

4

Determinação da Sub-Rede, Avaliação do Caminho e do Ramo de Transmissão mais Carregado: Novas Ideias

Uma vez avaliado o carregamento do sistema e detectada uma barra crítica, seja de carga ou geração, deve-se identificar a parte do sistema utilizada para transferir potência ativa de geradores para essa barra, se fora de carga, ou para transferir potência ativa para barras de carga, se a barra crítica fora de geração.

4.1. Determinação da Sub-Rede

4.1.1. Barra Crítica de Tensão Controlada

A avaliação das condições de carregamento da rede em barras de tensão controlada é muito importante. Como o problema de estabilidade de tensão se manifesta com efeitos de ações de controle de tensão opostos ao usual, é necessário verificar se o ponto de operação em análise está na parte superior ou inferior da curva ϕ constante no plano SV. Dado o contexto apresentado, apresenta-se uma proposta para determinar a sub-rede quando a barra crítica é uma barra de tensão controlada por compensador síncrono ou estático.

Com o objetivo de determinar a sub-rede quando a barra crítica é uma barra de tensão controlada por compensador foram feitos testes com os sistemas das Figuras 4.1 e 4.2.

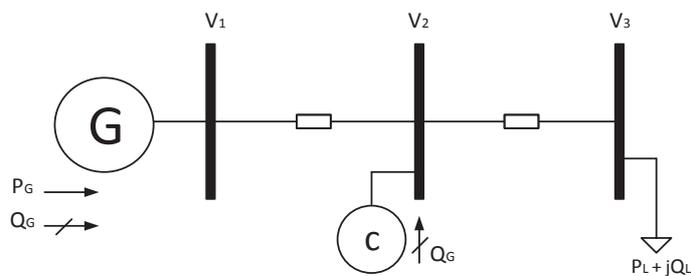


Figura 4.1 Sistema de Três Barras

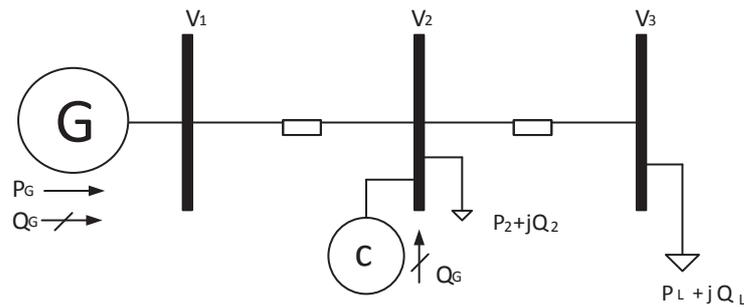


Figura 4.2 Sistema de Três Barras com Carga na Barra de Tensão Controlada

Para fazer a avaliação das condições de estabilidade de tensão, se criaram duas situações diferentes. Na Figura 4.1 tem-se um sistema de três barras com uma grande carga na barra 3 com parcela reativa igual a ativa. A impedância dos ramos de transmissão entre as barras 1 e 2 e entre as barras 2 e 3 é a mesma. O sistema fica muito carregado, tendo críticas a barra de tensão controlada e a barra de carga, como será visto.

Na Figura 4.2 tem-se um sistema de três barras, com uma grande carga na barra 2 e uma carga pequena na barra 3. A impedância do ramo de transmissão entre as barras 1 e 2 é bem maior do que a impedância do ramo de transmissão entre as barras 2 e 3, o que dificulta a transmissão de potência da barra 1 para a barra 2, levando essas barras a se tornarem barras críticas, como será visto.

Os dados de linha e barra de ambos os sistemas são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.1

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	Geração		Carga	
				P(Mw)	Q(Mvar)	P(Mw)	Q(Mvar)
1	V θ	1	0	-	-	-	-
2	PV	1	0	-	-	-	-
3	PQ	1	0	-	-	185,4	185,4

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

Tabela 4.2 Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.2

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	Geração		Carga	
				P(Mw)	Q(Mvar)	P(Mw)	Q(Mvar)
1	V θ	1	0	-	-	-	-
2	PV	1	0	-	-	305,095	104
3	PQ	1	0	-	-	20	10

Nó Inicial	Nó Final	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância
1	2	0,0684	0,1879	-
2	3	0,00342	0,009395	-

As condições de estabilidade de tensão foram avaliadas em todas as barras dos sistemas das Figuras 4.1 e 4.2. Para o cálculo dos índices na barra 1, foi necessário adicionar uma barra fictícia encarregada de assumir as variações de potência do sistema. A barra encontra-se ligada à barra 3 por meio de uma linha de transmissão com resistência igual a zero e com um valor muito pequeno de reatância.

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 se apresentam os resultados obtidos no algoritmo de fluxo de carga e a avaliação das condições de estabilidade de tensão do sistema da Figura 4.1.

Tabela 4.3 Valores de Tensão e Potência Líquida do Sistema da Figura 4.1

Barras	V	Ângulo	P _i	Q _i
1	1	0	303,934	-59,605
2	1	-17,8	0	570,628
3	0,5237	-30,02	-185,4	-185,4

Tabela 4.4 Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema da Figura 4.1

Tipo Barra	No Barra	M (%)	β (pu)	S _m (pu)	S _i (pu)
SW	1	53,3224	112,601	6,6354	3,0972
PV	2	-862,32	-8,159	-43,5	5,7063
PQ	3	2,7360	174,7795	2,6957	2,6220

Os resultados permitem observar que os índices de estabilidade de tensão na barra 1 se encontram em valores aceitáveis: não existe nenhum problema em transferir potência ativa da barra 1 para a barra 2.

Os índices da barra 2 estão deteriorados, com o compensador sendo o responsável por gerar a potência reativa consumida no sistema. Pode se observar que a margem e o ângulo β desta barra são negativos.

A margem da barra 3 é mínima e o ângulo β tende a 180° . Assim, o sistema tem como barras críticas as barras 2 e 3. O problema é na transmissão de potência da barra 2 para a barra 3, devido ao suprimento de potência reativa da barra 2 para a grande parcela de potência reativa da carga da barra 3.

Levando em conta os resultados apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, é possível concluir que a determinação da sub-rede deve partir da barra crítica de tensão controlada, barra 2, e chegar até a barra de carga crítica 3.

Não teria sentido determinar a sub-rede a partir da barra 2 e chegar até a barra de geração, barra 1, pois não existe nenhum problema na transmissão de potência de 1 para 2. O objetivo final é diminuir o fluxo de potência do caminho mais carregado, fazendo com que os índices das barras críticas voltem a valores aceitáveis.

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 são apresentados os resultados obtidos no algoritmo de fluxo de carga e na avaliação das condições de estabilidade de tensão do sistema da Figura 4.2.

Tabela 4.5 Valores de Tensão e Potência Líquida do Sistema da Figura 4.2

Barras	V	Ângulo	P_i	Q_i
1	1	0	510,9339	103,0715
2	1	-62,82	-305,089	417,457
3	0,9984	-62,9	-20	-10

Tabela 4.6 Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema da Figura 4.2

Tipo Barra	No Barra	M (%)	β (pu)	S_m (pu)	S_i (pu)
SW	1	-4,0160	-2,5435	5,0029	5,2123
PV	2	-4,1259	-7,4078	4,9573	5,1706
PQ	3	97,2433	103,6449	8,1113	0,2236

Na barra 3 deste sistema tem uma pequena carga. A impedância da linha entre as barras 2 e 3 é muito pequena. Pode se dizer que não existe dificuldade de transferir potência ativa e reativa da barra 2 para a barra 3. Os índices de avaliação das condições de estabilidade de tensão da barra 3, se encontram em valores aceitáveis.

Na Tabela 4.6 pode se observar que os índices da barra 1 e da barra 2 estão deteriorados. Na barra 2 há uma grande carga. Além disso, o compensador está sendo responsável por gerar a potência reativa consumida no sistema. Seus índices são negativos.

A transmissão de potência da barra 1 para a barra 2 é difícil porque a impedância do ramo de transmissão é grande. Assim, o sistema fica muito carregado: a margem da barra 1 e o ângulo β são negativos.

Os resultados obtidos permitem concluir que a determinação da sub-rede deve iniciar na barra crítica de tensão controlada, barra 2, e terminar na barra de geração 1.

Não teria sentido determinar a sub-rede a partir da barra 2 e chegar até a barra de carga 3, pois não existe nenhum problema na transmissão de potência de 2 para 3. O problema é na transmissão de potência ativa da barra 1 para a barra crítica de tensão controlada 2.

4.1.1.1. Sistema de Grande Porte

No item anterior foi determinado o cálculo da sub-rede para barra crítica de tensão controlada num sistema de três barras, levando em consideração duas situações. A determinação da sub-rede foi feita primeiro para o sistema da Figura 4.1 e, depois, para o sistema da Figura 4.2.

Num sistema pequeno é possível encontrar de forma quase instantânea a parte do sistema que está tendo problemas em transmitir e/ou receber potência desde a barra crítica de tensão controlada. No entanto, é preciso determinar o cálculo da sub-rede para um sistema de grande porte.

Neste caso, se considera necessário observar os índices das barras que se encontram adjacentes à barra crítica, seja de carga e/ou geração. Devem-se determinar quais barras têm valores deteriorados e que afetam os índices da barra de tensão controlada.

A sub-rede é determinada levando em conta a parte do sistema que tem dificuldade em transmitir potência ativa para a barra de tensão controlada (barra crítica como “barra de carga”, recebendo potência ativa), e/ou em receber potência ativa a partir da barra de tensão controlada (barra crítica como “barra de geração”, entregando potência ativa).

4.1.1.2. Exemplo Numérico

Na Figura 4.3 apresenta-se o diagrama unifilar do sistema de 34 barras utilizado nos exemplos do Capítulo 3. A barra 16 por ser uma barra de tensão controlada foi escolhida como a barra crítica em análise.

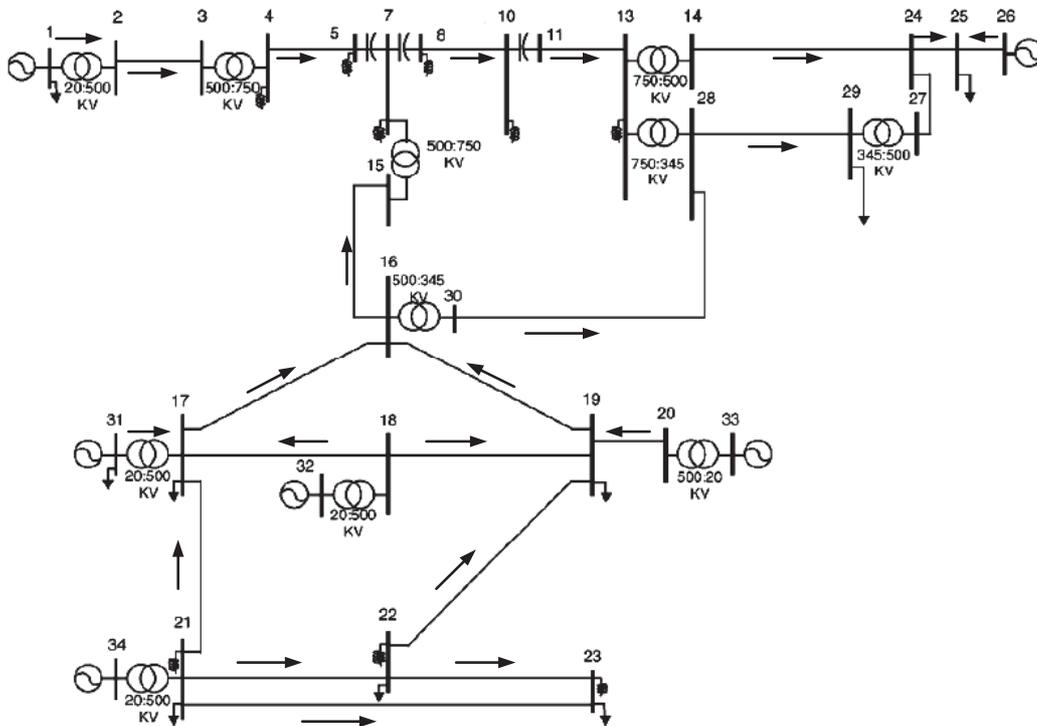


Figura 4.3 Fluxo de Potência Ativa no Sistema de 34 Barras

A direção dos fluxos de potência ativa está indicada no diagrama. É fácil verificar na Figura 4.3 a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa a partir da barra 16 (barra crítica como barra de geração) até as barras de carga 29 e 25, e a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa desde os geradores 31, 32, 33 e 34 até a barra 16 (barra crítica como barra de carga).

As sub-redes determinadas são apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5 respectivamente.

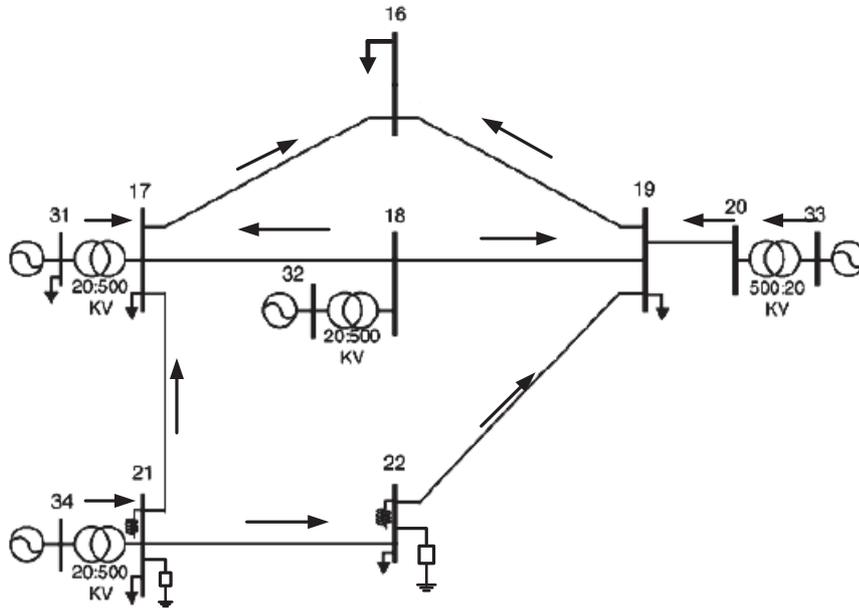


Figura 4.4 Sub-rede Determinada para Barra Crítica de Carga

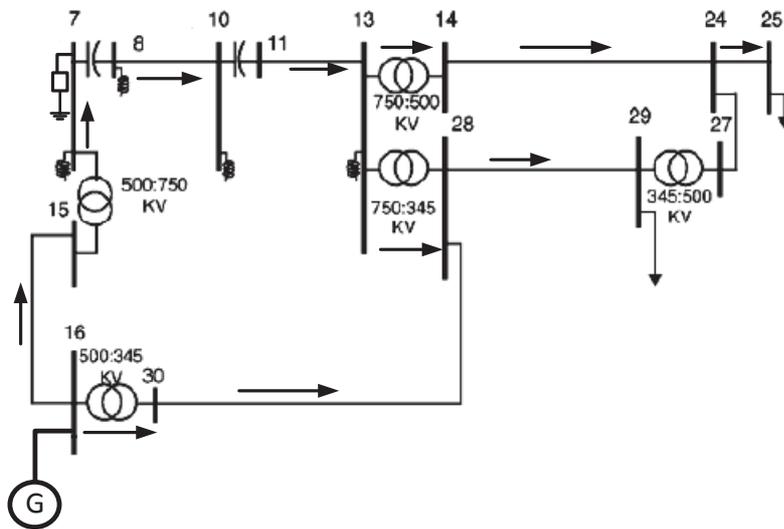


Figura 4.5 Sub-rede Determinada para Barra Crítica de Geração

Para definir qual das duas sub-redes determinadas está tendo problemas em transmitir ou receber potência foram propostas duas soluções. A primeira solução consiste na avaliação dos índices de estabilidade de tensão na barra crítica de cada

sub-rede, comparando os valores de M e β obtidos. A partir desta comparação, é escolhida a sub-rede cuja barra crítica apresente a menor margem.

A segunda solução proposta é identificar e avaliar os caminhos de transmissão que compõem cada sub-rede. Determina-se o caminho mais carregado em cada sub-rede e comparam-se os índices de estabilidade de tensão. A partir da comparação, é escolhida a sub-rede cujo caminho de transmissão apresente a menor margem.

O procedimento de avaliação dos caminhos das sub-redes será feito na Seção 4.2.

Na Tabela 4.7, são apresentados os resultados dos índices de estabilidade de tensão obtidos na avaliação da barra crítica (barra 16) das sub-redes determinadas.

Pode-se observar que os valores das margens nas duas sub-redes são positivos e o ponto de operação se encontra afastado do ponto crítico.

A sub-rede escolhida por apresentar menor margem, é a sub-rede onde a barra 16 é considerada como de carga com um valor de 27,51%.

Tabela 4.7 Índices de Estabilidade de Tensão das Sub-redes
Determinadas para a Barra 16

Barra 16	S_m (pu)	S_i (pu)	M (%)	β
Sub-rede Geração	45,09	29,56	34,45	152,15
Sub-rede Carga	40,77	29,56	27,51	138,82

4.1.2. Barra Crítica de Carga

Como já foi apresentado no Capítulo 3, para determinar a sub-rede é preciso 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].

Com o objetivo de observar se a sub-rede deve chegar até uma barra geradora de potência ativa m [4], ou se a busca pode e/ou deve terminar em barras de tensão controlada, foram feitos testes para o sistema da Figura 4.6.

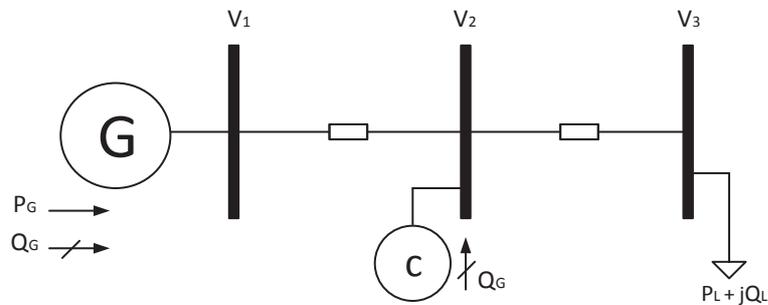


Figura 4.6 Sistema de Três Barras

Na Figura 4.6 mostra-se um sistema composto por uma barra *swing*, uma barra de tensão controlada por meio de um compensador síncrono e uma barra crítica de carga, isto é, a barra em análise.

A avaliação das condições de estabilidade de tensão foi feita primeiro com o sistema da Figura 4.6, e depois com o sistema da Figura 4.7.

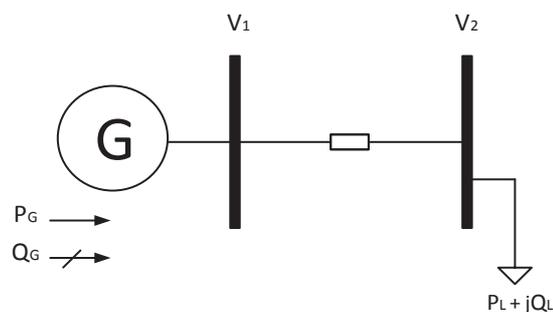


Figura 4.7 Sistema de Duas Barras

Nas Tabelas 4.8 e 4.9 apresentam-se os dados de barra e linha dos sistemas das Figuras 4.6 e 4.7 com os quais foram feitos os testes.

Tabela 4.8 Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.6

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	Geração		Carga	
				P(Mw)	Q(Mvar)	P(Mw)	Q(Mvar)
1	V θ	1	0	-	-	-	-
2	PV	1	0	-	-	-	-
3	PQ	1	0	-	-	185,49	185,49

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

Tabela 4.9 Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.7

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	Geração		Carga	
				P(Mw)	Q(Mvar)	P(Mw)	Q(Mvar)
1	V θ	1	0	-	-	-	-
3	PQ	1	0	-	-	185,49	185,49

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

Observa-se que a carga é a mesma nos dois sistemas, assim como a tensão controlada na barra 2 do sistema da Figura 4.6 e da barra 1 da Figura 4.7, além das impedâncias dos ramos de transmissão entre as barras 2 e 3 do sistema da Figura 4.6 e entre as barras 1 e 2 do sistema da Figura 4.7.

Partindo de um valor inicial de potência ativa e reativa para a carga, mantendo o mesmo fator de potência ($\phi=45^\circ$), aumentou-se a potência consumida pela carga do sistema de três barras. Para cada aumento, a estimativa inicial foi o ponto de operação anterior onde o algoritmo de fluxo de carga convergiu. O procedimento foi feito até atender a carga máxima permitida para aquela barra de carga. O mesmo procedimento foi aplicado ao sistema de duas barras.

Nas Tabelas 4.10 e 4.11 são mostrados os resultados obtidos e, como pode ser observado nas duas tabelas, a máxima potência que pode ser transferida para a barra de carga é a mesma para os dois sistemas. O ponto de operação encontra-se muito próximo ao ponto de operação correspondente ao máximo carregamento, ou seja, não é possível aumento de carga para os sistemas analisados.

A título de comparação, os sistemas da Figura 4.6 e da Figura 4.7 foram analisados com o método da matriz D' , lembrando que para um sistema de duas barras, o $\text{Det } J = \text{Det } D = \text{Det } [10]$. Observa-se que os valores do determinante da matriz D são muito próximos de zero, assim como as margens de potência de ambos os sistemas. Esses valores podem ser considerados nulos tendo em conta os erros numéricos nos cálculos.

Tabela 4.10 Avaliação do Sistema da Figura 4.6

Barra	Tensão	Ângulo	S_i	S_m	M (%)	Det D'	Max Carga	
							P(Mw)	Q(Mvar)
1	1	0	-	-	0	-	-	-
2	1	-18,1084	-	-	-6643	-	-	-
3	0,5123	-30,6029	2,6233	2,6289	0,215	-0,06295	185,4989	185,4989

Tabela 4.11 Avaliação do Sistema da Figura 4.7

Barra	Tensão	Ângulo	S_i	S_m	M (%)	Det D'	Max Carga	
							P(Mw)	Q(Mvar)
1	1	0	-	-	0	-	-	-
2	0,5123	-12,4945	2,6233	2,6250	0,0649	0,01743	185,4989	185,4989

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que, para determinar a sub-rede quando a barra crítica é uma barra de carga, não é necessário chegar até uma barra geradora m de potência ativa, a busca pode terminar em barras de tensão controlada, seja por meio de compensador síncrono/estático ou de LTC.

4.1.2.1. Teste de Reafirmação

Com o objetivo de reafirmar que o cálculo da sub-rede pode terminar em barras de tensão controlada quando a barra crítica é uma barra de carga, foi feito mais um teste com o sistema da Figura 4.6, adicionando uma carga consumidora de potência ativa na barra de tensão controlada, ocasionando assim um incremento na potência gerada pela barra *swing*, como se mostra na Figura 4.8.

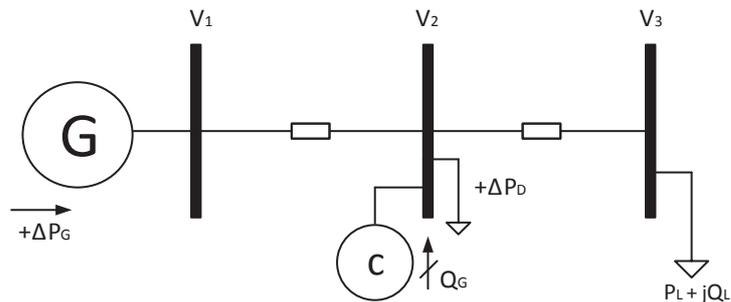


Figura 4.8 Sistema de Três Barras com Variação de Carga na Barra de Tensão Controlada

A ideia é constatar que os índices da barra são os mesmos quando os fluxos de potência ativa e reativa que saem da barra de tensão controlada para a barra crítica de carga permanecem inalterados, ainda que existam modificações na parte do sistema que compreende a barra *swing* e a barra de tensão controlada.

Nas Tabelas 4.12 e 4.13 são apresentados os resultados do algoritmo de fluxo de carga para os sistemas das Figuras 4.6 e 4.8 respectivamente.

Tabela 4.12 Valores de Tensão, Potência Líquida nas Barras e Fluxos de Potência nas Linhas do Sistema da Figura 4.6

Barra (i)	V	Ângulo	P_i (MW)	Q_i (Mvar)
1	1	0	309,0662	-59,7882
2	1	-18,11	0	584,7363
3	0,5123	-30,60	-185,49790	-185,4979

Nó Inicial	Nó Final	P_{IF} (MW)	Q_{IF} (Mvar)	P_{FI} (MW)	Q_{FI} (Mvar)
1	2	309,0662	-59,7882	-275,1752	152,8894
2	3	275,1747	431,8469	-185,4979	-185,4979

Tabela 4.13 Valores de Tensão, Potência Líquida nas Barras e Fluxos de Potência nas Linhas do Sistema da Figura 4.8

Barra (i)	V	Ângulo	P_i (MW)	Q_i (Mvar)
1	1	0	334,7406	-60,3075
2	1	-19,58	-20	600,8435
3	0,5123	-32,07	-185,4979	-185,4979

Nó Inicial	Nó Final	P_{iF} (MW)	Q_{iF} (Mvar)	P_{Fi} (MW)	Q_{Fi} (Mvar)
1	2	334,7406	-60,3075	-295,1752	168,9966
2	3	275,1747	431,8469	-185,4979	-185,4979

É possível observar nas Tabelas 4.12 e 4.13 que os fluxos de potência ativa e reativa na linha entre as barras 2 e 3 de ambos os sistemas permanecem iguais, ou seja, os fluxos chegando na barra crítica de carga ficam inalterados.

A avaliação das condições de estabilidade de tensão foi feita para os sistemas da Figura 4.6 e 4.8. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 Índices na Barra Três para os Sistemas das Figuras 4.6 e 4.8

	Barra	DetD'	M (%)	β	S_i (pu)	S_m (pu)
Caso-Base	3	-0,063	0,21519	-0,4654	2,6233	2,629
+ ΔP_D	3	-0,062	0,21709	-0,4654	2,6233	2,629

Observa-se que os índices de estabilidade de tensão continuam sendo mínimos. Pode se dizer que o concluído na Seção 4.1.2 foi reafirmado.

4.1.3. Barra Crítica de Geração

A determinação da sub-rede quando a barra crítica é uma barra de geração foi apresentada no Capítulo 3. No entanto, com o objetivo de observar se a sub-rede deve chegar até uma barra de carga [7], ou se a busca pode e/ou deve terminar em barras de tensão controlada, foram feitos testes para o sistema da Figura 4.6. Considera-se a barra 1 como barra de geração crítica.

Com a finalidade de calcular os índices da barra 1, foi adicionada uma barra de geração fictícia ao sistema da Figura 4.6, obtendo assim um sistema de 4 barras como se mostra na Figura 4.9. A barra fictícia encontra-se ligada à barra dois por meio de uma linha de transmissão com resistência igual a zero e com um valor muito pequeno de reatância.

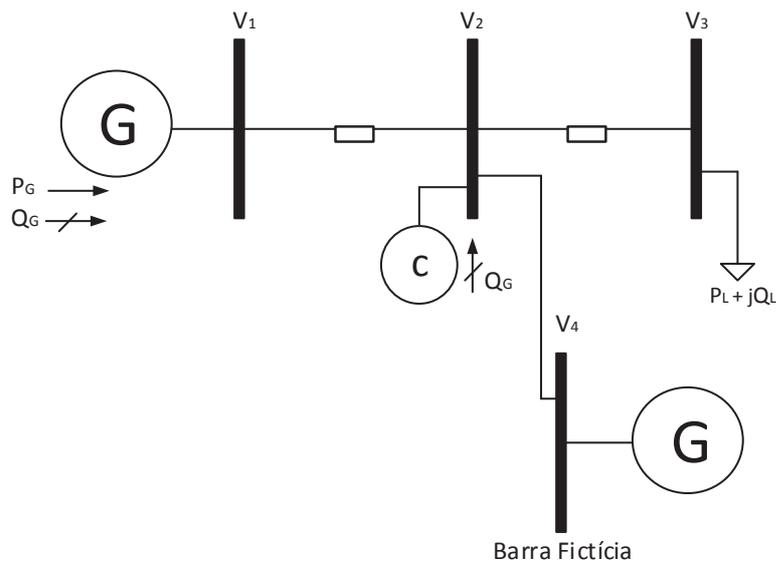


Figura 4.9 Sistema de Três Barras com Barra Fictícia Adicionada

A avaliação das condições de estabilidade de tensão foi feita primeiro com o sistema da Figura 4.9, e depois com o sistema mostrado na Figura 4.10, com a barra de geração fictícia, a barra *swing* como barra crítica e a barra tensão controlada por compensador síncrono à qual foi adicionada uma carga equivalente ao fluxo da barra 2 para a barra 1, como se mostra na Figura 4.10.

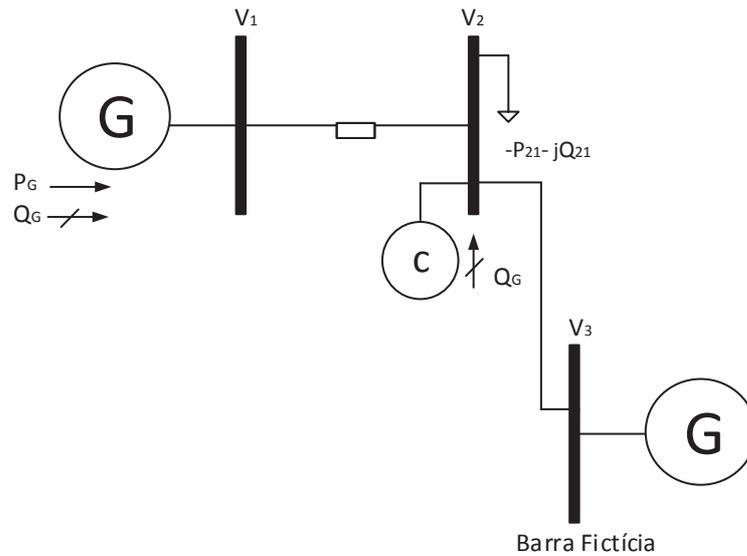


Figura 4.10 Sistema de Duas Barras com a Barra Fictícia Adicionada

Os dados de barra e linha dos sistemas das Figuras 4.9 e 4.10 se apresentam nas Tabelas 4.15 e 4.16 respectivamente.

Tabela 4.15 Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.9

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	Geração		Carga	
				P(Mw)	Q(Mvar)	P(Mw)	Q(Mvar)
1	V θ	1	0	-	-	-	-
2	PV	1	0	-	-	-	-
3	PQ	1	0	-	-	165	165
4	PQ	0,7	0,710	-	-	-	-

Nó Inicial	Nó Final	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância
1	2	0,0342	0,09395	-
2	3	0,0342	0,09395	-
2	4	0	0,00469	-

Tabela 4.16 Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.10

Barra	Tipo	Tensão	Ângulo	Geração		Carga	
				P(Mw)	Q(Mvar)	P(Mw)	Q(Mvar)
1	V θ	1	0	-	-	-	-
2	PV	1	0	-	-	205,6276	-102,991
3	PQ	1	0	-	-	-	-

Nó Inicial	Nó Final	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância
1	2	0,0342	0,09395	-
2	3	0	0,00469	-

Nas Tabelas 4.17 e 4.18 pode se observar que, os índices calculados para a barra 1 são iguais em ambos os sistemas.

Tabela 4.17 Índices do Sistema da Figura 4.9

Tipo Barra	No Barra	M (%)	β
PQ	1	76,58	112,23
PV	2	40,760	151,8530
PQ	3	37,93	127,885
SW	4	-	-

Tabela 4.18 Índices do Sistema da Figura 4.10

Tipo Barra	No Barra	M (%)	β
PQ	1	76,58	112,23
PV	2	77,007	108,4469
SW	3	-	-

Os resultados permitem concluir que, para determinar a sub-rede quando a barra crítica é uma barra de geração, não é preciso chegar até barras de carga m, a busca pode terminar em barras de tensão controlada.

Não foi possível imaginar um teste para reconfirmação, como feito quando a barra crítica era de carga.

4.2. Uso dos Índices para Determinação do Caminho mais Carregado

O objetivo desta seção é apresentar duas modificações do método para encontrar o caminho mais carregado. O propósito da primeira modificação é determinar o caminho mais carregado sem fazer uso dos circuitos equivalentes de duas barras, como foi descrito na Seção 3.1. Nesse caso, usa-se admitâncias equivalentes para isolar a sub-rede e os caminhos. O propósito da segunda modificação é determinar o caminho mais carregado utilizando injeções de potência para isolar a sub-rede e os caminhos. Nesse caso, sem fazer uso dos circuitos equivalentes de duas barras.

4.2.1. Não-Uso de Equivalentes

Uma vez determinada a sub-rede, o procedimento seguinte é identificar e avaliar todos os caminhos de transmissão para as barras críticas de carga, geração e tensão controlada, levando em consideração os resultados obtidos na Seção 4.1.

Na Seção 3.1.2 foi apresentado o método para identificar os caminhos de transmissão que compõem a sub-rede. Após determinar os caminhos, o isolamento de cada um é feito convertendo em admitâncias os fluxos de potência ativa e reativa que entram e saem do caminho em suas barras intermediárias. Para determinar as condições de carregamento, eliminam-se as barras intermediárias, resultando em um sistema de duas barras. Usam-se as fórmulas analíticas para verificar a margem de potência.

Por outro lado, quando da análise do sistema completo para determinação da barra crítica, a redução da rede não foi utilizada. O método da matriz $[D']$ e seus índices M e β foram utilizados. Assim, para manter coerência, o caminho de transmissão não será reduzido a duas barras. Os índices serão calculados na barra em análise considerando o caminho completo.

O caminho de transmissão mais carregado é aquele que apresenta a menor margem.

A comparação dos resultados obtidos com e sem essa mudança será apresentada na Seção 4.2.1.2.

4.2.1.1. Exemplo Numérico

a) Barra Crítica de Tensão Controlada

Nas Tabelas 4.19 e 4.20 se apresenta os resultados com a determinação dos caminhos de transmissão a partir da barra 16 e das respectivas margens de potência. Foram encontrados seis caminhos para a barra 16 avaliada como barra crítica de carga e quatro caminhos para a barra 16 avaliada como barra crítica de geração, mostrados em ordem a partir da pior margem de potência.

O sinal negativo da margem indica operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV.

Tabela 4.19 Determinação dos Caminhos de Transmissão da Barra 16 Avaliada como Barra Crítica de Carga

Caminhos de Transmissão				16LA
34-21-17-16				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	17,03	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	12,98	-24,16	

Caminhos de Transmissão				16LD
32-18-19-16				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,13	12,69	
Carga	11,84	4,62	12,71	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	16,48	22,87	

Caminhos de Transmissão				16LB
34-21-22-19-16				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	11,84	4,625	12,72	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	12,34	-2,93	

Caminhos de Transmissão				16LE
31-17-16				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	13,18	-1,42	13,26	
Carga	17,03	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	23,58	27,42	

Caminhos de Transmissão				16LC
32-18-17-16				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,12	12,69	
Carga	17,02	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	19,58	12,62	

Caminhos de Transmissão				16LF
33-20-19-16				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,78	12,91	
Carga	11,84	4,62	12,71	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	20,17	36,96	

Na Tabela 4.19 observa-se o resultado das avaliações feitas nos seis caminhos de transmissão encontrados para a barra de 16 como barra crítica de carga. Os dois caminhos de transmissão com pior margem envolvem o gerador 34 com a barra 16. Os dois caminhos seguintes conectam ao gerador 32 com a barra 16; o seguinte conecta a barra de carga 16 ao gerador 31, e o sexto e último caminho conecta a barra de carga 16 ao gerador 33.

O caminho de transmissão que apresenta o pior resultado, ou seja, a margem mais negativa é o caminho 16LA ($M = -24,16\%$) composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-17-16.

Tabela 4.20 Determinação dos Caminhos de Transmissão da Barra 16 Avaliada como Barra Crítica de Geração

Caminhos de Transmissão				16GA
16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	1,24	14,48	14,54	
Índices				
	S_i	S_m	$M(\%)$	
Barra 16	23,16	20,91	-9,74	

Caminhos de Transmissão				16GC
16-15-7-8-10-11-13-14-24-25				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	22,76	-37,15	43,57	
Índices				
	S_i	S_m	$M(\%)$	
Barra 16	23,16	36,3	36,18	

Caminhos de Transmissão				16GB
16-30-28-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	6,33	0,99	6,4	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	$M(\%)$	
Barra 16	6,4	7,42	13,62	

Caminhos de Transmissão				16GD
16-15-7-8-10-11-13-28-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	$M(\%)$	
Barra 16	23,16	42,52	45,52	

Na Tabela 4.20 se apresentam os resultados dos quatro caminhos de transmissão encontrados para a barra 16 avaliada como barra crítica de geração. Os dois caminhos mais carregados envolvem a barra crítica com a barra de carga 29. É possível observar que o caminho de transmissão que apresenta a pior margem é o caminho 16GA ($M = -9,74\%$) composto pelos ramos que ligam as barras 16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29.

Fazendo uma comparação dos resultados das margens obtidos nas avaliações dos caminhos de transmissão 16LA e 16GA é possível determinar qual caminho está tendo dificuldade em transmitir potência ativa e reativa desde/para barra 16.

O caminho que apresenta a pior margem é o caminho 16LA com uma margem de -24,16%. Pode se afirmar que, das duas sub-rede determinadas na Seção 4.1.1, a sub-rede escolhida por apresentar problemas em transferir potência ativa e reativa é a sub-rede de carga, isto é, a sub-rede usada para transferir potência ativa de geradores para a barra 16.

b) Barra Crítica de Carga

Na Tabela 4.21 são apresentados os resultados das avaliações feitas nos vinte caminhos de transmissão encontrados para a barra 29 como barra crítica. As margens são apresentadas em ordem a partir da pior margem. O sinal negativo da margem indica operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV.

É possível dizer que a tensão na barra 29 encontra-se na parte inferior da curva constante no plano SV para todos os caminhos mais carregados mostrados na Tabela 4.21.

O caminho mais carregado conecta a barra de carga 29 ao gerador 31, com uma margem de -74,2% composto pelos ramos que ligam as barras 31-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29. O segundo caminho mais carregado conecta ao gerador 32 com a barra de carga 29, composto pelos ramos que ligam as barras 32-18-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29.

Os caminhos seguintes ligam os geradores 33 e 34 com a barra de carga 29. Deve-se notar que os seis caminhos de transmissão mais carregados têm em comum os últimos oito ramos adicionados. Pode-se dizer que a parte do sistema que está tendo problemas em transmitir potência ativa e reativa para a barra de carga 29 é composta pelas barras 16-15-7-8-10-11-13-28-29.

Tabela 4.21 Determinação dos Caminhos de Transmissão da Barra 29

Caminhos de Transmissão		29A	
31-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,259
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	8,8	-74,2

Caminhos de Transmissão		29F	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	19,897	-41,78

Caminhos de Transmissão		29B	
32-18-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,13	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	11,925	-65,1

Caminhos de Transmissão		29G	
1-2-34-5-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	32,92	11,32	34,813
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	24,22	-29,12

Caminhos de Transmissão		29C	
33-20-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,918
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	12,146	-64,46

Caminhos de Transmissão		29H	
34-21-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	27,6	-19,23

Caminhos de Transmissão		29D	
32-18-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,12	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	14,45	-57,7

Caminhos de Transmissão		29I	
32-18-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	27,85	-18,52

Caminhos de Transmissão		29E	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	17,99	-47,35

Caminhos de Transmissão		29J	
31-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,259
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	27,9	-18,35

Caminhos de Transmissão		29K	
32-18-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	28,19	-17,49

Caminhos de Transmissão		29P	
33-20-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,91
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	25,33	42,61

Caminhos de Transmissão		29L	
33--20-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,918
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	28,2	-17,48

Caminhos de Transmissão		29Q	
1-2-3-4-5-7-8-9-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	32,92	11,32	34,813
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	25,82	43,7

Caminhos de Transmissão		29M	
34-21-22-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	28,63	-16,24

Caminhos de Transmissão		29R	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	28,63	49,22

Caminhos de Transmissão		29N	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	21,368	31,96

Caminhos de Transmissão		29S	
32-18-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	28,85	49,62

Caminhos de Transmissão		29O	
32-18-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	24,89	41,6

Caminhos de Transmissão		29T	
31-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,26
Carga	1,24	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	29,29	50,3

c) Barra Crítica de Geração

Na Tabela 4.22 são apresentados os caminhos determinados para a barra de geração 34 e a avaliação de cada um deles. Foram encontrados dez caminhos de transmissão, apresentados em ordem a partir da pior margem de potência.

O sinal negativo da margem indica operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV.

Nos resultados é possível observar que o caminho de transmissão que apresenta a pior margem é o caminho 34A com uma margem de -43,13%, composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-17-16-30-28-29. Era de esperar, porque o ponto de operação do caso-base foi obtido com os aumentos de carga na barra 29 e o respectivo aumento de geração foi atendido pelo gerador da barra 34.

Dos dez caminhos, seis terminam na barra 29.

Tabela 4.22 Determinação e Avaliação dos Caminhos de Transmissão da Barra 34

Caminhos de Transmissão				34A
34-21-17-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 34	14,97	8,51	-43,13	

Caminhos de Transmissão				34D
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	22,76	-37,15	43,57	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 34	14,97	16,23	7,75	

Caminhos de Transmissão				34B
34-21-22-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 34	14,97	10,47	-30,05	

Caminhos de Transmissão				34E
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 34	14,97	16,65	10,07	

Caminhos de Transmissão				34C
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	1,243	14,48	14,54	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 34	14,97	14,89	-0,56	

Caminhos de Transmissão				34F
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 34	14,97	17,31	13,53	

Caminhos de Transmissão		34G	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	17,32	13,54

Caminhos de Transmissão		34I	
34-21-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	4,1788	2,421	4,83
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	26,44	43,38

Caminhos de Transmissão		34H	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	17,41	14,00

Caminhos de Transmissão		34J	
34-21-22-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	2,604	2,198	3,41
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	38,58	61,20

4.2.1.2.

Comparação dos Resultados Com e sem Redução do Caminho

A seguir são comparados os resultados obtidos nas avaliações dos caminhos de transmissão das barras 29 e 34 com a modificação proposta na Seção 4.2.1 e os resultados obtidos no exemplo da Seção 3.1.5.

No Capítulo 3, o caminho era reduzido para duas barras e as fórmulas analíticas eram empregadas e, com a modificação proposta, o caminho é avaliado como um subsistema usando os índices de estabilidade sem fazer a redução a um sistema de duas barras.

a) Barra de Carga

Com o exemplo da Seção 3.1.5, na Tabela 3.2, deve-se notar que os seis caminhos de transmissão mais carregados têm em comum os últimos três ramos adicionados. Pode-se dizer que a parte do sistema que está tendo problemas em transmitir potência ativa e reativa para a barra de carga 29 é composta pelas barras 16-30-28-29. Com a mudança proposta, como se observa na Tabela 4.21, os seis caminhos de transmissão mais carregados têm em comum os últimos oito ramos adicionados: 16-15-7-8-10-11-13-28-29. Assim, os resultados são bem diferentes.

Para observar a diferença existente nos resultados quando o caminho é reduzido e analisado como um sistema de duas barras, e quando o caminho é analisado como um sistema todo sem uso de equivalentes, foram escolhidos os resultados dos seis caminhos mais carregados apresentados no exemplo da barra crítica de carga na Seção 3.1.5, e comparados com os resultados das avaliações feitas aos mesmos seis caminhos com a modificação proposta na Seção 4.2.1.

Na Tabela 4.23 pode-se observar a diferença entre os resultados: na primeira coluna, estão os resultados sem fazer a redução a duas barras, e na segunda coluna se encontram os resultados das avaliações feitas quando o caminho é reduzido a um sistema de duas barras. Nos dois casos é utilizada admitância equivalente no isolamento dos caminhos.

É possível observar que dos seis caminhos mais carregados do exemplo da Seção 3.1.5, o caminho que apresenta a pior situação, isto é, margem mais negativa, é o primeiro caminho, composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-22-19-16-30-28-29. Entretanto, com a modificação proposta, o caminho que apresenta a pior margem dos mesmos seis caminhos, é o caminho 29H compostos pelos ramos que ligam as barras 34-21-17-16-30-28-29. É importante ressaltar que o caminho mais carregado encontrado com a modificação proposta na Seção 4.2.1 é diferente dos caminhos avaliados neste exemplo. O caminho mais carregado sem redução do caminho a um sistema de duas barras foi o caminho 29A com uma margem de $-74,2\%$.

Aparentemente, a ordenação dos caminhos de acordo com o carregamento não é muito importante, pois as margens dos caminhos são parecidas. Já comparando as margens com e sem a modificação, observa-se grandes diferenças em todos os caminhos. Os índices de estabilidade de tensão, com o método descrito na Seção 3.2, representam um cenário mais crítico, em comparação com as margens obtidas com a modificação proposta.

Não se pode concluir se a modificação proposta é adequada.

Tabela 4.23 Comparação dos Resultados dos Caminhos de Transmissão da Barra

29

Caminhos de Transmissão				29M
34-21-22-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,17	28,63	-16,24	

Caminhos de Transmissão				1
34-21-22-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,35	3,82		
Carga	33,01	-8,69	34,15	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,15	337,42	-89,88	

Caminhos de Transmissão				29H
34-21-17-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,17	27,6	-19,23	

Caminhos de Transmissão				2
34-21-17-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,35	3,82		
Carga	33,03	-8,7	34,16	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,16	239,11	-85,71	

Caminhos de Transmissão				29K
32-18-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,127	12,69	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,17	28,19	-17,49	

Caminhos de Transmissão				3
32-18-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,02		
Carga	33,03	-8,7	34,16	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,16	156,86	-78,22	

Caminhos de Transmissão				29I
32-18-17-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,127	12,69	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,17	27,85	-18,52	

Caminhos de Transmissão				4
32-18-17-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,02	12,69	
Carga	33,03	-8,7	34,16	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,16	147,29	-76,81	

Caminhos de Transmissão				29L
33--20-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,78	12,918	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,17	28,2	-17,48	

Caminhos de Transmissão				5
33--20-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,66		
Carga	33,03	-8,7	34,16	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 29	34,16	131,52	-74,03	

Caminhos de Transmissão				Caminhos de Transmissão			
29J				6			
31-17-16-30-28-29				31-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente		Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,259	Geração	13,18	-1,55	
Carga	33,01	-8,87	34,17	Carga	33,03	-8,7	34,16
Índices				Índices			
	S_i	S_m	M(%)		S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	27,9	-18,35	Barra 29	34,16	127,25	-73,16

b) Barra de Geração

A título de comparação se apresentam na Tabela 4.24 os resultados das avaliações realizadas para os caminhos de transmissão a partir da barra 34. Na primeira coluna se mostram os resultados dos dez caminhos avaliados com a modificação proposta na Seção 4.2.1, e na segunda coluna, os resultados dos caminhos quando são reduzidos a um sistema equivalente de duas barras.

É importante ressaltar que para avaliar os índices da barra de geração com a modificação proposta foi necessário escolher outra barra “*swing*”, encarregada de assumir as variações de P da barra em análise. Entretanto, no método descrito na Seção 3.2 não é necessária a escolha de outra barra “*swing*”.

Os caminhos se encontram organizados conforme foram mostrados no exemplo da Seção 3.2.5, para a barra crítica de geração 34.

Os três caminhos mais carregados obtidos no exemplo da Seção 3.2.5 e com a modificação proposta são os mesmos, mas os valores da margem são diferentes. Os índices de estabilidade de tensão com o método descrito na Seção 3.2 representam um cenário mais crítico em comparação com as margens obtidas com a modificação proposta.

O caminho com a pior margem é o caminho 34A composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-17-16-30-28-29. Quando não é feita a redução do caminho a um sistema de duas barras, se encontrou uma margem negativa de -43.13%, e para o método descrito na Seção 3.2, a margem é de -434,57%.

Não se pode concluir se a modificação proposta é adequada.

Tabela 4.24 Comparação dos Resultados dos Caminhos de Transmissão da Barra 34

Caminhos de Transmissão				34A
34-21-17-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,97	8,51	-43,13	

Caminhos de Transmissão				1
34-21-17-16-30-28-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,44	3,89	14,95	
Carga	33,01	-8,82	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,95	79,94	-434,57	

Caminhos de Transmissão				34B
34-21-22-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,97	10,47	-30,05	

Caminhos de Transmissão				2
34-21-22-19-16-30-28-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,44	3,89	14,95	
Carga	33,01	-8,82	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,95	63,48	-324,480	

Caminhos de Transmissão				34C
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	1,243	14,48	14,54	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,97	14,89	-0,56	

Caminhos de Transmissão				3
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,44	3,89	14,95	
Carga	1,23	14,43	14,49	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,95	14,96	-0,07	

Caminhos de Transmissão				34F
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,97	17,31	13,53	

Caminhos de Transmissão				4
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,44	3,89	14,95	
Carga	33,01	-8,82	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,95	14,95	0,00	

Caminhos de Transmissão				34G
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	22,76	-37,15	43,57	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,97	17,32	13,54	

Caminhos de Transmissão				5
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,44	3,89	14,95	
Carga	22,77	-36,92	43,38	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,95	14,98	0,16	

Caminhos de Transmissão		34D	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	16,23	7,75

Caminhos de Transmissão		6	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	22,77	-36,92	43,38
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	15,01	0,39

Caminhos de Transmissão		34E	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	16,65	10,07

Caminhos de Transmissão		7	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	33,01	-8,82	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	15,07	0,77

Caminhos de Transmissão		34H	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	17,41	14,00

Caminhos de Transmissão		8	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	1,23	14,43	14,49
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	15,16	1,39

Caminhos de Transmissão		34J	
34-21-22-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	2,604	2,198	3,41
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	38,58	61,20

Caminhos de Transmissão		9	
34-21-22-23			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	2,6	2,2	3,41
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	19,08	21,620

Caminhos de Transmissão		34I	
34-21-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	4,1788	2,421	4,83
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	26,44	43,38

Caminhos de Transmissão		10	
34-21-23			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	4,1788	2,421	4,83
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	20,12	25,670

4.2.2. Uso de Injeção de Potência Equivalente

O uso de admitâncias equivalentes para o isolamento da sub-rede foi aplicada no método descrito na Seção 3.2.1. Nesta seção, se apresenta uma variação do método para fazer o isolamento da sub-rede e dos caminhos de transmissão.

Tanto a formulação do problema de fluxo de potência, como o problema de avaliação da estabilidade de tensão, consideram como modelo principal a lei dos nós de Kirchhoff aplicada para potência ativa e reativa. Assim, gerações e cargas são tratadas como injeções de potência ativa e reativa.

Para manter certa coerência para o isolamento da sub-rede, o resto do sistema deve ser modelado por injeções de potência.

Uma vez determinada a sub-rede quando a barra crítica é uma barra de carga o isolamento é feito representando os fluxos de potência ativa que deixam à sub-rede e os fluxos de potência reativa que entram e que deixam à sub-rede a partir dos nós intermediários como injeção de potência equivalente.

A injeção de potência pode ser negativa ou positiva. Na Figura 4.11 apresenta-se a sub-rede determinada quando a barra 29 é crítica, todas as barras do sistema-teste são parte da sub-rede, excetuando as barras 25 e 26. O isolamento é feito considerando o fluxo de potência ativa saindo da barra 24 para a barra 25 como uma injeção de potência negativa.

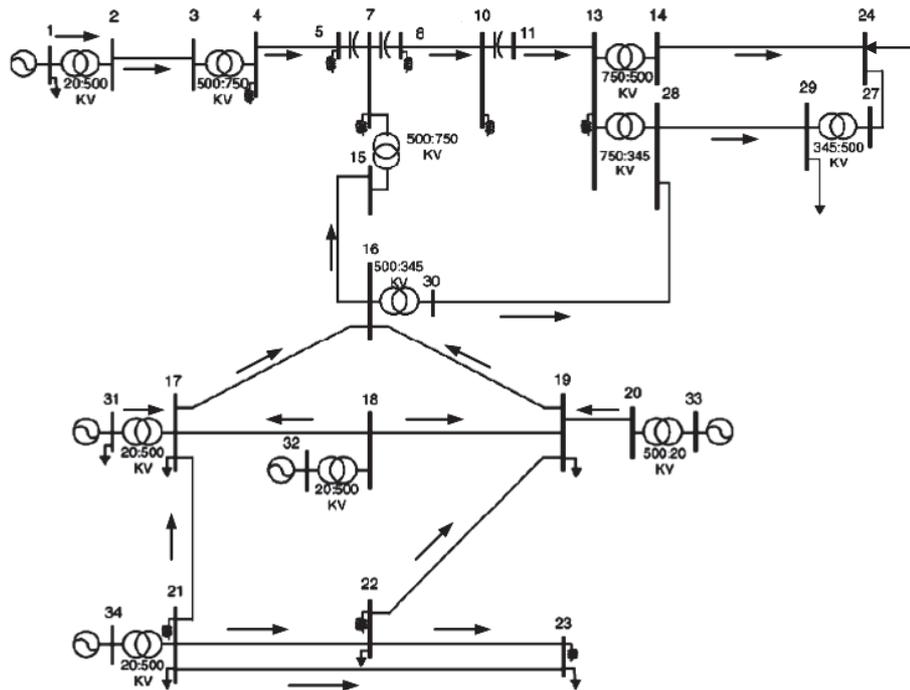


Figura 4.11 Sub-rede Determinada e Isolada com o Uso de Injeções para a Barra Crítica 29

Uma vez determinada a sub-rede para uma barra crítica de geração o isolamento dela do resto do sistema é feito representando os fluxos de potência ativa que chegam e os fluxos de potência reativa que deixam ou que chegam à sub-rede a partir dos nós intermediários como injeção de potência equivalente.

Na Figura 4.12 mostra-se a sub-rede determinada para a barra crítica de geração 34. O isolamento da sub-rede do resto do sistema é feito considerando os fluxos de potência ativa chegando às barras intermediárias (7, 17 e 19) como uma injeção de potência positiva.

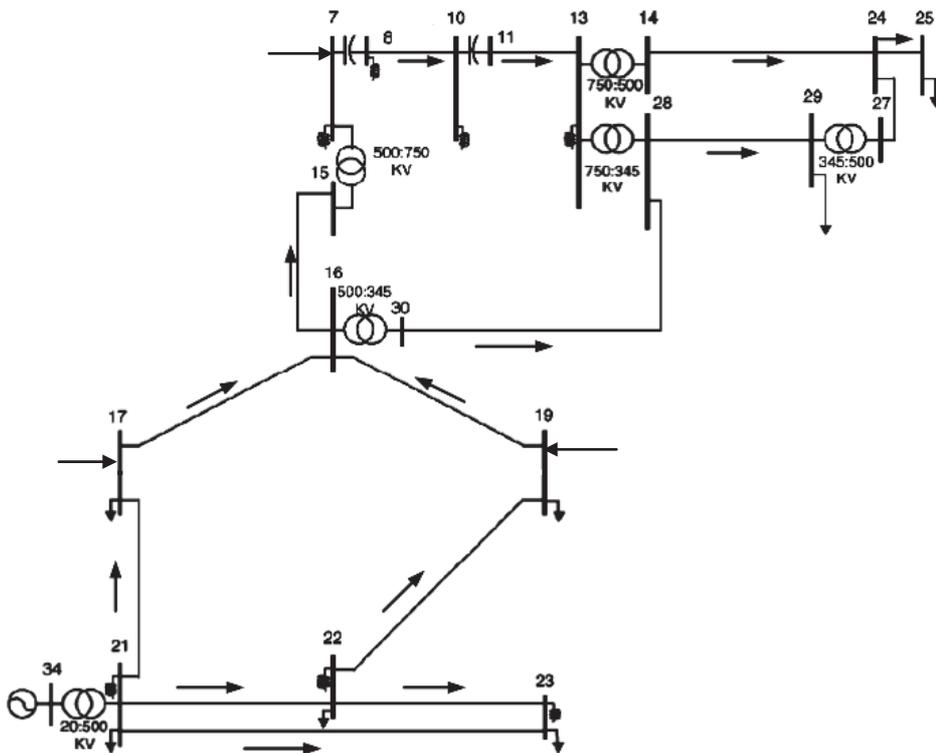


Figura 4.12 Sub-rede Determinada e Isolada com o Uso de Injeções para a Barra Crítica 34

Na Seção 3.2.1 o isolamento dos caminhos é realizado convertendo em admitâncias equivalentes os fluxos de potência ativa e reativa que entram e saem dos caminhos em suas barras intermediárias. Nesta seção, será feito o isolamento dos caminhos de transmissão representando os fluxos de potência ativa e reativa que chegam e que deixam a sub-rede a partir dos nós intermediários com injeção de potência.

A avaliação dos índices de estabilidade de tensão em cada caminho será feita sem uso de equivalentes.

4.2.2.1. Exemplo Numérico

A seguir, são apresentados os resultados e consequentes análises das avaliações feitas nos diferentes caminhos de transmissão encontrados para a barra crítica (carga, geração e tensão controlada).

a) Barra Crítica de Tensão Controlada

Na Tabela 4.25 é possível observar os resultados das avaliações feitas nos quatro caminhos de geração encontrados para a barra de tensão controlada avaliada como barra crítica de geração. Os dois caminhos de transmissão mais carregados envolvem o gerador 16 com a barra 29.

O caminho que apresenta a pior margem é o caminho 16GA com um valor 1,15%, composto pelos ramos que ligam as barras 16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29.

Tabela 4.25 Determinação dos Caminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 16 Avaliada como Barra Crítica de Geração

Caminhos de Transmissão				16GA
16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	1,24	14,48	14,54	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 16	23,16	23,43	1,15	

Caminhos de Transmissão				16GC
16-15-7-8-10-11-13-14-24-25				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	22,76	-37,15	43,57	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 16	23,16	35,47	34,69	

Caminhos de Transmissão				16GB
16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	6,33	0,99	6,4	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 16	6,4	7,41	13,60	

Caminhos de Transmissão				16GD
16-15-7-8-10-11-13-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m M(%)
Barra 16	23,16	43,62	46,89	

Na Tabela 4.26 se apresenta a avaliação dos índices dos caminhos de transmissão quando a barra crítica é avaliada como uma barra de carga. Os dois caminhos mais carregados envolvem ao gerador 34 com a barra de carga 16. O caminho que apresenta a pior margem é o caminho 16LA com um valor -29,30%, o qual se encontra composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-22-19-16.

Comparando-se os caminhos 16LA e 16GA pode se afirmar que, das duas sub-redes determinadas na Seção 4.1.1, a sub-rede escolhida por apresentar problemas em transferir potência ativa e reativa é a sub-rede de carga, isto é, a sub-rede usada para transferir potência ativa dos geradores para a barra 16.

Tabela 4.26 Determinação dos Caminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 16 Avaliada como Barra Crítica de Carga

Caminhos de Transmissão				16LA
34-21-22-19-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	11,84	4,625	12,7158	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	8,99	-29,30	

Caminhos de Transmissão				16LD
32-18-19-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,13	12,69	
Carga	11,84	4,62	12,71	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	16,58	23,29	

Caminhos de Transmissão				16LB
34-21-17-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	17,03	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	12,67	-25,93	

Caminhos de Transmissão				16LE
31-17-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	13,18	-1,42	13,26	
Carga	17,03	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	24,64	30,54	

Caminhos de Transmissão				16LC
32-18-17-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,12	12,69	
Carga	17,02	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	19,53	12,38	

Caminhos de Transmissão				16LF
33-20-19-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,78	12,91	
Carga	11,84	4,62	12,71	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	19,94	36,23	

b) Barra Crítica de Carga

Na Tabela 4.27 apresentam-se os resultados com a determinação dos caminhos de transmissão que conectam a barra crítica 29 com cada um dos geradores do sistema. Foram encontrados vinte caminhos, mostrados em ordem a partir da pior margem de potência.

As margens de potência de todos os caminhos avaliados apresentam sinal negativo, excetuando o último caminho (29T) composto pelos ramos que ligam as barras 1-2-3-4-5-7-8-10-11-13-14-24-27-29.

Observa-se que o pior caminho de transmissão, ou seja, aquele que tem a margem mais negativa é o 29A composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29.

Tabela 4.27 Determinação dos Caminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 29

Caminhos de Transmissão				29A			
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	14,45	3,91	14,97				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices				S_i	S_m	M(%)	
Barra 29	34,17	0,7728	-97,74				

Caminhos de Transmissão				29D			
32-18-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	12	4,12	12,69				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices				S_i	S_m	M(%)	
Barra 29	34,17	2,72	-92,02				

Caminhos de Transmissão				29B			
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	14,45	3,91	14,97				
Carga	1,243	14,48	14,54				
Índices				S_i	S_m	M(%)	
Barra 29	14,54	0,71	-95,14				

Caminhos de Transmissão				29E			
34-21-17-16-30-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	14,45	3,91	14,97				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices				S_i	S_m	M(%)	
Barra 29	34,17	2,86	-91,64				

Caminhos de Transmissão				29C			
34-21-22-19-16-30-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	14,45	3,91	14,97				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices				S_i	S_m	M(%)	
Barra 29	34,17	2,12	-93,78				

Caminhos de Transmissão				29F			
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	14,45	3,91	14,97				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices				S_i	S_m	M(%)	
Barra 29	34,17	3,17	-90,71				

Caminhos de Transmissão		29G	
32-18-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	3,39	-90,08

Caminhos de Transmissão		29L	
33-20-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,918
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	4,77	-86,04

Caminhos de Transmissão		29H	
32-18-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	3,69	-89,21

Caminhos de Transmissão		29M	
32-18-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	2,13	-85,32

Caminhos de Transmissão		29I	
33-20-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,918
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	3,725	-89,1

Caminhos de Transmissão		29N	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	2,992	-79,41

Caminhos de Transmissão		29J	
31-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,259
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	4,07	-88,07

Caminhos de Transmissão		29O	
31-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,259
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	7,33	-78,54

Caminhos de Transmissão		29K	
32-18-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,13	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	4,53	-86,73

Caminhos de Transmissão		29P	
32-18-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	3,5464	-75,6

Caminhos de Transmissão		29Q	
33-20-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,91
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	3,72	-74,37

Caminhos de Transmissão		29S	
1-2-3-4-5-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	32,92	11,32	34,813
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	26,77	-21,67

Caminhos de Transmissão		29R	
31-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,26
Carga	1,24	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	5,62	-61,34

Caminhos de Transmissão		29T	
1-2-3-4-5-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	32,92	11,32	34,813
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	16,9	14

c) Barra Crítica de Geração

Na Tabela 4.28 são apresentados os resultados da determinação e avaliação dos caminhos de transmissão da barra de geração 34. Foram encontrados dez caminhos de transmissão, mostrados em ordem a partir da pior margem de potência.

Os quatro caminhos mais carregados ligam ao gerador 34 com a barra de carga 29, o caminho seguinte conecta a barra de carga 25 ao gerador 34. O caminho menos carregado conecta ao gerador 34 com a barra de carga 23, com uma margem de 60,66% compostos pelos ramos que ligam as barras 34-21-22-23.

Analisando-se os resultados mostrados na Tabela 4.28 pode-se afirmar que o caminho de transmissão que está apresentando problemas em transmitir potência ativa a partir da barra de geração 34 é o caminho 34A com uma margem de -55,44%. É composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-22-19-16-30-28-29.

Tabela 4.28 Determinação dos Caminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 34

Caminhos de Transmissão		34A	
34-21-22-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	6,67	-55,44

Caminhos de Transmissão		34F	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	15,07	0,68

Caminhos de Transmissão		34B	
34-21-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	6,86	-54,18

Caminhos de Transmissão		34G	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	16,58	9,74

Caminhos de Transmissão		34C	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	12,69	-15,25

Caminhos de Transmissão		34H	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	17,6	14,94

Caminhos de Transmissão		34D	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	14,25	-4,79

Caminhos de Transmissão		34I	
34-21-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	4,1788	2,421	4,83
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	24,33	38,47

Caminhos de Transmissão		34E	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	14,37	-4,00

Caminhos de Transmissão		34J	
34-21-22-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	2,604	2,198	3,41
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	38,05	60,66

4.2.2.2. Comparação dos Resultados Usando Admitâncias e Injeções de Potência

Com os resultados obtidos nas Seções 4.2.1 e 4.2.2 é feita uma comparação para analisar se a modificação proposta apresenta melhores resultados.

Na primeira coluna das Tabelas 4.29 a 4.32 encontram-se os resultados obtidos quando é utilizado o uso de admitância equivalente no isolamento dos caminhos. Na segunda coluna são apresentados os resultados obtidos quando é utilizado o uso de injeções de potência. Nos dois casos optou-se por não fazer redução do caminho a um sistema de duas barras.

a) Barra de Tensão Controlada

Na Tabela 4.29 e 4.30 apresentam-se os resultados obtidos das avaliações feitas nos caminhos de transmissão da barra de tensão controlada, sendo avaliada como barra crítica de carga e posteriormente como barra crítica de geração.

Os caminhos se encontram organizados conforme foram mostrados no exemplo da Seção 4.2.1.1 para a barra crítica de tensão controlada 16.

É possível observar que os caminhos mais carregados são os mesmos, e envolvem ao gerador 34 com a barra 16. No entanto, observa-se nos dois primeiros caminhos um resultado mais pessimista para as margens obtidas com injeções de potência. É importante ressaltar que o caminho mais carregado não é o mesmo. O caminho mais carregado obtido na Seção 4.2.1.1 foi o caminho 16LA com uma margem de -24,16%, composto pelas barras 34-21-17-16. Na Seção 4.2.2.1 o caminho mais carregado foi o caminho 16LA com uma margem de -29,30%, composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-22-19-16.

Comparando os resultados das margens dos outros caminhos avaliados pode se observar valores de margem muito próximos um do outro.

Tabela 4.29 Comparação dos Resultados Com o Uso de Admitâncias e de Injeções para a Barra 16 como Barra de Carga

Caminhos de Transmissão				16LA
34-21-17-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	17,03	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	12,98	-24,16	

Caminhos de Transmissão				16LB
34-21-17-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	17,03	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	12,67	-25,93	

Caminhos de Transmissão				16LB
34-21-22-19-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	11,84	4,625	12,7158	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	12,34	-2,93	

Caminhos de Transmissão				16LA
34-21-22-19-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	11,84	4,625	12,7158	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	8,99	-29,30	

Caminhos de Transmissão				16LC
32-18-17-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,12	12,69	
Carga	17,02	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	19,58	12,62	

Caminhos de Transmissão				16LC
32-18-17-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,12	12,69	
Carga	17,02	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	19,53	12,38	

Caminhos de Transmissão				16LD
32-18-19-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,13	12,69	
Carga	11,84	4,62	12,71	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	16,48	22,87	

Caminhos de Transmissão				16LD
32-18-19-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	12	4,13	12,69	
Carga	11,84	4,62	12,71	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	12,71	16,58	23,29	

Caminhos de Transmissão				16LE
31-17-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	13,18	-1,42	13,26	
Carga	17,03	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	23,58	27,42	

Caminhos de Transmissão				16LE
31-17-16				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	13,18	-1,42	13,26	
Carga	17,03	1,69	17,11	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 16	17,11	24,64	30,54	

Caminhos de Transmissão		16LF	
33-20-19-16			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,91
Carga	11,84	4,62	12,71
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 16	12,71	20,17	36,96

Caminhos de Transmissão		16LF	
33-20-19-16			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,91
Carga	11,84	4,62	12,71
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 16	12,71	19,94	36,23

Na Tabela 4.30, são apresentadas as comparações para as avaliações da barra 16 como barra crítica de geração.

Pode-se observar que o caminho mais carregado 16GA, composto pelos ramos que ligam as barras 16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29 é o mesmo, mas com valores de margem diferentes. Com o uso de admitâncias a margem calculada é -9,74%, e com o uso de injeções a margem é 1,15%.

Comparando as margens dos outros caminhos avaliados, podem-se observar valores de margem muito próximos um do outro.

Tabela 4.30 Comparação dos Resultados Com o Uso Admitâncias e de Injeções para a Barra 16 Como Barra de Geração

Caminhos de Transmissão		16GA	
16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	22,54	5,33	23,16
Carga	1,24	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 16	23,16	20,91	-9,74

Caminhos de Transmissão		16GA	
16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	22,54	5,33	23,16
Carga	1,24	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 16	23,16	23,43	1,15

Caminhos de Transmissão		16GB	
16-30-28-29			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	6,33	0,99	6,4
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 16	6,4	7,42	13,62

Caminhos de Transmissão		16GB	
16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	6,33	0,99	6,4
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 16	6,4	7,41	13,60

Caminhos de Transmissão				16GC
16-15-7-8-10-11-13-14-24-25				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	22,76	-37,15	43,57	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 16	23,16	36,3	36,18	

Caminhos de Transmissão				16GC
16-15-7-8-10-11-13-14-24-25				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	22,76	-37,15	43,57	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 16	23,16	35,47	34,69	

Caminhos de Transmissão				16GD
16-15-7-8-10-11-13-28-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 16	23,16	42,52	45,52	

Caminhos de Transmissão				16GD
16-15-7-8-10-11-13-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	22,54	5,33	23,16	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	M(%)	
Barra 16	23,16	43,62	46,89	

b) Barra de Carga

Na Tabela 4.31 são apresentados os resultados das avaliações feitas nos vinte caminhos de transmissão com o uso de admitâncias e injeções. As margens são apresentadas em ordem a partir da pior margem. É possível dizer que a tensão na barra 29 encontra-se na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV para todos os caminhos mais carregados mostrados na Tabela 4.31

Os resultados são apresentados conforme foram mostrados no exemplo da Seção 4.2.1.1 quando a barra crítica é a barra 29.

Pode-se observar que, quando são utilizadas injeções, os resultados obtidos são mais pessimistas para todos os caminhos de transmissão avaliados, excetuando o caminho 29S.

É importante ressaltar que o caminho mais carregado é diferente. O caminho mais carregado usando admitâncias é o caminho 29A e conecta a barra de carga 29 ao gerador 31, com uma margem de -74,2%. Usando injeções, o caminho mais carregado é o caminho 29A e conecta a barra de carga 29 ao gerador 34, com uma margem de -97,74%.

Tabela 4.31 Comparação dos Resultados Com o Uso de Admitâncias e de Injeções para Barra 29

Caminhos de Transmissão				29A			
31-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	13,18	-1,42	13,259				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	8,8	-74,2				

Caminhos de Transmissão				29O			
31-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	13,18	-1,42	13,259				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	7,33	-78,54				

Caminhos de Transmissão				29B			
32-18-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	12	4,13	12,69				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	11,925	-65,1				

Caminhos de Transmissão				29K			
32-18-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	12	4,13	12,69				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	4,53	-86,73				

Caminhos de Transmissão				29C			
33-20-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	12	4,78	12,918				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	12,146	-64,46				

Caminhos de Transmissão				29L			
33-20-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	12	4,78	12,918				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	4,77	-86,04				

Caminhos de Transmissão				29D			
32-18-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	12	4,12	12,69				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	14,45	-57,7				

Caminhos de Transmissão				29D			
32-18-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	12	4,12	12,69				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	2,72	-92,02				

Caminhos de Transmissão				29E			
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	14,45	3,91	14,97				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	17,99	-47,35				

Caminhos de Transmissão				29A			
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29							
	Ativa	Reativa	Aparente				
Geração	14,45	3,91	14,97				
Carga	33,01	-8,87	34,17				
Índices	S_i	S_m	M(%)				
Barra 29	34,17	0,7728	-97,74				

Caminhos de Transmissão		29F	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	19,897	-41,78

Caminhos de Transmissão		29F	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	3,17	-90,71

Caminhos de Transmissão		29G	
1-2-3-4-5-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	32,92	11,32	34,813
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	24,22	-29,12

Caminhos de Transmissão		29S	
1-2-3-4-5-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	32,92	11,32	34,813
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	26,77	-21,67

Caminhos de Transmissão		29H	
34-21-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	27,6	-19,23

Caminhos de Transmissão		29E	
34-21-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	2,86	-91,64

Caminhos de Transmissão		29I	
32-18-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	27,85	-18,52

Caminhos de Transmissão		29H	
32-18-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	3,69	-89,21

Caminhos de Transmissão		29J	
31-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,259
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	27,9	-18,35

Caminhos de Transmissão		29J	
31-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,259
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	4,07	-88,07

Caminhos de Transmissão		29K	
32-18-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	28,19	-17,49

Caminhos de Transmissão		29G	
32-18-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	3,39	-90,08

Caminhos de Transmissão		29L	
33-20-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,918
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	28,2	-17,48

Caminhos de Transmissão		29I	
33-20-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,918
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	3,725	-89,1

Caminhos de Transmissão		29M	
34-21-22-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	28,63	-16,24

Caminhos de Transmissão		29C	
34-21-22-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	2,12	-93,78

Caminhos de Transmissão		29N	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	21,368	31,96

Caminhos de Transmissão		29N	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	2,992	-79,41

Caminhos de Transmissão		29O	
32-18-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	24,89	41,6

Caminhos de Transmissão		29M	
32-18-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	2,13	-85,32

Caminhos de Transmissão		29P	
33-20-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,91
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	25,33	42,61

Caminhos de Transmissão		29Q	
33-20-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,91
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	3,72	-74,37

Caminhos de Transmissão		29Q	
1-2-3-4-5-7-8-9-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	32,92	11,32	34,813
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	25,82	43,7

Caminhos de Transmissão		29T	
1-2-3-4-5-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	32,92	11,32	34,813
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	16,9	14

Caminhos de Transmissão		29R	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	28,63	49,22

Caminhos de Transmissão		29B	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	0,71	-95,14

Caminhos de Transmissão		29S	
32-18-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	28,85	49,62

Caminhos de Transmissão		29P	
32-18-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,127	12,69
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	3,5464	-75,6

Caminhos de Transmissão		29T	
31-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,26
Carga	1,24	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	29,29	50,3

Caminhos de Transmissão		29R	
31-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,26
Carga	1,24	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	14,54	5,62	-61,34

c) Barra de Geração

A seguir, são apresentados os resultados das comparações feitas nos dez caminhos de transmissão determinados para a barra de geração 34.

Os três caminhos mais carregados em ambos os casos envolvem o gerador 34 com a barra de carga 29. Era de se esperar, porque, como já dito, o ponto de operação foi obtido simulando-se aumentos de carga na barra 29 e o respectivo aumento de geração foi atendido pelo gerador da barra 34.

Para todos os caminhos avaliados, o uso de injeções apresenta margens mais pessimistas.

Observa-se que o pior caminho de transmissão com o uso de admitâncias é composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-17-16-30-28-29 porque tem a margem mais negativa $M = -43,13\%$. Com o uso de injeções, o caminho mais carregado é composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-22-19-16-30-28-29 com $M = -55,44\%$.

Os dois caminhos tem em comum as últimas quatro barras.

Tabela 4.32 Comparação dos Resultados com o Uso de Admitâncias e de Injeções para a Barra 34

Caminhos de Transmissão				34A
34-21-17-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	$M(\%)$	
Barra 34	14,97	8,51	-43,13	

Caminhos de Transmissão				34B
34-21-17-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	$M(\%)$	
Barra 34	14,97	6,86	-54,18	

Caminhos de Transmissão				34B
34-21-22-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	$M(\%)$	
Barra 34	14,97	10,47	-30,05	

Caminhos de Transmissão				34A
34-21-22-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				
	S_i	S_m	$M(\%)$	
Barra 34	14,97	6,67	-55,44	

Caminhos de Transmissão		34C	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	14,89	-0,56

Caminhos de Transmissão		34D	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	14,25	-4,79

Caminhos de Transmissão		34D	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	16,23	7,75

Caminhos de Transmissão		34G	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	16,58	9,74

Caminhos de Transmissão		34E	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	16,65	10,07

Caminhos de Transmissão		34H	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	17,6	14,94

Caminhos de Transmissão		34F	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	17,31	13,53

Caminhos de Transmissão		34F	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	15,07	0,68

Caminhos de Transmissão		34G	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	17,32	13,54

Caminhos de Transmissão		34E	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	14,37	-4,00

Caminhos de Transmissão		34H	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	17,41	14,00

Caminhos de Transmissão		34C	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	1,243	14,48	14,54
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	12,69	-15,25

Caminhos de Transmissão		34I	
34-21-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	4,1788	2,421	4,83
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	26,44	43,38

Caminhos de Transmissão		34I	
34-21-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	4,1788	2,421	4,83
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	24,33	38,47

Caminhos de Transmissão		34J	
34-21-22-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	2,604	2,198	3,41
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	38,58	61,20

Caminhos de Transmissão		34J	
34-21-22-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	2,604	2,198	3,41
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	38,05	60,66

4.2.3. Comparação dos Resultados do Capítulo 3 com o Uso de Injeções e sem Reduzir a Duas Barras

A seguir são comparados os resultados obtidos nas avaliações dos caminhos de transmissão das barras 29 e 34, quando é utilizado o uso de injeções de potência no isolamento dos caminhos e sem fazer redução a um sistema de duas barras, e os resultados obtidos nos exemplos das Seções 3.1.5 e 3.2.5, quando era utilizadas admitâncias no isolamento dos caminhos e o caminho era reduzido a duas barras (e as fórmulas analíticas eram empregadas).

Na primeira coluna das Tabelas 4.33 e 4.34 encontram-se os resultados obtidos com as duas modificações e na segunda coluna os resultados obtidos no exemplo da Seção 3.1.5.

a) Barra de Carga

Foram escolhidos os resultados dos seis caminhos mais carregados apresentados no exemplo da Seção 3.1.5 e comparado com os resultados das avaliações feitas aos mesmos seis caminhos quando são utilizadas as duas modificações.

Na Tabela 4.33 se apresentam os resultados obtidos na avaliação das condições de estabilidade de tensão para os seis caminhos escolhidos. Os caminhos se encontram organizados conforme foram mostrados no exemplo da Seção 3.1.5 para a barra crítica de carga 29.

Pode-se dizer que a tensão na barra 29 encontra-se na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV para todos os caminhos mostrados.

Analisando-se os resultados, é possível verificar que os valores das margens se encontram próximos. Entretanto, para todos os caminhos avaliados os resultados são mais pessimistas quando são utilizadas as duas modificações.

O caminho mais carregado é caminho 1 ou 29C composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-22-19-16-30-28-29. Os valores das margens são diferentes, mas próximas: aqui a margem é -93,78% e no exemplo da Seção 3.1.5 a margem é -89,88%. É importante ressaltar que o caminho mais carregado encontrado com o uso das duas modificações (o 29A composto das barras 34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29 com $M = -97,74\%$) é diferente dos caminhos avaliados nesta seção.

Aparentemente, a ordenação dos caminhos não é importante, qualquer que seja o método utilizado, pois, as margens obtidas com cada um deles são muito próximas.

Tabela 4.33 Comparação dos Resultados dos Caminhos mais Carregado da Barra 29

Caminhos de Transmissão				29C		
34-21-22-19-16-30-28-29						
	Ativa	Reativa	Aparente			
Geração	14,45	3,91	14,97			
Carga	33,01	-8,87	34,17			
Índices				S_i	S_m	$M(\%)$
Barra 29	34,17	2,12	-93,78			

Caminhos de Transmissão				1		
34-21-22-19-16-30-28-29						
	Ativa	Reativa	Aparente			
Geração	14,35	3,82				
Carga	33,01	-8,69	34,15			
Índices				S_i	S_m	$M(\%)$
Barra 29	34,15	337,42	-89,88			

Caminhos de Transmissão				29D		
34-21-17-16-30-28-29						
	Ativa	Reativa	Aparente			
Geração	14,45	3,91	14,97			
Carga	33,01	-8,87	34,17			
Índices				S_i	S_m	$M(\%)$
Barra 29	34,17	2,86	-91,64			

Caminhos de Transmissão				2		
34-21-17-16-30-28-29						
	Ativa	Reativa	Aparente			
Geração	14,35	3,82				
Carga	33,03	-8,7	34,16			
Índices				S_i	S_m	$M(\%)$
Barra 29	34,16	239,11	-85,71			

Caminhos de Transmissão				29F		
32-18-19-16-30-28-29						
	Ativa	Reativa	Aparente			
Geração	12	4,127	12,69			
Carga	33,01	-8,87	34,17			
Índices				S_i	S_m	$M(\%)$
Barra 29	34,17	3,39	-90,08			

Caminhos de Transmissão				3		
32-18-19-16-30-28-29						
	Ativa	Reativa	Aparente			
Geração	12	4,02				
Carga	33,03	-8,7	34,16			
Índices				S_i	S_m	$M(\%)$
Barra 29	34,16	156,86	-78,22			

Caminhos de Transmissão				29G		
32-18-17-16-30-28-29						
	Ativa	Reativa	Aparente			
Geração	12	4,127	12,69			
Carga	33,01	-8,87	34,17			
Índices				S_i	S_m	$M(\%)$
Barra 29	34,17	3,69	-89,21			

Caminhos de Transmissão				4		
32-18-17-16-30-28-29						
	Ativa	Reativa	Aparente			
Geração	12	4,02	12,69			
Carga	33,03	-8,7	34,16			
Índices				S_i	S_m	$M(\%)$
Barra 29	34,16	147,29	-76,81			

Caminhos de Transmissão		29H	
33-20-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,78	12,918
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	3,725	-89,1

Caminhos de Transmissão		5	
33--20-19-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	12	4,66	
Carga	33,03	-8,7	34,16
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,16	131,52	-74,03

Caminhos de Transmissão		29I	
31-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,42	13,259
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,17	4,07	-88,07

Caminhos de Transmissão		6	
31-17-16-30-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	13,18	-1,55	
Carga	33,03	-8,7	34,16
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 29	34,16	127,25	-73,16

b) Barra de Geração

Na Tabela 4.34 são apresentados os resultados obtidos nas avaliações feitas nos dez caminhos de transmissão encontrados para a barra crítica de geração 34. Os caminhos se encontram organizados conforme foram apresentados no exemplo da Seção 4.2.2 quando a barra crítica é a barra de geração 34.

É importante ressaltar que para avaliar os índices de estabilidade na barra de geração com as modificações propostas foi necessário escolher outra barra “*swing*”, encarregada de assumir as variações de P da barra em análise. No método descrito na Seção 3.2, não é necessária a escolha de outra barra “*swing*” porque o caminho é reduzido a duas barras e as fórmulas analíticas são empregadas.

Pode-se observar que existem diferenças nos valores das margens de potência. Quando são utilizadas as modificações, os resultados são mais favoráveis para sete dos dez caminhos avaliados.

Com o uso das modificações, o caminho que apresenta a pior margem é o caminho 34A (M= -55,44%) composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-22-19-16-30-28-29. Para o método descrito na Seção 3.2, o caminho que apresenta a pior situação, ou seja, o que tem a margem mais negativa é o primeiro (M= -434,57%), composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-17-16-30-28-29.

Os dois caminhos têm em comum os últimos três ramos adicionados e envolvem a barra crítica 34 com a barra de carga 29.

Tabela 4.34 Comparação dos Resultados dos Caminhos mais Carregados da Barra 34

Caminhos de Transmissão				34A
34-21-22-19-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,97	6,67	-55,44	

Caminhos de Transmissão				2
34-21-22-19-16-30-28-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,44	3,89	14,95	
Carga	33,01	-8,82	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,95	63,48	-324,480	

Caminhos de Transmissão				34B
34-21-17-16-30-28-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	33,01	-8,87	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,97	6,86	-54,18	

Caminhos de Transmissão				1
34-21-17-16-30-28-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,44	3,89	14,95	
Carga	33,01	-8,82	34,17	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,95	79,94	-434,57	

Caminhos de Transmissão				34C
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	1,243	14,48	14,54	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,97	12,69	-15,25	

Caminhos de Transmissão				8
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,44	3,89	14,95	
Carga	1,23	14,43	14,49	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,95	15,16	1,39	

Caminhos de Transmissão				34D
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29				
	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,45	3,91	14,97	
Carga	1,243	14,48	14,54	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,97	14,25	-4,79	

Caminhos de Transmissão				3
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-27-29				
Potência	Ativa	Reativa	Aparente	
Geração	14,44	3,89	14,95	
Carga	1,23	14,43	14,49	
Índices				S_i S_m $M(\%)$
Barra 34	14,95	14,96	-0,07	

Caminhos de Transmissão		34E	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	14,37	-4,00

Caminhos de Transmissão		5	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	22,77	-36,92	43,38
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	14,98	0,16

Caminhos de Transmissão		34F	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	15,07	0,68

Caminhos de Transmissão		4	
34-21-22-19-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	33,01	-8,82	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	14,95	0,00

Caminhos de Transmissão		34G	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	22,76	-37,15	43,57
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	16,58	9,74

Caminhos de Transmissão		6	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-14-24-25			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	22,77	-36,92	43,38
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	15,01	0,39

Caminhos de Transmissão		34H	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	33,01	-8,87	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	17,6	14,94

Caminhos de Transmissão		7	
34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	33,01	-8,82	34,17
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	15,07	0,77

Caminhos de Transmissão		34I	
34-21-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	4,1788	2,421	4,83
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	24,33	38,47

Caminhos de Transmissão		10	
34-21-23			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	4,1788	2,421	4,83
Índices			
	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	20,12	25,670

Caminhos de Transmissão		34J	
34-21-22-23			
	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,45	3,91	14,97
Carga	2,604	2,198	3,41
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,97	38,05	60,66

Caminhos de Transmissão		9	
34-21-22-23			
Potência	Ativa	Reativa	Aparente
Geração	14,44	3,89	14,95
Carga	2,6	2,2	3,41
Índices	S_i	S_m	M(%)
Barra 34	14,95	19,08	21,620

4.3.

Uso dos Índices para Determinação do Ramo Crítico

Uma vez encontrado o caminho de transmissão mais carregado, o procedimento seguinte é determinar o ramo de transmissão crítico, responsável pelos índices deteriorados da barra crítica.

O objetivo agora é analisar todos os ramos do caminho de transmissão mais carregado, adicionando um novo ramo de cada vez, partindo desde o gerador até a barra de carga crítica ou do gerador crítico até a barra de carga.

É apresentada uma variação do método descrito no Capítulo 3: será adicionado um ramo de cada vez, mas a avaliação será realizada sem eliminar as barras intermediárias e utilizando-se os índices de estabilidade de tensão. O propósito dessa modificação é determinar o ramo que terá seu fluxo de potência ativa diminuído sem fazer uso dos equivalentes de duas barras, como nas Seções 3.1.5 e 3.2.5.

4.3.1.

Não-Uso de Equivalentes

A seguir serão apresentados os resultados das avaliações feitas para o caminho de transmissão mais carregado encontrado para a barra crítica (carga, geração e tensão controlada).

O cálculo das margens de potência será feito sem eliminar as barras intermediárias entre o gerador e a carga, como já dito. É importante ressaltar que o isolamento dessas barras é feito convertendo os fluxos de potência ativa e reativa que entram e saem em admitâncias equivalentes, da mesma maneira como foi feito na Seção 3.1.2.

4.3.1.1. Exemplo Numérico

a) Barra Crítica de Tensão Controlada

No exemplo da Seção 4.2.1.1.a), foi determinado o caminho mais carregado 16LA, composto pelos ramos que ligam as barras 34-21-17-16.

O 1º subcaminho a ser analisado sai da barra de geração 34 para a barra 21, e os resultados apresentados na Tabela 4.35 indicam que a margem na barra 21 encontra-se positiva e afastada do ponto de carga crítico. O 2º subcaminho a ser analisado sai da barra 34 para a 21 e para a barra 17. É possível observar que a margem na barra 17 se encontra em valores aceitáveis e o ponto de operação se localiza na parte superior da curva ϕ constante no plano SV.

Tabela 4.35 Determinação e Avaliação dos Sub-Caminhos de Transmissão da Barra 16

Ramo	Subcaminho	S_i	S_m	M (%)
1	34-21	14,5	91,28	84,11
2	34-21-17	5,64	27,3	79,34
3	34-21-17-16	17,11	12,98	-24,16

Observando-se a margem para todos os subcaminhos, verifica-se que não houve problema em transferir potência a partir do gerador 34 para as barras 21 e 17, já que as margens são positivas. No entanto, quando é adicionado o ramo que liga a barra 17 com a 16 se observa uma margem negativa com valor de -24,16%. Conclui-se que o ramo crítico é o último ramo adicionado.

b) Barra Crítica de Carga

O objetivo agora é determinar o ramo crítico do caminho de transmissão mais carregado: 31-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29, definido na Seção 4.2.1.1.b), analisando os subcaminhos que começam no gerador 31, adicionando um ramo de cada vez e finalizando na barra crítica 29.

Na Tabela 4.36 se apresentam os resultados das avaliações feitas nos subcaminhos. É possível observar que no 1º subcaminho que sai da barra 31 para a barra 17 a margem se encontra “folgada” e o ponto de operação encontra-se na parte superior da curva ϕ constante no plano SV.

Observa-se margem negativa quando da adição do 3º ramo, o qual liga a barra 16 com a barra 15, e volta a ser positiva quando é adicionado o 4º ramo com um valor de 41.64%.

A partir da adição do 5º ramo, a margem conserva-se negativa até chegar ao 10º e último ramo, o qual liga a barra 28 com a barra 29. Comparando-se as margens da Tabela 4.36, conclui-se que o ramo crítico é o ramo que liga a barra 11 com a barra 13.

Tabela 4.36 Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão da Barra 29

Ramo	Sub-Caminho	S_i	S_m	M (%)
1	31-17	13,58	83,43	83,72
2	31-17-16	17,11	20,46	16,38
3	31-17-16-15	23,09	20,19	-12,56
4	31-17-16-15-7	22,72	38,93	41,64
5	31-17-16-15-7-8	58,58	47,64	-18,68
6	31-17-16-15-7-8-10	53,79	34,42	-36,01
7	31-17-16-15-7-8-10-11	54,93	38,41	-30,06
8	31-17-16-15-7-8-10-11-13	53,04	3,07	-94,2
9	31-17-16-15-7-8-10-11-13-28	28,15	8,63	-69,35
10	31-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29	34,17	8,80	-74,24

c) Barra Crítica de Geração

Na Tabela 4.37 se apresentam os resultados da avaliação feita no caminho mais carregado 34-21-17-16-30-28-29 da barra 34 como barra crítica. É acrescentado um ramo de cada vez, calculando-se a margem na barra 34. No 1º subcaminho analisado, o qual sai da barra 34 para a barra 21, é possível observar que não existe nenhum problema em transferir potência ativa, a margem se encontra positiva, o que indica que o ponto de operação se encontra na parte superior da curva, e longe do ponto de geração crítico. O 2º subcaminho sai da barra 34 para a barra 21 e para barra 17 e, nos resultados, é possível observar que a margem na barra 34 se encontra positiva, o ponto de operação continua na parte superior da curva, mas com uma redução em comparação com a primeira margem.

Tabela 4.37 Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão da Barra 34

Ramo	Subcaminho	S_i	S_m	M (%)
1	34-21	14,97	96,84	84,54
2	34-21-17	14,97	35,99	58,41
3	34-21-17-16	14,97	22,22	32,64
4	34-21-17-16-30	14,97	18,41	18,71
5	34-21-17-16-30-28	14,97	8,56	-42,82
6	34-21-17-16-30-28-29	14,97	8,51	-43,13

A medida que são incluídos novos ramos, a margem vai decrescendo. 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 o ramo crítico é o ramo que liga a barra 28 com a barra 29.

4.3.1.2. Comparação dos Resultados na Avaliação dos Ramos Críticos

A seguir são comparados os resultados obtidos nas Seções 3.1.5 e 3.2.5 com os resultados obtidos na seção anterior, sem reduzir o caminho a um sistema de duas quando da adição de cada ramo.

a) Barra de Carga

Na Tabela 4.38 se apresentam os resultados das avaliações feitas no caminho mais carregado da Seção 3.1.5 e as avaliações feitas com a modificação descrita na Seção 4.3.1 e apresentadas na Seção 4.3.1.1.

Os resultados, com e sem eliminação das barras intermediárias, confirmam que o ramo crítico é o 7º e último ramo, o qual liga a barra 28 com a barra 29.

Os valores das margens obtidas com o método descrito no Capítulo 3 são mais pessimistas para todos os subcaminhos avaliados.

Tabela 4.38 Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 29

Ramo	Subcaminho	Resultados sem Eliminação das Barras Intermediárias			Método do Capítulo 3		
		S _i	S _m	M (%)	S _i	S _m	M (%)
1	34-21	14,50	94,21	84,6	14,40	43,18	66,65
2	34-21-22	6,58	45,82	85,64	6,54	21,68	69,82
3	34-21-22-19	4,51	29,16	84,51	4,48	8,92	49,81
4	34-21-22-19-16	12,71	14,4	11,68	12,66	13,96	-9,36
5	34-21-22-19-16-30	6,35	12,12	47,59	6,34	6,91	8,16
6	34-21-22-19-16-30-28	5,75	28,53	79,84	5,74	6,95	-17,38
7	34-21-22-19-16-30-28-29	34,17	28,63	-16,24	34,15	337,42	-89,88

b) Barra de Geração

Na Tabela 4.39 são apresentados os resultados da avaliação de cada ramo do caminho mais carregado, determinado no exemplo da Seção 3.2.1. É possível observar que as duas avaliações identificam o mesmo ramo crítico.

A margem se encontra positiva quando a adição do 1º, 2º, 3º e 4º ramos. No entanto, quando é feita a adição do 5º e 6º ramos, surgem valores negativos nas duas margens, e os valores são bastante diferentes. O método da Seção 3.2 apresenta resultados mais pessimistas para todos os subcaminhos avaliados.

Tabela 4.39 Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 34

Ramo	Subcaminho	Resultados sem Eliminação das Barras Intermediárias			Método do Capítulo 3		
		S _i	S _m	M (%)	S _i	S _m	M (%)
1	34-21	14,97	96,84	84,54	14,95	62,64	76,13
2	34-21-17	14,97	35,99	58,41	14,95	25,84	42,14
3	34-21-17-16	14,97	22,22	32,64	14,95	17,38	13,98
4	34-21-17-16-30	14,97	18,41	18,71	14,95	15,63	4,33
5	34-21-17-16-30-28	14,97	8,56	-42,82	14,95	72,43	-384,33
6	34-21-17-16-30-28-29	14,97	8,51	-43,13	14,95	79,94	-434,57

4.3.2. Uso de Injeção de Potência Equivalente

O objetivo desta seção é, mais uma vez, avaliar os subcaminhos do caminho de transmissão mais carregado encontrado para a barra crítica (carga, geração e tensão controlada). No entanto, o isolamento das barras intermediárias é feito representando os fluxos de potência ativa e reativa que saem e que chegam nos nós intermediários como injeção de potência, da mesma forma em que foi realizado na seção 4.2.2. Na Seção 4.3.1 esse isolamento foi feito através de admitâncias.

Da mesma forma que na Seção 4.3.1, será acrescentado um ramo de cada vez, avaliando-se os índices de estabilidade de tensão sem realizar eliminação das barras intermediárias. Na verdade, essa eliminação é impossível quando existem injeções de potência nas barras intermediárias.

4.3.2.1. Exemplo Numérico

a) Barra Crítica de Tensão Controlada

Na Tabela 4.40 se apresentam os resultados da avaliação feita no caminho mais carregado. O 1º subcaminho a ser analisado sai da barra de geração 34 para a barra 21 e os resultados indicam que a margem na barra 21 encontra-se positiva e afastada do ponto de operação crítico.

Tabela 4.40 Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 16

Ramo	Subcaminho	S_i	S_m	M (%)
1	34-21	14,50	94,37	84,63
2	34-21-22	6,58	47,57	86,17
3	34-21-22-19	4,51	22,78	80,18
4	34-21-22-19-16	12,71	8,99	-29,30

A seguir, inclui-se um novo ramo, o 2º subcaminho a ser analisado sai da barra 34 para a 21 e para a barra 22. É possível observar na Tabela 4.37 que a margem na barra 22 se encontra em valores aceitáveis.

Observando-se a margem para todos os subcaminhos, verifica-se que não houve problema em transferir potência a partir do gerador 34 para as barras 21, 22 e 19, já que as margens são positivas. No entanto, quando é adicionado o ramo que liga a barra 19 com a barra crítica 16 se observa uma margem negativa com valor de -29,30%.

Diz-se que o ramo crítico que está sendo responsável por fazer com que os índices da barra 16 estejam deteriorados é o último ramo adicionado, o qual liga a barra 19 com a barra 16.

b) Barra Crítica de Carga

A avaliação de cada um dos ramos que compõem o caminho 34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29 mais crítico da barra 29 é apresentada na Tabela 4.41. É possível observar no 1° e no 2° subcaminho analisado, valores de margem positivos e afastados do ponto de carga crítica, ou seja, não existe problema em transferir potência ativa desde a barra de geração 34. Quando é feita a adição do 3° ramo, o valor da margem apresenta sinal negativo indicando operação na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV. As margens continuam piorando na medida em que são adicionados novos ramos.

Tabela 4.41 Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 29

Ramo	Subcaminho	S_i	S_m	M (%)
1	34-21	14,50	94,38	84,63
2	34-21-17	5,64	27,86	79,76
3	34-21-17-16	17,11	12,67	-25,93
4	34-21-17-16-15	23,09	12,53	-45,76
5	34-21-17-16-15-7	22,72	14,43	-36,51
6	34-21-17-16-15-7-8	58,58	23,70	-59,53
7	34-21-17-16-15-7-8-10	53,79	11,42	-78,78
8	34-21-17-16-15-7-8-10-11	54,93	12,59	-77,08
9	34-21-17-16-15-7-8-10-11-13	53,04	0,76	-98,57
10	34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28	28,17	0,75	-97,34
11	34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29	34,17	0,773	-97,74

Ainda que se tenha convencionado que o ramo mais crítico se apresenta quando é adicionado o 9º ramo que liga as barras 11 e 13 ($M = -98,57\%$), as margens, quando adicionados o 10º e o 11º ramos, se encontram bem próximas ao valor da margem quando é adicionado o 9º ramo.

c) Barra Crítica de Geração

Na Tabela 4.42 se apresentam os resultados da avaliação feita no caminho mais carregado 34-21-22-19-16-30-28-29 da barra 34 como barra crítica. No 1º subcaminho analisado, o qual sai da barra 34 para a barra 21, é possível observar que não existe nenhum problema em transferir potência ativa, a margem se encontra positiva, o que indica que o ponto de operação se encontra na parte superior da curva e longe do ponto de geração crítico. O 2º subcaminho sai da barra 34 para a barra 21 e para barra 22 e, nos resultados, é possível observar que o ponto de operação continua na parte superior da curva, mas com uma redução em comparação com a primeira margem.

À medida que são incluídos novos ramos, a margem vai decrescendo. 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.

Tabela 4.42 Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 34

Ramo	Subcaminho	S_i	S_m	M (%)
1	34-21	14,97	96,84	84,54
2	34-21-22	14,97	49,06	69,49
3	34-21-22-19	14,97	28,15	46,82
4	34-21-22-19-16	14,97	18,90	20,80
5	34-21-22-19-16-30	14,97	16,78	10,80
6	34-21-22-19-16-30-28	14,97	6,80	-54,58
7	34-21-22-19-16-30-28-29	14,97	6,67	-55,44

As margens quando da adição dos dois últimos ramos ficaram muito próximas. O último ramo acrescentado causa a menor margem, mas, quando da adição do 6º ramo que liga as barras 30 e 28, o ponto de operação passa a operar na parte inferior da curva ϕ constante no plano SV.

4.3.2.2.

Comparação dos Resultados na Avaliação do Ramo Crítico com Uso de Admitâncias e de Injeções

A seguir será apresentada uma comparação dos resultados obtidos na avaliação dos subcaminhos do caminho de transmissão mais carregado, com o uso de admitância e de injeções. Nos dois casos, as barras intermediárias do caminho não são eliminadas quando da adição de cada ramo.

a) Barra de Tensão Controlada

Na Tabela 4.43 são apresentadas as avaliações feitas com o uso de admitâncias e uso de injeções. As duas avaliações apontam o mesmo ramo crítico, o último a ser adicionado.

Pode-se observar que a margem dos três primeiros ramos adicionados tem valores positivos e se encontram próximas. No entanto, quando é adicionado o 4º e último ramo, as margens passam a ter valor negativo.

A pior margem é obtida quando os subcaminhos são avaliados com o uso de injeções ($M=-29,3\%$).

Tabela 4.43 Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 16

Ramo	Subcaminho	Resultados da Seção 4.3.2.1			Uso de Admitâncias e com as Barras Intermediárias		
		S_i	S_m	$M(\%)$	S_i	S_m	$M(\%)$
1	34-21	14,50	94,37	84,63	14,50	94,2	84,6
2	34-21-22	6,58	47,57	86,17	6,58	45,82	85,64
3	34-21-22-19	4,52	22,78	80,18	4,52	29,15	84,51
4	34-21-22-19-16	12,72	8,99	-29,3	12,72	12,34	-2,93

b) Barra de Carga

Na Tabela 4.44 se apresentam os resultados das avaliações feitas nos subcaminhos do caminho mais carregado, obtidos no exemplo da Seção 4.3.2.1. As duas avaliações confirmam que o ramo crítico é o 9º e último ramo adicionado, o qual liga a barra 11 com a barra 13.

É possível observar que as margens obtidas com o uso de admitâncias e com o uso de injeções são muito próximas quando da adição do 1º, 2º, 3º e 4º ramos. Valores negativos são observados quando da adição do 3º ramo. A partir da adição do 5º ramo, os valores da margem começam a se afastar.

Tabela 4.44 Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 29

Ramo	Subcaminho	Resultados da Seção 4.3.2.1			Uso de Admitâncias e com as Barras Intermediárias		
		S _i	S _m	M (%)	S _i	S _m	M (%)
1	34-21	14,50	94,38	84,63	14,50	91,28	84,11
2	34-21-17	5,64	27,86	79,76	5,64	27,3	79,34
3	34-21-17-16	17,11	12,67	-25,93	17,11	12,73	-25,62
4	34-21-17-16-15	23,09	12,53	-45,76	23,09	12,61	-45,41
5	34-21-17-16-15-7	22,72	14,43	-36,51	22,72	40,94	44,49
6	34-21-17-16-15-7-8	58,58	23,70	-59,53	58,58	46,17	-21,18
7	34-21-17-16-15-7-8-10	53,79	11,42	-78,78	53,79	38,00	-29,36
8	34-21-17-16-15-7-8-10-11	54,93	12,59	-77,08	54,93	40,55	-26,18
9	34-21-17-16-15-7-8-10-11-13	53,04	0,76	-98,57	53,04	11,71	-77,92
10	34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28	28,17	0,75	-97,34	28,15	17,40	-38,16
11	34-21-17-16-15-7-8-10-11-13-28-29	34,17	0,773	-97,74	34,17	17,99	-47,35

c) Barra de Geração

Na Tabela 4.45 se apresentam os resultados da avaliação feita nos subcaminhos do caminho de transmissão mais carregado, determinado na Seção 4.2.2. As duas avaliações confirmam que o ramo crítico é o último ramo adicionado.

No 1º subcaminho analisado, o qual sai da barra 34 para a barra 21, as margens se encontram positivas e próximas nas duas avaliações. Quando da adição do 2º, 3º, 4º e 5º ramos, as margens continuam sendo positivas e afastadas do ponto crítico de geração.

Observa-se margem negativa somente quando da adição do 6º ramo, entre as barras 30 e 28, e quando a adição do 7º ramo, entre as barras 28 e 29. Valores diferentes são observados em cada avaliação.

Tabela 4.45 Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 34

Ramo	Subcaminho	Resultados da Seção 4.3.2.1			Uso de Admitâncias e com as Barras Intermediárias		
		S _i	S _m	M (%)	S _i	S _m	M (%)
1	34-21	14,97	96,84	84,54	14,97	96,84	84,54
2	34-21-22	14,97	49,06	69,49	14,97	49,26	69,61
3	34-21-22-19	14,97	28,15	46,82	14,97	28,59	47,65
4	34-21-22-19-16	14,97	18,90	20,8	14,97	19,05	21,42
5	34-21-22-19-16-30	14,97	16,78	10,8	14,97	17,14	12,67
6	34-21-22-19-16-30-28	14,97	6,80	-54,58	14,97	10,52	-29,73
7	34-21-22-19-16-30-28-29	14,97	6,67	-55,44	14,97	10,47	-30,05

4.3.2.3.

Comparação da Avaliação do Ramo Crítico com o Método do Capítulo 3 e com o Uso de Injeções e sem Reduzir a Duas Barras

A seguir são comparados os resultados obtidos nas Seções 3.1.5 e 3.2.5 com os resultados obtidos com as modificações da Seção 4.3.2, quando é utilizado o uso de injeções de potência no isolamento dos caminhos e sem fazer eliminação das barras intermediárias.

a) Barra de Carga

Na Tabela 4.46 se apresentam os resultados das avaliações feitas nos subcaminhos do caminho mais carregado, obtidos no exemplo da Seção 3.1.5. As duas avaliações confirmam que o ramo crítico é o 7º e último ramo adicionado, o qual liga a barra 28 com a barra 29.

É possível observar que as margens obtidas com o método do Capítulo 3 apresentam um resultado mais pessimista para quatro dos sete subcaminhos avaliados. A margem se encontra positiva quando da adição do 1º, 2º, 3º. Valores negativos são observados quando da adição do 4º ramo. São observadas margens mais pessimistas, com a avaliação feita com o uso de injeções, quando da adição do 4º, 6º e 7º ramos.

Tabela 4.46 Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 29

Ramo	Sub-Caminho	Resultados da Seção 4.3.2.1			Método do Capítulo 3		
		S_i	S_m	M(%)	S_i	S_m	M(%)
1	34-21	14,50	94,38	84,6	14,40	43,18	66,65
2	34-21-22	6,58	47,56	86,17	6,54	21,68	69,82
3	34-21-22-19	4,51	22,78	80,18	4,48	8,92	49,81
4	34-21-22-19-16	12,71	8,99	-29,3	12,66	13,96	-9,36
5	34-21-22-19-16-30	6,35	7,99	20,6	6,34	6,91	8,16
6	34-21-22-19-16-30-28	5,75	2,31	-59,7	5,74	6,95	-17,38
7	34-21-22-19-16-30-28-29	34,17	2,12	-93,78	34,15	337,42	-89,88

b) Barra de Geração

Na Tabela 4.47 são apresentados os resultados da avaliação nos subcaminhos do caminho mais carregado, determinado no exemplo da Seção 3.2.1. É possível observar que as duas avaliações identificam o mesmo ramo crítico.

A margem se encontra positiva quando a adição do 1º, 2º, 3º e 4º ramos. No entanto, quando é feita a adição do 5º e 6º ramos, surgem valores negativos nas duas margens, e os valores são bastante diferentes. O método da Seção 3.2 apresenta resultados mais pessimistas para todos os subcaminhos avaliados.

Tabela 4.47 Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 34

Ramo	Sub-Caminho	Resultados da Seção 4.3.2.1			Método do Capítulo 3		
		S _i	S _m	M (%)	S _i	S _m	M(%)
1	34-21	14,97	96,84	84,54	14,95	62,64	76,13
2	34-21-17	14,97	36,49	58,98	14,95	25,84	42,14
3	34-21-17-16	14,97	23,58	36,53	14,95	17,38	13,98
4	34-21-17-16-30	14,97	20,17	25,79	14,95	15,63	4,33
5	34-21-17-16-30-28	14,97	7,0	-53,23	14,95	72,43	-384,33
6	34-21-17-16-30-28-29	14,97	6,85	-54,18	14,95	79,94	-434,57

4.4. Conclusões

Na Seção 4.1 determinou-se que, para definir as sub-redes de carga ou geração quando existem barras intermediárias de tensão controlada com compensadores síncronos/estáticos ou LTC na rede, não é preciso chegar, respectivamente, até barra de geração ou até barra de carga terminal. A busca para determinar a sub-rede pode acabar nas barras de tensão controlada existentes.

Analisando a sub-rede apresentada para a barra 29 pelo método descrito na Seção 3.1 e com o uso de admitâncias e de injeções, verifica-se que não existem diferenças na determinação dela, pois não depende do método utilizado, mas sim dos sentidos dos fluxos de potência ativa no sistema. No entanto, quando é realizado o isolamento da sub-rede se apresenta uma diferença, pois o uso de admitâncias equivalentes afeta diretamente o elemento próprio da barra isolada da matriz Y_{barra} , enquanto que o uso de injeções não modifica a matriz. Consequentemente, como os isolamentos da sub-rede são diferentes, as sub-redes são diferentes, embora com as mesmas barras e linhas.

A análise realizada para a sub-rede da barra crítica de carga também é válida para a barra crítica de geração, isto é, a barra 34. As sub-redes, embora com as mesmas barras e linhas, apresentam diferenças em barras que eram conectadas ao resto da rede.

É importante ressaltar que para a barra de tensão controlada não foi realizada uma comparação do método descrito no Capítulo 3 com as modificações propostas neste capítulo porque, antes dessa dissertação, não havia sido apresentada uma proposta para determinar a sub-rede desta barra.

Foram propostas duas modificações para a determinação do caminho mais carregado dentro de uma sub-rede. Quando se comparou os resultados com os obtidos sem as modificações, estes foram diferentes em muitos casos, ou seja, os caminhos mais carregados foram diferentes. Em alguns casos, embora diferentes, os caminhos tinham vários ramos em comum. Em outros casos, a ordenação não

pareceu relevante, pois vários caminhos estavam (quase) igualmente carregados. Não foi possível imaginar uma forma de avaliar que resultados eram mais adequados.

As mesmas duas modificações foram utilizadas para a determinação do ramo crítico do caminho mais carregado. Quando se comparou os resultados com os obtidos sem as modificações, os ramos apontados foram os mesmos.