,973	1,420	1582	339456	337873	71	339454	1580	615	96
62	0,972	1,416	1146	337573	336426	69	337571	1144	615	95
63	0,970	1,412	603	335568	334964	53	335566	601	615	94
64	0,970	1,411	303	335345	335042	31	335343	301	615	91
65	0,968	1,406	-570	332929	333499	-31	332927	-572	615	-1799
66	0,966	1,400	-1660	330288	331948	-39	330286	-1662	615	-3010

Em uma terceira análise numérica, verifica-se a barra 62, desta vez alterando-se a reatância da compensação série para $Z_{62,65}$ = - j0.15%, o que faz com que Y_{ii} adquira valor normal quando comparado com outras barras de mesma classe de tensão. Observando-se a Tabela 2.9 verifica-se que os índices apresentam valores usuais desde

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA

o caso 59. Os índices só voltam a apresentar valores deteriorados nos casos 65 e 66 que já correspondem à condições extremas em toda extensão da área Rio e Espírito Santo.

2.5 Conclusões

Este capítulo apresentou uma ferramenta computacional abrangente para a avaliação do carregamento da rede de transmissão adequada para estudos operacionais incluindo a operação em tempo real.

Fluxos de potência ativa e reativa transmitidos de geradores para cargas são avaliados. Os dois índices propostos S_m e β têm significado físico e matemático. Indicam a margem em MVA para a máxima transmissão e a região de operação na curva V x S. O tamanho da margem é corretamente interpretado. Não há problemas de escala isto é, a importância relativa entre as barras é bem estabelecida.

Os índices são calculados para todas as barras, incluindo as barras com geradores e compensadores. Embora muitos índices populares ignoram estas barras, os resultados apresentados mostraram que as relações Q-V devem ser avaliadas em barras PV mesmo naquelas com reservas de potência reativa. Elas têm importância fundamental no carregamento da rede e no colapso de tensão.

A localização de áreas da rede muito carregadas é imediata por que a análise é nodal. O efeito de ações de reforço é facilmente avaliado isto é, é direta a comparação do carregamento da rede com dois pontos de operação distintos.

A adequação e a aplicabilidade dos índices propostos são aferidas pelos resultados numéricos apresentados. Os valores da margem de potência são consistentes para qualquer ponto de operação estando este na região normal ou na região anormal de operação.

O esforço computacional da análise é pequeno o suficiente para aplicações na operação em tempo real, incluindo análise de contingências.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925026/CA