

ANÁLISE DO REGIME ESTÁTICO EM CONDIÇÃO OTIMIZADA

5.1. INTRODUÇÃO

A utilização de uma ferramenta de fluxo de potência ótimo na análise da operação de sistemas elétricos de potência vem aumentando cada vez mais e se tornando um instrumento fundamental na busca de soluções para problemas que apresentam um conjunto de restrições provenientes da grande dimensão do sistema, conjugada com as limitações operacionais e a otimização de funções objetivo. Esse tipo de análise é tipicamente empregado em problemas de planejamento da expansão e operação, despacho econômico, minimização de perdas elétricas, estabelecimento de limites de intercâmbio, etc.

O problema foi formulado inicialmente por J. Carpentier [*apud* 20 e 21]. O fluxo de potência ótimo pode ser definido como sendo a determinação do estado de uma rede elétrica que otimiza uma determinada função-objetivo, satisfazendo um conjunto de restrições físicas e operacionais, formulado matematicamente como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(x) \\ \text{s.a. } g(x) = 0 \\ h(x) \leq 0 \\ \ell \leq x \leq u \end{array} \right. \quad (5.1)$$

Onde:

x - vetor de variáveis do sistema

$g(x)$ - restrições de igualdade

$h(x)$ - restrições de desigualdade

u, ℓ limites superior e inferior dos controles

As restrições de igualdade correspondem à modelagem da rede (equações de balanço de potência ativa e reativa em cada nó da rede), enquanto que as restrições de desigualdade representam os limites das variáveis do sistema (restrições funcionais dos equipamentos e restrições operacionais do sistema).

A escolha da função objetivo é complexa e deve ser feita de forma criteriosa, já que, esta função objetivo deve descrever adequadamente a melhor condição operativa para o sistema elétrico em estudo.

Este capítulo tem como objetivo utilizar os sistemas-teste elaborados em aplicações realistas, abordando problemas típicos estudados nas empresas sob o enfoque de regime estático em condição otimizada.

5.2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Foi utilizado para análise de fluxo de potência em condições otimizadas dos sistemas teste, o programa Fluxo de Potência Ótimo (FLUPOT) desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) [22]. O programa baseia-se na otimização não linear através do método de pontos interiores direto primal-dual [20 e 23]. Um dos aspectos mais importantes do programa é sua flexibilidade em termos de escolha de função objetivo, controles e restrições. Com essa flexibilidade, o FLUPOT tanto pode ser utilizado no contexto de planejamento como de operação de sistemas de potência.

O FLUPOT tem por objetivo calcular um estado de uma rede CA em regime permanente que otimize uma determinada função objetivo. O programa possui um conjunto de funções objetivo, entre elas estão: *minimização de perdas de potência ativa*, *minimização de geração de potência reativa*, *maximização de carregamento*, *minimização de corte de carga*. Algumas dessas funções podem ser utilizadas de forma combinada, visando obter resultados que satisfaçam a uma quantidade maior de restrições, tomando o cuidado de não colocar funções conflitantes ou restrições redundantes.

5.3. PROCEDIMENTOS

A análise de fluxo de potência ótimo foi realizada a partir dos casos de fluxo de potência do ANAREDE convergidos ou não, seguidos do arquivo com os dados de otimização, de acordo com o objetivo pretendido. A Figura 5.1 mostra um diagrama simplificado do processo utilizado, onde o FLUPOT recebe um caso do ANAREDE e gera um segundo caso, já com os ajustes da otimização efetuados.

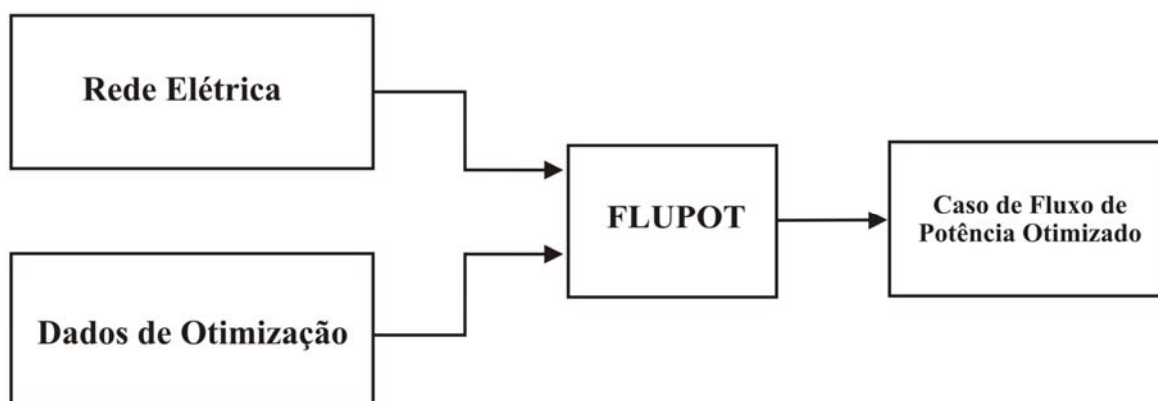


Figura 5.1 – Diagrama simplificado do processo utilizado para otimização

- Para o processamento da otimização, foi necessário o preenchimento dos cartões do ANAREDE, DGBT (dados de grupo base de tensão) e DGLT (dados de grupos limites de tensão). Estes dados não são necessários no ANAREDE porém são essenciais para o processamento do FLUPOT.
- No programa FLUPOT, o cartão DGLM (dados de geração mínima e máxima de potência reativa), foi preenchido considerando 80% da capacidade nominal de cada gerador para limite normal e para limite de emergência foi utilizado o próprio limite nominal do equipamento. Esse procedimento foi adotado como uma margem de segurança para que o programa não realize um ajuste no sistema que coloque os equipamentos em pontos extremos.
- No cartão DGEP (dados de geração ativa) do programa FLUPOT, foi considerado em algumas simulações um limite máximo de geração ativa igual a 90% da capacidade nominal.

- O número máximo de iterações foi de 100 e a tolerância de convergência para erro de potência ativa foi de 10^{-5} MW e para erro de potência reativa foi de 10^{-5} Mvar.
- Em todas as simulações não foi considerada a influência de custos. Assim, foi adotado o valor 1 (um) nos campos nos quais essa informação era solicitada, que é a forma utilizada para que esta opção não influencie nos resultados.
- Foram utilizadas as funções objetivo: LOSS - que minimiza as perdas elétricas no sistema, MXTR - que maximiza a transferência de potência entre áreas.

5.4. ESTUDOS DE PROBLEMAS TÍPICOS

Nesta seção foram feitas as seguintes análises com a utilização dos sistemas-teste elaborados:

- *Comparação de ajuste de casos;*
- *Realização de ajuste para suportar contingência;*
- *Minimização de perdas elétricas no sistema;*
- *Minimização de perdas elétricas com restrição na área Sudeste;*
- *Minimização de perdas elétricas com restrição na área Sul e;*
- *Maximização de intercâmbio entre áreas.*

5.4.1. Comparação de Ajuste de Casos

O objetivo é comparar o ajuste feito no caso base do **sistema-teste de 9 barras**, no Capítulo 4, item 4.4.1, sem o uso de processo de otimização, com um ajuste realizado com a utilização de uma ferramenta com recursos de otimização.

O ajuste feito tinha como meta manter as tensões do sistema nas barras de carga entre 1,00 e 1,03 pu e as perdas no sistema num valor baixo.

Aqui o objetivo foi o mesmo, porém o ajuste foi realizado pela ferramenta de acordo com a função objetivo mostrada na Figura 5.2 que minimiza as perdas no sistema. Para isto, foi permitido ao programa alterar os despachos das usinas e as tensões de excitação

das máquinas de modo a obter o melhor ponto de operação, onde as perdas no sistema sejam minimizadas.

```

REST 01
.
DCTE
MXIT 100
JUMP 0.001
9999
.
... CONTROLES ATIVADOS: GERAÇÃO REATIVA, TENSÃO DE GERADOR E LTCs
DCON VGEN QGEN TAPC PGEN
.
... FUNÇÃO OBJETIVO: MINIMIZAR PERDAS
DOBJ LOSS ← Função objetivo
.
... RELATORIOS COMPLETOS
COMP
RELA RVAR
9999
.
DGLM
.Num...Qmin .Qmax .QminC.QmaxC
01 -122 122 -122 122
02 -96 96 -96 96
9999
.
DGEP
.Num...Pmin .Pmax
01 0 250
02 0 200
9999
.
DVGB
..Vmin Vmax VminCVmaxC
A .95 1.05 .90 1.1
99
.
DARI
01
9999
.
EXOT
.
FIM

```

Figura 5.2 – Dados de otimização e função objetivo

Essa comparação foi realizada para duas condições iniciais distintas: primeiro utilizando o caso mostrado na Figura 4.3, antes de qualquer ajuste, e em seguida, utilizando o caso mostrado na Figura 4.4 com os ajustes efetuados.

Os resultados obtidos para a primeira situação estão mostrados nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5.

SUMÁRIO DO CASO									
SHUNT	TOTAL	=						0.0	MVAR
CARGA	TOTAL	=	325.0	MW				153.0	MVAR
GERACAO	TOTAL	=	328.5	MW			32.7	MVAR (	32.7 , 0.0)
INJECAO	EQUIV	=	0.0	MW				0.0	MVAR
INJ.	ALOCADA	=	0.0	MW				0.0	MVAR (0.0 , 0.0)
SHUNT	ALOCADO	=						0.0	MVAR (0.0N , 0.0N)
POT.	REJEIT.	=	0.0	MW				0.0	MVAR
SHUNT	CHAVEADO	=						0.0	MVAR (0.0N , 0.0N)
PERDA	TOTAL	=	3.5	MW				-120.3	MVAR
C.SERIE	ALOC.	=	0.000	%				0.00	MVAR
CARREG.	TOTAL	=	0.00	MW				0.00	MVAR
PEDAGIO		=	0.00	MW				0.00	MVAR
COMP.	ESTATICA	=						0.0	MVAR
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA								=	3.53539500
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA								=	0.00000000

Figura 5.3 - Sumário do caso

RELATÓRIO DE BARRAS CA DO SISTEMA										
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X										
NUM.	BARRA	TP	MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	EQUIV
X---X-----X---X-----X---X-----X---X-----X---X-----X---X-----X										
1	BAR-1 GER1	2	1.028	0.0	149.5	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	BAR-2 GER2	1	1.033	3.7	179.1	24.6	0.0	0.0	0.0	0.0
3	BAR-3	0	1.026	-4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	BAR-4	0	1.023	-3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	BAR-5 CAR1	0	1.009	-7.6	0.0	0.0	55.0	27.0	0.0	0.0
6	BAR-6 CAR2	0	1.019	-6.6	0.0	0.0	37.0	18.0	0.0	0.0
7	BAR-7 CAR3	0	1.004	-8.3	0.0	0.0	68.0	45.0	0.0	0.0
8	BAR-8 CAR4	0	1.016	-8.3	0.0	0.0	90.0	35.0	0.0	0.0
9	BAR-9 CAR5	0	1.000	-11.0	0.0	0.0	75.0	28.0	0.0	0.0

Figura 5.4 – Relatório de barras do sistema

Obs. Esta coluna corresponde ao carregamento dividido pela tensão, conhecido como Valor do fluxo corrigido pela tensão.

RELATÓRIO DE LINHAS DO SISTEMA											
X----- D A D O S - B A R R A -----X----- F L U X O S - C I R C U I T O S ---X											
DA BARRA		TENSAO		GERACAO							
NUM.	KV	TIPO	MOD/ ANG	MW/ Mvar	PARA	BARRA	NC	MW	FLUXOS	MVA/V_d	TAP
NOME					NUM.	NOME			Mvar		
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X											
1	1	2	1.028	149.5							
BAR-1	GER1		0.0	8.1							
					3	BAR-3	1	149.5	8.1	145.7	1.000F
2	1	1	1.033	179.1							
BAR-2	GER2		3.7	24.6	4	BAR-4	1	179.1	24.6	175.0	1.000F
3	1	0	1.026	0.0							
BAR-3			-4.3	0.0	1	BAR-1 GER1	1	-149.5	3.2	145.7	
					5	BAR-5 CAR1	1	64.7	0.6	63.0	
					8	BAR-8 CAR4	1	84.8	-3.8	82.7	
4	1	0	1.023	0.0							
BAR-4			-3.7	0.0	2	BAR-2 GER2	1	-179.1	-1.1	175.0	
					6	BAR-6 CAR2	1	72.8	-8.0	71.6	
					7	BAR-7 CAR3	1	106.3	9.1	104.2	
5	1	0	1.009	0.0							
BAR-5	CAR1		-7.6	0.0	3	BAR-3	1	-64.0	-13.2	64.8	
					7	BAR-7 CAR3	1	9.0	-13.8	16.3	
6	1	0	1.019	0.0							
BAR-6	CAR2		-6.6	0.0	4	BAR-4	1	-72.4	-3.9	71.1	
					8	BAR-8 CAR4	1	35.4	-14.1	37.4	
7	1	0	1.004	0.0							
BAR-7	CAR3		-8.3	0.0	4	BAR-4	1	-105.3	-17.0	106.2	
					5	BAR-5 CAR1	1	-9.0	-17.1	19.2	
					9	BAR-9 CAR5	1	46.3	-10.9	47.4	
8	1	0	1.016	0.0							
BAR-8	CAR4		-8.3	0.0	3	BAR-3	1	-84.1	-8.8	83.2	
					6	BAR-6 CAR2	1	-35.2	-11.4	36.5	
					9	BAR-9 CAR5	1	29.3	-14.8	32.3	
9	1	0	1.000	0.0							
BAR-9	CAR5		-11.0	0.0	7	BAR-7 CAR3	1	-46.0	-7.9	46.7	
					8	BAR-8 CAR4	1	-29.0	-20.1	35.3	

Figura 5.5 – Relatório de linhas do sistema

Os resultados obtidos para a segunda situação estão mostrados nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

SUMÁRIO DO CASO				
SHUNT	TOTAL =		0.0	MVAR
CARGA	TOTAL =	325.0 MW	153.0	MVAR
GERACAO	TOTAL =	328.5 MW	32.8	MVAR (32.8 , 0.0)
INJECAO	EQUIV =	0.0 MW	0.0	MVAR
INJ.	ALOCADA =	0.0 MW	0.0	MVAR (0.0 , 0.0)
SHUNT	ALOCADO =		0.0	MVAR (0.0N , 0.0N)
POT.	REJEIT. =	0.0 MW	0.0	MVAR
SHUNT	CHAVEADO =		0.0	MVAR (0.0N , 0.0N)
PERDA	TOTAL =	3.5 MW	-120.2	MVAR
C.SERIE	ALOC. =	0.000 %	0.00	MVAR
CARREG.	TOTAL =	0.00 MW	0.00	MVAR
PEDAGIO	=	0.00 MW	0.00	MVAR
COMP.	ESTATICA =		0.0	MVAR
SOMATORIO DAS FUNCOES	OBJETIVO, PARTE ATIVA =		3.53643708	
SOMATORIO DAS FUNCOES	OBJETIVO, PARTE REATIVA =		0.00000000	

Figura 5.6 – Sumário do caso

RELATÓRIO DE BARRAS AC DO SISTEMA - ÁREA 1										
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X										
NUM.	BARRA	TP	MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	EQUIV
X---X-----X---X-----X---X-----X---X-----X---X-----X										
1	BAR-1 GER1	2	1.028	0.0	149.1	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	BAR-2 GER2	1	1.033	3.8	179.4	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0
3	BAR-3	0	1.026	-4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	BAR-4	0	1.023	-3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	BAR-5 CAR1	0	1.009	-7.5	0.0	0.0	55.0	27.0	0.0	0.0
6	BAR-6 CAR2	0	1.019	-6.6	0.0	0.0	37.0	18.0	0.0	0.0
7	BAR-7 CAR3	0	1.004	-8.3	0.0	0.0	68.0	45.0	0.0	0.0
8	BAR-8 CAR4	0	1.016	-8.3	0.0	0.0	90.0	35.0	0.0	0.0
9	BAR-9 CAR5	0	1.000	-11.0	0.0	0.0	75.0	28.0	0.0	0.0

Figura 5.7 – Relatório de barras do sistema

RELATÓRIO DE LINHAS DO SISTEMA												
X----- D A D O S - B A R R A --X-----					F L U X O S - C I R C U I T O S ----X							
DA BARRA		TENSAO		GERACAO								
NUM.	KV	TIPO	MOD/ ANG	MW/ Mvar	PARA	BARRA	NC		MW	FLUXOS		TAP
NOME					NUM.	NOME				Mvar	MVA/V_d	
X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----
1	1	2	1.028	149.1								
BAR-1	GER1		0.0	8.0								
					3	BAR-3		1	149.1	8.0	145.3	1.000F
2	1	1	1.033	179.4								
BAR-2	GER2		3.8	24.8								
					4	BAR-4		1	179.4	24.8	175.3	1.000F
3	1	0	1.026	0.0								
BAR-3			-4.3	0.0								
					1	BAR-1	GER1	1	-149.1	3.2	145.3	
					5	BAR-5	CAR1	1	64.6	0.6	62.9	
					8	BAR-8	CAR4	1	84.5	-3.8	82.4	
4	1	0	1.023	0.0								
BAR-4			-3.7	0.0								
					2	BAR-2	GER2	1	-179.4	-1.2	175.3	
					6	BAR-6	CAR2	1	73.0	-7.9	71.7	
					7	BAR-7	CAR3	1	106.4	9.1	104.4	
5	1	0	1.009	0.0								
BAR-5	CAR1		-7.5	0.0								
					3	BAR-3		1	-63.9	-13.2	64.6	
					7	BAR-7	CAR3	1	8.9	-13.8	16.2	
6	1	0	1.019	0.0								
BAR-6	CAR2		-6.6	0.0								
					4	BAR-4		1	-72.6	-3.9	71.3	
					8	BAR-8	CAR4	1	35.6	-14.1	37.5	
7	1	0	1.004	0.0								
BAR-7	CAR3		-8.3	0.0								
					4	BAR-4		1	-105.4	-17.0	106.4	
					5	BAR-5	CAR1	1	-8.9	-17.1	19.2	
					9	BAR-9	CAR5	1	46.3	-10.9	47.4	
8	1	0	1.016	0.0								
BAR-8	CAR4		-8.3	0.0								
					3	BAR-3		1	-83.9	-8.8	83.0	
					6	BAR-6	CAR2	1	-35.4	-11.4	36.6	
					9	BAR-9	CAR5	1	29.3	-14.8	32.3	
9	1	0	1.000	0.0								
BAR-9	CAR5		-11.0	0.0								
					7	BAR-7	CAR3	1	-46.1	-7.9	46.7	
					8	BAR-8	CAR4	1	-28.9	-20.1	35.3	

Figura 5.8 – Relatório de linhas do sistema

Observa-se que tanto no primeiro quanto no segundo caso, o programa chegou praticamente ao mesmo resultado, o que mostra que ele foi eficaz apesar do pequeno ganho alcançado. A comparação permite concluir que o ajuste manual feito com a experiência do profissional estava adequado (vide item 4.4.1).

Esta situação demonstra também que a eficácia do programa é melhor percebida quando aplicado a sistemas grandes, onde não há condição de atuar de forma manual em todos os pontos simultaneamente. Para sistema muito pequeno como é o caso, onde se tem visibilidade de todo o sistema e conseqüentemente o controle de tudo, a potencialidade da ferramenta fica reduzida a poucas ações.

5.4.2. Realização de Ajuste para Suportar Contingência

O objetivo é realizar um ajuste no caso do **sistema-teste de 65 barras** utilizado no Capítulo 7, item 7.4.2, de modo que ele suporte a perda de um circuito da LT 500kV Ibiúna-Bateias.

O ponto de operação desse caso não suporta a perda deste elemento, pois não houve uma preocupação com a otimização do controle de tensão e, portanto dos fluxos de energia reativa no sistema. Para resolver essa restrição e permitir que o sistema suporte a ocorrência desta contingência, tentou-se encontrar um ajuste através do FLUPOT que não alterasse os despachos das usinas ou realizasse cortes de carga, para que o caso não se afastasse do ponto de operação definido inicialmente.

Foi utilizada a função objetivo de “*Mínimo Custo de Alocação de Elemento Shunt*”, permitindo ao programa, alterar as seguintes variáveis:

- tape de transformador;
- tensão em barra PV e conseqüente alteração na potência reativa gerada pelas máquinas e;
- montante de alocação de compensação reativa em derivação (“shunt”).

O resultado obtido com o FLUPOT demonstrou que, para atender a situação de contingência, foi necessário alocar 214,2 Mvar de elemento shunt capacitivo no sistema, conforme mostrado na Figura 5.9, que apresenta um sumário dos resultados.

SUMÁRIO DO CASO				
SHUNT	TOTAL	=	184.2	MVAR
CARGA	TOTAL	=	11738.1	MW 3349.0 MVAR
GERACAO	TOTAL	=	12091.9	MW 1380.1 MVAR (1599.8 , -219.7)
INJECAO	EQUIV	=	0.0	MW 0.0 MVAR
INJ.	ALOCADA	=	0.0	MW 214.2 MVAR (214.2 , 0.0)
SHUNT	ALOCADO	=	0.0	MVAR (0.0N , 0.0N)
POT.	REJEIT.	=	0.0	MW 0.0 MVAR
SHUNT	CHAVEADO	=	0.0	MVAR (0.0N , 0.0N)
PERDA	TOTAL	=	353.8	MW -1570.4 MVAR
C.SERIE	ALOC.	=	0.000	% 0.00 MVAR
CARREG.	TOTAL	=	0.00	MW 0.00 MVAR
PEDAGIO		=	0.00	MW 0.00 MVAR
COMP.	ESTATICA	=	0.0	MVAR
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA		=	0.000000000	
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA		=	214.53435569	

Figura 5.9 - Sumário do caso

A alocação foi feita nas seguintes barras do sistema, conforme mostra a Figura 5.10

RELATÓRIO DA POTÊNCIA REATIVA ALOCADA (> 1.0 MVAR)		
X-----	BARRA -----X	MVAR
102	POCOS----500	1.5
104	C.PAULIS-500	26.2
120	P.CALDAS-345	34.5
123	CAMPINAS-345	1.3
1503	ITAJUBA--500	93.8
1504	ITAJUBA--138	57.0

Figura 5.10 - Potência reativa alocada

Em seguida o FLUPOT retornou ao caso base para implementar os ajustes, operou as alterações nas barras (mostradas na Figura 5.10), alocou os montantes de compensação shunt capacitiva por conta da contingência e tentou resolver o fluxo de potência, mas não obteve êxito, ou seja, não encontrou uma solução matemática que satisfizesse aos critérios de convergência definidos no programa.

Na Figura 5.11 é mostrado o relatório emitido pelo programa, que apesar de não valer como resultado em função do caso não ter alcançado a convergência, ajuda a identificar o que pode ter ocorrido no processo de ajuste do caso-base. Possivelmente, quando o programa alocou os capacitores no sistema, o perfil de tensão ficou alto e algumas barras superaram o limite máximo. Na tentativa de resolver o problema, o

programa alterou a tensão terminal das máquinas, alocou mais compensação shunt para absorver potência reativa e reduzir a tensão e mesmo assim não encontrou solução.

SUMÁRIO DO CASO				
SHUNT	TOTAL =		220.1	MVAR
CARGA	TOTAL =	11738.1	MW	3349.0 MVAR
GERACAO	TOTAL =	12044.1	MW	-418.2 MVAR (416.6 , -834.8)
INJECAO	EQUIV =	0.0	MW	0.0 MVAR
INJ.	ALOCADA =	0.0	MW	0.0 MVAR (0.0 , 0.0)
SHUNT	ALOCADO =		113.4	MVAR (555.5N , -495.3N)
POT.	REJEIT. =	0.0	MW	0.0 MVAR
SHUNT	CHAVEADO =			0.0 MVAR (0.0N , 0.0N)
PERDA	TOTAL =	306.0	MW	-3433.6 MVAR
C.SERIE	ALOC. =	0.000	%	0.00 MVAR
CARREG.	TOTAL =	0.00	MW	0.00 MVAR
PEDAGIO	=	0.00	MW	0.00 MVAR
COMP.	ESTATICA =			0.0 MVAR
SOMATORIO	DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA =			0.00000000
SOMATORIO	DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA =			1051.49992374

Figura 5.11 - Sumário do caso

Observa-se neste caso que ocorre um conflito de ajuste entre o caso-base e o caso ajustado para suportar a contingência. Quando o programa volta ao caso-base promovendo as alterações que foram definidas no processo de otimização, ocorrem violações nos limites máximos de tensão em algumas barras do sistema.

Na Figura 5.12 são mostradas as barras onde o programa precisou alocar compensação reativa, sendo que na área Um foram alocados capacitores e na área Dois alocou um reator na barra de Curitiba.

RELATÓRIO DA POTÊNCIA REATIVA ALOCADA (> 1.0 MVAR)		
X-----	BARRA -----X	MVAR
101	ARARAQUA-500	220.8
102	POCOS---500	68.7
103	CAMPINAS-500	178.0
104	C.PAULIS-500	26.7
123	CAMPINAS-345	61.3
960	CURITIBA-230	-495.3

Figura 5.12 - Potência reativa alocada

A conclusão que se tira do processo realizado é que a solução para esse problema seria a instalação de uma fonte de injeção de energia reativa variável, que pode atuar nas duas condições operativas observadas.

Os resultados do programa mostrados na Figura 5.10 apontam a barra de 500kV de Itajubá como um ponto mais apropriado no sistema onde o elemento de compensação variável deveria ser instalado, devido ao maior montante de compensação alocado naquela região. Foi testada essa solução, com a instalação de um compensador síncrono de (-100, +250) Mvar nesse ponto e a contingência foi processada no Anarede que obteve êxito, convergindo o caso num ponto de operação satisfatório, com as grandezas do sistema dentro de seus limites operativos.

5.4.3. Minimização de Perdas Elétricas no Sistema

O objetivo desta avaliação foi atuar no caso do **sistema-teste de 65 barras** utilizado no item 5.4.2, realizando um ajuste ótimo global no sistema para reduzir o montante de perdas elétricas. Este procedimento vem sendo um requisito perseguido pelas empresas de energia elétrica, que têm buscado otimizar a operação dos seus sistemas com menor custo por megawatt gerado.

A realização desta otimização se justifica para uma condição hidrológica favorável nas duas áreas do sistema. Portanto foi feita uma avaliação comparativa entre o caso inicial e o resultado obtido.

A Figura 5.13 mostra o relatório de totais de área do caso inicial antes do processo de otimização. Nele pode ser observado que as perdas elétricas somam 386,7 MW e que existe um desequilíbrio nos valores de geração das áreas Um e Dois, sendo bem maior na área Dois.

RELATÓRIO DE TOTAIS DE ÁREA						
AREA	GERAÇÃO	CARGA	SHUNT	EXPORT	IMPORT	PERDAS
NUM.	MW/ Mvar	MW/ Mvar	Mvar/ EQUIV	MW/ Mvar	MW/ Mvar	MW/ Mvar
1	4674.8 -583.7	6007.0 1874.4	105.1 0.0	0.0 97.2	1404.3 0.0	72.1 -2450.2
2	7450.0 1389.6	5731.1 1474.6	92.6 0.0	1404.3 0.0	0.0 97.2	314.5 104.8
TOTAL	12124.8 805.9	11738.1 3349.0	197.7 0.0	1404.3 97.2	1404.3 97.2	386.7 -2345.4

Figura 5.13 – Relatório de totais de área do caso inicial

A Figura 5.14 mostra o relatório do sumário do caso obtido através do processo de otimização. Nele pode ser observado que as perdas elétricas foram reduzidas para 285,5 MW e a Figura 5.15 mostra que agora existe apenas um pequeno desequilíbrio entre a geração das duas áreas.

SUMÁRIO DO CASO			
SHUNT	TOTAL	=	225.4 MVAR
CARGA	TOTAL	=	11738.1 MW 3349.0 MVAR
GERACAO	TOTAL	=	12023.6 MW -912.4 MVAR (125.8 , -1038.1)
INJECAO	EQUIV	=	0.0 MW 0.0 MVAR
INJ.	ALOCADA	=	0.0 MW 0.0 MVAR (0.0 , 0.0)
SHUNT	ALOCADO	=	0.0 MVAR (0.0N , 0.0)
POT.	REJEIT.	=	0.0 MW 0.0 MVAR
SHUNT	CHAVEADO	=	0.0 MVAR (0.0N , 0.0)
PERDA	TOTAL	=	285.5 MW -4035.9 MVAR
C.SERIE	ALOC.	=	0.000 % 0.00 MVAR
CARREG.	TOTAL	=	0.00 MW 0.00 MVAR
PEDAGIO		=	0.00 MW 0.00 MVAR
COMP.	ESTATICA	=	0.0 MVAR
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA		=	285.63380338
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA		=	0.00000000

Figura 5.14 - Sumário do caso

RELATÓRIO DE TOTAIS DE ÁREA						
AREA	GERAÇÃO	CARGA	SHUNT	EXPORT	IMPORT	PERDAS
NUM.	MW/ Mvar	MW/ Mvar	Mvar/ EQUIV	MW/ Mvar	MW/ Mvar	MW/ Mvar
1	5328.3 -326.4	6007.0 1874.4	109.4 0.0	0.0 0.0	792.5 423.7	113.8 -1667.7
2	6695.4 -585.9	5731.1 1474.6	116.0 0.0	792.5 423.7	0.0 0.0	171.7 -2368.1
TOTAL	12023.6 -912.4	11738.1 3349.0	225.4 0.0	792.5 423.7	792.5 423.7	285.5 -4035.8

Figura 5.15 – Relatório de totais de área do caso otimizado

5.4.4. Minimização de Perdas Elétricas com Restrição na Área Sudeste

Foi utilizado o mesmo caso do item 5.4.3, mas considerando a existência de uma restrição energética na área Um (região Sudeste) por conta de uma hidraulicidade desfavorável. Esta restrição limitou o despacho em algumas usinas da região, reduzindo o montante de geração a 60% da capacidade total de geração da região.

A Figura 5.16 mostra o relatório de sumário do caso obtido através do processo de otimização e a Figura 5.17 mostra o relatório de totais de áreas do caso otimizado. Observa-se que o processo de otimização reduziu o montante de perdas de 386,7 MW para 290,6 MW, mesmo com a restrição energética imposta ao programa que limitou a capacidade de geração da área Um a 5.367 MW. O programa atuou elevando a geração na área Um de 4.674,8 MW para 4.964,8 MW, explorando a folga existente e consequentemente reduzindo a geração na área Dois.

SUMÁRIO DO CASO			
SHUNT	TOTAL =	225.7	MVAR
CARGA	TOTAL =	11738.1	MW 3349.0 MVAR
GERACAO	TOTAL =	12028.7	MW -855.4 MVAR (248.1 , -1103.4)
INJECAO	EQUIV =	0.0	MW 0.0 MVAR
INJ.	ALOCADA =	0.0	MW 0.0 MVAR (0.0 , 0.0)
SHUNT	ALOCADO =	0.0	MVAR (0.0N , 0.0N)
POT.	REJEIT. =	0.0	MW 0.0 MVAR
SHUNT	CHAVEADO =	0.0	MVAR (0.0N , 0.0N)
PERDA	TOTAL =	290.6	MW -3978.6 MVAR
C.SERIE	ALOC. =	0.000	% 0.00 MVAR
CARREG.	TOTAL =	0.00	MW 0.00 MVAR
PEDAGIO	=	0.00	MW 0.00 MVAR
COMP.	ESTATICA =	0.0	MVAR
SOMATORIO	DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA =	290.54828085	
SOMATORIO	DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA =	0.00000000	

Figura 5.16 - Sumário do caso

RELATÓRIO DE TOTAIS DE ÁREA						
X----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----
AREA	GERACAO	CARGA	SHUNT	EXPORT	IMPORT	PERDAS
NUM.	MW/ Mvar	MW/ Mvar	Mvar/ EQUIV	MW/ Mvar	MW/ Mvar	MW/ Mvar
X----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----
1	4964.8	6007.0	115.3	0.0	1126.1	83.8
	-724.3	1874.4	0.0	0.0	212.0	-2271.3
2	7063.9	5731.1	110.4	1126.1	0.0	206.7
	-131.1	1474.6	0.0	212.0	0.0	-1707.3
TOTAL	12028.7	11738.1	225.7	1126.1	1126.1	290.6
	-855.4	3349.0	0.0	212.0	212.0	-3978.6

Figura 5.17 - Relatório de totais de área do caso otimizado

5.4.5. Minimização de Perdas Elétricas com Restrição na Área Sul

Agora a situação é exatamente o oposto do que foi feito no item 5.4.4. A restrição ocorre na área Dois (região Sul) e a capacidade de geração total da área está limitada no máximo a 75 %, ou seja, 6.684 MW.

A Figura 5.18 mostra o relatório de sumário do caso obtido através do processo de otimização e a Figura 5.19 mostra o relatório de totais de áreas do caso otimizado. Observa-se que o processo de otimização reduziu o montante de perdas de 386,7 MW para 297,8 MW, mesmo com a restrição energética imposta ao programa, que reduziu a geração da área Dois até próximo do valor máximo disponível e complementou a necessidade do sistema aumentando a geração na área Um.

SUMÁRIO DO CASO			
SHUNT	TOTAL =		219.5 MVAR
CARGA	TOTAL =	11738.1 MW	3349.0 MVAR
GERACAO	TOTAL =	12035.9 MW	-674.8 MVAR (253.9 , -928.7)
INJECAO	EQUIV =	0.0 MW	0.0 MVAR
INJ.	ALOCADA =	0.0 MW	0.0 MVAR (0.0 , 0.0)
SHUNT	ALOCADO =		0.0 MVAR (0.0N , 0.0N)
POT.	REJEIT. =	0.0 MW	0.0 MVAR
SHUNT	CHAVEADO =		0.0 MVAR (0.0N , 0.0N)
PERDA	TOTAL =	297.8 MW	-3804.3 MVAR
C.SERIE	ALOC. =	0.000 %	0.00 MVAR
CARREG.	TOTAL =	0.00 MW	0.00 MVAR
PEDAGIO	=	0.00 MW	0.00 MVAR
COMP.	ESTATICA =		0.0 MVAR
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA	=		297.81960306
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA	=		0.00000000

Figura 5.18 - Sumário do caso

RELATÓRIO DE TOTAIS DE ÁREA						
X----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----
AREA	GERACAO	CARGA	SHUNT	EXPORT	IMPORT	PERDAS
NUM.	MW/ Mvar	MW/ Mvar	Mvar/ EQUIV	MW/ Mvar	MW/ Mvar	MW/ Mvar
X----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----
1	5406.5	6007.0	104.1	0.0	722.5	122.0
	-143.0	1874.4	0.0	0.0	467.6	-1445.7
2	6629.4	5731.1	115.4	722.5	0.0	175.8
	-531.8	1474.6	0.0	467.6	0.0	-2358.6
TOTAL	12035.9	11738.1	219.5	722.5	722.5	297.8
	-674.8	3349.0	0.0	467.6	467.6	-3804.2

Figura 5.19 - Relatório de totais de área do caso otimizado

As situações demonstradas nos itens 5.4.3, 5.4.4 e 5.4.5 mostraram que o programa conseguiu reduzir as perdas elétricas no sistema nas três condições definidas. Obviamente, a redução foi maior onde não havia restrições energéticas (item 5.4.3). Os itens 5.4.4 e 5.4.5 trataram situações particulares que em geral ocorrem em sistemas cuja base de geração é de origem hidráulica, que são dependentes das condições hidrológicas.

5.4.6. Maximização de Intercâmbio Entre Áreas

Algumas situações na operação de sistemas elétricos de potência podem requerer a exploração de máximo intercâmbio. Porém, a existência de um limite de energia transmitida por uma interligação muitas vezes fica abaixo da capacidade nominal de transmissão. Além disso, a operação do sistema com segurança é um requisito importante que exige cuidados e riscos calculados com a mínima possibilidade de interrupção de carga.

No planejamento da operação em regime permanente, estes estudos visam determinar os montantes máximos de transmissão de energia que podem ser praticados próximos de sua capacidade nominal, buscando-se utilizar de forma mais eficiente as linhas de transmissão existentes.

Para obtenção de máximo intercâmbio pode ser utilizado o programa de fluxo de potência ANAREDE. Porém uma forma mais precisa é o uso do programa FLUPOT. Nestas simulações são dadas as restrições do sistema e o FLUPOT tenta obter uma solução tal que não sejam violadas as restrições.

O enfoque nesta parte do trabalho é realizar, através do FLUPOT, a maximização do intercâmbio entre as áreas Sul e Sudeste, estabelecendo um carregamento máximo nas LT's 500 kV Ibiúna-Bateias C.1 e C.2, que não acarrete violações de limites no sistema em regime normal de operação considerando a rede completa. Como também na contingência de um dos circuitos, o valor do carregamento possa ser assumido pelo circuito remanescente sem violar o limite de emergência da linha.

No Capítulo 7, será avaliado o comportamento em regime dinâmico deste caso com o intercâmbio maximizado, frente à perda simples na interligação.

Foi utilizado neste estudo um caso de referência do **sistema-teste de 65 barras** apresentando as seguintes condições iniciais mostradas nas Tabelas 5.1 e 5.2:

Tabela 5.1 – Condições iniciais de geração e carga

Área	Geração (MW)	Carga (MW)	Folga (MW)	Perdas(MW)
Sudeste	5.441,2	6.018,3	3.505,0	134,1
Sul	6.695,4	5.806,9	2.216,6	177,6
Total	12,136,6	11.825,2	5.721,6	311,7

Tabela 5.2 – Intercâmbio e representação de carga

Intercâmbio	Sul → Sudeste = 718,4 MW
Carga ativa	Representada por 50% de impedância constante e 50% de potência constante
Carga reativa	Representada por 100% de impedância constante.

A situação considerada foi a maximização do intercâmbio no sentido do Sul para o Sudeste. Foi utilizada a função objetivo Máxima Transferência de Potência (MXTR) em conjunto as informações complementares das áreas vizinhas (cartão DTRF) as quais a transferência de potência deve ser maximizada. A Figura 5.20 apresenta os dados utilizados no processo de maximização.

```

REST 01
.
DCTE
MXIT 100
JUMP 0.001
9999
.
.DCON VGEN QGEN PGEN
... CONTROLES ATIVADOS: GERAÇÃO REATIVA, TENSÃO DE GERADOR, LTCs E ELEMENTOS SHUNT
... MANOBRÁVEIS
.DCON VGEN QGEN TAPC SHNC
.
... FUNÇÃO OBJETIVO: MAXIMIZAÇÃO DE INTERCÂMBIO ENTRE ÁREAS
DOBJ MXTR
.
... RESTRIÇÃO DE CAPACIDADE NOMINAL DAS LINHAS
DRES FMVA
.
DCAQ
0000 500 500 1 1
9999
.
... 80% DO REATIVO DAS MAQUINAS (FOLGA EM REGIME NORMAL)
DGLM
.Num...Qmin .Qmax
18 -436 480
20 -512 512
48 -864 960
300 -352 313
301 -112 112
302 -120 120
303 -480 480
500 -432 432
800 -640 640
808 -480 480
810 -320 425
904 -380 380
915 -412 372
919 -118 176
925 -352 336
9999
.
DGEP
.Num...Pmin .Pmax
18 200 2280
20 110 1488
300 190 1192
301 80 400
302 110 510
303 180 1680
500 125 1396
800 240 1674
808 235 1240
810 180 1260
904 170 1450
915 260 1140
919 120 728
925 220 1420
9999
.
DTRF
02 01
9999
.

```

Função objetivo

Indica o sentido da maximização, neste caso da área 2 para área 1

Figura 5.20 – Dados de otimização e função objetivo (continua na próxima página)

```

.
DVGB
..Vmin Vmax VminCVmaxC
A .95 1.05 .90 1.1
C .95 1.1 .90 1.1
B .95 1.07 .90 1.1
99
.
DARI
01
02
.
9999
.
EXOT
.
FIM

```

Figura 5.20 – Dados de otimização e função objetivo

Realizando o processo de otimização sobre o caso inicial, foram obtidos os seguintes resultados mostrados nas Figuras 5.21 e 5.22.

SUMÁRIO DO CASO				
SHUNT	TOTAL =	327.3	MVAR	
CARGA	TOTAL =	11915.0	MW	3436.6 MVAR
GERACAO	TOTAL =	12249.8	MW	154.3 MVAR (894.0 , -739.8)
INJECAO	EQUIV =	0.0	MW	0.0 MVAR
INJ.	ALOCADA =	0.0	MW	0.0 MVAR (0.0 , 0.0)
SHUNT	ALOCADO =			0.0 MVAR (0.0N , 0.0N)
POT.	REJEIT. =	0.0	MW	0.0 MVAR
SHUNT	CHAVEADO =			0.0 MVAR (0.0N , 0.0N)
PERDA	TOTAL =	334.8	MW	-2955.1 MVAR
C.SERIE	ALOC. =	0.000	%	0.00 MVAR
CARREG.	TOTAL =	0.00	MW	0.00 MVAR
PEDAGIO	=	0.00	MW	0.00 MVAR
COMP.	ESTATICA =			0.0 MVAR
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE ATIVA = 1526.46014080				
SOMATORIO DAS FUNCOES OBJETIVO, PARTE REATIVA = 0.00000000				

Figura 5.21 – Sumário do caso

RELATÓRIO DE MAXIMIZAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA			
X-AREA	ORIGEM-X	X-AREA	DESTINO-X
	2		1
		X--VALOR--X	1526.36

Figura 5.22 – Intercâmbio máximo obtido

Observa-se que o programa conseguiu maximizar o intercâmbio Sul → Sudeste de 718,4 MW para 1.526,36 MW, elevando o carregamento em mais de duas vezes o valor inicial. O relatório mostrado na Figura 5.23 indica os pontos do sistema que limitaram um aumento maior no valor do intercâmbio.

RELATÓRIO DE GRANDEZAS NO LIMITE			
X--	LOCALIZACAO -X	GRANDEZA	V.LIMITE
18	ITUMBIAR-3GR	Tensao em barra PV	1.0500 SUP
20	MARIMBON-5GR	Tensao em barra PV	1.0500 SUP
48	IBIUNA---1CS	Tensao em barra PV	1.0500 SUP
800	GBMUNHOZ-4GR	Tensao em barra PV	1.0500 SUP
808	SCAXIAS--4GR	Tensao em barra PV	1.0500 SUP
810	SSEGRED0-4GR	Tensao em barra PV	1.0500 SUP
904	ITA-----3GR	Tensao em barra PV	1.0500 SUP
915	MACHADIN-2GR	Tensao em barra PV	1.0500 SUP
925	SSANTIAG-3GR	Tensao em barra PV	1.0500 SUP
960	CURITIBA-230	Tensao em barra de carga	0.9500 INF
1047	SOSORIO--230	Tensao em barra de carga	1.0500 SUP
2	535 -> 536	Fluxo em circuitos (MVA)	750.00 SUP

Figura 5.23 – Grandezas no limite

Este relatório apresenta as restrições encontradas pelo programa, sendo a maior parte delas em barras de geração que atingiram o limite superior de tensão. A Figura 5.24 mostra o redespacho de geração nas regiões Sudeste e Sul, com um deslocamento de geração entre as áreas. Apesar de ainda existir margem de potência ativa nas usinas da região Sul, o programa não alocou devido às restrições de tensão e carregamento da rede.

RELATÓRIO DE VARIAÇÃO DE CONTROLES							
X----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----
CONT	BARRA/CIRCUITO	VARIACAO					
TIPO	NUM	NOME	INICIAL	DESVIO	FINAL	UNID	ITER
X----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----
GE_P	18	ITUMBIAR-3GR	1314.0	-204.4	1109.6	MW	0
GE_P	20	MARIMBON-5GR	882.6	589.1	1471.7	MW	0
GE_P	300	EMBORCAC-3GR	760.9	4.0	764.9	MW	0
GE_P	301	JAGUARA--3GR	320.9	-18.7	302.2	MW	0
GE_P	302	N.PONTE--3GR	330.9	24.0	354.9	MW	0
GE_P	303	S.SIMAO--3GR	1080.9	-540.0	540.9	MW	0
GE_P	500	A.VERMEL-4GR	751.1	470.6	1221.7	MW	0
GE_P	800	GBMUNHOZ-4GR	1598.6	33.6	1632.2	MW	0
GE_P	808	SCAXIAS--4GR	941.7	-323.9	617.8	MW	0
GE_P	810	SSEGRED0-4GR	724.0	141.9	865.9	MW	0
GE_P	904	ITA-----3GR	944.0	481.4	1425.3	MW	0
GE_P	915	MACHADIN-2GR	1124.0	-9.3	1114.7	MW	0
GE_P	919	SOSOR1A4-4GR	480.9	-212.7	268.2	MW	0
GE_P	925	SSANTIAG-3GR	882.2	-281.1	601.1	MW	0
GE_V	18	ITUMBIAR-3GR	1.035	0.015	1.050	P.U.	0
GE_V	20	MARIMBON-5GR	1.020	0.030	1.050	P.U.	0

Figura 5.24 – Redespacho de geração e variação dos controles (continua na próxima página)

RELATÓRIO DE VARIAÇÃO DE CONTROLES								
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
CONT	BARRA/CIRCUITO		VARIACAO					
TIPO	NUM	NOME	INICIAL	DESVIO	FINAL	UNID	ITER	
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
GE_V	48	IBIUNA---1CS	1.010	0.040	1.050	P.U.	0	
GE_V	300	EMBORCAC-3GR	1.035	0.015	1.050	P.U.	0	
GE_V	301	JAGUARA--3GR	1.035	0.013	1.048	P.U.	0	
GE_V	302	N.PONTE--3GR	1.035	0.014	1.049	P.U.	0	
GE_V	303	S.SIMAO--3GR	1.035	0.015	1.050	P.U.	0	
GE_V	500	A.VERMEL-4GR	1.040	0.007	1.047	P.U.	0	
GE_V	800	GBMUNHOZ-4GR	1.040	0.010	1.050	P.U.	0	
GE_V	808	SCAXIAS--4GR	1.048	0.001	1.049	P.U.	0	
GE_V	810	SSEGRED0-4GR	1.040	0.010	1.050	P.U.	0	
GE_V	904	ITA-----3GR	1.040	0.010	1.050	P.U.	0	
GE_V	915	MACHADIN-2GR	1.045	0.005	1.050	P.U.	0	
GE_V	925	SSANTIAG-3GR	1.040	0.009	1.049	P.U.	0	

Figura 5.24 – Redespacho de geração e variação dos controles

5.5. SUMÁRIO

Os estudos de fluxo de potência ótimo que foram realizados através dos sistemas-teste demonstraram ser este um recurso poderoso no ajuste de casos de fluxo de potência.

A constatação que foi feita é que, independentemente da dimensão do sistema, a otimização pode ser realizada, bastando definir as condições de interesse, sem esquecer que quanto maior for o número de restrições consideradas, mais difícil será a obtenção de resultados que atendam completamente a todos os objetivos. Por outro lado, quanto maior o grau de liberdade, melhor será a resposta. Desta forma, é preciso ponderar aquilo que realmente é importante colocar como restrição, para não tornar o processo sem solução, ou permitir um grau de liberdade muito grande e obter uma solução não adequada.

Uma outra observação é que toda e qualquer restrição, sejam elas de limites de equipamentos ou limites operativos, devem ser fornecidos ao programa para que o resultado obtido não seja um ponto de operação irrealizável ou inviável economicamente.

Este capítulo exemplificou o uso dos sistemas-teste propostos de 9 e 65 barras em estudos de otimização estática. As simulações realizadas encontram-se registradas nos arquivos dentro da pasta “Capítulo 5” no CD em apenso.

* * *