

4 Análise da Estimativa da Máxima Injeção S_m e da Margem M

O presente capítulo tem como objetivo analisar os índices de avaliação das condições de segurança de tensão, S_m que é uma estimativa da máxima potência que poderia ser injetada na barra em análise e a margem de potência M , distância entre o que está sendo injetado e a estimativa da máxima injeção.

4.1 Interpretação do Determinante da Matriz $[D']$

A ferramenta analítica, descrita em detalhes nos Capítulos 2 e 3, permite avaliar de forma abrangente e significativa as condições do sistema, indicando a região de operação na curva $V \times P, Q$ e a distância ao máximo carregamento. Os índices S_m , β e M foram definidos a partir do determinante da matriz $[D']$. Na Figura 4.1 é mostrado o fundamento básico: $\det[D'] > 0$ caracteriza a parte superior da curva $V \times P, Q$ e $\det[D'] < 0$ caracteriza a parte inferior da mesma curva, enquanto $\det[D'] = 0$ caracteriza a fronteira entre essas duas regiões, isto é, o máximo carregamento de potência.

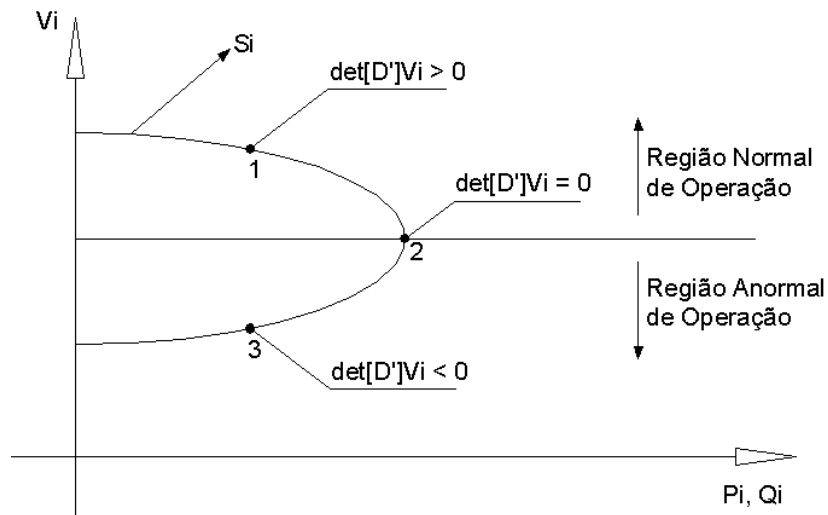


Figura 4.1 – Sinal do $\det[D']$ na curva $V \times P, Q$

Em barras de carga, por exemplo, para um valor negativo do determinante $[D']$, um aumento de carga nesta barra ($+\Delta P_D, +\Delta Q_D$) terá como resultado um aumento na tensão da barra ($+\Delta V$), ao contrário do esperado.

Em barras de geração de potência reativa, mas sem potência ativa gerada ($P_G=0$), por exemplo barras com compensadores, o valor negativo do determinante da matriz $[D']$ indica problemas quanto à relação $\Delta Q_G / \Delta V$, ou seja, um acréscimo na geração de potência reativa causa um decréscimo no módulo da tensão.

As equações (2.78) a (2.81), repetidas aqui por comodidade, serão estudadas com mais detalhes.

$$\det[D'] * V_i = S_{io}^2 - S_i^2 - S_{is}^2 \quad (4.1)$$

$$S_{is}^2 = -V_i \{ [xb_4 - yb_3] + [b_1u - b_2z] + [b_1b_4 - b_2b_3] \} \quad (4.2)$$

$$S_{is}^2 = (\det[D] - \det[D']) * V_i \quad (4.3)$$

$$S_m^2 = S_{io}^2 - S_{is}^2 \quad (4.4)$$

A entidade S_{is}^2 foi definida como a potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i . Essa entidade possui valores negativos quando o $\det[D] < \det[D']$. Este fato gerou dificuldades no entendimento da teoria, pois muitos entendiam a entidade como um escalar ao quadrado, que não pode adquirir valores negativos. A fim de eliminar esta dificuldade pode-se redefinir o nome da entidade S_{is}^2 para $\Delta \det * V_i$. Dessa forma as equações (4.1) a (4.4) ficam:

$$\det[D'] * V_i = S_{io}^2 - S_i^2 - \Delta \det * V_i \quad (4.5)$$

$$\Delta \det * V_i = -V_i \{ [xb_4 - yb_3] + [b_1u - b_2z] + [b_1b_4 - b_2b_3] \} \quad (4.6)$$

$$\Delta \det * V_i = (\det[D] - \det[D']) * V_i \quad (4.7)$$

$$S_m^2 = S_{i0}^2 - \Delta \det^* V_i \quad (4.8)$$

O mesmo problema encontra-se no índice S_m^2 que foi definido em (4.8) como a máxima potência aparente que poderia ser injetada na barra i , S_{i0}^2 , menos a grandeza $\Delta \det^* V_i$ associada à potência injetada no restante do sistema e que limita a injeção de potência na barra i . Esse índice S_m^2 possui valores negativos quando o $S_{i0}^2 < \Delta \det^* V_i$, criando dificuldades no entendimento da teoria de margem de potência. Esse assunto é explorado nas seções seguintes.

4.2 Interpretação dos Índices S_m e M

4.2.1 Análise da Curva $V \times P, Q$ para um Sistema Duas Barras

Utilizando-se as equações de fluxo de potência para um sistema de duas barras, obtém-se a Figura 4.2. É importante lembrar que para um sistema de duas barras $\Delta \det^* V_i = 0$ por que $\det[D'] = \det[D]$, e deste modo $S_m = S_{i0}$.

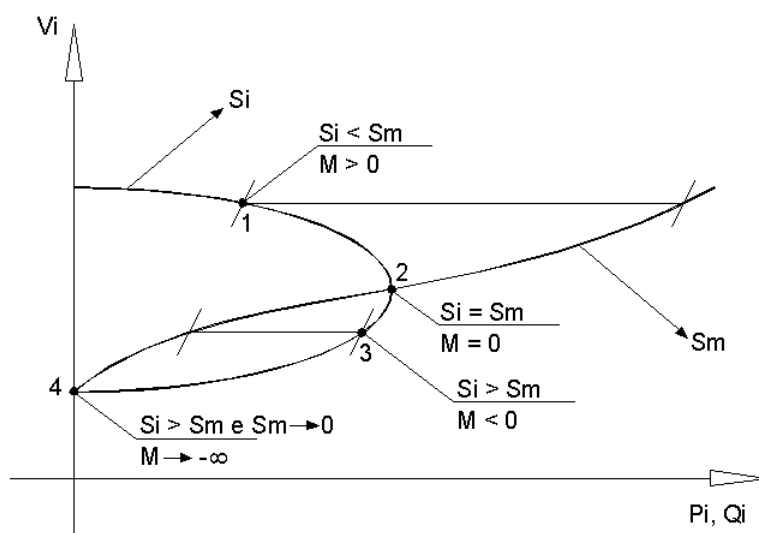


Figura 4.2 – Sinal da Margem na Curva $V \times P, Q$ para um Sistema de Duas Barras

Na Figura 4.2, o primeiro ponto de operação (Ponto 1) está na região normal de operação. A potência injetada na barra é menor que a máxima potência que poderia ser injetada na barra para aquele ponto de operação ($S_i < S_m$). Logo, a margem de potência é maior do que zero, informando que o sistema opera a uma determinada distância do máximo carregamento.

No Ponto 2, ponto de máximo carregamento, a potência injetada na barra é igual a máxima potência ($S_i = S_m$). Logo, a margem de potência é igual a zero.

No Ponto 3 da Figura 4.2, a máxima potência que poderia ser injetada na barra é menor que a própria potência injetada ($S_m < S_i$). Esse fato precisa de interpretação, que é oferecida na Seção 4.4. De qualquer forma, a margem de potência torna-se negativa, indicando que a barra está operando na região inferior da curva $V \times P, Q$.

No Ponto 4, a máxima potência tende a zero ($S_m \rightarrow 0$) mais rapidamente do que a potência injetada, o que faz com que a margem de potência tenda a um número infinitamente negativo ($M \rightarrow -\infty$).

4.2.2 Análise da Curva $V \times P, Q$ para um Sistema Multi-nó

Serão analisados, com o devido cuidado, quatro pontos de operação na curva $V \times P, Q$, que podem ser visualizados na Figura 4.3.

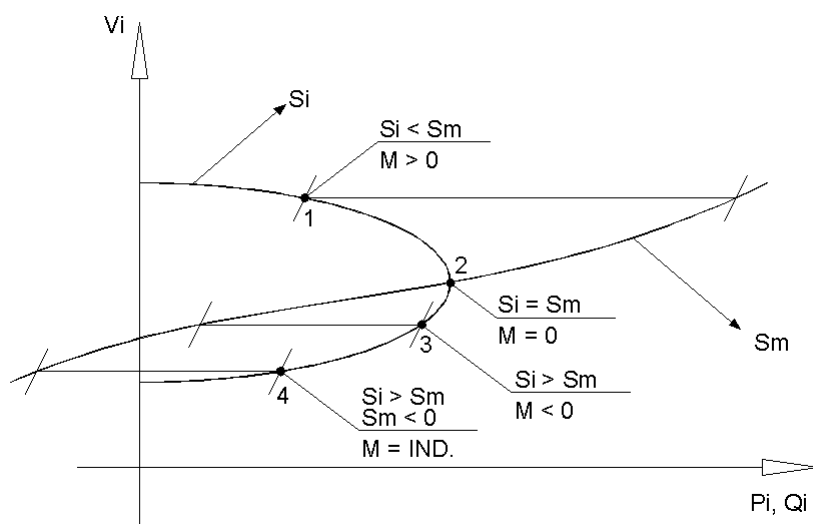


Figura 4.3 – Sinal da Margem para na Curva $V \times P, Q$ para um Sistema Multi-Nó

É importante enfatizar que essa figura tem efeito apenas ilustrativo do comportamento dos índices, pois todos os valores calculados têm validade instantânea porque são calculados com base em um único ponto de operação. Na verdade, deveriam ser plotadas várias curvas $V \times P, Q$, uma para cada ponto de operação.

4.2.2.1 Operação na Região Normal de Operação

O Ponto de Operação 1 tem $S_m > S_i$ e $\det[D'] > 0$. Este ponto encontra-se na região normal de operação, e nesta região, os índices S_m e M não possuem problemas, no que se refere à interpretação física e/ou matemática.

4.2.2.2 Operação no Ponto de Máximo Carregamento

O Ponto de Operação 2 tem $S_m = S_i$ e $\det[D'] = 0$. Neste ponto de operação, a margem de potência é nula, indicando que a barra em análise está sob o máximo carregamento.

4.2.2.3 Operação na Região Anormal de Operação

Na região anormal de operação, onde $S_m < S_i$, existem três casos que devem ser considerados:

- ✓ $S_i > S_m$ sendo $S_m > 0$;
- ✓ $S_i > S_m$ sendo $S_m = 0$;
- ✓ $S_i > S_m$ sendo $S_m < 0$;

Nos três casos, o controle automático de tensão pode ter efeito oposto ao esperado, além de haver perigo de um desencadeamento de problemas relacionados à queda de tensão e possivelmente um colapso de tensão.

No Caso 1, $S_i > S_m$ sendo $S_m > 0$, Ponto de Operação 3 na Figura 4.3, o problema é $S_i > S_m$ já mencionado na seção anterior, para o sistema de duas barras, e sua solução será apresentada na Seção 4.4.

No Caso 2, $S_i > S_m$ sendo $S_m = 0$, fazendo-se a conta vê-se que a margem de potência é infinitamente negativa, o que não é desejável.

No Caso 3, $S_i > S_m$ sendo $S_m < 0$, Ponto de Operação 4 na Figura 4.3, a margem é indefinida já que $S_m^2 < 0$. Isso também é indesejável por que faz com que se perca o sentido da estimativa da distância entre S_i e S_m na base S_m .

Resumindo, tem-se três problemas a serem resolvidos para um sistema multi-nó:

- i) $S_i > S_m$;
- ii) $S_m^2 < 0$ (ou $S_m < 0$);
- iii) $S_m = 0$.

4.3 Estudo de Casos Utilizando o Programa Computacional EstabTen

O objetivo desta seção é mostrar a evolução desses índices durante um horizonte de tempo correspondente a uma rampa de carregamento do sistema. A área Rio do sistema brasileiro 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 desses 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. 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 [Ferreira, 2003]. Verifica-se a ocorrência de situações extremas que levariam o sistema ao colapso de tensão.

A seguir são descritas as colunas mais importantes dos relatórios gerados pelo programa computacional EstabTen, versão "estudo", uma linha de impressão para cada barra.

1ª coluna: Número do caso

2ª coluna: Tensão (módulo da tensão na barra)

3ª coluna: Potência injetada na barra S_i .

4ª coluna: Quadrado da máxima potência aparente que poderia ser injetada na barra i , estimada no ponto de operação em análise:

$$S_m^2 = S_{io}^2 - \Delta \det^* V_i \quad (4.9)$$

5ª coluna: Quadrado da máxima maximorum potência aparente que poderia ser injetada para a barra i , estimada no ponto de operação em análise:

$$S_{io}^2 = V_i^4 \cdot Y_{ii}^2 \quad (4.10)$$

6ª coluna: Termo associado ao quadrado da potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i :

$$\Delta \det^* V_i = (\det[D] - \det[D'])^* V_i \quad (4.11)$$

7ª coluna: Ângulo β indicando a região de operação e a distância angular até o máximo carregamento:

$$\beta = \arcsin \left(\frac{\det[D']}{|\nabla P_i| \cdot |\nabla Q_i|} \right) \quad (4.12)$$

8ª coluna: Índice $\det[D']^* V_i$ cujo módulo é a distância de S_i^2 a S_m^2 e o sinal indica a região de operação na curva $V \times P, Q$:

$$\det[D']^* V_i = S_{io}^2 - S_i^2 - \Delta \det^* V_i \quad (4.13)$$

$$\det[D']^* V_i = S_m^2 - S_i^2 \quad (4.14)$$

9ª coluna: Margem M em % cujo módulo é a distância de S_i a S_m e o sinal indica a região de operação na curva V x P,Q:

$$M = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) 100\% \quad (4.15)$$

Para uma primeira análise, foram escolhidas duas barras de carga: 1718 – MAGE69 e 1754 – TERESÓPOL138. Nas Tabelas 4.1 e 4.2 estão mostrados os resultados da análise.

Tabela 4.1– Índices para a Barra de Carga 1718 – MAGE69

Barra 1718 - MAGE69								
Casos	V_i	S_i	S_m^2	S_{io}^2	$\Delta \det * V_i$	β	$\det[D'] * V_i$	M(%)
59	1,021	0,413	72,780	2216,876	2144,096	138,638	72,609	95,159
60	1,021	0,415	68,708	2214,328	2145,620	140,483	68,536	94,993
61	1,021	0,416	65,156	2211,806	2146,650	142,161	64,982	94,846
62	1,020	0,417	33,504	2209,236	2175,731	160,426	33,330	92,796
63	1,020	0,419	27,969	2206,707	2178,737	163,567	27,794	92,077
64	1,020	0,420	25,271	2204,093	2178,822	165,171	25,095	91,645
65	1,019	0,422	18,564	2201,479	2182,914	169,073	18,387	90,206
66	1,019	0,423	12,373	2198,840	2186,467	172,732	12,194	87,975
67	1,019	0,424	-8,024	2196,109	2204,133	-175,208	-8,204	85,032
68	1,018	0,426	-14,547	2193,390	2207,937	-171,258	-14,728	88,831

Tabela 4.2 – Índices para a Barra de Carga 1754 – TERESOPOL138

Barra 1754 - TERESOPOL138								
Casos	V_i	S_i	S_m^2	S_{io}^2	$\Delta \det * V_i$	β	$\det[D'] * V_i$	M(%)
59	0,937	0,708	38,820	485,783	446,963	125,159	38,319	88,637
60	0,936	0,712	37,058	483,059	446,001	127,031	36,552	88,304
61	0,935	0,716	35,372	480,670	445,298	128,914	34,860	87,961
62	0,933	0,719	20,160	478,155	457,995	151,038	19,642	83,987
63	0,932	0,723	17,122	475,738	458,616	155,546	16,599	82,527
64	0,931	0,727	15,530	473,440	457,910	158,004	15,001	81,552
65	0,930	0,731	11,715	471,014	459,299	163,760	11,180	78,643
66	0,929	0,735	8,065	468,585	460,520	169,233	7,525	74,119
67	0,927	0,739	-4,832	466,029	470,861	-172,980	-5,379	66,381
68	0,926	0,743	-9,294	463,501	472,795	-167,549	-9,846	75,628

Pode-se observar que a potência injetada nas barras 1718 e 1754 aumenta gradativamente, enquanto S_m diminui. Isto pode ser explicado por (2.70), (4.7) e (4.8) aqui repetidas por comodidade:

$$\det[D] * V_i = S_{io}^2 - S_i^2 \quad (4.16)$$

$$\Delta \det * V_i = (\det[D] - \det[D']) * V_i \quad (4.17)$$

$$S_m^2 = S_{io}^2 - \Delta \det * V_i \quad (4.18)$$

Logo, pode-se escrever:

$$S_m^2 = S_{io}^2 - (\det[D] - \det[D']) * V_i \quad (4.19)$$

$$S_m^2 = S_{io}^2 - (S_{io}^2 - S_i^2 - \det[D'] * V_i) \quad (4.20)$$

$$S_m^2 = S_i^2 + \det[D'] * V_i \quad (4.21)$$

Pela equação (4.21) e pelas Tabelas 4.1 e 4.2 pode-se observar que o comportamento da máxima potência S_m que poderia ser injetada na barra é similar ao comportamento do $\det[D'] * V_i$ desde que a potência injetada varie com pequenos incrementos.

Para uma segunda análise foram escolhidas duas barras de geração, 1107 – ITAIPU60-8MQ e 2696 – ROSAL--2MQ, e os resultados são mostrados nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 – Índices para a Barra de Geração 1107– ITAIPU60-8MQ

Barra 1107– ITAIPU60-8MQ								
Casos	V_i	S_i	S_m^2	S_{io}^2	$\Delta \det * V_i$	β	$\det[D'] * V_i$	M(%)
59	1,028	35,194	1367,071	158231,038	156863,967	8,744	128,485	4,814
60	1,028	35,209	1327,667	158425,280	157097,613	6,249	87,997	3,371
61	1,029	35,231	1287,274	158697,910	157410,636	3,406	46,023	1,805
62	1,029	35,261	307,274	159041,973	158734,699	-50,853	-936,044	-101,155
63	1,030	35,294	-90,242	159407,980	159498,222	-53,309	-1335,866	-271,532
64	1,030	35,298	-369,690	159460,441	159830,131	-51,868	-1615,648	-83,582
65	1,031	35,342	-1475,423	159921,464	161396,887	-41,441	-2724,463	7,990
66	1,031	35,379	-4091,957	160294,741	164386,698	-23,423	-5343,608	44,693

O comportamento de S_m continua próximo ao comportamento de $\det[D'] * V_i$. Entre os Casos 61 e 62 na Tabela 4.3, $\det[D'] * V_i$ e M passam por zero, indicando que a barra passou a operar na parte inferior da curva $V \times P, Q$, como esperado. Como antecipado teoricamente na Seção 4.2, Ponto 4 da Figura 4.3, nos Casos 63 a 66 S_m^2 adquire valores negativos.

Entre os Casos 64 e 65 na Tabela 4.3, pode-se observar que M passa novamente por zero. Este ponto pode ser visualizado pela Figura 4.4, e corresponde ao Ponto 2 de operação. Esta anomalia ocorreu por que o programa computacional EstabTen calculou o índice S_m por (4.22),

$$S_m = \sqrt{|S_{io}^2 - \Delta \det^* V_i|} \quad (4.22)$$

Aconteceu então que $S_i = S_m$ e, portanto, $M = 0$. Na Figura 4.4 pode-se observar claramente que este ponto não corresponde ao ponto de máximo carregamento.

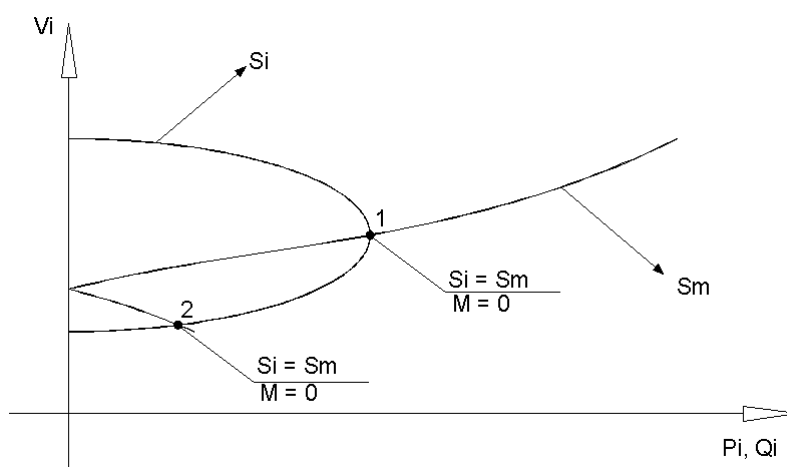


Figura 4.4 – Comportamento do Índice S_m

Conclui-se que o índice S_m^2 possui realmente valores negativos para barras de carga, geração e qualquer outro tipo de barra quando o sistema trabalha com condições extremas de carregamento, como poderá ser observado novamente mais adiante em exemplos como os relatados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Índices para a Barra de Geração 2696 – ROSAL----2MQ

Barra – 2696 ROSAL----2MQ								
Casos	V_i	S_i	S_m^2	S_{io}^2	$\Delta \det^* V_i$	β	$\det[D']^* V_i$	$M(\%)$
59	1,000	0,555	0,425	16,000	15,575	32,212	0,118	14,867
60	1,000	0,555	0,421	16,000	15,579	32,865	0,114	14,463
61	1,000	0,555	0,417	16,000	15,583	33,569	0,109	14,054
62	1,000	0,555	0,371	16,000	15,629	42,243	0,063	8,882
63	1,000	0,555	0,353	16,000	15,647	46,752	0,044	6,587
64	1,000	0,555	0,337	16,000	15,663	49,828	0,028	4,396
65	1,000	0,556	0,300	16,000	15,700	-111,980	-0,009	-1,511
66	1,000	0,556	0,246	16,000	15,754	-92,182	-0,063	-12,100
67	1,000	0,556	-1,588	16,000	17,588	-3,607	-1,897	55,879

O mesmo problema ocorre para a barra de geração 2696 – ROSAL----2MQ. Entre os Casos 66 e 67 verifica-se que S_m se torna igual a S_i num ponto de operação diferente de um ponto de máximo.

Nos resultados da Tabela 4.4, pode-se ainda observar que nos Casos 65 e 66 $\det[D'] * V_i < 0$, $S_m > 0$, e $M < 0$. Este resultado indica que a situação $S_m < S_i$, antecipada tanto para o sistema de duas barras como para o multi-nó, de fato ocorre.

Os números apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 também servem para comparar geradores de grande e pequeno porte.

Para uma terceira análise, foi escolhida uma barra de passagem 149 – VITORIA—345 com controle de tensão por LTC, e os resultados são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Índices para a Barra de Passagem 149 – VITORIA—345

Barra 149 – VITORIA—345								
Casos	V_i	S_i	S_m^2	S_{io}^2	$\Delta \det * V_i$	β	$\det[D'] * V_i$	M(%)
59	0,992	0,000	40,771	13040,220	12999,448	152,020	40,771	100
60	0,989	0,000	37,878	12891,349	12853,470	153,159	37,878	100
61	0,986	0,000	35,052	12730,782	12695,730	154,469	35,052	100
62	0,983	0,000	18,681	12574,619	12555,937	164,550	18,681	100
63	0,980	0,000	15,222	12412,952	12397,730	166,922	15,222	100
64	0,976	0,000	13,207	12217,912	12204,705	168,459	13,207	100
65	0,973	0,000	9,437	12054,132	12044,695	171,383	9,437	100
66	0,969	0,000	6,068	11882,329	11876,261	174,232	6,068	100
67	0,966	0,000	-4,045	11707,968	11712,013	-175,702	-4,045	100
68	0,960	0,000	-6,907	11446,585	11453,492	-172,136	-6,907	100

Como $S_i = 0$, a margem é sempre 100%. No entanto, observa-se que entre os Casos 67 e 68, há uma informação incorreta, pois estando na região anormal de operação, a margem de potência deveria ser negativa.

Pode-se concluir que em casos com sistemas reais podem ocorrer as seguintes situações indesejáveis:

- i) $S_m < S_i$;
- ii) $S_m^2 < 0$;

- iii) a indicação de um falso ponto de máximo carregamento na região anormal de operação,
- iv) a indicação de uma margem positiva ao invés de negativa em barras de passagem.

4.4 Proposição para Solução dos Problemas dos Índice S_m e M

Na Seção 2.2.3 definiu-se uma margem ou distância do ponto de operação em análise ao máximo carregamento como $(S_m - S_i)$ em MVA como usual. Por convenção, escolheu-se a base S_m para calcular a margem em p.u. A Figura 4.5 mostra a variação dessa margem versus a variação do carregamento, representado pelo ângulo da tensão na barra de carga, incluindo os três principais pontos de operação para um sistema de duas barras: quando $M = 1$ implica em $S_i = 0$ (região normal de operação), quando $M = 0$ implica $S_i = S_m$ (máximo carregamento) e quando $M = -\infty$ implica em $S_m \rightarrow 0$ (região anormal de operação).

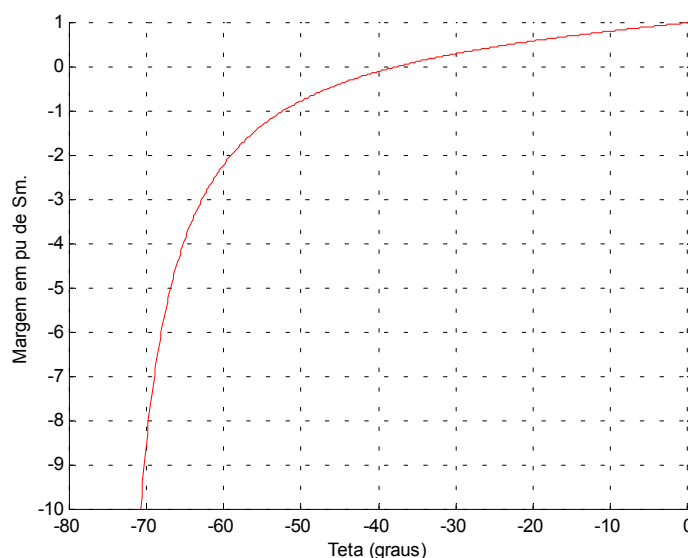


Figura 4.5 - Margem na Base de Potência S_m para um Sistema de Duas Barras

Observa-se a perda de linearidade de M na região anormal de operação quando submetida à base S_m . Alternativamente, pode-se definir a margem em p.u. na base S_i , e a variação desta com o carregamento é mostrada na Figura 4.6.

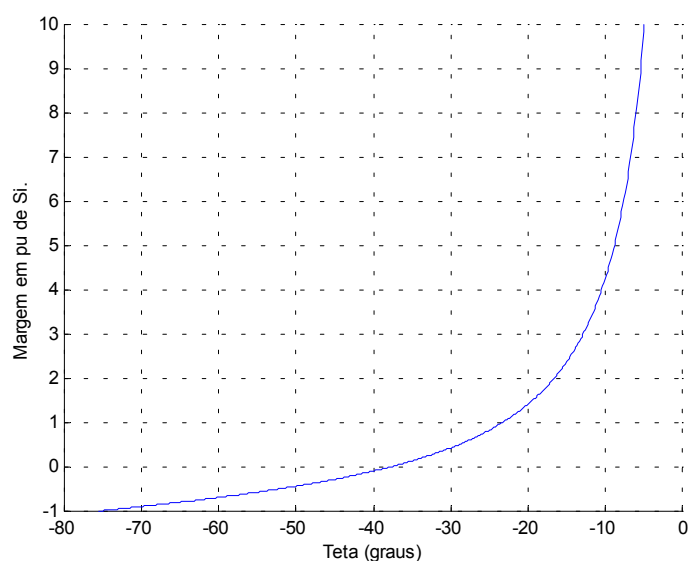


Figura 4.6 - Margem na Base de Potência S_i para um Sistema de Duas Barras

Agora, a perda de linearidade é na região normal de operação, como mostra a Figura 4.6. Os três pontos de operação significativos são mostrados na figura quando $M = +\infty$ para $S_i = 0$ (região normal de operação), quando $M=0$ para $S_i = S_m$ (máximo carregamento) e quando $M = -1$ para $S_m = 0$ (região anormal de operação).

A idéia é então linearizar a margem de potência utilizando-se a base S_m na região normal de operação e utilizando-se a base S_i na região anormal de operação, e a variação desta com o carregamento é mostrada na Figura 4.7.

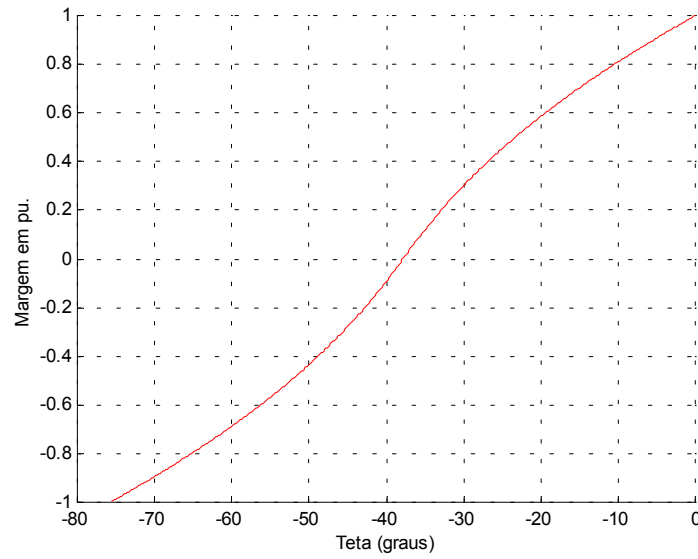


Figura 4.7 - Margem para um Sistema de Duas Barras

4.4.1 Proposta de Definição e Interpretação da Margem

Na região normal de operação, a margem de potência ($S_m - S_i$), um valor positivo, deve ser lida como a quantidade em MVA que poderia ser "adicionada" a S_i para atingir a estimativa do máximo S_m (de uma outra curva $V \times P, Q$).

Na região anormal de operação, a margem de potência ($S_m - S_i$), um valor negativo, deve ser lida como a quantidade em MVA que deveria ser "retirada" de S_i para atingir a estimativa do máximo S_m (de uma outra curva $V \times P, Q$).

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 .

Defini-se uma margem em p.u. ou em percentual como:

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) \text{ em p.u. de } S_m, \quad \text{ou} \quad (4.23)$$

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_m} \right) = \left(1 - \frac{S_i}{S_m} \right) \times 100\% \quad \text{em percentual de } S_m \quad (4.24)$$

válidas quando o ponto de operação estiver na região normal de operação; e

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right) \text{ em p.u. de } S_i, \text{ ou} \quad (4.25)$$

$$M = \left(\frac{S_m - S_i}{S_i} \right) = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1 \right) \times 100\% \text{ em percentual de } S_i \quad (4.26)$$

válidas quando o ponto de operação estiver na região anormal de operação.

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 duas 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 de 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 $S_m > S_i$.

A Figura 4.8 ilustra que a margem é positiva na região normal de operação, nula no ponto de máximo carregamento e negativa para região anormal de operação.

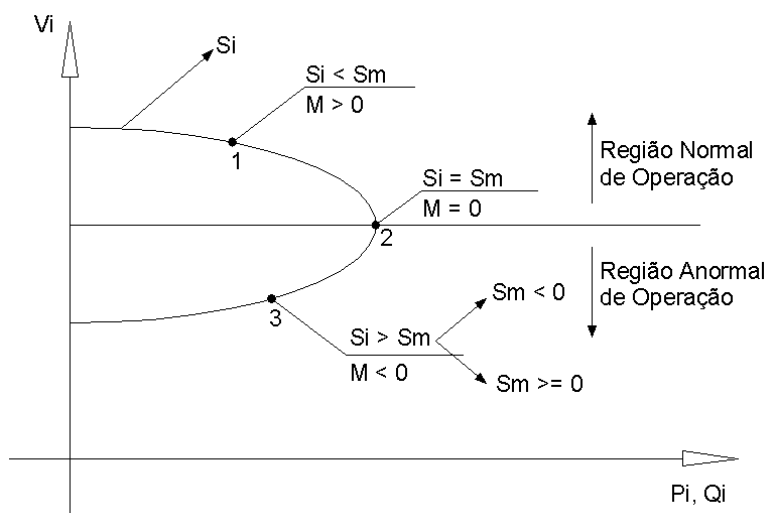


Figura 4.8 - Sinal da Margem na Curva V x P,Q

4.5 Sugestão para Imprimir os Resultados do Programa EstabTen

Os resultados apresentados anteriormente na Seção 4.3 serão apresentados nesta seção de acordo com a sugestão de impressão aqui proposta e de acordo com a teoria apresentada na Seção 4.4.

A seguir são descritas as colunas conforme o relatório agora gerado pelo programa computacional EstabTen, uma linha de impressão para cada barra:

1ª coluna: Número do caso

2ª coluna: V_i (módulo da tensão na barra),

3ª coluna: S_i (potência injetada na barrai),

4ª coluna: S_m (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), calculada por:

$$S_m = \text{sinal}(S_{i0}^2 - \Delta \det^* V_i) \sqrt{|S_{i0}^2 - \Delta \det^* V_i|} \quad (4.27)$$

5ª coluna: β (ângulo entre os gradientes ∇P e ∇Q , indica a região de operação e a distância angular até o máximo carregamento), calculado por:

$$\beta = \arcsen\left(\frac{\det[D']}{|\nabla P| * |\nabla Q|}\right) \quad (4.28)$$

6ª coluna: M (margem de potência, é a quantidade que deve ser adicionada a S_i , em percentual de S_m , ou retirada de S_i , em percentual de S_i , para se chegar ao máximo carregamento, respectivamente se o ponto de operação pertence à parte superior ou inferior da curva V x P,Q, estimada no ponto de operação em análise; o sinal indica a região de operação), calculada por:

$$M = \left(1 - \frac{S_i}{S_m}\right) \times 100 \text{ percentual de } S_m, \text{ para } S_i < S_m \quad (4.29)$$

$$M = \left(\frac{S_m}{S_i} - 1\right) \times 100 \text{ percentual de } S_i, \text{ para } S_i > S_m \quad (4.30)$$

Para uma primeira análise, foram escolhidas as mesmas duas barras de carga: 1718 – MAGE69 e 1754 – TERESÓPOL138, cujos resultados prévios foram mostrados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Pode-se observar nas Tabelas 4.6 e 4.7 que a potência injetada nas barras 1718 e 1754 aumenta gradativamente, enquanto S_m diminui.

Os Casos 67 e 68 apresentam margem de potência negativa, indicando a região anormal de operação, e abaixo de -100%, informando a ocorrência de situação de extremo carregamento. Uma situação crítica desse porte é acompanhada por várias outras barras adjacentes e uma diminuição da carga (ou geração) em algumas destas barras levariam todas elas a operarem uma situação mais favorável, com $S_m > 0$ e, na melhor das hipóteses, com $S_m > S_i$.

Tabela 4.6 – Índices para a Barra de Carga 1718 – MAGE69

Barra 1718 – MAGE69					
Casos	V_i	S_i	S_m	β	M(%)
59	1,021	0,413	8,531	138,638	95,159
60	1,021	0,415	8,289	140,483	94,993
61	1,021	0,416	8,072	142,161	94,846
62	1,020	0,417	5,788	160,426	92,796
63	1,020	0,419	5,289	163,567	92,077
64	1,020	0,420	5,027	165,171	91,645
65	1,019	0,422	4,309	169,073	90,206
66	1,019	0,423	3,518	172,732	87,975
67	1,019	0,424	-2,833	-175,208	-768,082
68	1,018	0,426	-3,814	-171,258	-995,318

Tabela 4.7 – Índices para a Barra de Carga 1754 – TERESOPOL138

Barra 1754 – TERESOPOL138					
Casos	V_i	S_i	S_m	β	M(%)
59	0,937	0,708	6,231	125,159	88,637
60	0,936	0,712	6,088	127,031	88,304
61	0,935	0,716	5,947	128,914	87,961
62	0,933	0,719	4,490	151,038	83,987
63	0,932	0,723	4,138	155,546	82,527
64	0,931	0,727	3,941	158,004	81,552
65	0,930	0,731	3,423	163,760	78,643
66	0,929	0,735	2,840	169,233	74,119
67	0,927	0,739	-2,198	-172,980	-397,453
68	0,926	0,743	-3,049	-167,549	-510,310

Para uma segunda análise, foram escolhidas as mesmas duas barras de geração, 1107 – ITAIPU60-8MQ e 2696 – ROSAL--2MQ, cujos resultados prévios foram mostrados nas Tabelas 4.3 e 4.4. Entre os Casos 64 e 65 nestas tabelas, observou-se que M passou por zero duas vezes, uma delas correspondendo a um falso ponto de máximo carregamento. Os resultados, na forma proposta neste capítulo, são mostrados nas Tabelas 4.8 e 4.9. Verifica-se que o problema mencionado não mais ocorre.

Observando-se na Tabela 4.8 o comportamento da margem de potência e comparando-se os índices S_i e S_m em todos os casos, percebe-se que a margem de potência 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 4.8 a margem de potência é de aproximadamente -50%. Comparando-se os índices S_i e S_m , pode-se observar que o índice S_m é aproximadamente a metade de S_i , o que indica a correta informação da margem de potência. Portanto, a margem de potência determina exatamente a região de operação e estima um percentual da distância ao máximo carregamento de uma curva $V \times P, Q$ para um dado ponto de operação, estando este ponto na região normal ou anormal de operação.

No Caso 65, mostrado na Tabela 4.9, pode-se observar que M é aproximadamente nulo, indicando que o ponto de operação da barra em análise é aproximadamente o ponto de máximo carregamento da curva $V \times P, Q$. Observa-se que neste ponto de operação, de máximo carregamento, a margem de potência informa exatamente o esperado, e à medida que os pontos de operação evoluem para os Casos 66 e 67, a margem tem valores cada vez mais negativos.

Tabela 4.8 – Índices para a Barra de Geração 1107 ITAIPU60-8MQ

Barra 1107 – ITAIPU60-8MQ					
Casos	V_i	S_i	S_m	β	$M(\%)$
59	1,028	35,194	36,974	8,744	4,814
60	1,028	35,209	36,437	6,249	3,371
61	1,029	35,231	35,879	3,406	1,805
62	1,029	35,261	17,529	-50,853	-50,287
63	1,030	35,294	-9,500	-53,309	-126,916
64	1,030	35,298	-19,227	-51,868	-154,471
65	1,031	35,342	-38,411	-41,441	-208,684
66	1,031	35,379	-63,968	-23,423	-280,809

Tabela 4.9 – Índices para a Barra de Geração 2696 – ROSAL----2MQ

Barra 2696 – ROSAL----2MQ					
Casos	V_i	S_i	S_m	β	$M(\%)$
59	1,000	0,555	0,652	32,212	14,867
60	1,000	0,555	0,649	32,865	14,463
61	1,000	0,555	0,646	33,569	14,054
62	1,000	0,555	0,609	42,243	8,882
63	1,000	0,555	0,594	46,752	6,587
64	1,000	0,555	0,581	49,828	4,396
65	1,000	0,556	0,548	-111,980	-1,489
66	1,000	0,556	0,496	-92,182	-10,794
67	1,000	0,556	-1,260	-3,607	-326,647

Para uma terceira análise, foi escolhida a mesma barra de passagem 149 – VITORIA—345 com controle de tensão por LTC, cujos resultados prévios foram mostrados na Tabela 4.5. Observou-se que entre os Casos 67 e 68, havia uma informação incorreta, pois estando na região anormal de operação, a margem de potência deveria ser negativa.

Os resultados, na forma proposta neste capítulo, são mostrados na Tabela 4.10. O problema mencionado não ocorre mais, e como β também indica a região de operação, não é necessário imprimir a margem de potência para as barras de passagem, pois como a potência injetada é sempre nula, a margem é sempre $\pm 100\%$.

Tabela 4.10 – Índices para a Barra de Passagem 149 – VITORIA---345

Barra 149 – VITORIA---345				
Casos	V_i	S_i	S_m	β
59	0,992	0,000	6,385	152,020
60	0,989	0,000	6,155	153,159
61	0,986	0,000	5,920	154,469
62	0,983	0,000	4,322	164,550
63	0,980	0,000	3,902	166,922
64	0,976	0,000	3,634	168,459
65	0,973	0,000	3,072	171,383
66	0,969	0,000	2,463	174,232
67	0,966	0,000	-2,011	-175,702
68	0,960	0,000	-2,628	-172,136

Na Tabela 4.11, para a barra de geração 10 ANGRA-1--1MQ, são mostrados os valores dos índices, onde se pode observar que a variação de S_i é mínima. Conclui-se que a degradação do sistema, observada através dos outros índices, não tem a participação direta desta barra e, então, é devida às outras barras ao redor. De fato, foi mencionado que 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.

Tabela 4.11 – Índices para a Barra de Geração 10 – ANGRA-1--1MQ

Barra 10 – ANGRA-1--1MQ					
Casos	V_i	S_i	S_m	β	M(%)
59	1,038	6,535	17,700	132,000	63,079
60	1,038	6,517	17,000	135,600	61,665
61	1,044	6,702	16,700	139,000	59,868
62	1,042	6,699	15,800	143,600	57,601
63	1,040	6,699	14,800	148,600	54,736
64	1,041	6,699	14,300	151,100	53,154
65	1,038	6,699	12,900	157,800	48,070
66	1,036	6,699	11,300	164,500	40,717
67	1,030	6,699	-3,600	-169,300	-153,739
68	1,029	6,699	-7,500	-161,200	-211,957

É o mesmo caso mostrado na Tabela 4.12, cujos os índices são 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 na área 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 4.12 – Índices para a Barra de Geração 253 – FONTES---3MQ

Barra 253 – FONTES---3MQ					
Casos	V_i	S_i	S_m	β	M(%)
59	1,000	1,458	7,500	84,600	80,560
60	1,000	1,458	7,400	85,100	80,297
61	1,000	1,459	7,300	85,700	80,014
62	1,000	1,460	6,300	97,900	76,825
63	1,000	1,461	6,000	102,100	75,650
64	1,000	1,462	5,800	104,600	74,793
65	1,000	1,463	5,300	113,600	72,396
66	1,000	1,464	4,500	127,500	67,467
67	1,000	1,353	-5,100	-131,900	-476,940
68	1,000	1,467	-7,200	-113,900	-590,798

Na Tabela 4.13 são mostrados os valores dos índices obtidos para a barra 44 – GRAJAU-1-1CS que tem a ela conectado um compensador síncrono. Foi a barra da área em estudo que primeiro acusou, já no Caso 65, índices negativos. Uma análise posterior dos componentes dos vetores gradientes, isto é, dos quatro elementos da matriz [D'] revelou que a relação entre a potência reativa gerada e a tensão terminal trocou de sinal e ficou oposta à usual. Nota-se uma variação substancial de S_i ao longo dos casos.

Tabela 4.13 – Índices para a Barra de Tensão Controlada 44 – GRAJAU-1-1CS

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

Na Tabela 4.14 são mostrados os valores dos índices obtidos para as barras 178 – GRAJAU--138, que é a barra que tem a tensão controlada pelo compensador da barra 44 – GRAJAU-1-1CS. Em ambas as barras 44 e 178 S_m vai se reduzindo até passa por zero e o ângulo β aumenta, tendendo a 180° . A margem percentual M diminui. É o comportamento esperado.

Tabela 4.14 – Índices para a Barra de Carga 178 – GRAJAU--138

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

Na Tabela 4.15, para a barra de geração 3977 MERCHANT12MQ, os índices indicam que a barra em análise está trabalhando na parte inferior da curva $V \times P, Q$, na maior parte do tempo. Esse problema, consequentemente, não se deve à rampa de carga

simulada nos testes, já que estava presente desde o Caso-Base. De qualquer forma a evolução desses índices indicam a degradação do sistema.

Tabela 4.15 – Índices para a Barra de Geração 3977 – MERCHANT12MQ

Barra 3977 – MERCHANT12MQ					
Casos	V_i	S_i	S_m	β	M(%)
59	1,056	5,553	-11,800	-79,300	-312,498
60	1,068	5,865	-12,000	-77,400	-304,604
61	1,070	5,933	-12,700	-72,600	-314,057
62	1,076	6,133	-17,200	-47,200	-380,450
63	1,079	6,243	-18,000	-42,900	-388,323
64	1,076	6,142	-18,900	-39,400	-407,717
65	1,079	6,254	-19,900	-35,100	-418,196
66	1,081	6,324	-20,900	-31,300	-430,487
67	1,087	6,575	-23,100	-24,100	-451,331
68	1,090	6,733	-23,800	-20,800	-453,483

Nas Tabelas 4.16 e 4.17 estão mostrados, respectivamente, os índices da barra 106, que dita o perfil de tensão da área Rio, 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 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 4.16 – Índices para a Barra de Passagem 106 – ADRIANO--500

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 4.17 – Índices para a Barra de Passagem 140 – ADRIANO--345

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

Os resultados para a barra 175 CAMPOS—138 estão mostrados na Tabela 4.18. Como é uma barra de carga com tensão controlada remotamente, observa-se que V_i e S_i não variam. Nota-se também que M não informa a degradação do sistema adequadamente. No entanto, o ângulo β informa claramente a degradação da barra devido ao aumento de carga no sistema.

A Figura 4.9 ilustra a passagem do Caso 66 para o 67. Observa-se que, para a mesma tensão e injeção, o ponto de operação passou da parte superior de uma curva $V \times P, Q$ para a parte inferior de uma outra curva.

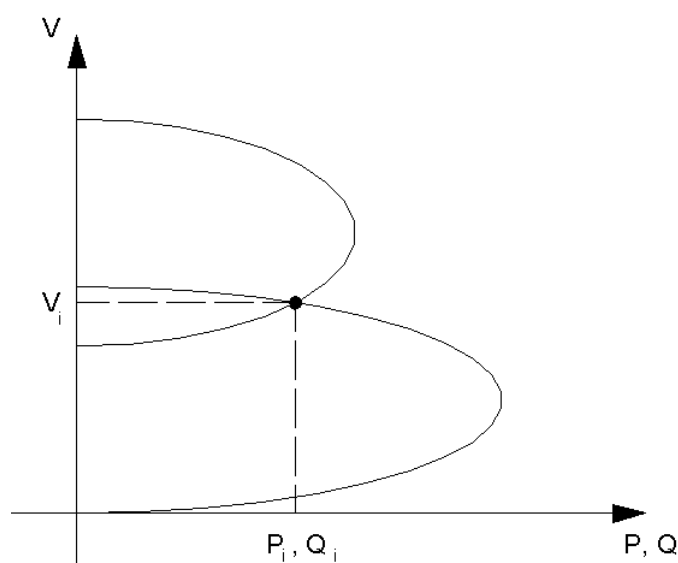


Figura 4.9 – Curvas $V \times P, Q$ para uma Barra de Tensão Controlada / Passagem da Região Normal para a Anormal

Tabela 4.18 – Índices para a Barra de Carga 175 – CAMPOS--138

Barra 175 – CAMPOS---138					
Casos	V_i	S_i	S_m	β	$M(\%)$
59	1,050	0,002	10,200	141,800	99,980
60	1,050	0,002	9,900	143,300	99,980
61	1,050	0,002	9,500	145,000	99,979
62	1,050	0,002	6,900	160,700	99,971
63	1,050	0,002	6,200	163,700	99,968
64	1,050	0,002	5,800	165,500	99,966
65	1,050	0,002	5,000	169,200	99,960
66	1,050	0,002	4,000	172,700	99,950
67	1,050	0,002	-3,200	-175,200	-160100,000
68	1,050	0,002	-4,100	-171,800	-205100,000

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 abaixo de -100% (quando $S_m < 0$ isto implica $M < -100\%$) 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, $S_m > S_i$, como já dito.

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 dos índices são consistentes, numérica e fisicamente, para qualquer ponto de operação, estando este na região normal ou na região anormal de operação.