

5 Casos Especiais

Neste capítulo 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 $V \times P, Q$. 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-se a estrutura física da rede elétrica em questão, mostrada na Figura 5.1, pode-se observar a existência de compensação série e paralela envolvendo as barras mencionadas.

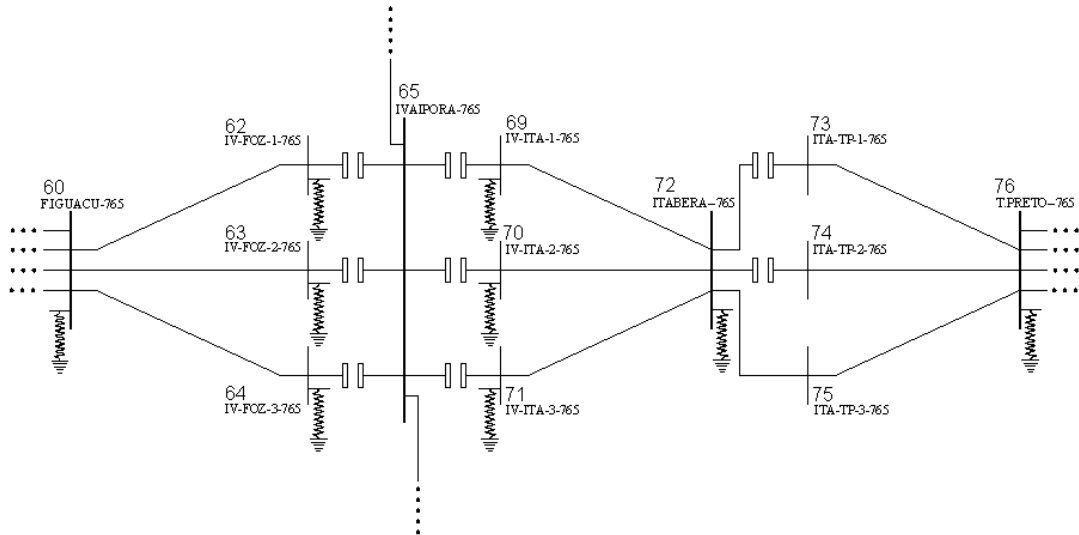


Figura 5.1 – Detalhe da Estrutura Física do Tronco ITAIPU – T. PRETO

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 $\Delta \det * V_i = (\det[D] - \det[D']) * V_i$, esse termo é grande principalmente se $\det[D'] * V_i < 0$. Como o módulo da tensão é o normal, são analisadas as grandezas Y_{ii} e $\det[D'] * V_i$.

5.1 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.

A seguir são descritas as colunas mais importantes dos relatórios gerados pelos programa computacional EstabTen:

1ª coluna: Número da barra

2ª coluna: Nome da barra

3ª coluna: Tensão (módulo da tensão na barra)

4ª coluna: Equip. (equipamento conectado à barra) onde:

G – Gerador

L – Carga

R – Reator

C – Capacitor

Q – Compensador

P – Barra de passagem (nenhum equipamento conectado)

5ª coluna: Tipo (tipo ou "status" da barra) onde:

1 – Barra de tensão controlada

2 – Barra "swing"

0 – Barra de carga

6ª coluna: S_i (potência injetada na barra i)

7ª coluna: S_m^2 (quadrado da 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).

8ª coluna: S_{io}^2 (quadrado da máxima potência aparente que poderia ser injetada para a barra i, caso o sistema fosse de duas barras, no ponto de operação em análise).

9ª coluna: $\Delta \det * V_i$ (potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i)

10ª coluna: $\det[D'] * V_i$ (distância entre S_m^2 e S_i^2)

11ª coluna: Y_{ii} (elemento diagonal da matriz admitância de barra)

12ª coluna: M (margem de potência, indica a região de operação, e a quantidade percentual de MVA que deve ser retirado ou adicionado S_i para se chegar ao máximo carregamento, calculada no ponto de operação em análise).

Na Tabela 5.1 são mostradas várias grandezas associadas às barras 62, 63, 64, 69, 70, 71, 73 e 74 (em vermelho). 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 soma com a reatância indutiva das linhas conectadas à barra. Por outro lado, a compensação paralela indutiva tende a aumentar o valor de Y_{ii} .

Tabela 5.1 – Índices para Barras de Mesma Classe de Tensão

| ÁREA = 1 * FURNAS * | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------|--------|----|----|-------|---------|------------|---------------------|------------------|----------|--------|
| Barra | Número-Nome | V_i | Eq | Tp | S_i | S_m^2 | S_{io}^2 | $\Delta \det * V_i$ | $\det[D'] * V_i$ | Y_{ii} | M(%) |
| 60 | F.IGUACU-765 | 0,9696 | R | 0 | 9,306 | 5623 | 557410 | 551786 | 5537 | 794 | 87,591 |
| 62 | IV-FOZ-1-765 | 1,0247 | R | 0 | 1,575 | -27654 | 7491 | 35146 | -27657 | 82 | -10658 |
| 63 | IV-FOZ-2-765 | 1,0242 | R | 0 | 1,573 | -27480 | 7529 | 35010 | -27483 | 82 | -10638 |
| 64 | IV-FOZ-3-765 | 1,0210 | R | 0 | 1,564 | -26662 | 7667 | 34329 | -26664 | 83 | -10540 |
| 65 | IVAIPORA-765 | 1,0095 | P | 0 | 0,000 | 4556 | 281877 | 277321 | 4556 | 521 | |
| 69 | IV-ITA-1-765 | 1,0165 | R | 0 | 3,410 | -5452 | 4352 | 9804 | -5464 | 63 | -2265 |
| 70 | IV-ITA-2-765 | 1,0170 | R | 0 | 3,413 | -5459 | 4357 | 9817 | -5471 | 63 | -2264 |
| 71 | IV-ITA-3-765 | 1,0161 | R | 0 | 3,407 | -5489 | 4405 | 9894 | -5500 | 64 | -2274 |
| 72 | ITABERA—765 | 1,0043 | R | 0 | 9,984 | 3864 | ***** | ***** | 3764 | 9975 | 83 |
| 73 | ITA-TP-1-765 | 0,9995 | P | 0 | 0,000 | -7056 | 3206 | 10263 | -7056 | 56 | |
| 74 | ITA-TP-2-765 | 0,9999 | P | 0 | 0,000 | -7064 | 3209 | 10273 | -7064 | 56 | |
| 75 | ITA-TP-3-765 | 1,0044 | P | 0 | 0,000 | 3718 | ***** | ***** | 3718 | **** | |
| 76 | T.PRETO—765 | 0,9594 | R | 0 | 9,112 | 4307 | 517574 | 513267 | 4224 | 781 | 86 |

Através dos dados de linha e dos dados de barra mostrados nas Tabelas 5.2 e 5.3 pode-se chegar à Figura 5.2, referente à barra 62. Somando todas as admitâncias, tem-se o elemento diagonal da matriz admitância de barra: $Y_{62,62} = 82.426$ p.u., que é um valor pequeno quando comparado ao de outras barras.

Tabela 5.2 - Relatório de Dados de Linha

| AREA = 1 * FURNAS * | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|--------|--------|---------|-------|-----|-----|-------|---------------|--------------|
| BARRA | | RESIST | REATAN | SUSCEP | | TAP | | BARRA | IDENTIFICACAO | |
| DE | PARA | (%) | (%) | (Mvar) | ATUAL | MIN | MAX | CONT, | DABARRA | PARABARRA |
| 60 | 62 | 0,08 | 1,84 | 927,800 | | | | | F,IGUACU-765 | IV-FOZ-1-765 |
| 60 | 63 | 0,08 | 1,85 | 929,100 | | | | | F,IGUACU-765 | IV-FOZ-2-765 |
| 60 | 64 | 0,08 | 1,89 | 954,570 | | | | | F,IGUACU-765 | IV-FOZ-3-765 |
| 62 | 65 | 0,00 | -0,75 | 0,000 | | | | | IV-FOZ-1-765 | IVAIPORA-765 |
| 63 | 65 | 0,00 | -0,75 | 0,000 | | | | | IV-FOZ-2-765 | IVAIPORA-765 |
| 64 | 65 | 0,00 | -0,75 | 0,000 | | | | | IV-FOZ-3-765 | IVAIPORA-765 |
| 65 | 69 | 0,00 | -0,78 | 0,000 | | | | | IVAIPORA-765 | IV-ITA-1-765 |
| 65 | 70 | 0,00 | -0,78 | 0,000 | | | | | IVAIPORA-765 | IV-ITA-2-765 |
| 65 | 71 | 0,00 | -0,78 | 0,000 | | | | | IVAIPORA-765 | IV-ITA-3-765 |
| 72 | 69 | 0,06 | 1,53 | 760,000 | | | | | ITABERA--765 | IV-ITA-1-765 |
| 72 | 70 | 0,06 | 1,53 | 755,700 | | | | | ITABERA--765 | IV-ITA-2-765 |
| 72 | 71 | 0,06 | 1,54 | 762,900 | | | | | ITABERA--765 | IV-ITA-3-765 |
| 72 | 73 | 0,00 | -0,92 | 0,000 | | | | | ITABERA--765 | ITA-TP-1-765 |
| 72 | 74 | 0,00 | -0,92 | 0,000 | | | | | ITABERA--765 | ITA-TP-2-765 |
| 72 | 75 | 0,00 | 0,01 | 0,000 | | | | | ITABERA--765 | ITA-TP-3-765 |
| 73 | 76 | 0,07 | 1,75 | 877,500 | | | | | ITA-TP-1-765 | T,PRETO--765 |
| 74 | 76 | 0,07 | 1,75 | 873,000 | | | | | ITA-TP-2-765 | T,PRETO--765 |
| 76 | 75 | 0,07 | 1,80 | 901,700 | | | | | T,PRETO--765 | ITA-TP-3-765 |

Tabela 5.3 – Relatório de Barras

| AREA 1 - * FURNAS * | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------|----|--------|------|---------|--------|-------|------|--------|
| BARRA | | | TENSÃO | | GERACAO | | CARGA | | SHUNT |
| NUM. | NOME | TP | MOD | ANG | MW | Mvar\ | MW | Mvar | Mvar |
| | | | | | | CEMvar | | | |
| 60 | F.IGUACU-765 | 0 | 0,970 | 25,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -930,6 |
| 62 | IV-FOZ-1-765 | 0 | 1,025 | 7,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -157,5 |
| 63 | IV-FOZ-2-765 | 0 | 1,024 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -157,3 |
| 64 | IV-FOZ-3-765 | 0 | 1,021 | 8,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -156,4 |
| 65 | IVAIPORA-765 | 0 | 1,009 | 14,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 69 | IV-ITA-1-765 | 0 | 1,016 | 23,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -341,0 |
| 70 | IV-ITA-2-765 | 0 | 1,017 | 23,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -341,3 |
| 71 | IV-ITA-3-765 | 0 | 1,016 | 23,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -340,7 |
| 72 | ITABERA--765 | 0 | 1,004 | 6,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -998,4 |
| 73 | ITA-TP-1-765 | 0 | 1,000 | 18,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 74 | ITA-TP-2-765 | 0 | 1,000 | 18,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 75 | ITA-TP-3-765 | 0 | 1,004 | 6,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 76 | T.PRETO--765 | 0 | 0,959 | -6,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -911,2 |

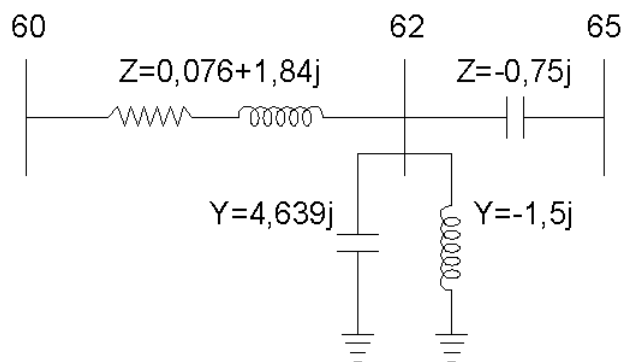


Figura 5.2 – Detalhe da Estrutura Física da Barra 62 - IV-FOZ-1-765

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: $Y_{62,62} = 615,55$ p.u. 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.

5.2 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 4.3. O problema dos índices não usuais acontece nos Casos 59, 60 e 61 como mostrado na Tabela 5.4. Pode ser explicado como um excesso de 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 5.4 – Índices para a Barra 62

| Barra 62 - IV-FOZ-1-765 | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|---------|------------|---------------------|---------|-----------------|------------------|----------|---------|
| Casos | V_i | S_i | S_m^2 | S_{io}^2 | $\Delta \det^* V_i$ | 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 |

Em uma terceira análise numérica, verifica-se a barra 62, desta vez alterando-se a reatância do 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 5.5 verifica-se que os índices apresentam valores usuais desde 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.

Tabela 5.5 - 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 | $\Delta \det^* V_i$ | 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 |

5.3 Conclusões

Conclui-se que a ferramenta computacional de avaliação das condições de segurança de tensão (EstabTen) agora é adequada para a operação em tempo real quando é monitorada a evolução dos índices relativos a uma seqüência de diferentes pontos de operação, de tal modo que não haja perda de informação dos índices M , $\det[D']$ e S_m . Os valores da margem de potência são consistentes, numérica e fisicamente para qualquer

ponto de operação, estando este na região normal ou anormal de operação, tomando apenas o cuidado de observar a estrutura física da rede, analisando sempre se o sistema é capaz ou não de absorver o suporte reativo.