

## 8

### Aplicação no Sistema Brasileiro

#### 8.1

##### Introdução

Como no estudo do sistema S35, utilizado no SAGE do CEPEL, aplica-se o método para reforçar as condições de estabilidade de tensão em barras de tensão controlada por geradores e compensadores síncronos em uma parte do sistema brasileiro. O objetivo é aumentar a margem de potência destas barras. Inicialmente o interesse está em produtores independentes. O sistema real em estudo tem 3514 barras, 293 geradores, 387 *shunts*, 1824 transformadores, 4949 circuitos e 65 áreas elétricas.

Para o caso da Usina Termoelétrica Norte Fluminense (UTE NF), que já está em operação, o objetivo deve ser monitorar o carregamento no tronco de transmissão entre Adrianópolis e Vitória, e sua própria injeção de potência, assim como da vizinha Usina Termoelétrica Mário Lago (UTE Mário Lago).

A UTE NF, localizada na área Rio, conta atualmente com três geradores com uma capacidade instalada de 191,5 MW cada um, e são acionados por turbinas de combustão a gás. Conta também com uma unidade com capacidade instalada de 293,4 MW, acionada por uma turbina a vapor operando em ciclo combinado. Com esse arranjo e descontando as perdas no transformador e serviços auxiliares, a potência total instalada é de 853 MW no ponto de conexão de 345 kV na SE Macaé, medido à temperatura ambiente em condições ISO.

A UTE Mário Lago, localizada também na área Rio, conta com 12 grupos conectados na barra 3977 - M.Lago-12Gr de 45,6 MW cada um e 8 grupos conectados na barra 3978 - M.Lago-8Gr de 45,6 MW cada um, todos acionados por turbinas de combustão a gás. Com esse arranjo e descontando as perdas no transformador e serviços auxiliares, a potência total instalada é de 912 MW no ponto de conexão de 345 kV na SE Macaé, medido à temperatura ambiente em condições ISO.

Neste exemplo numérico, considera-se o caso do planejamento quadrimestral do Operador Nacional do Sistema Elétrico, em carga pesada de setembro de 2006. Nesse cenário, a UTE NF estava gerando 570 MW na barra 3962 - N.Flu-G1-3Gr e 291 MW na barra 3963 - N.Flu-V1-1Gr. Inicialmente as unidades de geração do Mário Lago encontram-se desligadas.

A pior situação estudada é a possibilidade de geração simultânea da UTE NF e UTE Mário Lago.

## 8.2

### **Cenário em Estudo: Máxima Injeção de Potência nos Geradores da UTE Mário Lago Alimentando Acréscimo de Carga em Vitória**

O ponto de operação a ser considerado foi obtido através do aumento de geração na barra 3978 - M.Lago-8Gr e depois na barra 3977 - M.Lago-12Gr da UTE Mário Lago. Essas variações são absorvidas pela barra 149 - Vitória---345 através das barras de carga 2625 - Bmineira---138 e 2629 - CST---138 de 138 kV localizadas em Pitanga. Os índices  $\beta$  e M são acompanhados, já que traduzem o carregamento do sistema no que diz respeito às condições de estabilidade de tensão. Para as barras 3962 - N.Flu-G1-3Gr e 3963 - N.Flu-V1-1Gr, o resultado é mostrado nas Figuras 8.1 e 8.2, e para as barras 3977 - M.Lago-12Gr e 3978 - M.Lago-8Gr, mostrado nas Figuras 8.3 e 8.4.

Observa-se que os índices  $\beta$  e M na barra 3962 - N.Flu-G1-3Gr, respectivamente, nas Figuras 8.1 e 8.2, aproximam-se do ponto de máxima geração. Os índices na barra de geração 3963 - N.Flu-V1-1Gr praticamente se mantiveram constantes. Portanto, é verificado que a barra com os grupos acionados por turbina a gás encontra-se mais carregada do que a barra com o único grupo acionado por turbina a vapor. Há inversão do fluxo de potência ativa entre Macaé e Adrianópolis quando a injeção de potência pela UTE Mário Lago atinge 375,8 MW.

O aumento de injeção de potência pelos grupos de geração da UTE Mário Lago foi interrompido quando os índices  $\beta$  e M indicaram a proximidade do limite de estabilidade de tensão na barra 3962 - N.Flu-G1-3Gr. Portanto, a injeção de potência na barra 3978 - M.Lago-8Gr, com  $\beta=17,8^\circ$  e  $M=20,1\%$ , está limitada a

sua capacidade instalada de 364,8 MW e na barra 3977 - M.Lago-12Gr, com  $\beta=88,0^\circ$  e  $M=91,8\%$ , esta limitada a 28,3 MW sempre que exista a garantia que foi representado completamente todos os dispositivos de controle do sistema.

Desde já se comenta que não foi tomado em conta o chaveamento automático e discreto de bancos de capacitores/reatores e a atuação manual de LTC sistêmicos por parte dos operadores do sistema porque o interesse é mostrar o método de reforço das condições de estabilidade de tensão. Unicamente com a incorporação destes dispositivos de controle de tensão garante-se que os pontos de operação, durante o processo de crescimento de carga, representem de forma mais próxima da realidade os prováveis ajustes praticados pelos operadores em tempo real, garantindo margens e interações de controle mais precisos.

Mesmo assim, no tronco de transmissão entre Adrianópolis e Vitória 345 kV não têm-se dispositivos de chaveamento automático e discreto de capacitores/reatores e experiências com a atuação manual de LTC por parte dos operadores e, portanto, pode-se considerar como válidos os resultados para a UTE Mário Lago e UTE Norte Fluminense.

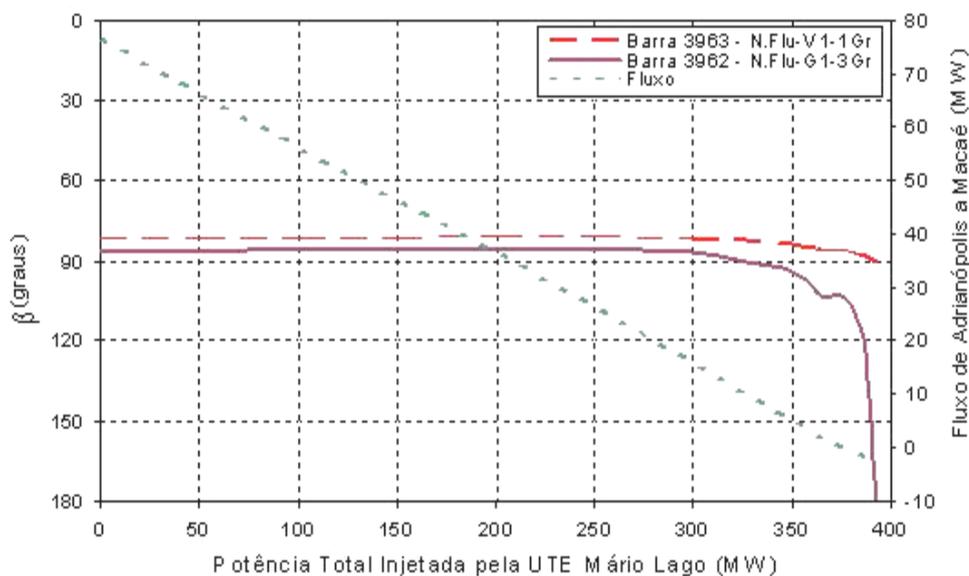


Figura 8.1 - Índice  $\beta$  nas Barras da UTE NF e Fluxo entre Adrianópolis e Macaé

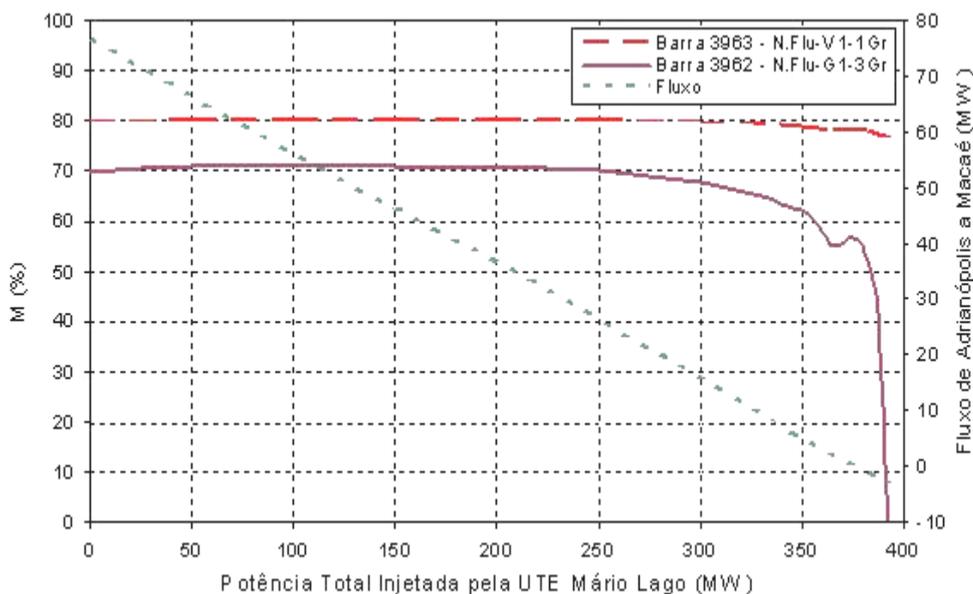


Figura 8.2 - Índice M nas Barras da UTE NF e Fluxo entre Adrianópolis e Macaé

Entende-se que inicialmente a injeção de potência pela UTE Mário Lago começou pelos geradores da barra 3978 - M.Lago-8Gr e quando esta ficou esgotada foi continuada pelo gerador da barra 3977 - M.Lago-12Gr. Este comportamento foi observado nas Figuras 8.3 e 8.4 com os índices  $\beta$  e M nas barras 3977 - M.Lago-12Gr e 3978 - M.Lago-8Gr que estavam perdendo cada vez mais sua robustez, ou seja, estavam-se aproximando a zero. Nota-se que os geradores da barras 3977 - M.Lago-12Gr ainda tinham capacidade instalada de geração disponível para ser injetado ao sistema, mas os índices  $\beta$  e M na barra 3962 - N.Flu-G1-3Gr indicaram a proximidade do limite de estabilidade de tensão.

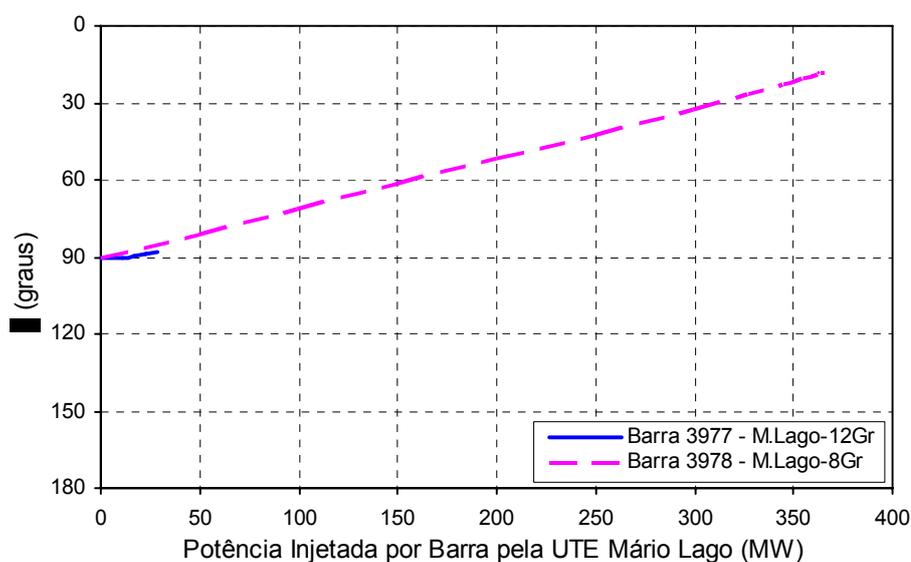


Figura 8.3 - Índice  $\beta$  nas Barras 3977 - M.Lago-12Gr e 3978 - M.Lago-8Gr da UTE Mário Lago

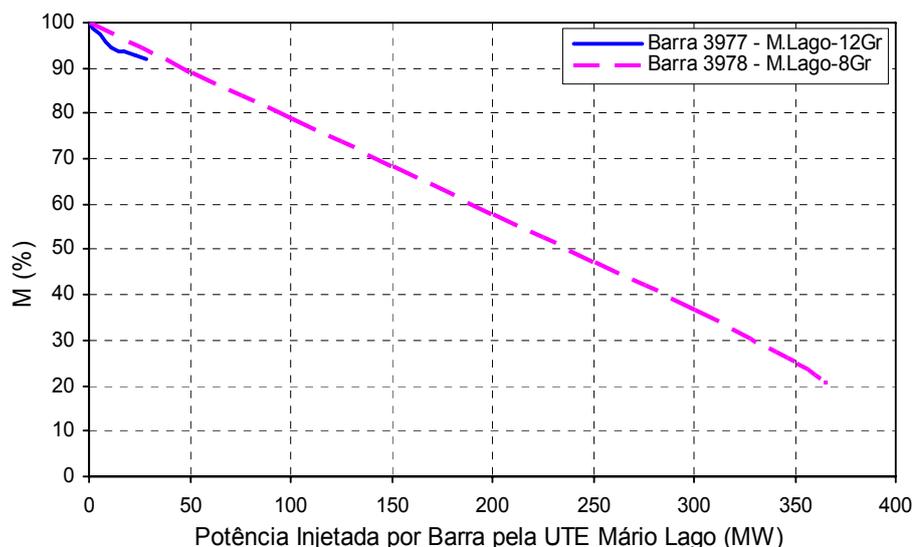


Figura 8.4 - Índice M nas Barras 3977 - M.Lago-12Gr e 3978 - M.Lago-8Gr da UTE Mário Lago

A partir do teste é possível verificar que aumentando-se gradativamente a geração na UTE Mário Lago a máxima injeção seria de 393,1 MW, limitada pelos índices quase nulos nas unidades da UTE NF, gerando 364,8 MW (máxima capacidade) na barra 3978 - M.Lago-8Gr e 28,3 MW na barra 3977 - M.Lago-12Gr. Este ponto de operação que corresponde à máxima injeção de potência nos geradores da UTE Mário Lago alimentando acréscimo de carga em Vitória é considerado ponto de máximo carregamento e servirá para análise deste sistema.

Observa-se na Tabela 8.1 os índices resultantes da injeção de 393,1 MW pela UTE Mário Lago. Não é mais possível continuar injetando potência pela UTE Mário Lago, porque os índices  $\beta=179,3^\circ$  e  $M=0,8\%$  na barra 3962 - N.Flu-G1-3Gr indicam proximidade do ponto de máxima geração. As variações de geração são absorvidas pela barra de carga 2625 - Bmineira---138 que passou de 7,0 MW para 108,7 MW e a barra de carga 2629 - CST---138 que passou de 18,6 MW para 310,0 MW. Houve uma inversão do sentido do fluxo, agora com 3,6 MW saindo da barra 3966 - Macaé---345 para a barra 140 - Adriano---345. Esta injeção de potência representa 43,1 % da capacidade instalada na UTE Mário Lago.

Tabela 8.1 - Máxima Injeção de Potência pela UTE Mário Lago Limitado pela Máxima Geração da UTE NF com Índices Positivos

Barra		Ponto de Operação em Análise		
Nº	Tipo	$\beta$ (graus)	M (%)	II
3962	PV	179,3	0,8	-0,989
3963	PV	90,4	76,6	-0,040
3977	PV	88,0	91,8	-0,082
3978	PV	17,8	20,1	-0,799
2625	PQ	161,0	69,4	-0,299
2629	PQ	167,2	45,4	-0,538

Na Tabela 8.2 observa-se que, quando a UTE Mário Lago injeta potência no sistema, as barras do tronco de transmissão Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória tornam-se mais carregadas. Nesta situação o índice da barra 140 - Adriano---345 passou de  $\beta=126,0^\circ$  a  $\beta=135,9^\circ$ , o da barra 3966 - Macaé---345 passou de  $\beta=99,1^\circ$  a  $\beta=115,8^\circ$ , o da barra 147 - Campos---345 passou de  $\beta=103,9^\circ$  a  $\beta=135,7^\circ$  e, finalmente, o da barra 149 - Vitória---345 passou de  $\beta=118,1^\circ$  a  $\beta=164,5^\circ$ .

A barra 149 - Vitória---345 com índice  $\beta=164,5^\circ$  apresentou-se como a mais carregada entre todas as barras do tronco de transmissão Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória. Isto porque nela chega o maior fluxo de potência ativa que é 875,7 MW, proveniente principalmente da barra 90 - Viana---345, da barra 147 - Campos---345 e da barra 385 - Opreto2---345.

Tabela 8.2 - índices das Barras do Tronco de Transmissão entre Adrianópolis e Vitória Considerando Aumento da Geração pela UTE Mário Lago

Barra		Ponto de Operação em Análise
Nº	Tipo	$\beta$ (graus)
140	C	135,9
3966	P	115,8
147	R	135,7
149	P	164,5
90	P	163,3

Na Figura 8.5, correspondente ao ponto de operação em análise, são mostrados os fluxos de potência ativa e reativa considerando a máxima injeção de potência possível pelos geradores da UTE Mário Lago, limitado pelos índices das unidades da UTE NF. Observa-se que as tensões na barra 147 - Campos---345, na barra 90 - Viana---345 e na barra 149 - Vitória---345 após a injeção de 393,1 MW pela UTE Mário Lago ficaram, respectivamente, em  $V = 0,942 \angle -65,0^\circ$  pu,  $V = 0,884 \angle -81,8^\circ$  pu e  $V = 0,881 \angle -82,2^\circ$  pu, valores fora da faixa normal de operação.

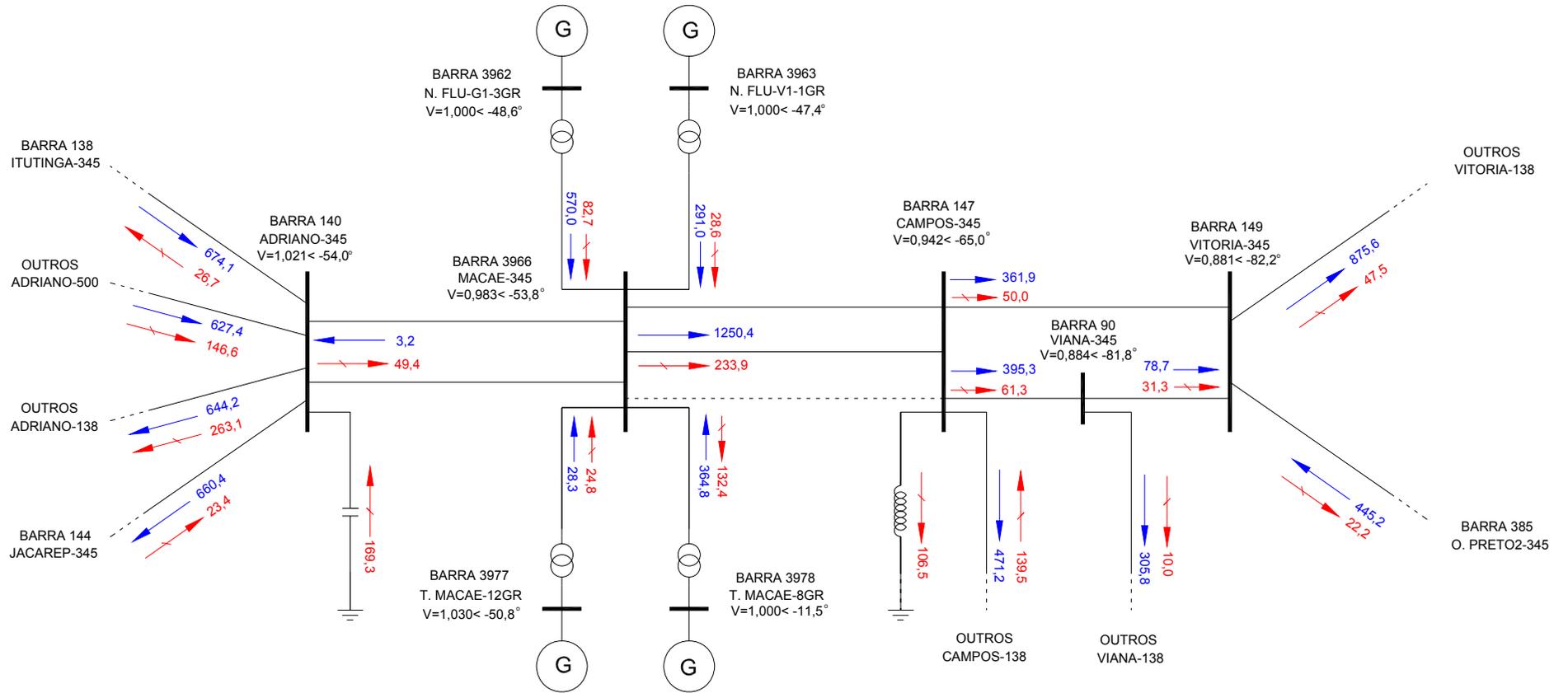


Figura 8.5 - Fluxos de Potência Ativa e Reativa Considerando 393,1 MW de Injeção de Potência pela UTE Mário Lago

### 8.3

#### Identificação da Barra de Geração Crítica

No ponto de operação em análise, que agora em adiante será chamando de caso-base, foram identificadas as barras de geração 4042 - AIMORES--3GR da área 2 e 1107 - ITAIPU60-9GR da área 17 operando com índices negativos. A primeira barra com  $\beta = -84,5^\circ$  e  $M = -322,7\%$  e a segunda com  $\beta = -28,2^\circ$  e  $M = -6,9\%$ . Por outro lado, o interesse de análise está nos produtores independentes já citados e conectados ao tronco de transmissão de 345 kV entre Adrianópolis e Vitória. A barra de geração crítica nesta área é a 3962 - N.FLU-G1-3GR com  $\beta = 179,3^\circ$  e  $M = 0,8\%$  que está bem próximo ao ponto de máxima geração. Portanto, a função reforço das condições de segurança de tensão estará concentrada nesta área.

Não existe barra de tensão controlada por compensadores síncronos com índices negativos, Mesmo assim, entre estas, foi a barra 48 - IBIUNA---4CS da área 1 com  $\beta = 175,0^\circ$  e  $M = 70,6\%$  que mostrou-se a mais carregada e sensível (a que mais injetava potência reativa) ao incremento de geração pela UTE Mário Lago para compensar aumento de carga em Vitória.

### 8.4

#### Eliminação de Restrições Violadas

No caso-base há várias barras com tensões fora da faixa normal de operação e, portanto, estas precisam ser corrigidas antes da identificação do caminho mais carregado que sai da barra de geração crítica e minimização do fluxo de potência no ramo crítico. Entende-se por tensões fora da faixa normal de operação quando estas não estão dentro dos valores especificados no código de execução DGLT do arquivo de rede. Espera-se que após este processo de eliminação de restrições violadas, a barra de geração crítica 3962 - N.FLU-G1-3GR da área 41 e as outras com índices negativos aumentem sua margem de potência. Isto porque, na maioria dos casos, uma elevação do perfil de tensão acarreta em aumento das margens.

Usa-se a função-objetivo DGMW do programa computacional FLUPOT sem nenhuma restrição de fluxo de potência em ramos de transmissão. As únicas

opções de controle ativadas são: QGEN que controla os limites de geração de potência reativa, VGEN que controla os limites de tensão, PGEN que controla os limites de geração de potência ativa e TAPC que controla os limites de variação dos *taps* do sistema. A alteração do perfil de tensão é feito através do redespacho reativo nas barras de geração. As barras *swing* 501 - I.SOLTE-20GR, 1040 - RinconEq-500, 1100 - ITAIPU50-9GR e 8004 - ALU\_BINF-1GR são as únicas responsáveis para fechar o balanço de potência ativa e absorver a variação das perdas ativas da rede.

Se o código PGEN não for especificado, a geração de potência ativa será fixada no valor da rede em todas as barras PV, exceto na barra de referência onde os limites de geração serão liberados ( $\pm \infty$ ).

Se o código VGEN não for especificado, durante a otimização a tensão nas barras PV será considerada fixa no valor original, contanto que a geração de potência reativa correspondente não atinja o seu limite. Caso isto ocorra, a tensão é liberada e a geração de potência reativa é fixada no valor correspondente. Quando a tensão na barra PV é liberada nestas circunstâncias, não são observadas as faixas de tensão especificados para estas barras. Quando não se especificam os limites de tensão das barras ou áreas no arquivo FPODAT associadas ao código VGEN, estas são ajustadas de acordo aos dados dos grupos limites de tensão do arquivo de rede conforme Tabela 8.3. Vários destes grupos limites de tensão apresentam tensões baixas porque estas correspondem a barras fictícias do sistema.

Se o código QGEN não for especificado a geração de potência reativa será fixada no valor original em todas as barras PV.

Se o código TAPC não for especificado, os *taps* do sistema serão fixados no valor original em todos os transformadores da rede.

O controle de susceptância *shunt* (SHNC) não foi utilizado apesar que neste sistema existem capacitores / reatores chaveáveis, isto com a finalidade de limitar as injeções de potência reativa no sistema e assim fazer que o método de reforço seja mais exigido, em uma região de operação mais limitada.

Tabela 8.3 - Dados dos Grupos Limites de Tensão

DGLT	(Vmn	(Vmx
(G		
O	0,400	1,900
8	0,950	1,050
9	0,500	1,300
U	0,900	1,046
Y	0,950	1,100
W	0,950	1,048
5	0,950	1,050
7	0,950	1,050
4	0,950	1,050
6	0,950	1,050
3	0,950	1,046
V	0,950	1,048
X	0,950	1,100
Z	0,950	1,046
99		

Na Tabela 8.4 é mostrado que após a eliminação de restrições violadas uma nova barra crítica na área 41 é identificada que é a barra 3978 - M.Lago-8Gr com  $\beta=25,8^\circ$  e  $M=28,7\%$ . Todas as tensões das barras passaram a operar na suas respectivas faixas de operação normal de tensão. Houve uma redução de geração de potência na barra 3962 - N.FLU-G1-3GR de 587,1 MVA a 578,4 MVA, e isso significou que os índices  $\beta$  e  $M$  se afastaram do ponto de máxima geração e outra barra seja identificada como crítica.

Após a eliminação das restrições violadas as únicas barras *swing* que mudaram sua geração de potência foi a barra 501 - I.SOLTE-20GR que passou de 2864,1 MW a 2918,5 MW ( $\Delta P=54,4$  MW) e a barra 1100 - ITAIPU50-9GR de 6681,0 MW a 6680,5 MW ( $\Delta P=0,5$  MW). Nota-se também que as perdas ativas do sistema aumentaram de 3023,7 MW no caso-base para 3077,5 MW.

A título de comparação com o caso-base, a barra de geração 4042 - AIMORES--3GR da área 2 passou a ter índices positivos  $\beta= 51,4^\circ$  e  $M=48,7\%$ , enquanto que a barra de geração 1107 - ITAIPU60-9GR da área 17 continua sendo negativa, mas com índices  $\beta= -18,6^\circ$  e  $M=-5,4\%$  mais robustos. Os índices da barra 48 - IBIUNA---4CS da área 1 passaram para  $\beta = 160,8^\circ$  e  $M = 96,2\%$  mais afastados do ponto de máximo.

Conclui-se que a eliminação de restrições violadas no sistema melhora as condições de estabilidade de tensão em barras de tensão controlada por geradores e compensadores síncronos com um custo associado a um ligeiro aumento nas perdas ativas no sistema.

Tabela 8.4 - Tensões e Índices no Caso-Base e Após a Eliminação de Restrições Violadas devido à Máxima Injeção de Potência pela UTE Mário Lago

Barra		Caso-Base			Após Eliminação de Restrições		
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)
3962	PV	1,000	179,3	0,8	1,049	86,1	72,1
3963	PV	1,000	90,4	76,6	1,048	82,2	81,4
3977	PV	1,030	88,0	91,8	1,042	85,7	94,3
3978	PV	1,000	17,8	20,1	1,044	25,8	28,7
2625	PQ	0,938	161,0	69,4	0,956	130,3	82,3
2629	PQ	0,945	167,2	45,4	0,963	141,8	68,7

Na Tabela 8.5 é mostrado que as tensões nas barras no tronco de transmissão entre Adrianópolis e Vitória encontra-se operando entre 0,95 e 1,05 pu. A barra mais carregada continua sendo a barra 149 - Vitória---345 com  $\beta=138,3^\circ$ , mas agora mais afastada do ponto de máximo.

Tabela 8.5 - Tensões e Índices no Caso-Base e Após a Eliminação de Restrições Violadas no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória

Barra		Caso-Base		Após Eliminação de Restrições	
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	V (pu)	$\beta$ (graus)
140	C	1,021	135,9	1,050	122,4
3966	P	0,983	115,8	1,038	96,5
147	R	0,942	135,7	1,018	109,7
149	P	0,881	164,5	0,976	138,3
90	P	0,884	163,3	0,979	136,1

## 8.5

### Identificação da Sub-Rede

Através do programa computacional CaTrans identifica-se que a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa está composta por 156 caminhos de transmissão que saem da barra de geração crítica 3978 - M.Lago-8Gr e chegam a 34 barras de carga terminais, fazendo um total de 1516 ramos de transmissão. Entende-se que vários caminhos de transmissão estão chegando à mesma barra de carga terminal e para cada barra de geração crítica existe sua própria sub-rede. Devido à grande dimensão dos caminhos de transmissão é difícil mostrar esta sub-rede num gráfico, mas no exemplo de 34 barras já apresentando neste trabalho, se mostra claramente o método de identificação da sub-rede.

## 8.6

### Identificação dos Caminhos de Transmissão e do Caminho mais Carregado

Do ponto de vista operacional os valores de tensão e índices  $\beta$  e M encontrados após a eliminação de restrições violadas e mostrados na Tabela 8.4 e 8.5 são aceitáveis desde que são admitidos como válidos os grupos de limites de tensão especificado na Tabela 8.3. No entanto, para ilustrar o funcionamento do algoritmo se poderia fazer uma ou mais iterações de reforço com as barras das usinas em análise como críticas. O argumento seria de que deve-se aumentar as margens para um possível aumento de geração nessas barras.

Nas Tabelas 8.6 a 8.9 são mostrados os caminhos de transmissão mais carregados que saem, respectivamente, dos geradores das barras 3962 - N.Flu-G1-3Gr, 3963 - N.Flu-V1-1Gr, 3977 - M.Lago-12Gr e 3978 - M.Lago-8Gr. Os outros caminhos de transmissão menos carregados não são mostrados. Nota-se que as margens de potência nas barras de geração são diferentes, apesar de que estas se conectam ao mesmo ponto na rede elétrica em 345 kV. Isto porque as tensões nas barras de geração são diferentes, assim como as respectivas impedâncias dos seus transformadores elevadores de tensão. Os fluxos de potência que saem destas quatro barras de geração chegam à mesma barra de 345 kV, mas o esforço de transmissão de cada uma deles é diferente pelas razões já ditas.

O pior caminho de transmissão identificado pelo programa CaTrans entre estas quatro barras de geração é mostrado na Tabela 8.9 e corresponde à barra 3978 - M.Lago-8Gr com  $M = -1596,74$ . Isto era de se esperar porque, como mostrado na Tabela 8.4, esta era a barra crítica com  $\beta=25,9$  e  $M=28,8 \%$ .

Tabela 8.6 - Caminho Crítico de Transmissão da Barra 3962 - N.Flu-G1-3Gr

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3962 3966 147 149 114 177 2666  
2629

	MÓDULO	ÂNGULO
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,1578	96,2660
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	0,4498	-32,6936
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,9926	-27,3854
	MÓDULO	ÂNGULO
TENSÃO NO GERADOR	1,0490	-50,5439
TENSÃO NA CARGA	0,9634	-87,7085

TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	1,0510	-50,7110	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	5,7000	0,9592	5,7802
CARGA	3,1000	0,0790	3,1010
GERAÇÃO CRÍTICA	5,7001	0,9593	5,7802
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	5,78	5,78	0,00

Tabela 8.7 - Caminho Critico de Transmissão da Barra 3963 - N.Flu-V1-1Gr

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3963 3966 147 149 114 177 2666  
2629

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,1738	92,9603	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	0,6718	-111,2810	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	1,0812	-51,4949	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0480	-49,4373	
TENSÃO NA CARGA	0,9634	-87,7085	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,8631	-36,1336	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	2,9100	0,4193	2,9401
CARGA	3,1000	0,0790	3,1010
GERAÇÃO CRÍTICA	3,2736	0,4717	3,3075
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	2,94	3,31	-12,50

Tabela 8.8 - Caminho Critico de Transmissão da Barra 3977 - M.Lago-12Gr

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3977 3966 147 149 114 177 2666  
2629

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,2954	76,1508	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	0,5797	-168,4338	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,5910	-144,8995	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0420	-52,4949	
TENSÃO NA CARGA	0,9634	-87,7085	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,6889	-17,6634	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	0,2830	0,0285	0,2844
CARGA	3,1000	0,0790	3,1010
GERAÇÃO CRÍTICA	1,4495	0,1457	1,4569
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	0,28	1,46	-412,21

Tabela 8.9 - Caminho Crítico de Transmissão da Barra 3978 - M.Lago-8Gr

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147 175 2614 2697 2616

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,5347	121,8262	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	0,3802	-15,7946	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,5077	0,8968	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0440	-17,4910	
TENSÃO NA CARGA	1,0200	-85,1485	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	6,0802	-92,5714	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2797	3,8660
CARGA	0,1430	-0,0722	0,1602
GERAÇÃO CRÍTICA	61,8970	21,7140	65,5953
	$S_1$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,87	65,60	-1596,74

## 8.7

### Determinação do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado

Na Tabela 8.10 é mostrado que o ramo crítico é aquele que se encontra entre as barras 2614 e 2697 com  $M = -2338,39\%$  porque quando é inserido no caminho de transmissão mais carregado produz a pior margem na barra de geração 3978 - M.Lago-8Gr. Nota-se que nesta situação o ramo crítico não se encontra no final do caminho de transmissão como algumas vezes acontece.

Os outros caminhos de transmissão que saem das barras 3962 - N.Flu-G1-3Gr, 3963 - N.Flu-V1-1Gr e 3977 - M.Lago-12Gr têm, respectivamente, o ramo 2666-2629 com  $M=0\%$ , 147-149 com  $M=-57,46\%$  e 3966-147 com  $M=-962,77\%$  como mais carregados. Neste ponto de operação, então, cada uma das quatro barras de geração tem associado um ramo mais carregado diferente dos outros três. O interesse é aliviar o fluxo de potência que passa pelo ramo crítico do caminho mais carregado.

Tabela 8.10 - Ramo Crítico do Caminho mais Carregado de Transmissão da Barra 3978 - M.Lago-8Gr

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,1818	90,0000	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	2622,9	-147,07	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	3,9635	-90,0000	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0440	-17,4910	
TENSÃO NA CARGA	1,0382	-55,2211	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,8976	-0,5555	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2797	3,8660
CARGA	3,6480	-1,2134	3,8445
GERAÇÃO CRÍTICA	4,1811	1,4668	4,4309
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,87	4,43	12,75

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,1894	83,0586	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	1,4848	-165,5089	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,1191	-167,5649	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0440	-17,4910	
TENSÃO NA CARGA	1,0178	-65,1992	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,9141	-3,5130	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2797	3,8660
CARGA	12,4109	-0,2472	12,4134
GERAÇÃO CRÍTICA	3,9993	1,4030	4,2383
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,87	4,24	8,78

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147 175

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,2198	89,2606	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	1,8129	-112,5899	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,4080	-31,5149	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0440	-17,4910	
TENSÃO NA CARGA	1,0380	-68,9144	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,9837	-12,4240	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2797	3,8660
CARGA	1,5795	-0,0538	1,5805
GERAÇÃO CRÍTICA	3,6925	1,2954	3,9131
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,87	3,91	1,20

***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	3978	3966	147	175	2614			
					MÓDULO	ÂNGULO			
	IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE				0,3137	96,5948			
	IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR				0,7747	-48,5855			
	IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA				0,5213	-36,7451			
					MÓDULO	ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR				1,0440	-17,4910			
	TENSÃO NA CARGA				0,9946	-81,1781			
	TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO				1,4483	-39,3607			
					ATIVA	REATIVA	APARENTE		
	GERAÇÃO				3,6480	1,2797	3,8660		
	CARGA				1,6210	-0,1641	1,6293		
	GERAÇÃO CRÍTICA				4,4579	1,5639	4,7242		
					$S_i$	$S_m$	M(%)		
	ÍNDICES				3,87	4,72	18,17		
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	3978	3966	147	175	2614	2697		
					MÓDULO	ÂNGULO			
	IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE				0,5539	123,1530			
	IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR				0,3714	-14,4839			
	IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA				0,5516	2,5331			
					MÓDULO	ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR				1,0440	-17,4910			
	TENSÃO NA CARGA				1,0177	-85,3411			
	TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO				7,1901	-95,1446			
					ATIVA	REATIVA	APARENTE		
	GERAÇÃO				3,6480	1,2797	3,8660		
	CARGA				0,2390	-0,0713	0,2494		
	GERAÇÃO CRÍTICA				88,9524	31,2052	94,2671		
					$S_i$	$S_m$	M(%)		
	ÍNDICES				3,87	94,27	-2338,39		
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	3978	3966	147	175	2614	2697	2616	
					MÓDULO	ÂNGULO			
	IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE				0,5347	121,8262			
	IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR				0,3802	-15,7946			
	IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA				0,5077	0,8968			
					MÓDULO	ÂNGULO			
	TENSÃO NO GERADOR				1,0440	-17,4910			
	TENSÃO NA CARGA				1,0200	-85,1485			
	TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO				6,0802	-92,5714			
					ATIVA	REATIVA	APARENTE		
	GERAÇÃO				3,6480	1,2797	3,8660		
	CARGA				0,1430	-0,0722	0,1602		
	GERAÇÃO CRÍTICA				61,8970	21,7140	65,5953		
					$S_i$	$S_m$	M(%)		
	ÍNDICES				3,87	65,60	-1596,74		

Antes de passar à próxima etapa do processo de reforço, mostra-se na Figura 8.6 que não é possível diminuir o fluxo de potência no ramo crítico 2614-2697, seja em termos de MW ou MVA, porque todo esse fluxo é consumido nas barras de carga 2616 e 2617.

Procede-se a identificar na Tabela 8.10 o segundo ramo crítico que, seguindo a ordem da pior margem de potência, é o ramo 2697-2616 com  $M=-1596,74\%$ . Este também, como mostrado na Figura 8.6, não pode ter seu fluxo de potência reduzido, por ser este todo consumido na barra de carga 2616. Seguindo a mesma lógica da escolha do ramo crítico por ordem de criticidade da margem de potência num mesmo caminho de transmissão, tem-se que o terceiro ramo crítico é o 147-175 com  $M=1,20\%$ . Neste ramo é mostrado a seguir que a diminuição do seu fluxo de potência é possível. Portanto, o novo ramo crítico é o 147-175.

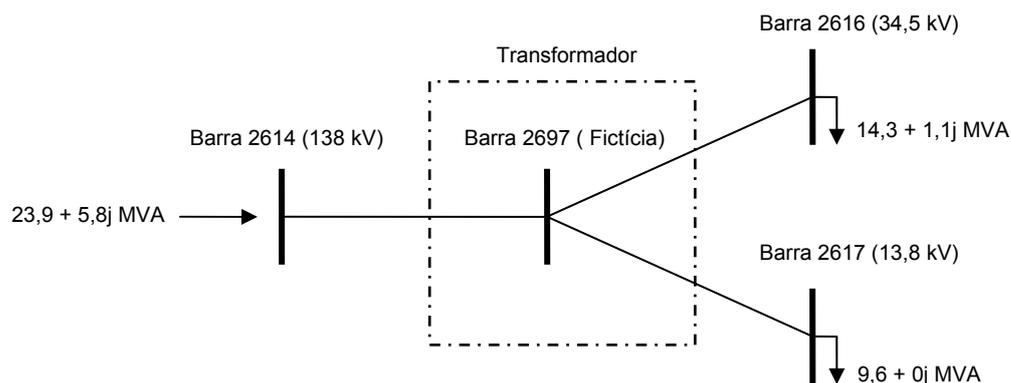


Figura 8.6 - Análise de Fluxo de Potência no Ramo de Transmissão 2614-2697, 2697-2616 e 2697-2617 Após a Eliminação das Restrições Violadas

## 8.8

### Diminuição do Fluxo de Potência Ativa no Ramo Crítico de Transmissão

#### 8.8.1

##### Diminuição do Fluxo em Termos de MW

##### Após a 1ª Iteração

Foi feito o redespacho unicamente reativo na rede em estudo para melhorar os índices  $\beta$  e  $M$  da barra crítica 3978 - M.Lago-8Gr, tendo como condição a diminuição do fluxo de potência ativa no ramo 147-175 através da função-

objetivo MXTR. As barras *swing* do sistema foram as únicas livres para variar sua potência elétrica (ativa e reativa), enquanto que, nas outras barras foi fixada sua geração de potência ativa. Na Figura 8.7 é mostrado que o fluxo de potência ativa que chega à barra 175 diminui em 19,5 MW após a 1ª iteração, apesar de que, em termos de potência aparente, esta aumenta em 68,46 MVA. Nota-se que o objetivo desta função é diminuir o fluxo em termos de MW e não em MVA.



Figura 8.7 - Fluxos no Ramo 147-175 Antes e Após a 1ª Iteração com a Função-Objetivo MXTR

Na Tabela 8.11 é mostrado que a barra 3978 - M.Lago-8Gr após a 1ª iteração de reforço continua sendo a barra crítica, mas com índices mais robustos do que aqueles após a eliminação de restrições violadas. O índice  $\beta$  passou de 25,9° a 26,2° e o índice M passou de 28,8 % a 29,1%.

Tabela 8.11 - Tensões e Índices Após a Eliminação de Restrições Violadas e Após a 1ª Iteração nos Geradores da Área 41 e nas Barras de Carga 2625 e 2629 com a Função-Objetivo MXTR

Barra Nº	Tipo	Após Eliminação de Restrições			Após a 1ª Iteração		
		V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)
3962	PV	1,049	86,0	72,1	1,050	85,9	72,2
3963	PV	1,048	82,2	81,4	1,049	82,2	81,5
3977	PV	1,042	85,7	94,4	1,045	85,7	94,4
3978	PV	1,044	25,9	28,8	1,046	26,2	29,1
2625	PQ	0,956	130,1	82,3	0,956	130,3	82,3
2629	PQ	0,963	141,6	68,9	0,963	141,8	68,8

Igualmente é mostrado na Tabela 8.12 que os índices  $\beta$  e M das barras do tronco de transmissão entre Adrianópolis e Vitória quase não variaram seu valor em relação a aqueles após a eliminação das restrições violadas. As tensões continuam dentro dos limites dos grupos de tensão definido no arquivo de dados de rede.

Tabela 8.12 - Tensões e Índices Após a Eliminação de Restrições Violadas e Após a 1ª Iteração no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória com a Função-Objetivo MXTR

Barra Nº	Tipo	Após Eliminação de Restrições		Após a 1ª Iteração	
		V (pu)	$\beta$ (graus)	V (pu)	$\beta$ (graus)
140	C	1,050	122,4	1,052	121,7
3966	P	1,038	96,4	1,040	96,4
147	R	1,018	109,5	1,021	109,7
149	P	0,976	138,0	0,974	138,3
90	P	0,979	135,8	0,978	136,1

Após a 1ª iteração é analisado com o programa computacional CaTrans que, a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa continua estando composta por 156 caminhos de transmissão que saem da barra de geração crítica 3978 - M.Lago-8Gr e chegam a 34 barras de carga terminais, fazendo um total de 1516 ramos de transmissão.

Também é determinado com o mesmo programa computacional que, após a 1ª iteração com a função-objetivo MXTR, o pior caminho de transmissão que sai da barra crítica 3978 - M.Lago-8Gr é: 3978, 3966, 147, 148, 175, 2614, 2697 e 2616 por apresentar o menor índice, ou seja,  $M = -1583,22\%$ . Por razões de espaço não se mostram todos esses caminhos de transmissão que saem da barra 3978 - M.Lago-8Gr. Na Tabela 8.13 verifica-se que o ramo crítico deste caminho é o ramo 2614-2697 que, quando inserido, produz a pior margem de potência na barra 3978 - M.Lago-8Gr com  $M = -2304,37\%$ . Este ramo crítico não necessariamente é o último do caminho mais carregado.

Tabela 8.13 - Ramo Crítico do Caminho mais Carregado que Sai da Barra 3978 - M.Lago-8Gr  
Após a 1ª Iteração com a Função-Objetivo MXTR

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,1818	90,0000	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	106,61	-91,6428	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	3,9635	-90,0000	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,2333	
TENSÃO NA CARGA	1,0416	-54,7337	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,8980	-0,1820	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2635	3,8606
CARGA	3,6480	-1,2133	3,8445
GERAÇÃO CRÍTICA	4,1910	1,4515	4,4353
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	4,44	12,96

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147

	MÓDULO	ÂNGULO
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,1895	83,1347
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	1,5021	-165,4341
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,1219	-171,1202
	MÓDULO	ÂNGULO
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,2333
TENSÃO NA CARGA	1,0213	-64,6113
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,9144	-3,1185

	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2635	3,8606
CARGA	12,3715	-0,2269	12,3736
GERAÇÃO CRÍTICA	4,0078	1,3881	4,2414

	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	4,24	8,98

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147 148

	MÓDULO	ÂNGULO
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,2239	89,3176
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	2,1074	-115,4472
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,0329	-86,2235

	MÓDULO	ÂNGULO
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,2333
TENSÃO NA CARGA	1,0593	-68,3278
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,9839	-12,0246

	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2635	3,8606
CARGA	1,5813	-1,0600	1,9037
GERAÇÃO CRÍTICA	3,6952	1,2798	3,9105

	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	3,91	1,28

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147 148 175

	MÓDULO	ÂNGULO
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,2102	89,0756
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	1,3982	-108,4465
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,0344	85,5533

	MÓDULO	ÂNGULO
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,2333
TENSÃO NA CARGA	1,0000	-68,1627
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,9800	-11,6362

	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2635	3,8606
CARGA	1,5813	-1,2725	2,0297
GERAÇÃO CRÍTICA	3,7025	1,2824	3,9183

	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	3,92	1,47

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147 148 175 2614

	MÓDULO	ÂNGULO
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,3132	96,8353
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	0,7338	-48,4786
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,5366	-30,1980

	MÓDULO	ÂNGULO
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,2333
TENSÃO NA CARGA	0,9768	-80,9010
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	1,4719	-40,0247

	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2635	3,8606
CARGA	1,5567	-0,3119	1,5877
GERAÇÃO CRÍTICA	4,5300	1,5690	4,7940
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	4,79	19,47

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147 148 175 2614 2697

	MÓDULO	ÂNGULO
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,5599	122,9022
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	0,3738	-14,4772
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,5590	2,2168
	MÓDULO	ÂNGULO
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,2333
TENSÃO NA CARGA	1,0217	-85,0318
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	7,1404	-94,8059

	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2635	3,8606
CARGA	0,2390	-0,0720	0,2496
GERAÇÃO CRÍTICA	87,7115	30,3787	92,8233
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	92,82	-2304,37

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147 148 175 2614 2697  
2616

	MÓDULO	ÂNGULO
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,5408	121,5864
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	0,3826	-15,7506
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,5147	0,6060
	MÓDULO	ÂNGULO
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,2333
TENSÃO NA CARGA	1,0240	-84,8407
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	6,0542	-92,2636

	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2635	3,8606
CARGA	0,1430	-0,0729	0,1605
GERAÇÃO CRÍTICA	61,4040	21,2672	64,9826
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	64,98	-1583,22

O ramo crítico após a 1ª iteração com a função-objetivo MXTR é o ramo 2614-2697, como mostrado na Tabela 8.13, mas a diminuição do fluxo nesta em termos de MW é impossível porque todo seu fluxo é consumido nas barras de carga 2616 e 2617 conforme mostrado na Figura 8.8. O mesmo ocorre com o segundo ramo crítico 2697-2616 com  $M=-1583,22$  % desse mesmo caminho de transmissão identificado pela ordem de criticidade da margem de potência. O

terceiro ramo é o 147-148 com  $M=1,28\%$ . A seguir, é mostrado que neste ramo 147-148 é possível a diminuição do fluxo em termos de MW e, portanto, será considerado o crítico.

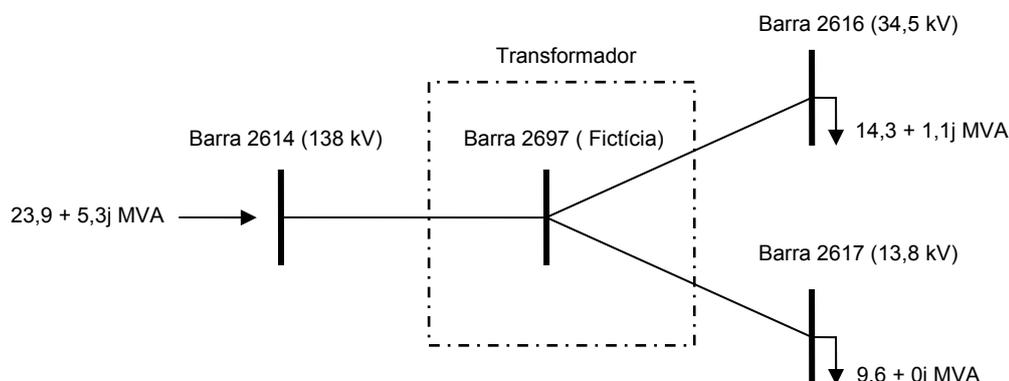


Figura 8.8 - Análise de Fluxo de Potência no Ramo de Transmissão 2614-2697, 2697-2616 e 2697-2617 Após a 1ª Iteração com a Função-Objetivo MXTR

### Após a 2ª Iteração

Sabe-se que o gerador crítico continua sendo aquele da barra 3978 - M.Lago-8Gr e seguindo a política de reforço, se faz o redespacho de potência ativa e reativa para melhorar os índices  $\beta$  e  $M$  desta barra com a restrição de diminuir o fluxo de potência em termos de MW no ramo crítico 147-148 identificado na Tabela 8.13. Deve ser lembrado que o processo deve recomeçar através da alteração do perfil de tensão toda vez que um novo gerador crítico é identificado. Como não é o caso, o redespacho de potência ativa e reativa é aplicado. Permitiram-se variações de geração de potência ativa de  $\pm 5\%$ . Os fluxos que entram e saem no ramo 147-148 são mostrados na Figura 8.9 e nota-se que o fluxo que chega à barra 148 diminuiu em 8,2 MW. A diminuição deste fluxo poderia ter sido maior, mas a variação da potência ativa dos geradores foi limitada em  $\pm 5\%$  antes do início da 2ª iteração. Se não for controlada esta variação, o sentido do fluxo no ramo crítico 147-148 se inverte.

	Barra 147	Barra 148	
Antes:	158,00 MW (181,15 MVA)	158,00 MW	
	(188,77 MVA)		
Após:	149,80 MW (162,94 MVA)	149,80 MW	
	(158,34 MVA)		

Figura 8.9 - Fluxos no Ramo 147-148 Antes e Após a 2ª Iteração com a Função-Objetivo MXTR

Na Tabela 8.14 é mostrado que a barra 3978 - M.Lago-8Gr, após a 2ª iteração de reforço, continua sendo a barra crítica, mas com índices mais robustos do que aqueles após a 1ª iteração. O índice  $\beta$  passou de 26,2° a 28,6° e o índice M passou de 29,1 % a 32,7 %. Nota-se uma relação de sensibilidade entre o tamanho do fluxo diminuído em MW no ramo crítico e os índices  $\beta$  e M da barra crítica. Os índices  $\beta$  e M da barra 3978 - M.Lago-8Gr aumentariam mais se fosse possível diminuir ainda mais o fluxo em termos de MW no ramo crítico.

Tabela 8.14 - Tensões e Índices Após a 1ª Iteração e Após a 2ª Iteração nos Geradores da Área 41 e nas Barras de Carga 2625 e 2629 com a Função-Objetivo MXTR

Barra		Após a 1ª Iteração			Após a 2ª Iteração		
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)
3962	PV	1,050	85,9	72,2	1,050	77,6	73,3
3963	PV	1,049	82,2	81,5	1,050	79,0	82,3
3977	PV	1,045	85,7	94,4	1,049	85,0	94,1
3978	PV	1,046	26,2	29,1	1,050	28,6	32,7
2625	PQ	0,956	130,3	82,3	0,952	127,2	82,7
2629	PQ	0,963	141,8	68,8	0,959	138,0	69,7

É mostrada na Tabela 8.15 que os índices  $\beta$  e M das barras do tronco de transmissão entre Adrianópolis e Vitória afastaram-se mais do ponto de máximo em relação a aqueles após a 1ª iteração e as tensões continuam dentro dos limites dos grupos de tensão definido no arquivo de dados de rede. A barra 140 passou de  $\beta=121,7^\circ$  a  $\beta=111,3^\circ$ , a barra 3966 passou de  $\beta=96,4^\circ$  a  $\beta=87,8^\circ$ , a barra 147 passou de  $\beta=109,7^\circ$  a  $\beta=100,1^\circ$ , a barra 149 passou de  $\beta=138,3^\circ$  a  $\beta=133,0^\circ$  e a barra 90 passou de  $\beta=136,1^\circ$  a  $\beta=130,2^\circ$ .

Tabela 8.15 - Tensões e Índices Após a 1ª Iteração e Após a 2ª Iteração no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória com a Função-Objetivo MXTR

Barra		Após a 1ª Iteração		Após a 2ª Iteração	
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	V (pu)	$\beta$ (graus)
140	C	1,052	121,7	1,052	111,3
3966	P	1,040	96,4	1,024	87,8
147	R	1,021	109,7	0,984	100,1
149	P	0,974	138,3	0,970	133,0
90	P	0,978	136,1	0,970	130,2

Na Tabela 8.16 mostra-se o caminho de transmissão e o ramo crítico das duas iterações que foram suficientes para mostrar que o método de reforço das condições de segurança de tensão funciona também num sistema de grande porte. Ao termo destas duas iterações o gerador crítico continua sendo aquele da barra 3978 - M.Lago-8Gr, mas com uma margem de potência bem maior. Considera-se que não é necessário o cálculo de um novo ponto de operação através de uma 3ª iteração.

Nota-se que antes da 1ª iteração o ramo crítico é o 147-175 e antes da 2ª iteração é o 147-148. Antes da 2ª iteração, introduziu-se uma nova restrição de fluxo máximo no ramo 147-175 em 138,8 MW (valor que corresponde após a 1ª iteração) para que quando seja feito o redespacho de potência ativa e reativa tentando diminuir o fluxo em termos de MW no ramo crítico 147-148, este não sobrecarregue novamente o ramo crítico inicial. Usou-se a restrição FLMW do FLUPOT que obriga que o fluxo de carga para o novo ponto de operação convergido respeite as capacidades nominais em MW especificadas no arquivo de dados de entrada do FLUPOT.

Tabela 8.16 - Caminho de Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Antes de cada Iteração com a Função-Objetivo MXTR

Iteração	Caminho de Transmissão Mais Carregado	Ramo Crítico
1	3978-3966-147-175-2614-2697-2616	147-175
2	3978-3966-147-148-175-2614-2697-2616	147-148

Na Tabela 8.17 são mostradas as gerações de potência ativa após o redespacho de potência reativa e/ou ativa nas barras de geração e as perdas ativas do sistema. Após a 1ª iteração, que corresponde unicamente ao redespacho de potência reativa, as perdas do sistema diminuíram de 3077,54 MW a 3076,15 MW e a geração na barra *swing* 501 - I.SOLTE-20GR diminuiu de 2918,5 MW a 2917,10 MW. Após a 2ª iteração, que corresponde ao redespacho de potência reativa e ativa, a geração da barra *swing* 501- I.SOLTE-20GR foi fixada em 2917,10 MW e as perdas do sistema diminuíram até 2991,34 MW. As outras barras *swing* 1040, 1100 e 8004 não alteraram sua geração.

Na Tabela 8.17 nota-se que após a 1ª e a 2ª iterações, a injeção de potência pela barra de geração 3978 - M.Lago-8Gr diminui (de 364,80 MW a 346,70 MW) com a finalidade de aliviar o fluxo que sai desta barra e, portanto, os índices puderem aumentar progressivamente tornando-se mais robustos. O ponto de operação resultante tem um aumento substancial na margem da barra de geração 3978 - M.Lago-8Gr de 20,1 % para 32,7 %. O índice de influência da ação de reforço é  $II=0,6269$  o que corresponde a um aumento de 62,69 % na margem da barra de geração 3978 - M.Lago-8Gr. Da mesma forma, o ângulo  $\beta$  passou de 17,8° para 28,6°.

Tabela 8.17 - Variação de Geração Ativa e Perdas no Sistema Após de cada Iteração com a Função-Objetivo MXTR

Iteração	Geração (MW)								Perdas (MW)
	G3962	G3963	G3977	G3978	G501	G1040	G1100	G8004	
Após Eliminação de Restrições	570,00	291,00	28,30	364,80	2918,50	0,00	6680,50	-239,10	3077,54
1	570,00	291,00	28,30	364,80	2917,10	0,00	6680,50	-239,10	3076,15
2	541,60	276,60	27,00	346,70	2917,10	0,00	6680,50	-239,10	2991,34

### 8.8.2

#### Diminuição do Fluxo em Termos de MVA

##### Após a 1ª Iteração

Foi feito o redespacho unicamente reativo na rede em estudo para melhorar os índices  $\beta$  e M da barra crítica 3978 - M.Lago-8Gr, tendo como condição a criação de uma sobrecarga fictícia em termos de MVA no ramo 147-175 através da função-objetivo DGMW. As barras *swing* do sistema foram as únicas livres para absorver estas variações de potência ativa e reativa, enquanto que, nas outras barras foi fixada sua geração de potência ativa. Na Figura 8.10 é mostrado que o fluxo de potência aparente que chega à barra 175 diminui em 9,66 MVA após a 1ª iteração. Nota-se que o objetivo desta função é diminuir o fluxo em termos de MVA e não em MW, mas, neste caso, também diminui em termos de MW.

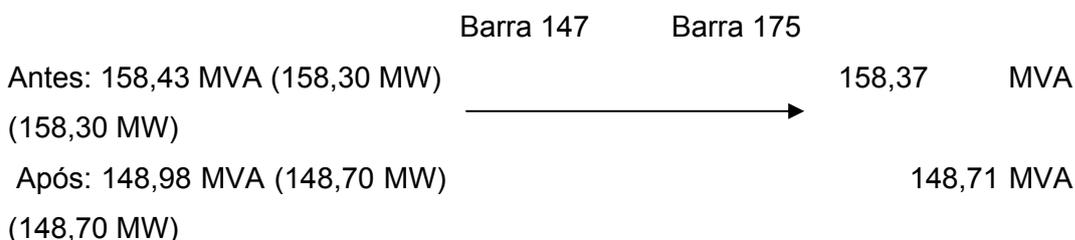


Figura 8.10 - Fluxos no Ramo 147-175 Antes e Após a 1ª iteração com a Função-Objetivo DGMW

Na Tabela 8.18 é mostrado que a barra 3978 - M.Lago-8Gr após a 1ª iteração de reforço continua sendo a barra crítica, mas com índices mais robustos do que aqueles após a eliminação de restrições violadas. O índice  $\beta$  passou de 25,9° a 26,2° e o índice M passou de 28,8 % a 29,2%.

Tabela 8.18 - Tensões e Índices Após a Eliminação de Restrições Violadas e Após a 1ª Iteração nos Geradores da Área 41 e nas barras de carga 2625 e 2629 com a Função-Objetivo DGMW

Barra		Após Eliminação de Restrições			Após a 1ª Iteração		
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)
3962	PV	1,049	86,0	72,1	1,050	85,3	72,4
3963	PV	1,048	82,2	81,4	1,049	81,9	81,5
3977	PV	1,042	85,7	94,4	1,045	85,7	94,4
3978	PV	1,044	25,9	28,8	1,046	26,2	29,2
2625	PQ	0,956	130,1	82,3	0,961	130,3	82,4
2629	PQ	0,963	141,6	68,9	0,968	141,8	68,9

É mostrado na Tabela 8.19 que os índices  $\beta$  e M das barras do tronco de transmissão entre Adrianópolis e Vitória quase não variaram seu valor em relação a aqueles após a eliminação das restrições violadas e as tensões continuam dentro dos limites dos grupos de tensão definido no arquivo de dados de rede.

Tabela 8.19 - Tensões e Índices Após a Eliminação de Restrições Violadas e Após a 1ª Iteração no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória com a Função-Objetivo DGMW

Barra		Após Eliminação de Restrições		Após a 1ª Iteração	
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	V (pu)	$\beta$ (graus)
140	C	1,050	122,4	1,052	120,4
3966	P	1,038	96,4	1,041	95,6
147	R	1,018	109,5	1,023	109,3
149	P	0,976	138,0	0,974	138,2
90	P	0,979	135,8	0,980	136,0

Após a 1ª iteração, é determinado, com o programa computacional CaTrans, que a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa continua estando composta por 156 caminhos de transmissão que saem da barra de geração crítica 3978 - M.Lago-8Gr e chegam a 34 barras de carga terminais, fazendo um total de 1516 ramos de transmissão.

Também é determinado, com o mesmo programa computacional, que após a 1ª iteração com a função-objetivo DGMW, o pior caminho de transmissão que sai da barra crítica 3978 - M.Lago-8Gr é: 3978, 3966, 147, 148, 175, 2614, 2697 e 2616 por apresentar o menor índice, ou seja,  $M = -1575,82\%$ . Por razões de espaço não se mostram todos esses caminhos de transmissão que saem da barra 3978 - M.Lago-8Gr. Na Tabela 8.20 mostra-se que o ramo crítico deste caminho mais carregado é o ramo 2614-2697, que quando inserido, produz a pior margem de potência na barra 3978 - M.Lago-8Gr com  $M = -2288,54\%$ . Este ramo crítico não necessariamente é o último do caminho mais carregado, como já dito.

Tabela 8.20 - Ramo Crítico do Caminho mais Carregado que Sai da Barra 3978 - M.Lago-8Gr  
Após a 1ª Iteração com a Função-Objetivo DGMW

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,1818	90,0000	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	2561,2	-157,844	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	3,9635	-90,0000	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,1044	
TENSÃO NA CARGA	1,0423	-54,5765	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,8978	-0,0589	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2586	3,8590
CARGA	3,6480	-1,2161	3,8454
GERAÇÃO CRÍTICA	4,1911	1,4460	4,4335
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	4,43	12,96

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,1898	83,0840	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	1,4998	-166,4294	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,1217	-172,1161	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,1044	
TENSÃO NA CARGA	1,0240	-64,4983	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,9142	-2,9868	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2586	3,8590
CARGA	12,4536	-0,3834	12,4595
GERAÇÃO CRÍTICA	4,0083	1,3829	4,2402
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	4,24	8,99

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147 148

	MÓDULO	ÂNGULO	
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,2177	89,6052	
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	1,6316	-107,2764	
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,0602	-82,3812	
	MÓDULO	ÂNGULO	
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,1044	
TENSÃO NA CARGA	1,0262	-68,1365	
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	0,9865	-12,1500	
	ATIVA	REATIVA	APARENTE
GERAÇÃO	3,6480	1,2586	3,8590
CARGA	1,5036	-0,1922	1,5158
GERAÇÃO CRÍTICA	3,6907	1,2733	3,9041
	$S_i$	$S_m$	M(%)
ÍNDICES	3,86	3,90	1,16

***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	3978	3966	147	148	175		
					MÓDULO	ÂNGULO		
	IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE				0,2100	89,3424		
	IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR				1,3551	-106,0654		
	IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA				0,0725	80,2118		
					MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0460	-17,1044		
	TENSÃO NA CARGA				0,9960	-67,9695		
	TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO				0,9822	-11,7373		
					ATIVA	REATIVA	APARENTE	
	GERAÇÃO				3,6480	1,2586	3,8590	
	CARGA				1,5036	-0,3940	1,5544	
	GERAÇÃO CRÍTICA				3,6981	1,2759	3,9120	
					$S_i$	$S_m$	M(%)	
	ÍNDICES				3,86	3,91	1,36	
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	3978	3966	147	148	175	2614	
					MÓDULO	ÂNGULO		
	IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE				0,3137	96,9484		
	IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR				0,7219	-48,3081		
	IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA				0,5411	-29,7619		
					MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0460	-17,1044		
	TENSÃO NA CARGA				0,9728	-80,8603		
	TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO				1,4832	-40,3498		
					ATIVA	REATIVA	APARENTE	
	GERAÇÃO				3,6480	1,2586	3,8590	
	CARGA				1,5615	-0,3172	1,5934	
	GERAÇÃO CRÍTICA				4,5680	1,5760	4,8322	
					$S_i$	$S_m$	M(%)	
	ÍNDICES				3,86	4,83	20,14	
***	CAMINHO DE TRANSMISSÃO:	3978	3966	147	148	175	2614	2697
					MÓDULO	ÂNGULO		
	IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE				0,5617	122,7651		
	IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR				0,3752	-14,5223		
	IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA				0,5618	1,8147		
					MÓDULO	ÂNGULO		
	TENSÃO NO GERADOR				1,0460	-17,1044		
	TENSÃO NA CARGA				1,0267	-84,9513		
	TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO				7,1229	-94,6317		
					ATIVA	REATIVA	APARENTE	
	GERAÇÃO				3,6480	1,2586	3,8590	
	CARGA				0,2390	-0,0728	0,2498	
	GERAÇÃO CRÍTICA				87,1338	30,0626	92,1740	
					$S_i$	$S_m$	M(%)	
	ÍNDICES				3,86	92,17	-2288,54	

\*\*\* CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 3978 3966 147 148 175 2614 2697  
2616

	MÓDULO	ÂNGULO		
IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE	0,5428	121,4533		
IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR	0,3840	-15,7782		
IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA	0,5175	0,2282		
	MÓDULO	ÂNGULO		
TENSÃO NO GERADOR	1,0460	-17,1044		
TENSÃO NA CARGA	1,0290	-84,7621		
TENSÃO CRÍTICA NA GERAÇÃO	6,0451	-92,0973		
	ATIVA	REATIVA	APARENTE	
GERAÇÃO	3,6480	1,2586	3,8590	
CARGA	0,1430	-0,0737	0,1609	
GERAÇÃO CRÍTICA	61,1339	21,0922	64,6702	
	$S_i$	$S_m$	M(%)	
ÍNDICES	3,86	64,67	-1575,82	

O ramo crítico após a 1ª iteração com a função-objetivo DGMW é o ramo 2614-2697, como mostrado na Tabela 8.20, mas a diminuição do fluxo neste em termos de MVA é impossível porque todo seu fluxo é consumido nas barras de carga 2616 e 2617 conforme mostrado na Figura 8.11. O mesmo ocorre com o segundo ramo crítico 2697-2616 com  $M=-1575,82\%$  desse mesmo caminho de transmissão identificado pela ordem de criticidade da margem de potência. O terceiro é o ramo 147-148 com  $M=1,16\%$ . É mostrado que neste ramo 147-148 é possível a diminuição do fluxo em termos de MVA e, portanto, é considerado o crítico.

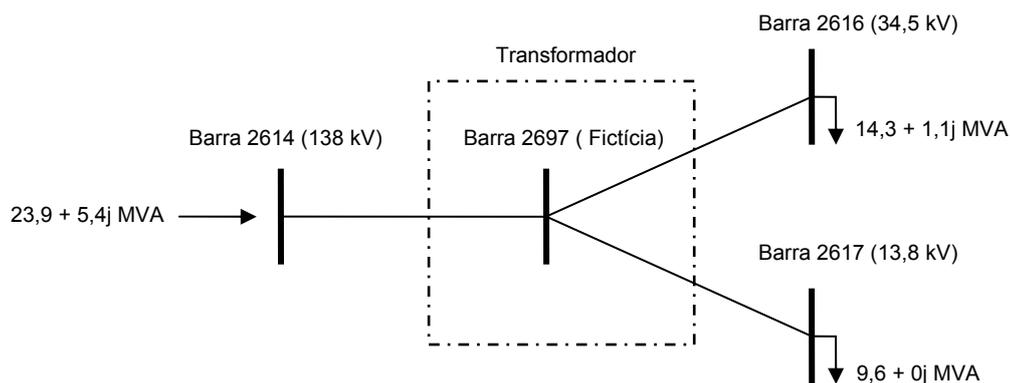


Figura 8.11 - Análise de Fluxo de Potência no Ramo de Transmissão 2614-2697, 2697-2616 e 2697-2617 Após a 1ª Iteração com a Função-Objetivo DGMW

Nota-se que após a 1ª iteração com a função-objetivo MXTR houve uma redução em 19,5 MW e um aumento de 68,5 MVA no fluxo que chega à barra 175, enquanto que, com a função-objetivo DGMW houve uma redução em 9,6 MW e 9,7 MVA no fluxo que chega à barra 175. Os índices  $\beta$  e  $M$  obtidos são

parecidos. Os índices resultantes dependem de quanto é a redução do fluxo em termos de MW com a função-objetivo MXTR e de quanto é a sobrecarga fictícia com a função-objetivo DGMW. Nesta situação, a redução em 19,5 MW produz quase os mesmos resultados que uma sobrecarga de 9,7 MVA no fluxo que chega à barra 175.

### **Após a 2ª Iteração**

Sabe-se que o gerador crítico continua sendo aquele da barra 3978 - M.Lago-8Gr e seguindo a política de reforço, faz-se o redespacho de potência ativa e reativa para melhorar os índices  $\beta$  e M desta barra com a restrição de uma sobrecarga fictícia em termos de MVA no ramo crítico 147-148 identificado na Tabela 8.20. Os fluxos que entram e saem no ramo 147-148 são mostrados na Figura 8.12 e nota-se que a sobrecarga fictícia criada foi de 5,33 MVA no fluxo que chega à barra 148. O tamanho da sobrecarga fictícia está limitado pela convergência do algoritmo de fluxo de carga ótimo.

	Barra 147	Barra 148	
Antes: 150,14 MVA (149,90 MW)	→	151,03	MVA
(149,90 MW)	—————→		
Após: 145,97 MVA (145,70 MW)		145,70	MVA
(145,70 MW)			

Figura 8.12 - Fluxos no Ramo 147-148 Antes e Após a 2ª Iteração com a Função-Objetivo DGMW

Na Tabela 8.21 é mostrado que a barra 3978 - M.Lago-8Gr, após a 2ª iteração de reforço, continua sendo a barra crítica, mas com índices mais robustos do que aqueles após a 1ª iteração. O índice  $\beta$  passou de 26,2° a 31,6° e o índice M passou de 29,2 % a 35,2 %. Nota-se uma relação de sensibilidade entre o tamanho da sobrecarga fictícia em MVA aplicada no ramo crítico e os índices  $\beta$  e M da barra crítica. Os índices  $\beta$  e M da barra 3978 - M.Lago-8Gr aumentariam mais se fosse possível aumentar o tamanho da sobrecarga fictícia.

Tabela 8.21 - Tensões e Índices Após a 1ª Iteração e Após a 2ª Iteração nos Geradores da Área 41 e nas Barras de Carga 2625 e 2629 com a Função-Objetivo DGMW

Barra		Após a 1ª Iteração			Após a 2ª Iteração		
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)
3962	PV	1,050	85,3	72,4	1,050	85,5	72,6
3963	PV	1,049	81,9	81,5	1,049	82,1	81,6
3977	PV	1,045	85,7	94,4	1,047	85,8	94,4
3978	PV	1,046	26,2	29,2	1,047	31,6	35,2
2625	PQ	0,961	130,3	82,4	0,960	129,9	82,5
2629	PQ	0,968	141,8	68,9	0,967	141,4	69,1

É mostrado na Tabela 8.22 que os índices  $\beta$  e M das barras do tronco de transmissão entre Adrianópolis e Vitória quase não variaram seu valor em relação a aqueles após a 1ª iteração e as tensões continuam dentro dos limites dos grupos de tensão definido no arquivo de dados de rede. A barra 140 passou de  $\beta=120,4^\circ$  a  $\beta=120,1^\circ$ , a barra 3966 passou de  $\beta=95,6^\circ$  a  $\beta=95,8^\circ$ , a barra 147 passou de  $\beta=109,3^\circ$  a  $\beta=109,1^\circ$ , a barra 149 passou de  $\beta=138,2^\circ$  a  $\beta=137,9^\circ$  e a barra 90 passou de  $\beta=136,0^\circ$  a  $\beta=135,7^\circ$ .

Tabela 8.22 - Tensões e Índices Após a 1ª Iteração e Após a 2ª Iteração no Tronco de Transmissão de Adrianópolis, Macaé, Campos e Vitória com a Função-Objetivo DGMW

Barra		Após a 1ª Iteração		Após a 2ª Iteração	
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	V (pu)	$\beta$ (graus)
140	C	1,052	120,4	1,052	120,1
3966	P	1,041	95,6	1,043	95,8
147	R	1,023	109,3	1,025	109,1
149	P	0,974	138,2	0,977	137,9
90	P	0,980	136,0	0,982	135,7

Na Tabela 8.23 mostra-se o caminho de transmissão e o ramo crítico das duas iterações que foram suficientes para mostrar que o método de reforço das condições de segurança de tensão funciona também num sistema de grande porte. Ao termo destas duas iterações, o gerador crítico continua sendo aquele da barra 3978 - M.Lago-8Gr, mas com uma margem de potência maior. Considera-se que não é necessário o cálculo de um novo ponto de operação através de uma 3ª iteração.

Nota-se que antes da 1ª iteração, o ramo crítico é o 147-175 e antes da 2ª iteração, é o 147-148. Antes da 2ª iteração, introduziu-se uma nova restrição de fluxo máximo no ramo 147-175 em 148,7 MVA (valor que corresponde após a 1ª iteração) para que quando seja feito o redespacho de potência ativa e reativa tentando minimizar o fluxo em termos de MVA no ramo crítico 147-148, este não sobrecarregue novamente o ramo crítico inicial. Usou-se a restrição FMVA do FLUPOT que obriga que o fluxo de carga para o novo ponto de operação

convergiu respeite as capacidades nominais em MVA especificadas no arquivo de dados de entrada.

Tabela 8.23 - Caminho de Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Antes de cada Iteração com a Função-Objetivo DGMW

Iteração	Caminho de Transmissão Mais Carregado	Ramo Crítico
1	3978-3966-147-175-2614-2697-2616	147-175
2	3978-3966-147-148-175-2614-2697-2616	147-148

Na Tabela 8.24 são mostradas as gerações de potência ativa após o redespacho de potência reativa e/ou ativa nas barras de geração e as perdas ativas do sistema. Após a 1ª iteração, que corresponde unicamente ao redespacho de potência reativa, as perdas do sistema diminuíram de 3077,54 MW a 3075,98 MW e a geração na barra *swing* 501 - I.SOLTE-20GR diminuiu de 2918,50 MW a 2916,90 MW. Após a 2ª iteração, que corresponde ao redespacho de potência reativa e ativa, a geração da barra *swing* 501 - I.SOLTE-20GR foi fixada em 2916,90 MW e as perdas do sistema diminuíram até 3070,14 MW. As outras barras *swing* 1040, 1100 e 8004 não alteraram sua geração.

Na Tabela 8.24 nota-se que após a 1ª e a 2ª iterações, a injeção de potência pela barra de geração 3978 - M.Lago-8Gr diminui (de 364,80 MW a 334,80 MW) com a finalidade de aliviar o fluxo que sai desta barra e, portanto, os índices puderem aumentar progressivamente tornando-se mais robustos. O ponto de operação resultante tem um aumento substancial na margem da barra de geração 3978 - M.Lago-8Gr de 20,1 % para 35,2 %. O índice de influência da ação de reforço é  $II=0,7512$  o que corresponde a um aumento de 75,12 % na margem da barra de geração 3978 - M.Lago-8Gr. Da mesma forma, o ângulo  $\beta$  passou de 17,8° para 31,6°.

Não necessariamente a função-objetivo que diminui mais as perdas ativas da rede faz que índices  $\beta$  e M sejam mais robustos na barra crítica. Por exemplo, com a função-objetivo MXTR obteve-se após a 2ª iteração 2991,34 MW de perdas e com a função-objetivo DGMW obteve-se 3070,14 MW de perdas, mas os melhores índices obteve-se com esta última função-objetivo.

No caso do redespacho ativo e reativo, a função-objetivo que consiga diminuir mais a geração na barra crítica será a que produzirá um ponto de operação com melhores índices  $\beta$  e M nessa barra.

Tabela 8.24 - Variação de Geração Ativa e Perdas no Sistema Após de cada Iteração com a Função-Objetivo DGMW

Iteração	Geração (MW)								Perdas (MW)
	G3962	G3963	G3977	G3978	G501	G1040	G1100	G8004	
Após Eliminação de Restrições	570,00	291,00	28,30	364,80	2918,5	0,00	6680,50	-239,10	3077,54
1	570,00	291,00	28,30	364,80	2916,90	0,00	6680,50	-239,10	3075,98
2	569,80	290,80	28,10	334,80	2916,90	0,00	6680,50	-239,10	3070,14

## 8.9

### Reforço das Condições de Segurança de Tensão na Barra de Geração 1107 - ITAIPU60-9GR

Para o mesmo cenário em estudo apresentado na Seção 8.2 que corresponde à máxima injeção de potência nos geradores da UTE Mário Lago alimentando acréscimo de carga em Vitória, notou-se que a barra de geração 1107 - ITAIPU60-9GR da área 17 após a eliminação de restrições violadas no sistema elétrico brasileiro estava operando com índices negativos  $\beta = -18,6^\circ$  e  $M = -5,4\%$ . Este resultado é puramente ilustrativo do método de reforço das condições de estabilidade de tensão porque não considerou-se o chaveamento automático e discreto de capacitores/reatores e atuação manual sistêmica de LTC por parte dos operadores em tempo real próximos à barra 1107 - ITAIPU60-9GR.

Se o interesse de reforço fosse nesta barra, e não nas barras de geração de produtores independentes, o método de reforço teria começado por esta barra. Mostra-se a seguir o resultado desta análise.

#### 8.9.1

#### Função-Objetivo MXTR e Diminuição do Fluxo em Termos de MW

Na Tabela 8.25 é mostrado os resultados após a eliminação de restrições violadas, após a 1ª iteração que corresponde ao redespacho unicamente de potência reativa e após a 2ª iteração que corresponde ao redespacho de potência ativa. Foi necessário eliminar as restrições violadas e duas iterações de reforço com a função-objetivo MXTR para obter índices positivos na barra 1107 - ITAIPU60-9GR, com  $\beta = 1,7^\circ$  e  $M = 0,7\%$ . Os índices dos geradores do tronco de transmissão em 345 kV entre Adrianópolis e Vitória quase mantiveram seus valores após a eliminação de restrições violadas, porque seu perfil de tensão e injeções de potência não sofreram grandes mudanças.

Tabela 8.25 - Tensões e Índices Após Eliminação de Restrições Violadas e Após 1ª e 2ª Iteração no Gerador 1107 - ITAIPU60-9GR e Outros com a Função-Objetivo MXTR

Barra		Após Eliminação de Restrições			Após a 1ª Iteração			Após a 2ª Iteração		
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)
1107	PV	0,991	-18,6	-5,4	0,989	-6,0	-2,1	0,968	1,7	0,7
3962	PV	1,049	86,0	72,1	1,049	80,4	74,2	1,009	75,7	75,5
3963	PV	1,048	82,2	81,4	1,049	79,9	81,8	1,008	77,9	82,6
3977	PV	1,042	85,7	94,4	1,044	85,2	94,4	1,000	84,2	93,7
3978	PV	1,044	25,9	28,8	1,045	26,0	29,2	0,998	24,4	28,6

Na Tabela 8.26 são mostrados os caminhos de transmissão mais carregados e sua respectiva margem de potência em relação à barra crítica 1107 - ITAIPU60-9GR. O caminho mais carregado chega até a barra de carga 3324 e tem  $M = -2359,57$  % antes da 1ª iteração. O caminho mais carregado chega até a barra de carga 1274 e tem  $M = -2292,14$  % antes da 2ª iteração.

Na Tabela 8.26 também são mostrados a margem de potência que corresponde ao sub-caminho mais carregado em relação à barra crítica 1107- ITAIPU60-9GR. O sub-caminho crítico tem  $M = -663,65$  % antes da 1ª iteração quando se insere o ramo 1601-258. O sub-caminho crítico tem  $M = -848,91$  % antes da 2ª iteração quando se insere o ramo 1236-1246. Entende-se que sub-caminho crítico de transmissão é uma parte do caminho de transmissão mais carregado.

Nota-se que a margem de potência do sub-caminho crítico é menor a margem de potência do caminho de transmissão de potência mais carregado. Isto faz sentido quando se sabe que os ramos críticos mostrados na Tabela 8.26 adquiriram esse status após outros, com margem de potência mais negativa, terem sido descartados. Isto porque a minimização do seu fluxo de potência em termos de MW era impossível, já que esta potência era consumida nas barras terminais.

Tabela 8.26 - Caminho de Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Antes de cada Iteração com a Função-Objetivo MXTR

Iteração	Caminho de Transmissão Mais Carregado	M (%) Caminho Crítico	Ramo Crítico	M (%) Sub-Caminho Crítico
1	1107-1106-61-60-62-65-71-72-75-76-80-77-104-105-108-169-1604-287-1606-268-1602-1601-258-3300 3324	-2359,57	1601-258	-663,65
2	1107-1106-61-60-64-65-68-66-999-1060-995-1045-1046-1250-1243-1299-1258-1190-1267-1212-1199-1194-1239-1236-1246-1247-1285-1274	-2292,14	1236-1246	-848,91

Na Tabela 8.27 nota-se que, após 1ª iteração de reforço, o fluxo de potência em termos de MW diminuiu 2,50 MW e, após a 2ª iteração, 6 MW. Após a 1ª

iteração, as perdas do sistema aumentaram em 1,83 MW assim como a geração da barra *swing* 501 - I.SOLTE-20GR em 1,30 MW, enquanto que as gerações das outras barras foram fixadas. Após a 2ª iteração, as perdas do sistema diminuíram em 329,7 MW, assim como a geração da barra 1107 - ITAIPU60-9GR em 452 MW, enquanto que as gerações das barras *swing* foram fixadas.

Durante o redespacho de potência ativa e reativa permitiram-se variações de geração de potência ativa até  $\pm 10\%$  com a finalidade de conseguir índices positivos na barra 1107 - ITAIPU60-9GR. Não foram necessárias mais do que duas iterações.

Tabela 8.27 - Variação de Geração Ativa, Perdas no Sistema e Variação do Fluxo no Ramo Crítico Após de cada Iteração com a Função-Objetivo MXTR

Iteração	Geração (MW)					Perdas (MW)	Variação de Fluxo (MW)
	G1107	G501	G1040	G1100	G8004		
Após Eliminação de Restrições	6200,00	2918,50	0,00	6680,50	-239,10	3077,54	0,00
1	6200,00	2919,80	0,00	6680,50	-239,10	3079,37	2,50 (4,55 MVA)
2	5748,00	2919,80	0,00	6680,50	-239,10	2749,71	6,00 (0,05 MVA)

## 8.9.2

### Função-Objetivo DGMW e Diminuição do Fluxo em Termos de MVA

Na Tabela 8.28 são mostrados os resultados após a eliminação de restrições violadas, após a 1ª iteração que corresponde ao redespacho unicamente de potência reativa e após a 2ª iteração que corresponde ao redespacho de potência ativa e reativa. Foi necessário eliminar as restrições violadas e duas iterações de reforço com a função-objetivo DGMW para colocar os índices positivos da barra 1107 - ITAIPU60-9GR em  $\beta=7,8^\circ$  e  $M=2,8\%$ . Os índices dos geradores do tronco de transmissão em 345 kV entre Adrianópolis e Vitória quase mantiveram seus valores após a eliminação de restrições violadas porque seu perfil de tensão e injeções de potência não sofreram grandes mudanças.

Tabela 8.28 - Tensões e Índices Após Eliminação de Restrições Violadas e Após 1ª e 2ª Iteração no Gerador 1107 - ITAIPU60-9GR e Outros com a Função-Objetivo DGMW

Barra		Após Eliminação de Restrições			Após a 1ª Iteração			Após a 2ª Iteração		
Nº	Tipo	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)	V (pu)	$\beta$ (graus)	M (%)
1107	PV	0,991	-18,6	-5,4	0,974	-12,4	-4,0	1,020	7,8	2,8
3962	PV	1,049	86,0	72,1	1,050	80,8	74,1	1,049	80,2	74,4
3963	PV	1,048	82,2	81,4	1,050	80,1	81,8	1,048	79,8	82,0
3977	PV	1,042	85,7	94,4	1,048	85,2	94,3	1,041	85,1	94,4
3978	PV	1,044	25,9	28,8	1,049	26,5	29,5	1,042	25,6	29,0

Na Tabela 8.29 são mostrados o caminho de transmissão mais carregado e sua respectiva margem de potência em relação à barra crítica 1107 - ITAIPU60-9GR.

O caminho mais carregado tem  $M=-2359,57$  % antes da 1ª iteração e chega até a barra de carga 3324. O caminho mais carregado tem  $M=-2025,75$  % antes da 2ª iteração e chega até a barra de carga 1274.

Na Tabela 8.29 também são mostrados a margem de potência que corresponde ao sub-caminho mais carregado em relação à barra crítica 1107- ITAIPU60-9GR. O sub-caminho crítico tem  $M=-663,65$  % antes da 1ª iteração quando se insere o ramo 1601-258. O sub-caminho crítico tem  $M=-759,42$  % antes da 2ª iteração quando se insere o ramo 1236-1246. Entende-se que sub-caminho crítico de transmissão é uma parte do caminho de transmissão mais carregado.

Nota-se que a margem de potência do sub-caminho crítico é menor a margem de potência do caminho de transmissão de potência mais carregado. Isto faz sentido quando se sabe que os ramos críticos mostrados na Tabela 8.29 ficaram com esse status após outros, com margem de potência mais negativa, terem sido descartados. Isto porque a minimização do seu fluxo de potência em termos de MW era impossível, já que esta potência era consumida nas barras terminais.

Tabela 8.29 - Caminho de Transmissão Mais Carregado e Ramo Crítico Antes de cada Iteração com a Função-Objetivo DGMW

Iteração	Caminho de Transmissão Mais Carregado	M (%) Caminho Crítico	Ramo Crítico	M (%) Ramo Crítico
1	1107-1106-61-60-62-65-71-72-75-76-80-77-104-105-108-169-1604-287-1606-268-1602-1601-258-3300 3324	-2359,57	1601-258	-663,65
2	1107-1106-61-60-64-65-68-66-999-1060-995-1045-1046-1250-1243-1299-1258-1190-1267-1212-1199-1194-1239-1236-1246-1247-1285-1274	-2025,75	1236-1246	-759,42

Na Tabela 8.30 nota-se que, na 1ª iteração de reforço, a sobrecarga fictícia usada no ramo crítico era de 6,27 MVA e na 2ª iteração era de 8,69 MVA. Após a 1ª iteração, as perdas do sistema aumentaram em 20,3 MW assim como a geração da barra *swing* 501 - I.SOLTE-20GR em 20,4 MW, enquanto que as gerações das outras barras foram fixadas. Após a 2ª iteração as perdas do sistema diminuíram em 64,7 MW assim como a geração da barra 1107 - ITAIPU60-9GR em 150 MW, enquanto que as gerações das barras *swing* foram fixadas.

Não foi necessário uma 3ª iteração porque já os índices da barra 1107- ITAIPU60-9GR ficaram positivos.

Tabela 8.30 - Variação de Geração Ativa, Perdas no Sistema e Variação do Fluxo no Ramo Crítico Após de cada Iteração com a Função-Objetivo DGMW

Iteração	Geração (MW)					Perdas (MW)	Sobrecarga Fictícia (MVA)
	G1107	G501	G1040	G1100	G8004		
Após Eliminação de Restrições	6200,00	2918,50	0,00	6680,50	-239,10	3077,54	0,00
1	6200,00	2938,90	0,00	6680,50	-239,10	3097,93	6,27 (4,20 MW)
2	6050,00	2938,90	0,00	6680,50	-239,10	3033,22	8,69 (8,70 MW)

Foi demonstrado numericamente que o método de reforço das condições de estabilidade de tensão apresentado neste trabalho para barras de tensão controlada por geradores e compensadores síncronos funciona e o esforço computacional gasto garante sua aplicabilidade na operação em tempo real.

As duas funções-objeto utilizadas, MXTR e DGMW, são aceitáveis para reforço das condições de estabilidade de tensão das barras críticas do sistema. Quanto é melhor uma da outra, depende da sensibilidade existente entre o fluxo a ser diminuído e margem de potência a ser aumentando na barra crítica. Esta sensibilidade depende do tamanho da sobrecarga fictícia no caso da função-objeto DGMW e da percentagem da variação das gerações no caso da função-objeto MXTR.

O tamanho da sobrecarga fictícia está limitado pela convergência do algoritmo do fluxo de carga e a percentagem da variação das gerações pela inversão do fluxo de potência ativa no ramo crítico.

A melhoria dos índices na barra crítica, quando o redespacho de potência reativa é realizado, deve-se a melhoria do perfil de tensão na rede, o que implica em uma menor geração de potência reativa (a barra *swing* assume as variações das perdas). Quando o redespacho de potência ativa e reativa é realizado, a melhoria dos índices deve-se a diminuição de geração ativa e reativa na barra crítica.

A margem de potência pode aumentar pelos ajustes nos recursos de controle de tensão sugeridos pelo FLUPOT e foi verificado após a eliminação das restrições violadas. Logo, após de cada iteração de reforço de tensão, não se tem dúvidas que o aumento na margem de potência deve-se ao alívio de carregamento nos ramos críticos, como foi verificado nos exemplos numéricos.