

### 3

## Método para Cálculo dos Caminhos de Transmissão e Escolha do Ramo Crítico

Uma vez avaliado o carregamento do sistema e detectada uma barra crítica seja de carga ou geração, deve-se determinar a sub-rede para transmitir potência ativa do gerador crítico até as barras de carga ou dos geradores até a barra crítica de carga, verificar os diferentes caminhos de transmissão existentes, identificar o caminho mais carregado, e por último identificar o ramo crítico do caminho de transmissão mais carregado.

Os passos a seguir descrevem o método utilizado, primeiro para uma barra crítica de carga e, depois, quando a barra crítica é de geração [7,8].

### 3.1.

#### Barra Crítica de Carga

#### 3.1.1.

##### Determinação da Sub-Rede

Para determinar a sub-rede basta verificar o sinal dos fluxos de potência ativa. As barras  $j$  conectadas à barra de carga crítica  $i$  pertencem à sub-rede se  $P_{ij} < 0$ . A barra  $k$  conectada a barra  $j$ , pertence à sub-rede se  $P_{jk} < 0$ . A barra  $l$  conectada a barra  $k$ , pertence à sub-rede se  $P_{kl} < 0$ . A busca acaba em barras geradoras  $m$  de potência ativa [4].

Por exemplo, na Figura 3.1, é possível observar dois geradores nas barras  $m_1$  e  $m_2$  conectados por os nós intermediários  $j_1$  e  $j_2$ , e duas linhas de transmissão distintas a uma única barra de carga  $i$ . É determinada a parte da rede utilizada para transmitir potência ativa até a barra crítica de carga, isto é, a barra  $i$ .

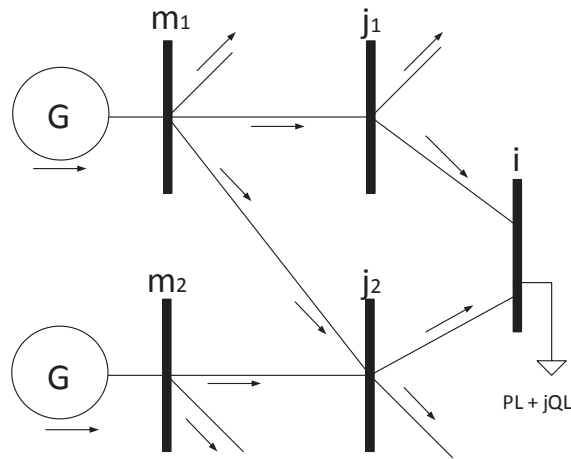


Figura 3.1 Parte da Rede no Entorno da Barra i

O isolamento da sub-rede do resto do sistema é necessário. Para isolar a sub-rede do resto da rede é necessário transformar em admitâncias os fluxos de potência ativa que deixam a sub-rede a partir dos nós intermediários, assim como os fluxos de potência reativa que deixam e que chegam à sub-rede nos nós intermediários, como se mostra na Figura 3.2 (por definição da sub-rede, não entra potência ativa nos nós intermediários).

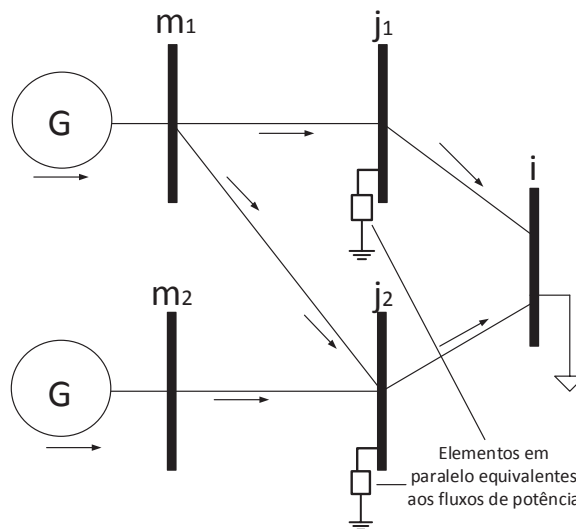


Figura 3.2 Isolamento da Sub-rede

Nas barras de geração  $m_1$  e  $m_2$  não é necessário incluir elementos em paralelo se for considerado que:

$$P_{Gm1} = P_{m1j1} + P_{m1j2} \text{ e } P_{Gm2} = P_{m2j2} \quad (3.1)$$

$$Q_{Gm1} = Q_{m1j1} + Q_{m1j2} \text{ e } Q_{Gm2} = Q_{m2j2} \quad (3.2)$$

Similarmente na barra de carga  $i$  não é necessário incluir elementos em paralelo se for considerado que:

$$P_{Li} = -(P_{ij1} + P_{ij2}) \quad (3.3)$$

$$Q_{Li} = -(Q_{ij1} + Q_{ij2}) \quad (3.4)$$

Tem-se agora um sistema de dimensões reduzidas composto de uma barra de carga ligada por uma rede de transmissão, com vários nós intermediários a um ou mais geradores.

### 3.1.2. Determinação dos Caminhos de Transmissão

Uma vez determinada a sub-rede, é necessário determinar todos os caminhos radiais de transmissão de potência ativa entre a barra de carga crítica e cada gerador. A execução dessa ideia envolve os seguintes passos:

- a) Cada barra  $j$  conectada por um ramo de transmissão à barra crítica  $i$  define um caminho de transmissão radial. Note-se que  $P_{ij} < 0$ .

Se existem  $n_j$  barras  $j$ , são definidos  $n_j$  caminhos. Para cada barra  $j$  existem  $n_k$  barras  $k$ , com  $P_{jk} < 0$ , a ela conectadas, e são definidos  $n_k - 1$  novos caminhos. Para cada barra  $k$  existem  $n_l$  barras  $l$ , com  $P_{kl} < 0$ , a ela conectadas, e são definidos  $n_l - 1$  novos caminhos. Cada caminho termina em um gerador  $m$  de potência ativa.

São definidos então vários caminhos radiais contendo a barra de carga 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.

- b) O isolamento de cada caminho radial de transmissão do resto da sub-rede é feito transformando em admitâncias todos os fluxos de potência ativa e reativa que entram e saem do caminho em suas barras intermediárias, como se mostra na Figura 3.3.

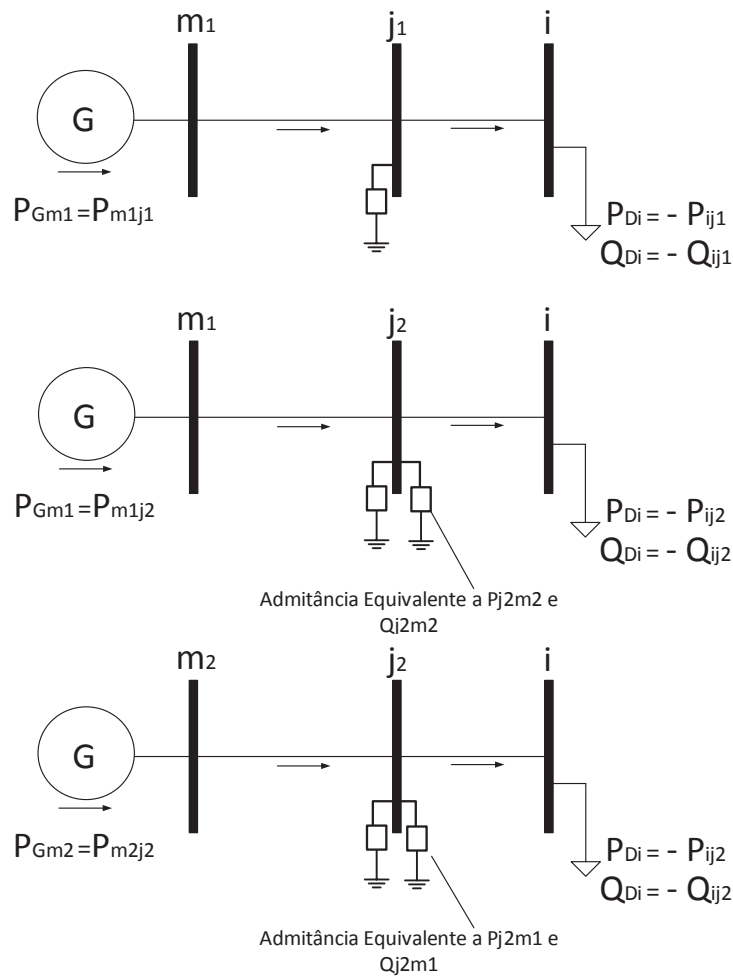


Figura 3.3 Caminhos Radiais de Transmissão Isolados do Resto da Sub-rede

- c) Transformando-se as cargas das barras intermediárias em admitâncias e eliminando-se essas barras, pela técnica conhecida como “redução da rede” [9], tem-se um circuito equivalente de duas barras, como se queria obter. Essa redução era usual em estudos de estabilidade angular [10].

Assim obtêm-se vários circuitos compostos de gerador, circuito  $\Pi$  equivalente de transmissão, e barra de carga. O mesmo gerador pode estar conectado à barra de carga por mais de um circuito  $\Pi$  de transmissão, como se mostra na Figura 3.4. A individualidade de cada caminho de transmissão é mantida.

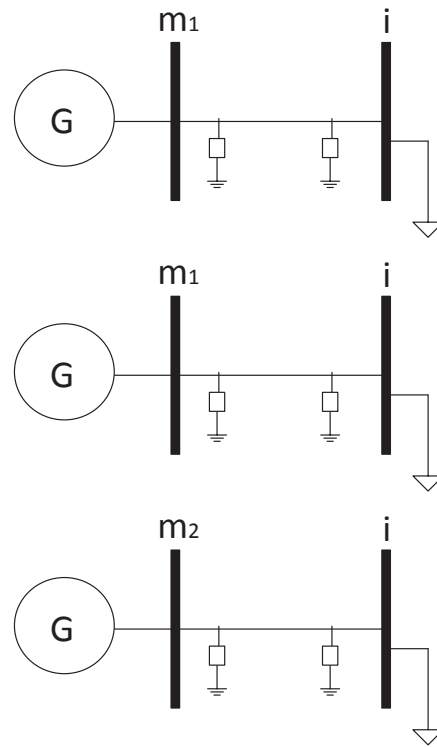


Figura 3.4 Circuitos  $\Pi$  Equivalente de Transmissão

A carga de cada um dos vários circuitos de duas barras resultantes é o fluxo de potência ativa e reativa que chega na 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 correspondente.

As grandezas que mantêm o mesmo valor no circuito intacto e no circuito de duas barras são as tensões nodais em módulo e ângulo 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 inteira, 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, obviamente, não têm parâmetros semelhantes aos de uma linha de transmissão, mas o interesse é observar o “esforço de transmissão” (quedas do módulo e aumento da defasagem angular da tensão) e o esforço é o mesmo na rede inteira e na rede reduzida.

É necessário recalcular os circuitos equivalentes de duas barras toda vez que o ponto de operação é alterado.

### **3.1.3. Identificação do Caminho de Transmissão Mais Carregado**

Com o objetivo de encontrar o caminho de transmissão mais carregado compara-se a carga no ponto de operação em análise de cada caminho com a carga máxima, calculada pelas fórmulas para um circuito de duas barras. Com essa comparação, é possível determinar se o ponto de operação em análise se encontra na parte superior ou na inferior da “curva do nariz”  $\phi$  constante no plano SV, e ainda, a “distância” ao ponto de máxima carga. O caminho de transmissão mais carregado é aquele que apresenta a menor margem entre a carga no ponto de operação em análise e a carga máxima que poderia ser atendida naquela barra.

### **3.1.4. Identificação do Ramo Crítico**

Uma vez determinada a barra crítica e o caminho de transmissão mais carregado, procura-se o ramo a ter seu fluxo de potência diminuído.

Quando a barra é de carga, entende-se que há dificuldade em transmitir potência do gerador (daquele caminho) para a barra e, conseqüentemente, aumentar a carga. A idéia é, então, ir acrescentando ramos, a partir do gerador, e verificar a dificuldade de transmitir potência para a barra no extremo do ramo adicionado. Assim, calculam-se os índices dessas barras “de carga” intermediárias, uma a cada ramo adicionado, até chegar-se a barra de carga em análise.

O ramo procurado é aquele que, quando adicionado, corresponde aos piores índices.

Neste diagrama não se encontram as barras 6, 9 e 12, porque os caminhos 4, 5, 7 e 4, 6, 7 foram transformados em um único caminho, assim como 7, 8, 10 com 7, 9, 10 e 10,11, 13 com 10, 12, 13. Da mesma forma, os ramos em paralelo e os dois transformadores que existem entre as barras 13 e 28 foram reduzidos a um, e a razão para este procedimento está apresentada no Apêndice A.

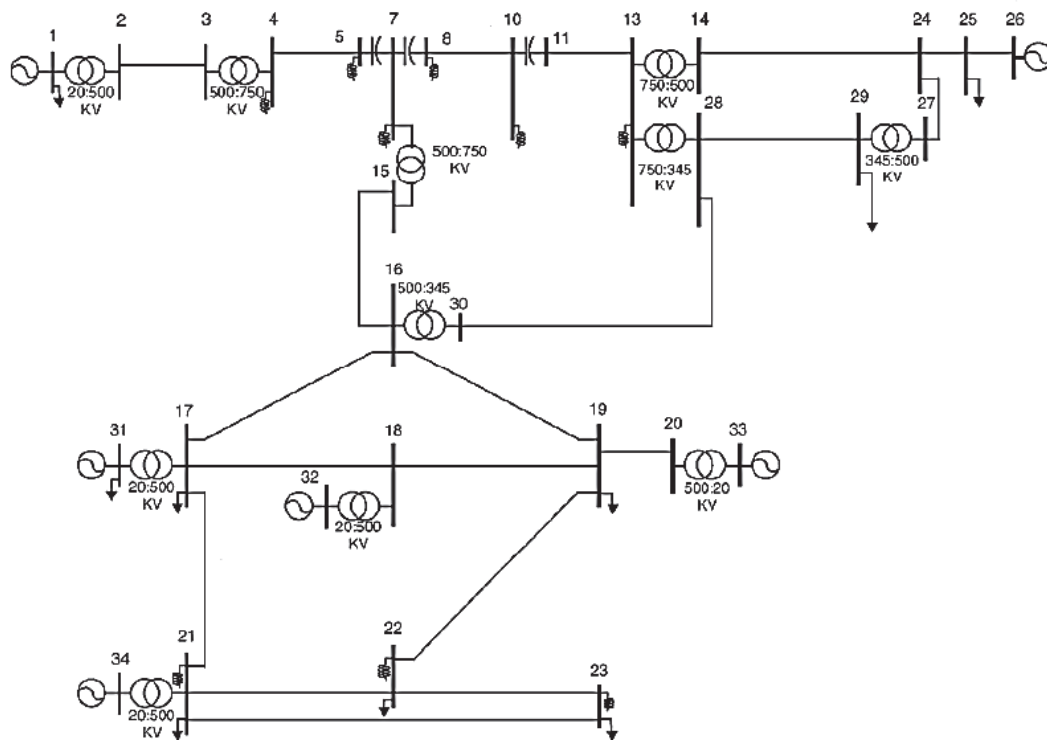


Figura 3.5 Sistema – Teste de 34 Barras Modificado

O objetivo é identificar a barra crítica, determinar a parte da rede que esta sendo utilizada para transmitir potência ativa e reativa para a barra de carga, identificar o caminho de transmissão mais carregado e encontrar o ramo crítico.

Os resultados a seguir foram obtidos do exemplo numérico apresentado em [4].

### 3.1.5.1. Identificação da Barra Crítica

Na Figura 3.6 são ilustrados diferentes pontos de operação, como o ponto de operação S34\_A06 foi obtido através de aumentos de carga na barra 29, provavelmente a barra crítica é a barra 29.

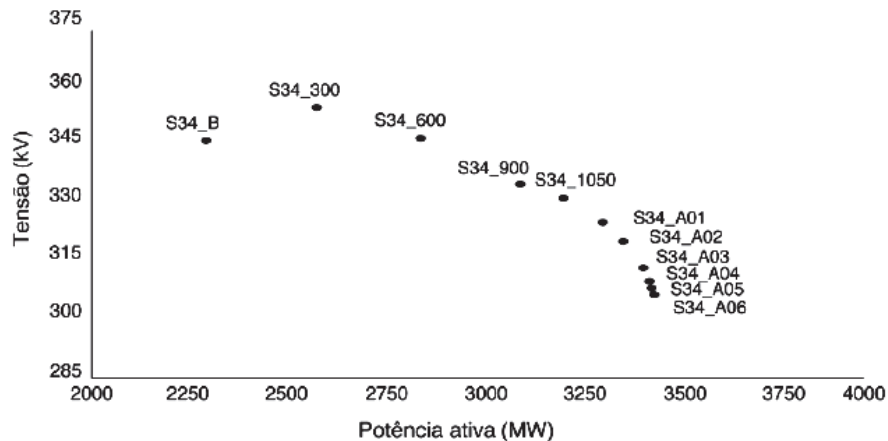


Figura 3.6 Caraterística Tensão x Potência para a Barra 29

Na Tabela 3.1 se mostra os resultados da avaliação das condições de segurança de tensão utilizando a ferramenta computacional EstabTen descrita em [11].  $S_i$  é a potência injetada na barra  $i$  no ponto de operação em análise,  $S_m$  é uma estimativa da máxima potência aparente que poderia ser injetada na barra  $i$ . Portanto,  $M = (S_m - S_i)/S_m$  é a margem de potência entre o que está sendo injetado e o máximo calculado naquele ponto de operação (em pu de  $S_m$ ).  $\beta$  é o ângulo entre os vetores gradientes  $\nabla P_i$  e  $\nabla Q_i$  e na região normal de operação (parte superior da “curva do nariz”) tem-se  $0^\circ < \beta < 180^\circ$  e na parte inferior da curva tem-se  $0^\circ > \beta > -180^\circ$ . No ponto máximo, os vetores gradientes  $\nabla P_i$  e  $\nabla Q_i$  estão alinhados, e então o ângulo  $\beta$  é  $\pm 180^\circ$  ou  $0^\circ$ .

Valores negativos de  $\beta$  em barras de tensão controlada indicam uma relação oposta ao usual entre a potência reativa gerada e a tensão controlada, o que pode levar ao colapso de tensão, pois as ações automáticas de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado [12].

Como previsto, a barra 29 é a pior do ponto de vista de margem de potência: tem uma carga de 34,7 MVA e o programa indica uma máxima carga de

35,7 MVA. O ângulo  $\beta$  vale  $179^\circ$  para um máximo de  $180^\circ$ . Portanto, a barra 29 é a que terá sua margem aumentada.

Tabela 3.1 Relatório de Segurança de Tensão no Ponto de Operação S34\_A06

| Barra | Barra Nome    | V (pu) | Equipo | Tipo | Si (pu) | Sm (pu) | M (pu de Sm) | $\beta$ (graus) |
|-------|---------------|--------|--------|------|---------|---------|--------------|-----------------|
| 1     | BUS--001--20  | 1,030  | GL     | 1    | 34,815  | 115,9   | 0,699        | -8              |
| 2     | BUS--002--500 | 1,012  | P      | 0    | 0       | 31,6    | 1,000        | 166             |
| 3     | BUS--003--500 | 1,010  | P      | 0    | 0       | 30,7    | 1,000        | 166             |
| 4     | BUS--004--750 | 0,951  | R      | 0    | 6,279   | 23,3    | 0,730        | 166             |
| 5     | BUS--005--750 | 0,916  | R      | 0    | 1,374   | 15,5    | 0,911        | 178             |
| 6     | BUS--006--750 | 0,915  | R      | 0    | 1,373   | 15,5    | 0,911        | 178             |
| 7     | BUS--007--750 | 0,932  | R      | 0    | 3,076   | 13      | 0,763        | 172             |
| 8     | BUS--008--750 | 0,986  | R      | 0    | 3,255   | 36,5    | 0,911        | 173             |
| 9     | BUS--009--750 | 0,987  | R      | 0    | 3,257   | 36,5    | 0,911        | 173             |
| 10    | BUS--010--750 | 0,906  | R      | 0    | 5,983   | 11      | 0,456        | 176             |
| 11    | BUS--011--750 | 0,921  | P      | 0    | 0       | 18,8    | 1,000        | 175             |
| 12    | BUS--012--750 | 0,922  | P      | 0    | 0       | 18,7    | 1,000        | 175             |
| 13    | BUS--013--750 | 0,882  | R      | 0    | 2,911   | 9,5     | 0,693        | 178             |
| 14    | BUS--014--500 | 0,966  | P      | 0    | 0       | 10,7    | 1,000        | 178             |
| 15    | BUS--015--500 | 0,876  | P      | 0    | 0       | 14,4    | 1,000        | 170             |
| 16    | BUS--016--500 | 0,879  | P      | 0    | 0       | 14,7    | 1,000        | 169             |
| 17    | BUS--017--500 | 0,999  | L      | 0    | 0,044   | 56,2    | 0,999        | 142             |
| 18    | BUS--018--500 | 1,037  | P      | 0    | 0       | 66,1    | 1,000        | 142             |
| 19    | BUS--019--500 | 1,050  | L      | 0    | 14,998  | 58,5    | 0,744        | 147             |
| 20    | BUS--020--500 | 1,052  | P      | 0    | 0       | 57,5    | 1,000        | 146             |
| 21    | BUS--021--500 | 1,074  | LR     | 0    | 3,223   | 101,7   | 0,968        | 122             |
| 22    | BUS--022--500 | 1,075  | LR     | 0    | 2,151   | 59,6    | 0,964        | 125             |
| 23    | BUS--023--500 | 1,066  | LR     | 0    | 7,069   | 34,6    | 0,801        | 122             |
| 24    | BUS--024--500 | 1,037  | P      | 0    | 0       | 19,6    | 1,000        | 179             |
| 25    | BUS--025--500 | 1,093  | L      | 0    | 66,017  | 81,4    | 0,189        | 179             |
| 26    | BUS--026--500 | 1,100  | G      | 1    | 41,143  | 62,3    | 0,339        | -77             |
| 27    | BUS--027--500 | 0,991  | P      | 0    | 0       | 12,7    | 1,000        | 178             |
| 28    | BUS--028--345 | 0,869  | P      | 0    | 0       | 8,2     | 1,000        | 178             |
| 29    | BUS--029--345 | 0,878  | L      | 0    | 34,707  | 35,7    | 0,028        | 179             |
| 30    | BUS--030--345 | 0,929  | P      | 0    | 0       | 10,5    | 1,000        | 168             |
| 31    | BUS--031--20  | 1,007  | GL     | 1    | 13,259  | 28,5    | 0,534        | -39             |
| 32    | BUS--032--20  | 1,058  | G      | 1    | 12,690  | 25,8    | 0,508        | 123             |
| 33    | BUS--033--20  | 1,059  | G      | 1    | 12,918  | 14,4    | 0,103        | -155            |
| 34    | BUS--034--20  | 1,049  | G      | 2    | 14,973  | -       | -            | -               |

Legenda: G gerador, L carga, R reator, C capacitor, P passagem, 2 swing, 1 PV, 0 PQ.

### 3.1.5.2.

#### Identificação da Sub-Rede, dos Caminhos de Transmissão e do Caminho mais Carregado

A direção dos fluxos de potência ativa está indicada no diagrama unifilar do sistema mostrado na Figura 3.7. É fácil verificar que a sub-rede utilizada para transmitir potência para a barra de carga 29 inclui todas as barras exceto as barras 23, 25 e 26.

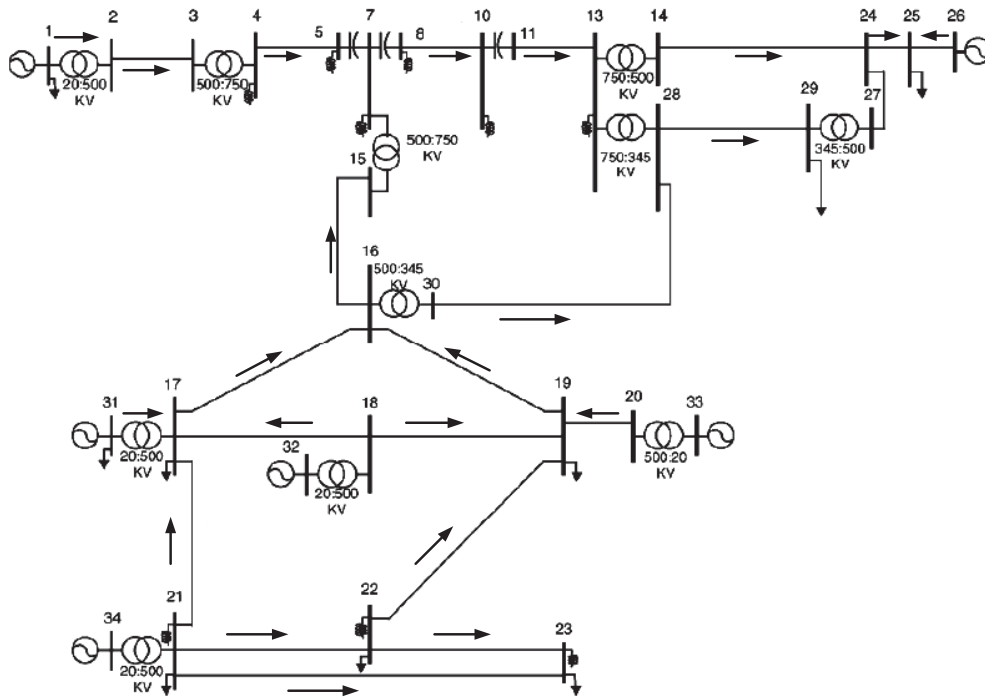


Figura 3.7 Fluxo de Potência Ativa no Sistema de 34 Barras

Na Tabela 3.2 apresenta-se os resultados do programa CaTrans com a determinação dos caminhos mais carregados de transmissão de potência para a barra crítica 29. Somente os seis piores são mostrados, em ordem decrescente a partir da pior margem. O sinal negativo da margem indica operação na parte inferior da curva. Pode-se dizer, então, que a tensão na barra 29 encontra-se na parte inferior da curva para todos os caminhos mais carregados mostrados.

Como os aumentos de carga na barra 29 e os acréscimos nas perdas de transmissão foram atendidas pelo gerador *swing* da barra 34, os dois caminhos mais carregados de transmissão conectam a barra de carga 29 ao gerador *swing* 34. Os dois caminhos seguintes conectam a barra de carga 29 ao gerador 32; o

seguinte conecta a barra de carga 29 ao gerador 33; e o sexto e último caminho conecta a barra de carga 29 ao gerador 31.

Tabela 3.2 Relatório de Segurança de Tensão no Ponto de Operação S34\_A06

| Caminhos de Transmissão |          | 29-28-30-16-19-22-21-34 |          |
|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
|                         |          | Módulo                  | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |          | 1,0490                  | 22,3000  |
| Tensão na Carga         |          | 0,8829                  | -62,7516 |
| Tensão Crítica na Carga |          | 3,0719                  | 8,6184   |
|                         | Ativa    | Reativa                 | Aparente |
| Geração                 | 14,3498  | 3,8172                  |          |
| Carga                   | 33,0229  | -8,6997                 | 34,1497  |
| Carga Crítica           | 326,2837 | -85,9578                | 337,4163 |
| Índices                 | $S_i$    | $S_m$                   | M(%)     |
| Barra 29                | 34,15    | 337,42                  | -89,88   |

| Caminhos de Transmissão |        | 29-28-30-16-17-21-34 |          |
|-------------------------|--------|----------------------|----------|
|                         |        | Módulo               | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |        | 1,0490               | 22,3000  |
| Tensão na Carga         |        | 0,8829               | -62,7738 |
| Tensão Crítica na Carga |        | 2,5997               | 4,9071   |
|                         | Ativa  | Reativa              | Aparente |
| Geração                 | 14,35  | 3,82                 |          |
| Carga                   | 33,03  | -8,7                 | 34,16    |
| Carga Crítica           | 231,22 | -60,91               | 239,11   |
| Índices                 | $S_i$  | $S_m$                | M(%)     |
| Barra 29                | 34,16  | 239,11               | -85,71   |

| Caminhos de Transmissão |        | 29-28-30-16-19-18-32 |          |
|-------------------------|--------|----------------------|----------|
|                         |        | Módulo               | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |        | 1,0580               | 16,7148  |
| Tensão na Carga         |        | 0,8829               | -62,7738 |
| Tensão Crítica na Carga |        | 2,0906               | -0,7194  |
|                         | Ativa  | Reativa              | Aparente |
| Geração                 | 12,00  | 4,02                 |          |
| Carga                   | 33,03  | -8,70                | 34,16    |
| Carga Crítica           | 151,69 | -39,96               | 156,86   |
| Índices                 | $S_i$  | $S_m$                | M(%)     |
| Barra 29                | 34,16  | 156,86               | -78,22   |

| Caminhos de Transmissão |                | 29-28-30-16-17-18-32 |          |
|-------------------------|----------------|----------------------|----------|
|                         |                | Módulo               | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |                | 1,0580               | 16,7148  |
| Tensão na Carga         |                | 0,8829               | -62,7738 |
| Tensão Crítica na Carga |                | 2,0315               | -1,7068  |
|                         | Ativa          | Reativa              | Aparente |
| Geração                 | 12,00          | 4,02                 |          |
| Carga                   | 33,03          | -8,70                | 34,16    |
| Carga Crítica           | 142,43         | -37,52               | 147,29   |
| Índices                 | S <sub>i</sub> | S <sub>m</sub>       | M(%)     |
| Barra 29                | 34,16          | 147,29               | -76,81   |

| Caminhos de Transmissão |                | 29-28-30-16-19-20-33 |          |
|-------------------------|----------------|----------------------|----------|
|                         |                | Módulo               | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |                | 1,0590               | 12,7291  |
| Tensão na Carga         |                | 0,8829               | -62,7738 |
| Tensão Crítica na Carga |                | 1,9102               | -3,5524  |
|                         | Ativa          | Reativa              | Aparente |
| Geração                 | 12,00          | 4,66                 |          |
| Carga                   | 33,03          | -8,70                | 34,16    |
| Carga Crítica           | 127,19         | -33,50               | 131,52   |
| Índices                 | S <sub>i</sub> | S <sub>m</sub>       | M(%)     |
| Barra 29                | 34,16          | 131,52               | -74,03   |

| Caminhos de Transmissão |                | 29-28-30-16-17-31 |          |
|-------------------------|----------------|-------------------|----------|
|                         |                | Módulo            | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |                | 1,0070            | 18,1187  |
| Tensão na Carga         |                | 0,8829            | -62,7738 |
| Tensão Crítica na Carga |                | 1,8864            | -4,1372  |
|                         | Ativa          | Reativa           | Aparente |
| Geração                 | 13,18          | -1,55             |          |
| Carga                   | 33,03          | -8,70             | 34,16    |
| Carga Crítica           | 123,05         | -32,42            | 127,25   |
| Índices                 | S <sub>i</sub> | S <sub>m</sub>    | M(%)     |
| Barra 29                | 34,16          | 127,25            | -73,16   |

O caminho mais carregado se encontra composto pelos ramos que ligam as barras 29-28-30-16-19-22-21-34, com uma margem de -89.88%.

### 3.1.5.3. Determinação do Ramo Crítico

O objetivo, agora, é determinar analiticamente o ramo crítico do caminho mais carregado. A ideia é analisar os subcaminhos que começam no gerador 34 incluindo um novo ramo de cada vez. Portanto, o 1º subcaminho a ser analisado vai da barra 34 para a barra 21. Uma inspeção dos resultados na Tabela 3.3 demonstra que a margem na barra 21 encontra-se “folgada” e o ponto de operação na parte superior da curva.

A seguir, inclui-se novo ramo e, conseqüentemente, o 2º subcaminho a ser analisado vai da barra 34 para a barra 21 para a barra 22. Mais uma vez, os resultados da Tabela 3.3 demonstram que a margem na barra 22 encontra-se “folgada” e o ponto de operação encontra-se na parte superior da curva. Sequencialmente, vai-se incluindo novos ramos até que na 7ª e última adição inclui-se o ramo da barra 28 para a barra 29, que é a barra em análise.

Na Tabela 3.3, observando-se a margem para todos os subcaminhos de transmissão, verifica-se que não houve problema em transferir potência a partir do gerador 34 para as barras 21, 22, 19, 16, 30, já que as margens são positivas. Observa-se margem negativa somente quando da adição do 6º ramo, entre as barras 30 e 28, e quando da adição do 7º e último ramo, entre as barras 28 e 29.

Conclui-se que a pior situação, isto é, margem mais negativa, ocorre quando da adição do ramo entre as barras 28 e 29. Esse é então o ramo crítico.

Tabela 3.3 Análise dos Subcaminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado

| Caminhos de Transmissão |         | 34-21   |          |
|-------------------------|---------|---------|----------|
|                         |         | Módulo  | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |         | 1,0490  | 22,3000  |
| Tensão na Carga         |         | 1,0752  | 13,5455  |
| Tensão Crítica na Carga |         | 0,7404  | -19,2130 |
|                         | Ativa   | Reativa | Aparente |
| Geração                 | 14,3498 | 3,8172  |          |
| Carga                   | 14,3167 | 1,5406  | 14,3994  |
| Carga Crítica           | 42,9292 | 4,6196  | 43,1771  |
| Índices                 | $S_i$   | $S_m$   | M(%)     |
| Barra 29                | 14,4    | 43,18   | 66,65    |

| Caminhos de Transmissão |         | 34-21-22 |          |
|-------------------------|---------|----------|----------|
|                         |         | Módulo   | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |         | 1,0490   | 22,3000  |
| Tensão na Carga         |         | 1,0765   | 9,3914   |
| Tensão Crítica na Carga |         | 0,7448   | -24,8147 |
|                         | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                 | 14,3498 | 3,8172   |          |
| Carga                   | 6,5423  | 0,0297   | 6,5423   |
| Carga Crítica           | 21,6786 | 0,0984   | 21,6788  |
| Índices                 | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 29                | 6,54    | 21,68    | 69,82    |

| Caminhos de Transmissão |         | 34-21-22-19 |          |
|-------------------------|---------|-------------|----------|
|                         |         | Módulo      | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |         | 1,0490      | 22,3000  |
| Tensão na Carga         |         | 1,0510      | 5,4448   |
| Tensão Crítica na Carga |         | 0,6640      | -12,7592 |
|                         | Ativa   | Reativa     | Aparente |
| Geração                 | 14,3498 | 3,8172      |          |
| Carga                   | 3,8708  | 2,2502      | 4,4774   |
| Carga Crítica           | 7,7127  | 4,4835      | 8,9212   |
| Índices                 | $S_i$   | $S_m$       | M(%)     |
| Barra 29                | 4,48    | 8,92        | 49,81    |

| Caminhos de Transmissão |         | 34-21-22-19-16 |          |
|-------------------------|---------|----------------|----------|
|                         |         | Módulo         | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |         | 1,0490         | 22,3000  |
| Tensão na Carga         |         | 0,8834         | -11,9939 |
| Tensão Crítica na Carga |         | 1,1782         | -0,3168  |
|                         | Ativa   | Reativa        | Aparente |
| Geração                 | 14,3498 | 3,8172         |          |
| Carga                   | 11,7982 | 4,5826         | 12,6569  |
| Carga Crítica           | 13,0171 | 5,0560         | 13,9645  |
| Índices                 | $S_i$   | $S_m$          | M(%)     |
| Barra 29                | 12,66   | 13,96          | -9,36    |

| Caminhos de Transmissão |         | 34-21-22-19-16-30 |          |
|-------------------------|---------|-------------------|----------|
|                         |         | Módulo            | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |         | 1,0490            | 22,3000  |
| Tensão na Carga         |         | 0,9341            | -16,2072 |
| Tensão Crítica na Carga |         | 0,7657            | -25,6692 |
|                         | Ativa   | Reativa           | Aparente |
| Geração                 | 14,3498 | 3,8172            |          |
| Carga                   | 6,3263  | 0,4672            | 6,3435   |
| Carga Crítica           | 6,8882  | 0,5087            | 6,9069   |
|                         |         |                   |          |
| Índices                 | $S_i$   | $S_m$             | M(%)     |
| Barra 29                | 6,34    | 6,91              | 8,16     |

| Caminhos de Transmissão |         | 34-21-22-19-16-30-28 |          |
|-------------------------|---------|----------------------|----------|
|                         |         | Módulo               | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |         | 1,0490               | 22,3000  |
| Tensão na Carga         |         | 0,8739               | -57,7081 |
| Tensão Crítica na Carga |         | 1,3366               | -41,1486 |
|                         | Ativa   | Reativa              | Aparente |
| Geração                 | 14,3498 | 3,8172               |          |
| Carga                   | 5,5348  | -1,5296              | 5,7423   |
| Carga Crítica           | 6,6987  | -1,8513              | 6,9499   |
|                         |         |                      |          |
| Índices                 | $S_i$   | $S_m$                | M(%)     |
| Barra 29                | 5,74    | 6,95                 | -17,38   |

| Caminhos de Transmissão |          | 34-21-22-19-16-30-28-29 |          |
|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
|                         |          | Módulo                  | Ângulo   |
| Tensão no Gerador       |          | 1,0490                  | 22,3000  |
| Tensão na Carga         |          | 0,8829                  | -62,7516 |
| Tensão Crítica na Carga |          | 3,0719                  | 8,6184   |
|                         | Ativa    | Reativa                 | Aparente |
| Geração                 | 14,3498  | 3,8172                  |          |
| Carga                   | 33,0229  | -8,6997                 | 34,1497  |
| Carga Crítica           | 326,2837 | -85,9578                | 337,4163 |
|                         |          |                         |          |
| Índices                 | $S_i$    | $S_m$                   | M(%)     |
| Barra 29                | 34,15    | 337,42                  | -89,88   |

### 3.2. Barra de Geração Crítica

#### 3.2.1. Determinação da Sub-Rede

Para determinar a sub-rede é preciso verificar o sinal dos fluxos de potência ativa. As barras  $j$  conectadas à barra crítica de geração  $i$  pertencem à sub-rede se  $P_{ij} > 0$ . A barra  $k$  conectada a barra  $j$ , pertence à sub-rede se  $P_{jk} > 0$ . A barra  $l$  conectada a barra  $k$ , pertence à sub-rede se  $P_{kl} > 0$ . A busca acaba quando o fluxo de potência ativa chega às barras de carga  $m$ , onde o fluxo de potência ativa não tem outro lugar para ir, exceto ser consumida pela própria carga [7].

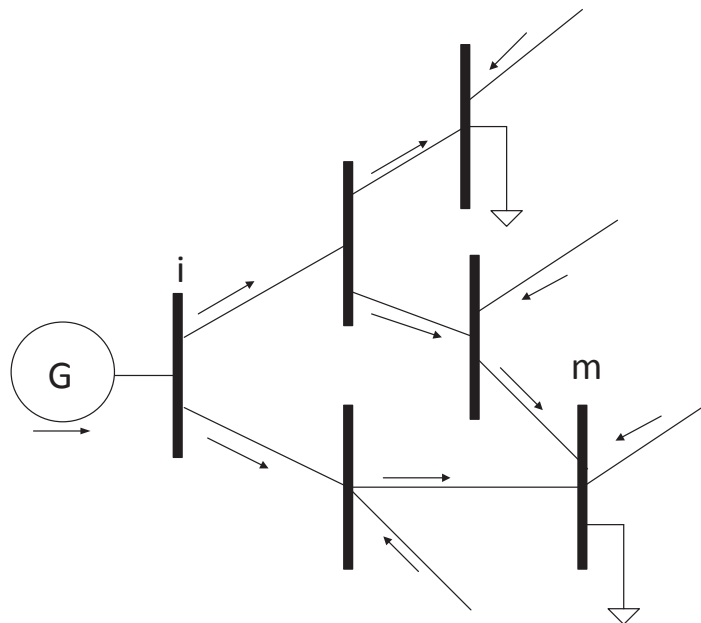


Figura 3.8 Parte da Rede no Entorno da Barra Crítica de Geração

Para isolar a sub-rede do resto da rede é necessário transformar em admitâncias os fluxos de potência ativa que entram à sub-rede a partir dos nós intermediários, assim como os fluxos de potência reativa que deixam e que chegam à sub-rede nos nós intermediários. Por definição da sub-rede, não há fluxos de potência ativa saindo nela.

Tem-se agora um sistema de dimensões reduzidas composto de uma barra de geração ligada por uma rede de transmissão, com vários nós intermediários a uma ou mais barras de carga, como se mostra na Figura 3.9.

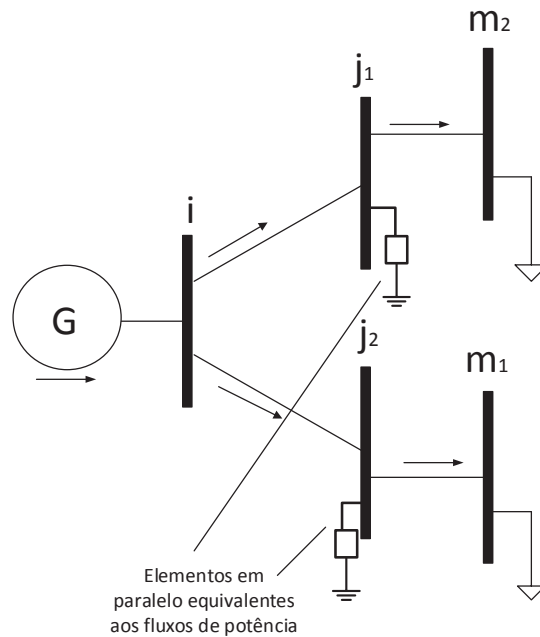


Figura 3.9 Isolamento da Sub-Rede para Barra Crítica de Geração

### 3.2.2. Determinação dos Caminhos de Transmissão

Uma vez determinada a sub-rede, é necessário determinar todos os caminhos radiais de transmissão de potência ativa entre o gerador e cada barra de carga. A execução dessa idéia envolve os seguintes passos:

- a) Cada barra  $j$  conectada por um ramo de transmissão à barra crítica de geração “ $i$ ” define um caminho de transmissão radial. Note-se que  $P_{ij} > 0$ . Se existem  $n_j$  barras  $j$ , são definidas  $n_j$  caminhos. Para cada barra  $j$  existem  $n_k$  barras  $k$ , com  $P_{jk} > 0$ , a ela conectadas, e são definidos “ $n_k - 1$ ” novos caminhos. Para cada barra  $k$  existem  $n_l$  barras  $l$ , com  $P_{kl} > 0$ , a ela conectadas, e são definidos “ $n_l - 1$ ” novos caminhos. Cada caminho termina numa barra de carga “ $m$ ”.

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

- b) 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 entram e saem do caminho em suas barras intermediárias.
- c) Transformando-se as cargas das barras intermediárias em admitâncias e eliminando-se essas barras, pela técnica conhecida como “redução da rede” [9], tem-se um circuito equivalente de duas barras, como se queria obter. Essa redução era usual em estudos de estabilidade angular [10].

Assim, obtêm-se vários circuitos compostos de gerador, circuito  $\Pi$  equivalente de transmissão, e barra de carga. O mesmo gerador pode estar conectado à barra de carga por mais de um circuito  $\Pi$  de transmissão. A individualidade de cada caminho de transmissão é mantida.

A carga de cada um dos vários circuitos de duas barras resultantes 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 correspondente.

As grandezas que mantêm o mesmo valor no circuito intacto e no circuito de duas barras são as tensões nodais em módulo e ângulo 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 inteira, 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 ou para variações infinitesimais.

Os ramos série e os ramos em paralelo do circuito equivalente de transmissão obviamente não têm parâmetros semelhantes aos de uma linha de transmissão, mas o interesse é observar o “esforço de transmissão” (quedas do módulo e aumento da defasagem angular da tensão) e o esforço é o mesmo na rede inteira e na rede reduzida.

É necessário recalcular os circuitos equivalentes de duas barras toda vez que o ponto de operação é alterado.

### **3.2.3.**

#### **Identificação do Caminho de Transmissão mais Carregado**

Com o fim de encontrar o caminho de transmissão mais carregado compara-se a geração no ponto de operação em análise de cada caminho com a geração máxima calculada pelas fórmulas para um circuito de duas barras. Com essa comparação é possível determinar se o ponto de operação em análise se encontra na parte superior ou inferior da “curva do nariz”, e ainda, a “distância” ao ponto de máxima geração. O caminho de transmissão mais carregado é aquele que apresenta a menor margem entre a geração no ponto de operação em análise e a geração máxima que poderia ser atendida naquela barra.

### **3.2.4.**

#### **Identificação do Ramo Crítico**

Uma vez determinada a barra crítica e o caminho de transmissão mais carregado, procura-se o ramo a ter seu fluxo de potência diminuído.

Quando a barra é de geração, entende-se que há dificuldade em injetar potência no caminho para alimentar as cargas nos nós intermediários e no nó no extremo do caminho. Essa dificuldade pode impedir o aumento dessas cargas se forem para ser alimentadas pelo gerador em análise.

A ideia é, então, ir acrescentando ramos, a partir do gerador, e verificar a dificuldade de injetar potência para alimentar a “carga” no extremo do ramo adicionado.

Assim, calculam-se os índices da barra de geração a cada ramo adicionado, até chegar-se ao final do caminho.

O ramo procurado é aquele que, quando adicionado, corresponde aos piores índices.

### 3.2.5. Exemplo Numérico

Os resultados a seguir foram obtidos do exemplo numérico apresentado em [7]. Na Tabela 3.4 são mostrados os índices de estabilidade de tensão, e observa-se a barra 34 com piores índices com  $\beta = -89,1$  e  $M = -683,8$  %. Isso já era esperado, pois o caso foi criado a partir do incremento de carga na barra 29 e correspondente aumento de geração na barra 34.

Tabela 3.4 Índices de Estabilidade de Tensão para o Sistema de 34 Barras

| Barra | Barra Nome    | V (pu) | Equipo | Tipo | Si (pu) | Sm (pu) | M (%)  | $\beta$ (graus) |
|-------|---------------|--------|--------|------|---------|---------|--------|-----------------|
| 1     | BUS--001--20  | 1,030  | GL     | 1    | 34,815  | -104,9  | -401,4 | -8,1            |
| 2     | BUS--002--500 | 1,012  | P      | 0    | 0       | 31,6    | -      | 166,1           |
| 3     | BUS--003--500 | 1,010  | P      | 0    | 0       | 30,7    | -      | 166             |
| 4     | BUS--004--750 | 0,951  | R      | 0    | 0       | 22,4    | 100    | 165,8           |
| 5     | BUS--005--750 | 0,916  | R      | 0    | 0       | 15,4    | 100    | 177,9           |
| 6     | BUS--006--750 | 0,915  | R      | 0    | 0       | 15,4    | 100    | 177,9           |
| 7     | BUS--007--750 | 0,932  | R      | 0    | 0       | 12,6    | 100    | 172,3           |
| 8     | BUS--008--750 | 0,986  | R      | 0    | 0       | 36,4    | 100    | 172,6           |
| 9     | BUS--009--750 | 0,987  | R      | 0    | 0       | 36,4    | 100    | 172,6           |
| 10    | BUS--010--750 | 0,906  | R      | 0    | 0       | 9,3     | 100    | 176,4           |
| 11    | BUS--011--750 | 0,921  | P      | 0    | 0       | 18,8    | -      | 175             |
| 12    | BUS--012--750 | 0,922  | P      | 0    | 0       | 18,7    | -      | 175             |
| 13    | BUS--013--750 | 0,882  | R      | 0    | 0       | 9       | 100    | 178,3           |
| 14    | BUS--014--500 | 0,966  | P      | 0    | 0       | 10,7    | -      | 178,5           |
| 15    | BUS--015--500 | 0,876  | P      | 0    | 0       | 14,4    | -      | 169,7           |
| 16    | BUS--016--500 | 0,879  | P      | 0    | 0       | 14,7    | -      | 169,4           |
| 17    | BUS--017--500 | 0,999  | L      | 0    | 0,044   | 56,2    | 99,9   | 142,5           |
| 18    | BUS--018--500 | 1,037  | P      | 0    | 0       | 66,1    | -      | 142,2           |
| 19    | BUS--019--500 | 1,050  | L      | 0    | 14,998  | 58,5    | 74,4   | 147,3           |
| 20    | BUS--020--500 | 1,052  | P      | 0    | 0       | 57,5    | -      | 146,3           |
| 21    | BUS--021--500 | 1,074  | LR     | 0    | 0,028   | 101,6   | 100    | 122             |
| 22    | BUS--022--500 | 1,075  | LR     | 0    | 0,024   | 59,5    | 100    | 125,3           |
| 23    | BUS--023--500 | 1,066  | LR     | 0    | 6,890   | 35,5    | 80,6   | 121,7           |
| 24    | BUS--024--500 | 1,037  | P      | 0    | 0       | 19,6    | -      | 178,9           |
| 25    | BUS--025--500 | 1,093  | L      | 0    | 66,017  | 81,4    | 18,8   | 178,9           |
| 27    | BUS--027--500 | 0,991  | P      | 0    | 0       | 12,7    | -      | 178,5           |
| 28    | BUS--028--345 | 0,869  | P      | 0    | 0       | 8,2     | -      | 178,4           |
| 29    | BUS--029--345 | 0,878  | L      | 0    | 34,707  | 35,7    | 2,7    | 178,5           |
| 30    | BUS--030--345 | 0,929  | P      | 0    | 0       | 10,5    | -      | 168,1           |
| 31    | BUS--031--20  | 1,007  | GL     | 1    | 13,259  | -21,4   | -261,5 | -39,1           |
| 32    | BUS--032--20  | 1,058  | G      | 1    | 12,690  | 25,8    | 50,7   | 122,9           |
| 33    | BUS--033--20  | 1,059  | G      | 1    | 12,918  | 11,2    | -13,1  | -155,2          |
| 34    | BUS--034--20  | 1,049  | G      | 2    | 14,973  | -87,4   | -683,8 | -89,1           |



Os quatro caminhos mais carregados de transmissão conectam o gerador 34 à barra de carga 29. Era de esperar, porque o ponto de operação do caso-base foi obtido simulando-se aumentos de carga na barra 29 e o respectivo aumento de geração, assim como os acréscimos nas perdas de transmissão, foram atendidas pelo gerador da barra 34. Observa-se que o pior caminho de transmissão é composto pelos ramos que ligam as barras 34, 21, 17, 16, 30, 28, 29 porque tem a margem mais negativa com  $M = -434,57\%$ .

Tabela 3.5 Determinação dos Caminhos de Transmissão e Margens de Potência a partir do Gerador 34

| Caminhos de Transmissão   |         |          |          |
|---------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-17-16-30-28-29      |         |          |          |
|                           | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga           | 0,8798  | -64,0665 |          |
| Tensão Crítica na Geração | 3,2044  | -41,5522 |          |
|                           | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                     | 33,0112 | -8,8206  | 34,1694  |
| Geração Crítica           | 77,1904 | 20,7848  | 79,9398  |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$    | $M(\%)$  |
| Barra 34                  | 14,95   | 79,94    | -434,57  |

| Caminhos de Transmissão   |         |          |          |
|---------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-22-19-16-30-28-29   |         |          |          |
|                           | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga           | 0,8798  | -64,0665 |          |
| Tensão Crítica na Geração | 2,7587  | -38,2620 |          |
|                           | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                     | 33,0112 | -8,8206  | 34,1694  |
| Geração Crítica           | 61,2936 | 16,5043  | 63,4767  |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$    | $M(\%)$  |
| Barra 34                  | 14,95   | 63,48    | -324,48  |

| Caminhos de Transmissão                 |         |          |          |
|-----------------------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29 |         |          |          |
|                                         | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador                       | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga                         | 0,8798  | -64,0665 |          |
| Tensão Crítica na Geração               | 1,0528  | 21,4939  |          |
|                                         | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                                 | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                                   | 1,2290  | 14,4347  | 14,4869  |
| Geração Crítica                         | 14,4293 | 3,8853   | 14,9433  |
| Índices                                 | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                                | 14,95   | 14,96    | -0,07    |

| Caminhos de Transmissão              |         |          |          |
|--------------------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29 |         |          |          |
|                                      | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador                    | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga                      | 0,8798  | -64,0665 |          |
| Tensão Crítica na Geração            | 1,0611  | 20,6216  |          |
|                                      | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                              | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                                | 33,0112 | -8,8206  | 34,1694  |
| Geração Crítica                      | 14,4399 | 3,8882   | 14,9542  |
| Índices                              | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                             | 14,95   | 14,95    | 0        |

| Caminhos de Transmissão                 |         |          |          |
|-----------------------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25 |         |          |          |
|                                         | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador                       | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga                         | 1,0935  | -65,7902 |          |
| Tensão Crítica na Geração               | 1,0755  | 19,4581  |          |
|                                         | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                                 | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                                   | 22,7736 | -36,9179 | 43,3771  |
| Geração Crítica                         | 14,4631 | 3,8944   | 14,9782  |
| Índices                                 | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                                | 14,95   | 14,98    | 0,16     |

| Caminhos de Transmissão              |         |          |          |
|--------------------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25 |         |          |          |
|                                      | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador                    | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga                      | 1,0935  | -65,7902 |          |
| Tensão Crítica na Geração            | 1,0094  | 24,7873  |          |
|                                      | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                              | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                                | 22,7736 | -36,9179 | 43,3771  |
| Geração Crítica                      | 14,4959 | 3,9033   | 15,0123  |
| Índices                              | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                             | 14,95   | 15,01    | 0,39     |

| Caminhos de Transmissão           |         |          |          |
|-----------------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29 |         |          |          |
|                                   | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador                 | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga                   | 0,8798  | -64,0665 |          |
| Tensão Crítica na Geração         | 0,9984  | 25,9737  |          |
|                                   | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                           | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                             | 33,0112 | -8,8206  | 34,1694  |
| Geração Crítica                   | 14,5525 | 3,9185   | 15,0708  |
| Índices                           | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                          | 14,95   | 15,07    | 0,77     |

| Caminhos de Transmissão                    |         |          |          |
|--------------------------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29 |         |          |          |
|                                            | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador                          | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga                            | 0,8798  | -64,0665 |          |
| Tensão Crítica na Geração                  | 1,1333  | 16,0685  |          |
|                                            | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                                    | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                                      | 1,2290  | 14,4347  | 14,4869  |
| Geração Crítica                            | 14,6431 | 3,9429   | 15,1646  |
| Índices                                    | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                                   | 14,95   | 15,16    | 1,39     |

| Caminhos de Transmissão   |         |         |          |
|---------------------------|---------|---------|----------|
| 34-21-22-23               |         |         |          |
|                           | Módulo  |         | Ângulo   |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  |         | 21,7507  |
| Tensão na Carga           | 1,0667  |         | 4,8101   |
| Tensão Crítica na Geração | 0,9223  |         | 45,7923  |
|                           | Ativa   | Reativa | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882  | 14,9542  |
| Carga                     | 2,6050  | 2,2001  | 3,4098   |
| Geração Crítica           | 18,4235 | 4,9608  | 19,0797  |
|                           |         |         |          |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$   | M(%)     |
| Barra 34                  | 14,95   | 19,08   | 21,62    |

| Caminhos de Transmissão   |         |         |          |
|---------------------------|---------|---------|----------|
| 34-21-23                  |         |         |          |
|                           | Módulo  |         | Ângulo   |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  |         | 21,7507  |
| Tensão na Carga           | 1,0667  |         | 4,8101   |
| Tensão Crítica na Geração | 0,9151  |         | 47,9351  |
|                           | Ativa   | Reativa | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882  | 14,9542  |
| Carga                     | 4,1778  | 2,4216  | 4,8289   |
| Geração Crítica           | 19,4263 | 5,2309  | 20,1182  |
|                           |         |         |          |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$   | M(%)     |
| Barra 34                  | 14,95   | 20,12   | 25,67    |

### 3.2.5.3.

#### Determinação do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado

O objetivo agora é determinar analiticamente o ramo crítico do caminho de transmissão mais carregado: 34, 21, 17, 16, 30, 28, 29, definido na seção anterior.

O 1º subcaminho a ser analisado sai da barra de geração 34 para a barra 21. Pode se observar na Tabela 3.6 que a margem na barra 34 encontra-se bem afastada do ponto de operação crítico com margem positiva  $M = 76,13\%$ . A seguir, inclui-se um novo ramo e, consequentemente, o 2º subcaminho a ser analisado vai da barra 34 para a barra 21 e para a barra 17. Mais uma vez, os resultados da Tabela 3.6 mostram que a margem na barra de geração 34 encontra-se “folgada” e o ponto de operação encontra-se na parte superior da curva.

Sequencialmente, vai-se incluindo novos ramos até que na 6º e última adição inclui-se o ramo da barra 28 para a barra 29. Na Tabela 3.6, observando-se a margem para todos os subcaminhos de transmissão, verifica-se que não houve problema em transferir potência a partir do gerador 34 para as barras 21, 17, 16, 30, já que as margens são positivas. Observa-se margem negativa somente quando da adição do 5º ramo, entre as barras 30 e 28, e quando da adição do 6º e último ramo, entre as barras 28 e 29. Comparando-se as margens, conclui-se que a margem mais negativa ocorre quando da adição do ramo entre as barras 28 e 29. Esse é, então, o ramo crítico que deveria ter seu fluxo de potência diminuído.

Tabela 3.6 Determinação dos Subcaminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado e Margens de Potência a partir do Gerador 34

| Caminhos de Transmissão   |         |         |          |
|---------------------------|---------|---------|----------|
| 34-21                     |         |         |          |
|                           | Módulo  | Ângulo  |          |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  | 21,7507 |          |
| Tensão na Carga           | 1,0746  | 12,9358 |          |
| Tensão Crítica na Geração | 0,8437  | 65,8870 |          |
|                           | Ativa   | Reativa | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882  | 14,9542  |
| Carga                     | 14,4063 | 1,5791  | 14,4926  |
| Geração Crítica           | 60,4857 | 16,2868 | 62,6400  |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$   | $M(\%)$  |
| Barra 34                  | 14,95   | 62,64   | 76,13    |

| Caminhos de Transmissão   |         |         |          |
|---------------------------|---------|---------|----------|
| 34-21-17                  |         |         |          |
|                           | Módulo  | Ângulo  |          |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  | 21,7507 |          |
| Tensão na Carga           | 0,9991  | 9,1583  |          |
| Tensão Crítica na Geração | 0,8888  | 55,1092 |          |
|                           | Ativa   | Reativa | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882  | 14,9542  |
| Carga                     | 3,5044  | 4,4110  | 5,6336   |
| Geração Crítica           | 24,9551 | 6,7196  | 25,8439  |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$   | M(%)     |
| Barra 34                  | 14,95   | 25,84   | 42,14    |

| Caminhos de Transmissão   |         |          |          |
|---------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-17-16               |         |          |          |
|                           | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga           | 0,8802  | -12,8184 |          |
| Tensão Crítica na Geração | 0,9276  | 40,7058  |          |
|                           | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                     | 17,0240 | 1,6705   | 17,1058  |
| Geração Crítica           | 16,7864 | 4,5200   | 17,3843  |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                  | 14,95   | 17,38    | 13,98    |

| Caminhos de Transmissão   |         |          |          |
|---------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-17-16-30            |         |          |          |
|                           | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga           | 0,9302  | -17,0673 |          |
| Tensão Crítica na Geração | 0,9660  | 32,1939  |          |
|                           | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                     | 6,3301  | 0,4958   | 6,3495   |
| Geração Crítica           | 15,0939 | 4,0643   | 15,6315  |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                  | 14,95   | 15,63    | 4,33     |

| Caminhos de Transmissão   |         |          |          |
|---------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-17-16-30-28         |         |          |          |
|                           | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga           | 0,8705  | -58,9846 |          |
| Tensão Crítica na Geração | 3,0419  | -40,1068 |          |
|                           | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                     | 5,5300  | -1,5689  | 5,7482   |
| Geração Crítica           | 69,9362 | 18,8315  | 72,4271  |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                  | 14,95   | 72,43    | -384,33  |

| Caminhos de Transmissão   |         |          |          |
|---------------------------|---------|----------|----------|
| 34-21-17-16-30-28-29      |         |          |          |
|                           | Módulo  | Ângulo   |          |
| Tensão no Gerador         | 1,0490  | 21,7507  |          |
| Tensão na Carga           | 0,8798  | -64,0665 |          |
| Tensão Crítica na Geração | 3,2044  | -41,5522 |          |
|                           | Ativa   | Reativa  | Aparente |
| Geração                   | 14,4398 | 3,8882   | 14,9542  |
| Carga                     | 33,0112 | -8,8206  | 34,1694  |
| Geração Crítica           | 77,1904 | 20,7848  | 79,9398  |
| Índices                   | $S_i$   | $S_m$    | M(%)     |
| Barra 34                  | 14,95   | 79,94    | -434,57  |

### 3.3. Análises dos Índices de Estabilidade de Tensão

A barra tem índices positivos quando avaliada com todo o sistema. Quando o sistema é separado em subsistemas, todos contendo a barra em análise, pode ocorrer, para um ou mais subsistemas, que os índices da barra fiquem negativos.

Um exemplo muito simples é um sistema de três barras com dois geradores e uma carga como mostrado na Figura 3.11. O ponto de operação e os parâmetros são mostrados nas Tabelas 3.7 e 3.8.

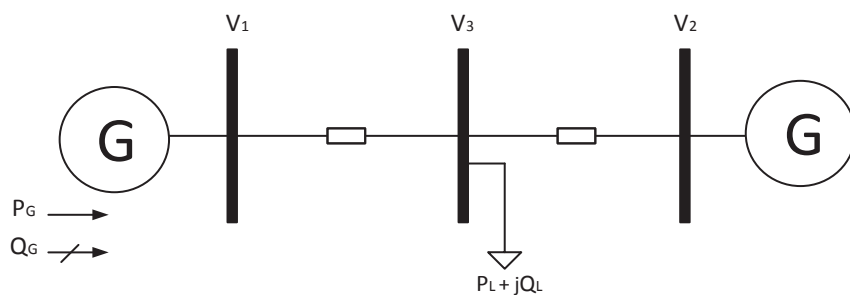


Figura 3.11 Sistema de Três Barras com Dois Geradores

Tabela 3.7 Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 3.11

| Barra | Tipo       | Tensão | Ângulo | Geração |         | Carga |         |
|-------|------------|--------|--------|---------|---------|-------|---------|
|       |            |        |        | P(Mw)   | Q(Mvar) | P(Mw) | Q(Mvar) |
| 1     | V $\theta$ | 1,1    | 0      | -       | -       | -     | -       |
| 2     | PV         | 0,8    | 0      | -       | -       | -     | -       |
| 3     | PQ         | 1      | 0      | 10      | -       | 432   | 86,4    |

| Nó Inicial | Nó Final | Resistência (pu) | Reatância (pu) | Susceptância |
|------------|----------|------------------|----------------|--------------|
| 1          | 3        | 0,0342           | 0,09395        | -            |
| 2          | 3        | 0,0684           | 0,1879         | -            |

Tabela 3.8 Valores de Tensão, Potência Líquida nas Barras e Fluxos de Potência nas Linhas do Sistema da Figura 3.11

| Barra (i) | V      | Ângulo | $P_i(\text{MW})$ | $Q_i(\text{Mvar})$ |
|-----------|--------|--------|------------------|--------------------|
| 1         | 1,1    | 0      | 589,53           | 474,47             |
| 2         | 0,8    | -38,35 | 10               | 72,15              |
| 3         | 0,6232 | -34,83 | -432             | -86,4              |

| Nó Inicial | Nó Final | $P_{iF}(\text{MW})$ | $Q_{iF}(\text{Mvar})$ | $P_{Fi}(\text{MW})$ | $Q_{Fi}(\text{Mvar})$ |
|------------|----------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 1          | 3        | 589,53              | 474,47                | -427,67             | -29,83                |
| 2          | 3        | 10                  | 72,15                 | -4,33               | -56,57                |

Para o sistema completo, os índices da barra 3 de carga são  $M = 1,37\%$ ,  $\beta = 179,23$ .

Separando em dois subsistemas, um deles com as barras 1 e 3 e a carga igual ao negativo do fluxo de potência que chega na barra 3 vindo da barra 1, e o outro com as barras 2 e 3 e carga igual ao negativo do fluxo de potência que chega na barra 3 vindo da barra 2, os índices da barra 3 são  $M = -9,39\%$ ,  $\beta = -6,33$  para o sistema com as barras 1 e 3 e  $M = 70,79\%$ ,  $\beta = 93,32$  para o sistema com as barras 2 e 3.

O sistema completo e os dois subsistemas são diferentes, exceto as tensões nas barras e os fluxos nas linhas. É de se esperar que os índices da barra 3 sejam diferentes, já que eles dependem da matriz  $Y_{\text{barra}}$  do sistema ou subsistema.

### 3.4. Conclusões

Utilizou-se o conceito de margem de potência para avaliação dos índices de estabilidade de tensão, comparando a carga ou geração em um determinado ponto de operação, com a carga ou geração máxima que poderia chegar à barra de carga ou sair da barra de geração.

Concluiu-se que o caminho de transmissão mais carregado é aquele que apresenta a menor margem entre a carga no ponto de operação em análise e a carga máxima que poderia ser atendida naquela barra, quando a barra crítica é de carga. No caso de barra crítica de geração, o caminho de transmissão mais carregado é aquele que apresenta a menor margem entre a geração no ponto de operação em análise e a geração máxima que poderia ser atendida naquela barra.

Determinou-se que o ramo procurado é aquele que, quando adicionado, corresponde aos piores índices, sem importar se a barra em análise é de carga ou geração.

Foi demonstrado que, ainda que a barra em análise tenha índices positivos, quando avaliada com todo o sistema, quando o sistema é separado em subsistemas, todos contendo a barra em análise, pode ocorrer que os índices da barra fiquem negativos, já que eles dependem da matriz  $Y_{barra}$  do sistema ou subsistema.