



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO PARA CÁLCULO DE LIMITES DE INTERCÂMBIO

Bruno da Cruz Sessa

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis,
D.Sc.

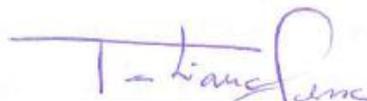
Rio de Janeiro
Agosto de 2013

**AVALIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO
PARA CÁLCULO DE LIMITES DE INTERCÂMBIO**

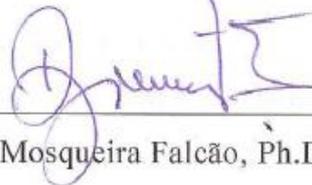
Bruno da Cruz Sessa

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:



Prof. Tatiana Mariano Lessa de Assis, D.Sc.
(Orientadora)



Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.



Eng. Elder Geraldo Sales de Sant'Anna, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
AGOSTO DE 2013

Sessa, Bruno da Cruz.

Avaliação de uma Ferramenta de Fluxo de Potência Ótimo para Cálculo de Limites de Intercâmbio / Bruno da Cruz Sessa – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.

XIII, 82 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis.

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 70-72.

1. Fluxo de Potência Ótimo. 2. Análise de Segurança.
3. Limites de Intercâmbio. I. Assis, Tatiana Mariano Lessa de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, por me ajudar a superar todos os obstáculos e tornar possível mais uma conquista em minha vida.

Aos meus pais Claudio Sessa e Maria de Lourdes M. Cruz, pelo amor, carinho e apoio dedicados à minha criação, por todos os ensinamentos e por ter dado toda a estrutura para me tornar a pessoa que sou hoje.

Ao meu irmão Thiago, pela convivência e amizade durante todo o tempo. Aos meus familiares, em especial à minha avó Rosalina, meus tios Jorge, Luiza e Dedé e minha prima Nathalia, pelo carinho e apoio. À Cris e filhos, por sempre me receberem bem em vossa casa.

Ao meu avô Emídio (*in memoriam*), por me incentivar a cursar engenharia e fazer com que minha formação se tornasse um sonho para ele, me motivando ainda mais para concluir o curso. Mesmo não estando presente neste momento, tenho total convicção de que ele está feliz e realizado.

À minha namorada Carolina Castro, por todo o amor e compreensão ao longo dos cinco anos de engenharia, por compartilhar comigo todos os momentos da minha vida e me ajudar a alcançar meus objetivos.

Aos amigos Bruno Riehl, Eduardo Netto, Lucas Ferreira, Rafael Caetano, Rodrigo Lopes, Teodoro Guarinello e Thaís Pacheco, pelo companheirismo, amizade e momentos de descontração ao longo dessa trajetória árdua e vencedora.

À minha orientadora Tatiana Mariano L. Assis, pelo comprometimento e atenção dispensada neste trabalho e pela contribuição técnica significativa para a minha formação.

Ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em especial a toda a equipe da Gerência de Ampliações e Reforços na Rede Básica (GAT-2), pela convivência e pelos conhecimentos transmitidos. Agradeço particularmente ao Eng. Elder Sant'Anna, pela sugestão do tema e pelo apoio técnico fundamental para a conclusão deste projeto.

**Resumo do Projeto de Graduação apresentado a Escola Politécnica/UFRJ
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista**

Avaliação de uma Ferramenta de Fluxo de Potência Ótimo para Cálculo de Limites
de Intercâmbio

Bruno da Cruz Sessa

Agosto 2013

Orientadora: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Curso: Engenharia Elétrica

Este projeto de graduação consiste em avaliar a utilização de uma ferramenta de fluxo de potência ótimo aplicado ao cálculo de limites de intercâmbio entre duas áreas de um sistema elétrico de potência. O conhecimento destes valores é importante, pois serve de insumo para o planejamento energético do sistema. Além disso, também é útil no planejamento elétrico da expansão, onde podem ser indicadas obras que permitam o aumento do intercâmbio.

O objetivo da otimização é encontrar um ponto de máxima transferência de potência entre duas regiões geoeletricas, de tal maneira que não ocorra quaisquer violações das restrições impostas ao problema. Contudo, ao explorar altamente o fluxo nas interligações, pode-se chegar a um ponto de operação onde não é possível atender determinadas contingências. Neste caso, o fluxo de potência ótimo com restrições de segurança surge como uma solução para o problema e também será um tema abordado neste trabalho.

As simulações, realizadas no programa computacional FLUPOT, desenvolvido pelo CEPEL, foram feitas primeiramente em um sistema-teste de 33 barras e, em seguida, no Sistema Interligado Nacional, que possui mais de 6000 barras em sua base de dados.

Palavras-chave: Otimização de Sistemas de Potência, Fluxo de Potência Ótimo, Limites de Intercâmbio, Análise de Segurança.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer

Evaluation of a Tool of Optimal Power Flow for Calculation of Limits of Interchange

Bruno da Cruz Sessa

August 2013

Advisor: Tatiana Mariano Lessa de Assis

Course: Electric Engineering

This undergraduate project is to evaluate the use of a tool of optimal power flow applied to the calculation of limits of interchange between two areas of an electric power system. The knowledge of these values is important because they function as input for energy planning system. Furthermore, it is also useful in electric expansion planning, which can be indicated works that allow the increase of the interchange power flow.

The objective of the optimization is to find a point of maximum power transfer between two geoelectric regions, so that it does not permit any violation of restrictions imposed on the problem. However, when exploring highly flow interconnections, the system can reach an operating point where you cannot bear certain contingencies. In this case, the security constrained optimal power flow comes as a solution to the problem and will also be a topic analysed in this work.

The simulations, performed in a computer program, developed by FLUPOT CEPTEL, were first undertaken in a test system with 33 bus and then in Brazilian Interconnected System, which has more than 6000 bus in its database.

Keywords: Power Systems Optimization, Optimal Power Flow, Limits of Interchange, Security Analysis.

Sumário

Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Símbolos.....	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura do Trabalho.....	2
2 Fluxo de Potência Ótimo	4
2.1 Fluxo de Potência Convencional.....	4
2.2 Modelagem do Problema de FPO	7
2.2.1 Restrições de Igualdade.....	7
2.2.2 Restrições de Desigualdade.....	7
2.2.3 Funções Objetivo.....	8
2.3 Solução do FPO.....	11
2.3.1 Método de Pontos Interiores	12
2.3.2 Algoritmo da Solução.....	17
2.4 Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança.....	18
2.4.1 Modelagem do Problema de FPORS.....	19
2.4.2 Método de Decomposição de Benders	21
3 Utilização do FPO para Cálculo de Limites de Intercâmbio.....	23
3.1 Teste em um Sistema de Pequeno Porte.....	23
3.1.1 Descrição do Sistema	23
3.1.2 Utilização do FLUPOT para o Cálculo de Intercâmbio	25
3.1.3 Resultados Obtidos.....	29
3.2 Teste no Sistema Interligado Nacional.....	36
3.2.1 Interligações do SIN.....	36
3.2.2 Descrição do Cenário RSUL	38

3.2.3	Utilização do FLUPOT em um Caso do SIN	41
3.2.3.1	Montagem do Arquivo de Otimização	43
3.2.4	Resultados Obtidos.....	45
4	Aplicação do Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança	51
4.1	Utilização do FPORS no FLUPOT	51
4.2	Teste do FPORS em um Sistema de Pequeno Porte	53
4.2.1	Lista 1 - Contingências de Duas Linhas de Transmissão	53
4.2.1.1	Modo Preventivo	53
4.2.1.2	Modo Corretivo	55
4.2.2	Lista 2 – Contingências nas LTs da Área Exportadora	56
4.2.2.1	Modo Preventivo	57
4.2.2.2	Modo Corretivo	58
4.2.3	Lista 3 – Contingência nos Elementos da Interligação	61
4.3	Teste do FPORS no Sistema Interligado Nacional	64
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	66
5.1	Considerações Finais.....	66
5.2	Trabalhos Futuros.....	68
6	Referências Bibliográficas	70
Anexo I	73

Lista de Figuras

Figura 1: Algoritmo do Método de Pontos Interiores Direto – Adaptado de [8] ...	18
Figura 2: Esquema explicativo da resolução do FPORS – Adaptado de [9].....	20
Figura 3: Sistema equivalente da região Sul – Adaptado de [17]	24
Figura 4: Arquivo de otimização do sistema de 33 barras	29
Figura 5: Diagrama unifilar do sistema-teste no ponto de operação relativo ao caso base	30
Figura 6: Relatório de grandezas no limite do caso otimizado.....	32
Figura 7: Diagrama unifilar do caso com aumento de 5% da carga.....	33
Figura 8: Código DGEP do arquivo de otimização do caso com aumento de 5% da carga	34
Figura 9: Relatório de grandezas no limite do caso com 5% de aumento de carga otimizado	35
Figura 10: Interligações entre os subsistemas do SIN [20]	37
Figura 11: Localização geográfica das linhas que compõem o RSUL – Adaptado de [22].....	40
Figura 12: Identificação das regiões de monitoração e controle	42
Figura 13: Relatório de saída do FLUPOT no caso de limite RSUL	46
Figura 14: Relatório emitido quando somente as barras da Rede Básica são monitoradas.....	48
Figura 15: Relatório emitido após a retirada da SE Rurópolis 230 kV da área de monitoração	49
Figura 16: Dados de entrada para atuação da restrição de segurança no modo preventivo	54
Figura 17: Dados de entrada para atuação da restrição de segurança no modo corretivo.....	55
Figura 18: Variação de controles para atender a contingência 1	56
Figura 19: Variação de controles para atender a contingência 2.....	56
Figura 20: Contingências inseridas na Lista 2	57
Figura 21: Mensagem exibida no FLUPOT informando as contingências conflitantes	58
Figura 22: Distribuição dos fluxos de potência no caso base.....	59

Figura 23: Contingências conflitantes no modo corretivo sem redespacho de geração	60
Figura 24: Contingências inseridas na Lista 3	61
Figura 25: Configuração da rede com o capacitor de 20 Mvar na SE Curitiba	62

Lista de Tabelas

Tabela 1: Levantamento de geração.....	24
Tabela 2: Carga do caso base	25
Tabela 3: Controles disponíveis no FLUPOT.....	26
Tabela 4: Restrições funcionais do FLUPOT	27
Tabela 5: Comparação do intercâmbio entre o caso base e o caso otimizado.....	31
Tabela 6: Comparação de geração entre o caso base e o caso otimizado	31
Tabela 7: Fluxos que compõem o intercâmbio RSUL.....	39
Tabela 8: Inflexibilidade das UTEs da região Sul	44
Tabela 9: Comparação do intercâmbio RSUL entre o caso base e o caso otimizado	45
Tabela 10: Despacho de geração por subsistema do SIN	47
Tabela 11: Nome do código para cada tipo de contingência	52
Tabela 12: Intercâmbios encontrados no sistema-teste de 33 barras.....	53
Tabela 13: Caminho percorrido pelo FLUPOT até alcançar a convergência	54
Tabela 14: Intercâmbio da área 2 para a área 1 após cada contingência	60
Tabela 15: Atuação da decomposição de Benders no processo de convergência...	63

Lista de Símbolos

ANAREDE	Programa de Análise de Redes
ASHN	Dados da Função Objetivo de Mínimo Custo de Instalação de <i>Shunt</i> Reativo (FLUPOT)
BNT1.DAT	Arquivo com Dados das Unidades Geradoras e Transformadores Elevadores da Usina
C1	Circuito 1
C2	Circuito 2
CA	Corrente Alternada
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CTG	Contingência
DARI	Dados de Áreas de Interesse (FLUPOT)
DBSH	Dados de Bancos <i>Shunts</i> Individualizados (ANAREDE)
DCAQ	Dados de Instalação de <i>Shunt</i> Reativo (FLUPOT)
DCCT	Dados de Controle Alterados do Caso Base para as Contingências (FLUPOT)
DCON	Dados de Controle (FLUPOT)
DGEP	Dados de Geração de Potência Ativa (FLUPOT)
DGLT	Dados de Limites de Tensão (ANAREDE)
DLIS	Dados da Lista de Contingências (FLUPOT)
DOBJ	Dados da Função Objetivo (FLUPOT)
DRCC	Dados de Áreas de Controle (FLUPOT)
DRES	Dados de Restrição (FLUPOT)
DRMI	Dados de Áreas de Monitoração (FLUPOT)
DTRF	Opção de Máxima Transferência de Potência entre Áreas Vizinhas (FLUPOT)
DVES	Opção de Máxima Transferência de Potência em um Conjunto de Circuitos (FLUPOT)
DVLB	Dados de Limites de Tensão por Barra (FLUPOT)
FLUPOT	Programa de Fluxo de Potência Ótimo
FPO	Fluxo de Potência Ótimo

FPORS	Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança
LT	Linha de Transmissão
LTC	<i>Load Tap Changers</i>
MXTR	Função Objetivo de Máxima Transferência de Potência Ativa (FLUPOT)
N	Subsistema Norte
NE	Susbsistema Nordeste
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR	Plano de Ampliações e Reforços
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PGEN	Opção de Controle de Geração de Potência Ativa (FLUPOT)
PQ	Barra de Carga
PR	Estado do Paraná
PV	Barra de Tensão Controlada
QGEN	Opção de Controle de Geração de Potência Reativa (FLUPOT)
RESP	Opção de Restrições Especiais (FLUPOT)
RSE	Recebimento de Energia pela Região Sudeste
RSHC	Relatório de <i>Shunt</i> Chaveável (FLUPOT)
RSUL	Recebimento de Energia pela Região Sul
RVAR	Relatório de Variação de Controles (FLUPOT)
S	Subsistema Sul
SE	Subestação
SE/CO	Subsistema Sudeste/Centro-Oeste
SIN	Sistema Interligado Nacional
SP	Estado de São Paulo
T1	Transformador 1
T2	Transformador 2
T3	Transformador 3
TR	Transformador
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Térmica
V0	Barra <i>Swing</i>

1 Introdução

1.1 Motivação

A energia elétrica é uma das formas de energia que a humanidade mais utiliza na atualidade, sendo indispensável no dia a dia de toda a sociedade e exerce um papel fundamental para o desenvolvimento econômico de um país. Os sistemas elétricos de potência, compostos basicamente pela geração, transmissão e distribuição, são responsáveis por fornecer energia elétrica com qualidade aos consumidores.

Para aumentar a confiabilidade e assegurar o atendimento à demanda de energia elétrica, que vem crescendo significativamente ao longo das últimas décadas, a interligação entre diferentes sistemas elétricos tem se tornado cada vez mais comum. Além dos benefícios relacionados à segurança, a interconexão de redes elétricas vizinhas proporciona uma operação do sistema mais econômica, permitindo a exploração de fontes de energia de menores custos.

Atualmente, os sistemas de energia elétrica são operados em um ambiente mais competitivo, caracterizado por diferentes transações comerciais regidas por regra de mercado, com o livre acesso à rede de transmissão. Tais características exigem uma avaliação detalhada dos limites de intercâmbio entre diferentes áreas, de forma a garantir a segurança do sistema [1].

O intercâmbio entre sistemas elétricos pode ser limitado por diferentes fatores. Algumas restrições estáticas, como os limites de tensão em barramentos e carregamento em circuitos ou certas restrições dinâmicas, como a estabilidade transitória são causas da limitação da máxima transferência de potência [2]. Esses valores limite têm aplicação direta no planejamento energético, pois podem representar uma restrição ativa na modelagem energética do sistema. Já no âmbito do planejamento elétrico, o conhecimento de tais limites apresenta relação direta com a necessidade de proposição de ampliações ou reforços para a rede, de modo a possibilitar a prática de intercâmbios mais elevados [1].

Uma forma de calcular o limite de intercâmbio é aumentar o fluxo da região exportadora para a região importadora de energia, até que algum critério preestabelecido seja violado. Contudo, essa tarefa demanda um tempo elevado no que se refere ao ajuste dos pontos de operação em diversos cenários.

Neste contexto, a fim de automatizar o processo, o problema de determinação dos limites máximos de intercâmbio aponta para a utilização de técnicas de otimização. Logo, a aplicação do fluxo de potência ótimo aparece como uma solução, onde se deseja atingir o maior valor de transferência de potência entre regiões, sujeito às restrições físicas e operativas impostas ao problema.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é avaliar, por meio de simulações computacionais, uma ferramenta de fluxo de potência ótimo aplicada ao cálculo de limites de intercâmbio em sistemas de potência, interpretando os resultados obtidos de acordo com a teoria apresentada sobre o assunto. A ferramenta computacional utilizada é o programa FLUPOT, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

Outra finalidade do trabalho consiste em verificar a possibilidade de utilização dessa ferramenta em um sistema de grande porte, como o brasileiro, apontando os cuidados necessários para a definição dos dados de entrada e as dificuldades encontradas nas simulações. As análises envolvem também a inclusão de restrições de segurança na otimização, onde o objetivo do problema deve ser alcançado atendendo simultaneamente uma lista de contingências predeterminadas.

1.3 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 2 tem enfoque conceitual e é responsável por apresentar os fundamentos teóricos acerca do fluxo de potência ótimo. Inicialmente, é mostrada a modelagem do problema e, em seguida, é apresentado um método de solução para o mesmo. No final do capítulo são explicados os conceitos relativos ao fluxo de potência ótimo com restrições de segurança.

No Capítulo 3 é realizado primeiramente um teste em um sistema de pequeno porte, onde se deseja maximizar a transferência de potência entre duas áreas. Para isso, são apresentadas as diretrizes para a montagem do arquivo de otimização a ser carregado no programa, definindo-se alguns comandos fundamentais para que a execução da otimização seja bem sucedida. Posteriormente, a ferramenta será utilizada para o cálculo do limite de intercâmbio em um caso real do sistema brasileiro.

O Capítulo 4 é destinado às simulações computacionais de fluxo de potência ótimo com restrições de segurança. São realizados testes no sistema de pequeno porte para três listas de contingências distintas. Por último, são apresentadas as dificuldades encontradas para a aplicação da análise de segurança em um sistema de grandes dimensões.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e algumas sugestões para futuros trabalhos.

2 Fluxo de Potência Ótimo

O fluxo de potência ótimo (FPO) é uma ferramenta de otimização que vem sendo utilizada ao longo do tempo para auxiliar o planejamento e a operação de sistemas elétricos de potência. Este capítulo tem como objetivo apresentar sua formulação matemática básica, que surgiu inicialmente em 1962 com J. Carpentier [3].

A finalidade da resolução de um problema por meio do FPO é fornecer o melhor ponto de operação do sistema que minimiza ou maximiza o valor de uma determinada função objetivo, sujeita às restrições físicas ou operacionais impostas ao problema. Para que seja possível atingir esse ponto ótimo sem que ocorram violações, o FPO atuará nos controles disponíveis no sistema a ser otimizado.

Assim sendo, as seguintes condições devem ser satisfeitas nas soluções obtidas por meio do FPO [1]:

- Minimizar ou maximizar uma variável de operação;
- Atender a carga do sistema;
- Manter certas grandezas dentro de seus limites operativos.

2.1 Fluxo de Potência Convencional

Para entender o conceito de fluxo de potência ótimo se faz necessário que os conhecimentos de fluxo de potência estejam bem consolidados. O cálculo do fluxo de potência em uma rede de energia elétrica consiste essencialmente na determinação do estado da rede (módulo e ângulo das tensões nas barras) e da distribuição de seus fluxos (potências ativas e reativas que fluem pelas linhas e transformadores), por meio da representação de um conjunto de equações e inequações algébricas. Nesse tipo de problema, a modelagem do sistema é estática, pois as variações dos parâmetros da rede com o tempo são consideradas lentas, possibilitando que os efeitos transitórios sejam ignorados [4].

As equações básicas do fluxo de potência são formuladas de acordo com a primeira lei de Kirchoff, na qual a potência líquida injetada em cada nó da rede elétrica deve ser igual à soma das potências injetadas por todos os componentes ligados a este nó. Tais componentes podem ser internos, como linhas de

transmissão, transformadores, capacitores e reatores ou externos, como os geradores e a carga.

Na formulação mais simples do problema, cada barra da rede é representada por quatro variáveis [4]:

P_k : potência ativa líquida injetada na barra k

Q_k : potência reativa líquida injetada na barra k

V_k : magnitude da tensão na barra k

θ_k : ângulo da tensão na barra k

Dessas quatro variáveis presentes no problema, duas delas são previamente conhecidas e as outras duas são incógnitas. São definidos três tipos de barras de acordo com essa distinção.

i. Barra flutuante ou swing

Geralmente, só existe uma barra desse tipo no sistema, que é necessária para suprir as perdas do sistema que não são representadas nas equações do fluxo de potência. As variáveis conhecidas são V_k e θ_k e as variáveis calculadas são P_k e Q_k .

ii. Barra PQ ou de carga

São barras que não apresentam qualquer controle de tensão. Estão em maioria no sistema. Suas variáveis conhecidas são P_k e Q_k e as variáveis calculadas são V_k e θ_k .

iii. Barra PV ou de tensão controlada

São barras que são capazes de fixar o módulo da tensão e a injeção de potência ativa, como geradores e compensadores síncronos. Suas variáveis conhecidas são P_k e V_k e as variáveis calculadas são Q_k e θ_k .

As equações (1) e (2) mostram, respectivamente, as equações na forma polar do fluxo de potência ativa e reativa para uma barra genérica k de um sistema com n barras [5].

$$P_k = V_k \cdot \left\{ \sum_{m=1}^n V_m \cdot [G_{km} \cos(\theta_{km}) + B_{km} \sen(\theta_{km})] \right\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$Q_k = V_k \cdot \left\{ \sum_{m=1}^n V_m \cdot [G_{km} \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \text{cos}(\theta_{km})] \right\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Em que:

V_k : módulo da tensão na barra k

V_m : módulo da tensão na barra m conectada à barra k

G_{km} : condutância da linha que liga a barra k à barra m

B_{km} : susceptância da linha que liga a barra k à barra m

θ_{km} : diferença angular entre as fases das tensões nas barras k e m

O número de equações a serem resolvidas para o cálculo do fluxo de potência em um sistema elétrico é dado por (3) [5].

$$Eq_{FP} = 2 \cdot n - PV - 2 \quad (3)$$

Em que:

n : número de barras do sistema elétrico

PV : número de barras PV do sistema

É possível perceber que um sistema de grande porte apresenta um alto número de equações para solucionar o problema do fluxo de potência. Em virtude disso, são utilizados diversos algoritmos, cada um com suas particularidades, para resolver essa matemática complexa, entre os quais se destaca o Método de Newton-Raphson [6] devido a sua alta eficiência.

Já o conjunto de inequações algébricas que representa a rede é proveniente das restrições operacionais das tensões nodais e das restrições de injeção de potência ativa e reativa no sistema, conforme apresentado a seguir.

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (4)$$

$$P_k^{min} \leq P_k \leq P_k^{max} \quad (5)$$

$$Q_k^{min} \leq Q_k \leq Q_k^{max} \quad (6)$$

2.2 Modelagem do Problema de FPO

Geralmente, o fluxo de potência ótimo é caracterizado como um problema de programação não linear com restrições, sendo formulado matematicamente da seguinte maneira [7]:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(z) \\ & \text{s.a.} \\ & \qquad g(z) = 0 \\ & \qquad h(z) \leq 0 \end{aligned} \tag{7}$$

Em que:

$f(z)$: função objetivo

$g(z)$: conjunto de restrições de igualdade

$h(z)$: conjunto de restrições de desigualdade

z : vetor de variáveis do sistema

2.2.1 Restrições de Igualdade

As restrições de igualdade do FPO se referem às equações de balanço de potência ativa e reativa no sistema, ou seja, são formadas pelas equações (1) e (2) do fluxo de potência convencional. Vale ressaltar que dependendo do problema a ser analisado, alguns controles do sistema, ao invés de variarem dentro de uma faixa específica, podem ser fixados, tornando-se restrições de igualdade a serem acrescentadas àquelas já existentes.

2.2.2 Restrições de Desigualdade

As restrições de desigualdade são formadas por inequações contendo os limites térmicos que definem o máximo carregamento de linhas de transmissão e transformadores. Esses limites físicos podem variar dependendo se o equipamento em questão está operando sob regime normal ou em emergência. Entretanto, a maioria das restrições de desigualdade está relacionada aos limites de operação dos equipamentos do sistema, culminando em diversas inequações que devem ser atendidas pelo FPO, conforme é mostrado a seguir [8].

Módulo da tensão na barra k

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (8)$$

Potência ativa gerada no gerador i

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad (9)$$

Potência reativa gerada no gerador i

$$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max} \quad (10)$$

Injeção de potência reativa capacitiva na barra k

$$QC_k^{min} \leq QC_k \leq QC_k^{max} \quad (11)$$

Injeção de potência reativa indutiva na barra k

$$QL_k^{min} \leq QL_k \leq QL_k^{max} \quad (12)$$

Injeção de potência ativa na barra k

$$P_k^{min} \leq P_k \leq P_k^{max} \quad (13)$$

Tape do transformador no circuito $i-j$

$$a_{ij}^{min} \leq a_{ij} \leq a_{ij}^{max} \quad (14)$$

Ângulo de defasamento no circuito $i-j$

$$\theta_{ij}^{min} \leq \theta_{ij} \leq \theta_{ij}^{max} \quad (15)$$

Intercâmbio líquido na área j

$$IT_j^{min} \leq IT_j \leq IT_j^{max} \quad (16)$$

2.2.3 Funções Objetivo

As funções objetivo desempenham um papel essencial durante o processo de otimização, pois fornecem um propósito para a busca do ponto de solução. Existem variadas funções objetivo dependendo do tipo de aplicação do problema. A modelagem matemática das principais delas encontra-se a seguir [9]:

Mínimo custo de geração de potência ativa

$$f = \sum_{i \in I_G} c_{p_i} P_{G_i} \quad (17)$$

Em que:

I_G : conjunto de geradores controláveis de potência ativa

c_{p_i} : custo de geração de potência ativa no gerador i

P_{G_i} : geração de potência ativa no gerador i

Mínimo desvio de geração de potência ativa

$$f = \frac{1}{2} \sum_{i \in I_G} \rho (P_{G_i} - P_{G_i}^0)^2 \quad (18)$$

Em que:

I_G : conjunto de geradores controláveis de potência ativa

ρ : peso associado ao desvio de potência ativa

P_{G_i} : geração de potência ativa no gerador i

$P_{G_i}^0$: geração inicial de potência ativa no gerador i

Mínima perda

$$f = \sum_{(i,j) \in \Omega} (P_{ij} + P_{ji}) \quad (19)$$

Em que:

P_{ij} : fluxo de potência ativa da barra i para a barra j

P_{ji} : fluxo de potência ativa da barra j para a barra i

Ω : conjunto de circuitos do sistema

Mínimo custo de corte de carga

$$f = \sum_{i \in I_C} c_{fc_i} (1 - FC_i) PL_i \quad (20)$$

Em que:

I_C : conjunto de barras candidatas a corte de carga

c_{fc_i} : custo de corte de 1 MW de carga na barra i

FC_i : fração de carga efetiva na barra i

PL_i : carga original na barra i

Mínimo desvio de intercâmbio

$$f = \frac{1}{2} \sum_{i \in I_i} \rho (IT_i - IT_i^0)^2 \quad (21)$$

Em que:

I_i : conjunto de áreas consideradas para minimizar o intercâmbio

ρ : peso associado ao intercâmbio entre áreas

IT_i : intercâmbio da área i

IT_i^0 : intercâmbio inicial da área i

Mínimo custo de injeção de potência ativa

$$f = \sum_{i \in I_P} c_{p_i} PA_i \quad (22)$$

Em que:

I_P : conjunto de barras candidatas a injeção de potência ativa

c_{p_i} : custo de injeção de potência ativa na barra i

PA_i : potência ativa injetada na barra i

Mínimo custo de injeção de potência reativa

$$f = \sum_{i \in I_Q} (c_{qc_i} QC_i + c_{ql_i} QL_i) \quad (23)$$

Em que:

I_Q : conjunto de barras candidatas a injeção de potência reativa

c_{qc_i} : custo de injeção de potência reativa capacitiva na barra i

c_{ql_i} : custo de injeção de potência reativa indutiva na barra i

QC_i : potência reativa capacitiva injetada na barra i

QL_i : potência reativa indutiva injetada na barra i

Máximo carregamento

$$f = \sum_{i \in \Omega} PL_i \quad (24)$$

Em que:

PL_i : carga na barra i

Ω : conjunto de barras que devem ter suas cargas maximizadas

Máxima transferência de potência ativa

$$f = \sum_{(i,j) \in \Omega} P_{ij} \quad (25)$$

Em que:

P_{ij} : fluxo de potência ativa no circuito i - j

Ω : conjunto de circuitos a ter seu somatório de fluxos maximizado

Vale ressaltar que é difícil obter uma função objetivo que seja capaz de melhorar todos os aspectos do sistema simultaneamente, visto que um objetivo minimizado ou maximizado tende a apresentar melhor desempenho sob algum critério e não sob outros. Dessa maneira, é possível combinar vários objetivos em um único problema multi-objetivo [10].

2.3 Solução do FPO

As equações que representam o fluxo de potência ótimo não podem ser resolvidas exatamente, isto é, suas soluções não podem ser descritas a partir da combinação finita de operações algébricas simples. Tal característica faz com que sejam chamadas de equações não lineares e, portanto, o FPO pode ser definido como um problema de Programação Não Linear [11].

Uma forma de solucionar esse tipo de problema é aproximá-lo para um problema de Programação Linear, onde as equações originais mostradas em (7) são resolvidas por meio de sucessivas linearizações que calculam a direção do ponto ótimo. Contudo, essa solução iterativa da maneira linear não garante a solução do problema não linear original, sendo necessário executar o fluxo de potência

convencional entre cada linearização. As principais vantagens de utilizar técnicas de Programação Linear são a eficiência na detecção de casos sem solução real, a rapidez na resolução do problema e a facilidade na aplicação de fluxo de potência ótimo com restrição de segurança [8].

Em determinados casos onde há dificuldades em realizar a sucessão de aproximações lineares, são utilizadas técnicas de Programação Não Linear para resolver diretamente o problema. Neste caso, é preciso que o problema seja modelado com maior precisão, culminando em maior esforço computacional para sua resolução.

2.3.1 Método de Pontos Interiores

O Método de Pontos Interiores é uma das técnicas disponíveis para resolver casos de otimização, sendo utilizado inicialmente em problemas de Programação Linear. Seu alto grau de desempenho em aplicações computacionais, fez com que fosse estendido posteriormente para problemas de Programação Não Linear, passando a ser chamado neste caso de Método de Pontos Interiores Direto. Este último apresenta características particulares na resolução do FPO, dentre as quais se destaca [12]:

- Número reduzido de iterações para encontrar o ponto ótimo;
- Alta eficiência para resolver sistemas com problemas de tensão;
- As equações de balanço só precisam ser atendidas na solução ótima, não dependendo da convergência do algoritmo do fluxo de potência convencional.

Para a solução do problema de FPO pelo Método de Pontos Interiores Direto, a equação (7) deve ser substituída por (26), onde as restrições de desigualdade passam a ser do tipo restrições canalizadas nas variáveis [7].

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(z) \\ & \text{s.a.} \\ & \quad g(z) = 0 \\ & \quad l \leq z \leq u \end{aligned} \tag{26}$$

Em que:

l : limite inferior das variáveis do sistema

u : limite superior das variáveis do sistema

São incluídas então as variáveis de folga s_l e s_u , a fim de que as restrições de desigualdade se tornem restrições de igualdade, conforme é mostrado no conjunto de equações definido por (27).

$$\begin{aligned} z - s_l &= l \\ z + s_u &= u \\ s_l &\geq 0 \\ s_u &\geq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

Em seguida, as variáveis de folga são incorporadas à função-objetivo através de uma função de penalização chamada de barreira logarítmica. Desta maneira, o problema original é transformado em um novo problema parametrizado pelo parâmetro barreira, indicado pela variável μ .

$$\begin{aligned} \text{Min } f(z) - \mu \sum_{j=1}^m \ln s_{lj} - \mu \sum_{j=1}^m \ln s_{uj} \\ \text{s.a.} \\ g(z) &= 0 \\ z - s_l &= l \\ z + s_u &= u \end{aligned} \quad (28)$$

A função Lagrangeana associado ao problema definido em (28) para cada valor de μ é:

$$\begin{aligned} L(z, \lambda, \pi_l, \pi_u, s_l, s_u) \\ = f(z) - \mu \sum_{j=1}^m \ln s_{lj} - \mu \sum_{j=1}^m \ln s_{uj} - \lambda^T g(z) \\ - \pi_l^T (z - s_l - l) - \pi_u^T (z + s_u - u) \end{aligned} \quad (29)$$

Em que:

λ : multiplicador de Lagrange associado à restrição $g(z) = 0$

π_l : multiplicador de Lagrange associado à restrição $z - s_l = l$

π_u : multiplicador de Lagrange associado à restrição $z + s_u = u$

No ponto ótimo, segundo as condições de otimalidade de primeira ordem de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [13], o gradiente da função objetivo está alinhado com as funções de restrição, logo são linearmente dependentes. Tem-se então $\nabla L = 0$, que é a expressão que rege o processo de otimização. Esta expressão resulta num sistema formado por um conjunto de equações que satisfazem a função Lagrangeana.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial z} &= \nabla f(z) - \lambda^T \nabla g(z) - \pi_l - \pi_u = 0 \\
\frac{\partial L}{\partial \lambda} &= g(z) = 0 \\
\frac{\partial L}{\partial \pi_l} &= z - s_l - l = 0 \\
\frac{\partial L}{\partial \pi_u} &= z + s_u - u = 0 \\
\frac{\partial L}{\partial s_l} &= -\mu(S_l)^{-1} e + \pi_l = 0 \\
\frac{\partial L}{\partial s_u} &= -\mu(S_u)^{-1} e - \pi_u = 0
\end{aligned} \tag{30}$$

Em que:

e : vetor de componentes unitários

S_l : matriz diagonal de componentes s_l

S_u : matriz diagonal de componentes s_u

O sistema de equações definido em (30) é resolvido por meio do método de Newton-Raphson, onde se obtém o seguinte sistema de segunda ordem:

$$\begin{aligned}
& [\nabla^2 f(z) - \lambda^T \nabla^2 g(z)] \Delta z - \nabla g(z) \Delta \lambda - \Delta \pi_l - \Delta \pi_u \\
& \quad = \nabla f(z) - \lambda^T \nabla g(z) - \pi_l - \pi_u \\
& \quad \nabla^T g(z) \Delta z = -g(z) \\
& \quad \Delta z - \Delta s_l = -(z - s_l - l) \\
& \quad \Delta z - \Delta s_u = -(z + s_u - u) \\
& \quad -\Pi_l \Delta s_l - S_l \Delta \pi_l = -(\mu e - S_l \pi_l) \\
& \quad \Pi_u \Delta s_u + S_u \Delta \pi_u = -(\mu e + S_u \pi_u)
\end{aligned} \tag{31}$$

Em que:

Π_l : matriz diagonal de componentes π_l

Π_u : matriz diagonal de componentes π_u

Combinando-se as equações dos sistemas mostrados em (30) e (31) e após algumas manipulações algébricas, é possível obter os acréscimos de cada variável definidos pelos valores Δz , $\Delta \lambda$, Δs_l , Δs_u , $\Delta \pi_l$ e $\Delta \pi_u$. Tais variáveis são definidas em primais (z , s_l e s_u) e duais (λ , π_l e π_u).

Em seguida, calculam-se os passos nos espaços primal e dual para que a sequência de pontos gerados respeite sempre as restrições, conforme definem as equações (32) e (33).

$$\alpha_p = \min \left[\min_{\Delta s_{lj} < -\delta} \frac{s_{lj}}{|\Delta s_{lj}|}, \min_{\Delta s_{uj} < -\delta} \frac{s_{uj}}{|\Delta s_{uj}|}, 1 \right] \tag{32}$$

$$\alpha_d = \min \left[\min_{\Delta \pi_{lj} < -\delta} \frac{\pi_{lj}}{|\Delta \pi_{lj}|}, \min_{\Delta \pi_{uj} > \delta} \frac{-\pi_{uj}}{|\Delta \pi_{uj}|}, 1 \right] \tag{33}$$

Em que:

α_p : passo primal

α_d : passo dual

δ : tolerância para o cálculo da razão

Com a obtenção de α_p e α_d , o próximo passo é calcular, da seguinte maneira, uma nova aproximação das variáveis primais e duais para a solução ótima:

$$\begin{aligned}
 z^{n+1} &= z^n + \sigma \alpha_p \Delta z \\
 s_l^{n+1} &= s_l^n + \sigma \alpha_p \Delta s_l \\
 s_u^{n+1} &= s_u^n + \sigma \alpha_p \Delta s_u \\
 \lambda^{n+1} &= \lambda^n + \sigma \alpha_d \Delta \lambda \\
 \pi_l^{n+1} &= \pi_l^n + \sigma \alpha_d \Delta \pi_l \\
 \pi_u^{n+1} &= \pi_u^n + \sigma \alpha_d \Delta \pi_u
 \end{aligned} \tag{34}$$

Em que:

σ : parâmetro considerado de forma a evitar singularidades na barreira logarítmica ($\sigma = 0,9995$)

A ideia do método é resolver o problema apresentado em (28) para cada valor do parâmetro barreira (μ) e fazê-lo tender para zero na busca da solução ótima. Para isso, a atualização de μ é feita a cada iteração utilizando (35) e (36).

$$\mu = \frac{gap}{\beta} \tag{35}$$

$$gap = \frac{s_l^t \pi_l - s_u^t \pi_u}{2n} \tag{36}$$

Em que:

β : valor divisor do gap para reduzir a influência das funções barreira

n : número de variáveis do problema

2.3.2 Algoritmo da Solução

A fim de organizar e resumir as ideias expostas anteriormente, é descrito a seguir um algoritmo da solução do problema de FPO pelo Método de Pontos Interiores Direto e, em seguida, é apresentado na Figura 1 o fluxograma correspondente.

I. Primeiro Passo

Inicializar as variáveis primais (z , s_l e s_u) e duais (λ , π_l e π_u).

II. Segundo Passo

Resolver o sistema de equações mostrado em (30) utilizando o método de Newton-Raphson para determinar os valores de Δz , $\Delta \lambda$, Δs_l , Δs_u , $\Delta \pi_l$ e $\Delta \pi_u$.

III. Terceiro Passo

Determinar os passos primal (α_p) e dual (α_d) utilizando (32) e (33).

IV. Quarto Passo

Atualizar as variáveis primais e duais seguindo (34).

V. Quinto Passo

Atualizar o parâmetro barreira utilizando (35) e (36).

VI. Sexto Passo

Verificar se as condições de otimalidade são atendidas e o valor do parâmetro barreira está dentro da tolerância imposta pelo programa computacional que tentará resolver o problema. Se sim, o problema está solucionado. Caso contrário, deve-se voltar ao segundo passo e continuar o método iterativo. Vale ressaltar que este processo pode ser interrompido caso o número de iterações exceda a quantidade máxima imposta previamente, significando que não é possível a resolução do problema de FPO.

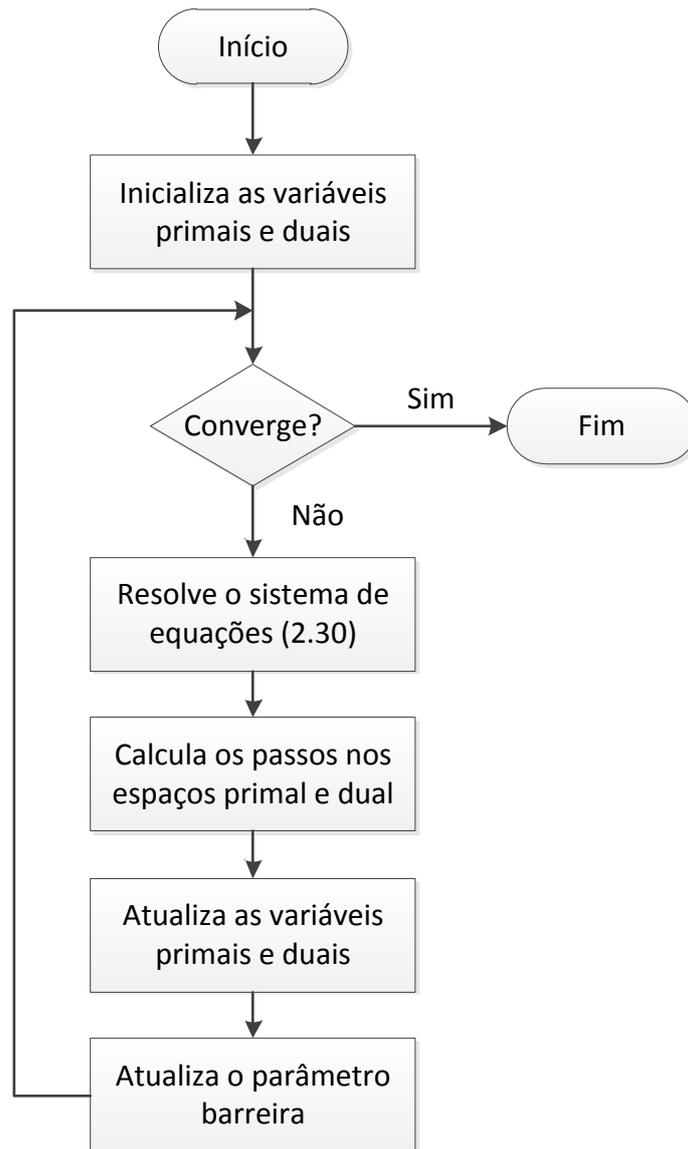


Figura 1: Algoritmo do Método de Pontos Interiores Direto – Adaptado de [8]

2.4 Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança

O fluxo de potência ótimo com restrições de segurança (FPORS) tem como finalidade determinar uma solução que otimize uma função objetivo, de tal forma que na ocorrência de qualquer contingência no sistema, pertencente a uma lista preestabelecida, o estado pós-contingência permanecerá sem violações [14].

A lista de contingências inclui o desligamento de linhas, transformadores, geradores, entre outros equipamentos do sistema, podendo ser considerada a perda de um único equipamento por vez ou, em determinados casos, contingências múltiplas. Para a elaboração de tal lista são levadas em consideração as

probabilidades de ocorrência de falhas, bem como a experiência do planejador ou operador.

2.4.1 Modelagem do Problema de FPORS

Para a simplificação do método, a formulação matemática mostrada em (7) é reescrita da seguinte maneira [15]:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(z_o) \\ & \text{s.a.} \\ & \qquad a_o(z_o) \leq b_o \end{aligned} \tag{37}$$

Em que:

$f(z_o)$: função objetivo

$a_o(z_o)$: equações de balanço da rede e restrições operativas dos equipamentos

b_o : limites físicos e operativos provenientes das restrições de desigualdade

z_o : vetor de variáveis do sistema

Com o fornecimento de uma lista de N contingências suscetíveis a ocorrer, o FPORS é definido como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(z_o) \\ & \text{s.a.} \\ & \qquad a_o(z_o) \leq b_o \\ & \qquad a_i(z_i) \leq b_i, i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \tag{38}$$

Nesta formulação, cada caso de contingência passa a ser um novo problema, onde devem ser atendidas todas as restrições físicas e operativas. Assim sendo, o problema original do FPORS pode ser decomposto em dois níveis, como apresentado a seguir [9]:

- Subproblema de operação do caso base: onde é otimizada a função objetivo e atendida as restrições operativas do caso base;

- Subproblema de operação para contingências: onde se busca viabilizar a operação nas contingências a partir do ponto de operação fornecido pelo caso base otimizado.

A resolução do FPORS pode ser mais facilmente entendida através do esquema de solução apresentado na Figura 2.

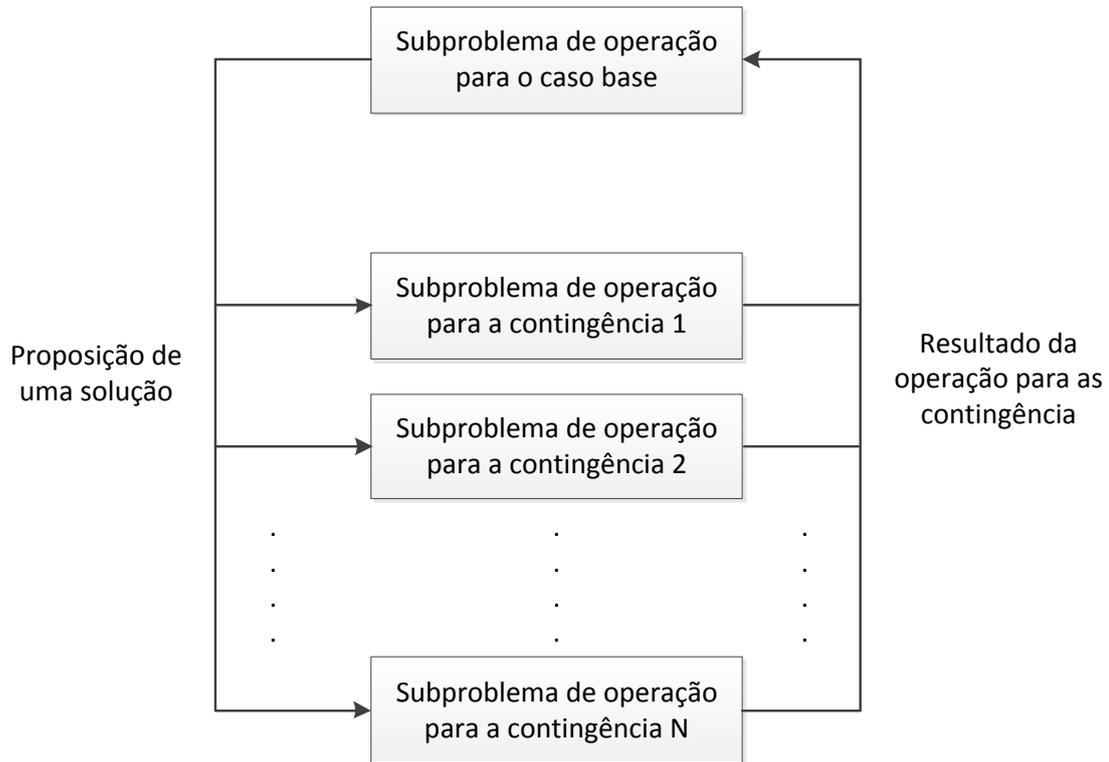


Figura 2: Esquema explicativo da resolução do FPORS – Adaptado de [9]

É possível observar que o subproblema de operação de caso base envia uma proposta de ponto de operação ao grupo de contingências e recebe delas informações indicando o grau de inviabilidade da operação de cada contingência. O processo iterativo é encerrado quando o ponto de operação do subproblema do caso base permite a operação viável de todos os subproblemas de contingências.

Nesse contexto, a metodologia aplicada para solucionar o problema de fluxo de potência ótimo com restrições de segurança é baseada na decomposição de Benders [16], que possibilita a obtenção de um ponto de operação que otimize a função objetivo e viabilize simultaneamente todos os subproblemas de operação.

2.4.2 Método de Decomposição de Benders

A técnica da decomposição de Benders requer que sejam adicionadas variáveis de penalidade a cada subproblema de contingência, a fim de que seja garantida a viabilidade matemática do mesmo. Tais variáveis podem ser interpretadas como a quantidade de violação associada ao ponto de operação pós-contingência e servem de insumo para resolver o subproblema do caso base no processo iterativo. Quando as variáveis de penalidades são iguais a zero, sabe-se que o subproblema de contingência é viável.

Assim sendo, para cada subproblema de contingência determina-se uma nova função objetivo de forma a minimizar as violações de restrição por meio do fluxo de potência ótimo convencional, conforme é mostrado a seguir [15]:

$$\begin{aligned} & \text{Min } w(z_o) \\ & \text{s.a.} \end{aligned} \tag{39}$$

$$a_o(z_o) \leq b_o$$

Sendo que:

$$w = d^r r, r \geq 0 \tag{40}$$

Em que:

$w(z_o)$: nova função objetivo para minimizar as violações

r : vetor de variáveis de penalidade

d^r : vetor de custo

É possível notar que o subproblema de contingência será viável se w for igual a zero e inviável se w for maior do que zero. Logo, para uma lista de N contingências, pode-se reescrever a formulação matemática do FPORS da seguinte maneira [15]:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(z_o) \\ & \text{s.a.} \end{aligned} \tag{41}$$

$$a_o(z_o) \leq b_o$$

$$w_i(z_o) \leq 0, i = 1, 2, \dots, N$$

Nesta formulação, $w_i(z_o) \leq 0$ corresponde a solução do problema (39) para o ponto de operação z_o dado e significa a viabilização de todos os subproblemas de contingências. A solução desses subproblemas está associada a um conjunto de multiplicadores de Lagrange que mostram a sensibilidade da inviabilidade causada por mudanças incrementais no ponto de operação do caso base.

Estes multiplicadores formam restrições lineares conhecidas como cortes de Benders, escritas em termos das variáveis do caso base. Os cortes de Benders relativos à operação das contingências entram de forma iterativa como restrições adicionais no subproblema do caso base, visando à obtenção de uma solução global que atenda as premissas estabelecidas.

3 Utilização do FPO para Cálculo de Limites de Intercâmbio

Este capítulo tem como objetivo mostrar a aplicação do fluxo de potência ótimo para o cálculo da máxima transferência de potência entre duas áreas de um sistema elétrico. Para tal, foi utilizado o programa FLUPOT, desenvolvido pelo CEPEL. O FLUPOT é uma ferramenta para o cálculo de FPO e possui uma grande flexibilidade no que se refere à escolha da função objetivo, aos controles ativados no problema e às restrições impostas ao mesmo.

Primeiramente, será realizada a simulação em um sistema de pequeno porte (33 barras), a fim de visualizar melhor a aplicação da função objetivo e validar as opções existentes no programa. Em seguida, será feita uma simulação em um caso real do Sistema Interligado Nacional (SIN) para o cálculo do intercâmbio RSUL, que é composto pelo somatório dos fluxos de potência ativa que migram para a região Sul do Brasil.

3.1 Teste em um Sistema de Pequeno Porte

3.1.1 Descrição do Sistema

O teste inicial para o cálculo do limite de intercâmbio entre duas áreas será realizado em um sistema equivalente da região Sul do sistema brasileiro, onde se deseja maximizar o intercâmbio da área 2 para a área 1, conforme mostra a Figura 3.

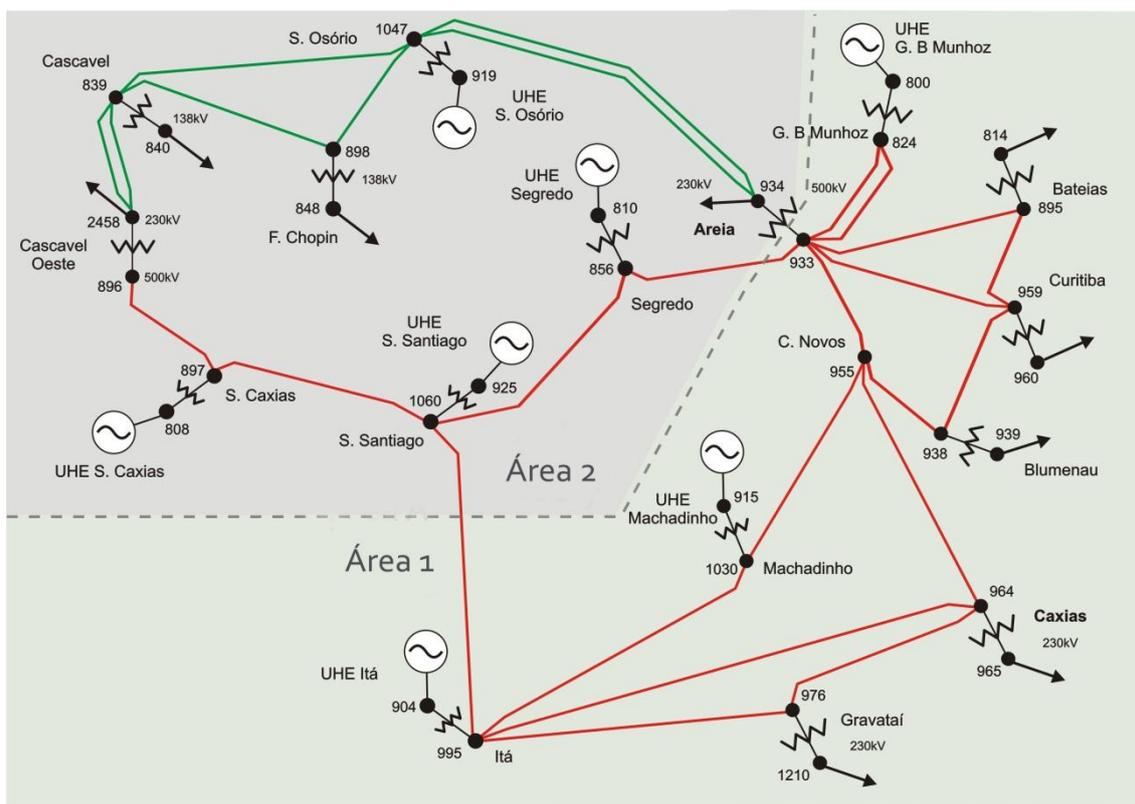


Figura 3: Sistema equivalente da região Sul – Adaptado de [17]

O sistema é composto na sua totalidade por 33 barras, sendo que sete delas correspondem às barras de geração e nove possuem carga conectada. Apresenta também 26 linhas de transmissão e 24 transformadores. A capacidade instalada de geração é 8912 MW, enquanto que a carga ativa total do sistema é 5605,7 MW.

Das sete usinas que estão presentes no sistema, três pertencem à área 1 e as outras quatro à área 2. A potência nominal de cada uma delas baseada nos dados do ONS e o despacho no caso base são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Levantamento de geração

Número	Tipo de Barra	Nome da Usina	Potência Nominal (MW)	Despacho no caso base		Área
				MW	%	
800	V θ	Gov. Bento Munhoz	1674,0	1002,3	60	1
808	PV	Gov. José Richa	1240,0	800,0	65	2
810	PV	Gov. Ney Braga	1260,0	800,0	63	2
904	PV	Itá	1450,0	950,0	66	1
915	PV	Machadinho	1140,0	750,0	66	1
919	PV	Salto Osório	728,0	480,0	66	2
925	PV	Salto Santiago	1420,0	950,0	67	2

Já a carga do sistema, que está dividida entre nove barramentos, é detalhada na Tabela 2.

Tabela 2: Carga do caso base

Caso Base			
Barra	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Área
1210	1228	425	1
939	1149	53,06	1
960	844,7	469,1	1
965	755,6	56,24	1
814	735,4	191	1
2458	403	126	2
934	237	59	2
840	159	36	2
848	94	18	2

A interligação entre as áreas é formada pelas linhas de transmissão de 525 kV Segredo – Areia e Salto Santiago – Itá e pelo transformador 500/230 kV de Areia.

3.1.2 Utilização do FLUPOT para o Cálculo de Intercâmbio

O FLUPOT é um programa de fluxo de potência ótimo cuja finalidade é calcular um estado de uma rede CA em regime permanente que otimiza uma função objetivo e satisfaz uma série de restrições físicas e operacionais. A execução do programa ocorre por meio de códigos que determinam a função objetivo a ser utilizada (DOBJ), os controles que podem ser alterados na busca do ponto ótimo (DCON) e as restrições impostas ao problema (DRES). Tais códigos devem ser inseridos nesta ordem e o conjunto deles forma um arquivo texto chamado de arquivo de otimização. Vale ressaltar que o uso de alguns comandos requer que sejam utilizados dados complementares a serem inseridos no arquivo de otimização nas linhas abaixo do DRES. Neste item, serão destacados alguns códigos utilizados nas simulações, mas maiores detalhes podem ser obtidos em [9].

O objetivo de máxima transferência de potência ativa entre duas áreas ou em um conjunto de circuitos é dado pela função MXTR, que deve estar associada ao código DOBJ. Essa função requer que sejam inseridos dados complementares para

indicar a interligação na qual será maximizado o intercâmbio. Como neste sistema de pequeno porte a maximização se dá entre áreas vizinhas, deve ser utilizado o código DTRF para a identificação das áreas exportadora e importadora de energia.

Para que o fluxo de potência ativa seja gradativamente aumentado nos circuitos que compõem a interligação, o usuário deve especificar a relação de controles que podem ser alterados durante o processo de otimização. Os controles disponíveis atualmente no FLUPOT para uma rede CA e suas respectivas descrições são mostrados na Tabela 3. Tais controles devem estar associados ao código de execução DCON.

Tabela 3: Controles disponíveis no FLUPOT

Código	Descrição	Dados Complementares
CAPS	Reatância de capacitor série	DCPS
CCER	Compensador estático de reativo	Não possui
VREF	Tensão do compensador estativo. Controle associado ao código CCER.	Não possui
PGEN	Geração de potência ativa	DGEP
QGEN	Geração de potência reativa	Não obrigatório
PHSS	Ângulo de defasamento	DPHS
SHNC	Susceptância <i>shunt</i> de banco de reatores ou capacitores manobráveis	DSCH ou DBSH
VGEN	Tensão em barra PV	Não obrigatório
TAPC	Tapes dos LTC's	Não obrigatório
LTCP	Acoplamento de LTC's em paralelo. Controle associado ao código TAPC.	Não possui

O sistema em questão não apresenta compensadores estáticos, nem reatores e capacitores manobráveis. Devido à ausência de grande quantidade de recursos de controle no caso, foi utilizada nas simulações somente a geração de potência ativa e reativa, bem como a tensão de excitação das máquinas. Embora a geração de potência reativa seja uma consequência da variação de tensão nas barras PV, o comando QGEN está presente na relação de controles para que sejam respeitados os limites mínimo e máximo de cada unidade geradora.

O controle PGEN requer que seja utilizado código DGEP para a entrada dos dados de limites de geração de potência ativa. Para a identificação de tais limites nas barras de geração do sistema-teste, foi utilizada a base de dados do ONS. A

ativação do controle de potência ativa para casos de maximização de intercâmbio é fundamental, pois caso contrário, a geração nas barras PV será mantida nos valores iniciais e não ocorrerá uma otimização efetiva da função objetivo.

As restrições funcionais impostas ao problema entram no arquivo de otimização por meio do código DRES. As restrições existentes no FLUPOT associadas a esse código são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Restrições funcionais do FLUPOT

Código	Descrição	Dados Complementares
FMVA	Limite de carregamento dos circuitos em MVA	Não obrigatório
FLMW	Limite de carregamento dos circuitos em MW	Não obrigatório
FAMP	Limite de corrente dos circuitos em kA	Não obrigatório
FPOT	Limitação de fator de potência	DCFP ou DLFP
RESP	Restrições especiais	DREF ou DRFA

As restrições especiais (RESP) se referem à restrição de fluxo entre circuitos ou entre áreas, que podem ser utilizados em casos em que há necessidade de limitar o valor de um intercâmbio. Na simulação do caso-teste foi considerando somente o limite de carregamento dos circuitos em função da potência aparente.

É importante ressaltar que os limites de tensão nas barras a serem respeitadas na otimização são provenientes dos dados do grupo limite de tensão especificados no código DGLT do programa ANAREDE, desenvolvido pelo CEPEL [18]. Esta informação é integrada ao FLUPOT quando é feita a leitura do caso histórico que se deseja otimizar. Entretanto, caso seja necessário delimitar faixas diferentes de tensão nos barramentos para relaxar ou restringir determinadas variáveis, pode-se utilizar a opção DVLB no arquivo de otimização.

O próximo passo para a execução do FLUPOT é determinar a região do sistema em que os controles podem ser ativados e a região onde as grandezas serão monitoradas. Neste contexto, foram definidos os conceitos a seguir [8]:

- Região de controle: Corresponde ao conjunto de áreas onde os controles escolhidos para atuar são otimizados, respeitando os limites dos equipamentos, tais como faixa de tensão e geração reativa nas barras PV. É executada com o código DRCC.

- Região de monitoração: Corresponde ao conjunto de áreas onde grandezas como tensão nas barras, carregamento nos circuitos e demais restrições são monitoradas. Essa região está sempre contida na região de controle. É executada com o código DRMI.
- Região de interesse: É assim definida quando as regiões de monitoração e controle são coincidentes. Dessa maneira, não é necessária a especificação das regiões de monitoração e controle. É executada com o código DARI.

Esta funcionalidade do programa é extremamente útil em sistemas de grande porte quando o usuário deseja estudar e analisar áreas específicas. No caso-teste, por ser um sistema de apenas duas áreas, ambas foram inseridas na região de interesse.

Por último, é possível especificar no arquivo de otimização os relatórios do sistema a serem gerados nos arquivos de saída. Um relatório de grande importância é o relatório de variação de controles definido pelo código RVAR, onde se pode observar os controles que foram alterados durante o processo de otimização, informando seus valores iniciais (caso base) e finais (caso otimizado), a fim de ajudar no entendimento do caminho percorrido pelo programa para alcançar a convergência do problema. No sistema em questão, esta descrição foi requisitada juntamente com os relatórios de circuitos, de geradores e dos multiplicadores de Lagrange associados a cada restrição de balanço de potência ativa e reativa e restrições funcionais.

Visto isso, a Figura 4 mostra o conteúdo do arquivo com os dados de entrada da simulação no FLUPOT.

```

. DADOS DE CONSTANTES E/OU TOLERÂNCIAS
DCTE
PTOL 1.0
QTOL 1.0
MXIT 300
99999
.
. DADOS DA FUNÇÃO OBJETIVO
DOBJ MXTR
.
. DADOS DOS CONTROLES
DCON QGEN VGEN PGEN
.
. INCLUSÃO DAS RESTRIÇÕES DE FLUXO EM MVA
DRES FMVA
.
RELA CONV
COMP
.
. DADOS NECESSÁRIOS PARA O PGEN
DGEP IMPR
(Num)      (Pmn)  (Pmx)          (Cst)          (n)    (fp)
800         0.  1674.         1.0
808         0.  1240.         1.0
810         0.  1260.         1.0
904         0.  1450.         1.0
915         0.  1140.         1.0
919         0.   728.         1.0
925         0.  1420.         1.0
99999
.
DTRF IMPR
(Ar (Ar Tot (Lmin.) (Lmax.)
2   1
99999
.
DARI
(Ar
1
2
99999
.
RELA RLIN RVAR RGER RLMB
.
FIM

```

Figura 4: Arquivo de otimização do sistema de 33 barras

3.1.3 Resultados Obtidos

O diagrama unifilar do sistema de 33 barras com os fluxos nos circuitos e as tensões nos barramentos relativos ao ponto de operação do caso base é apresentado na Figura 5. Conforme mencionado na Seção 3.1.1, o objetivo do teste é maximizar a transferência de potência da área 2 para a área 1, cujo valor encontra-se em 2113 MW no caso base.

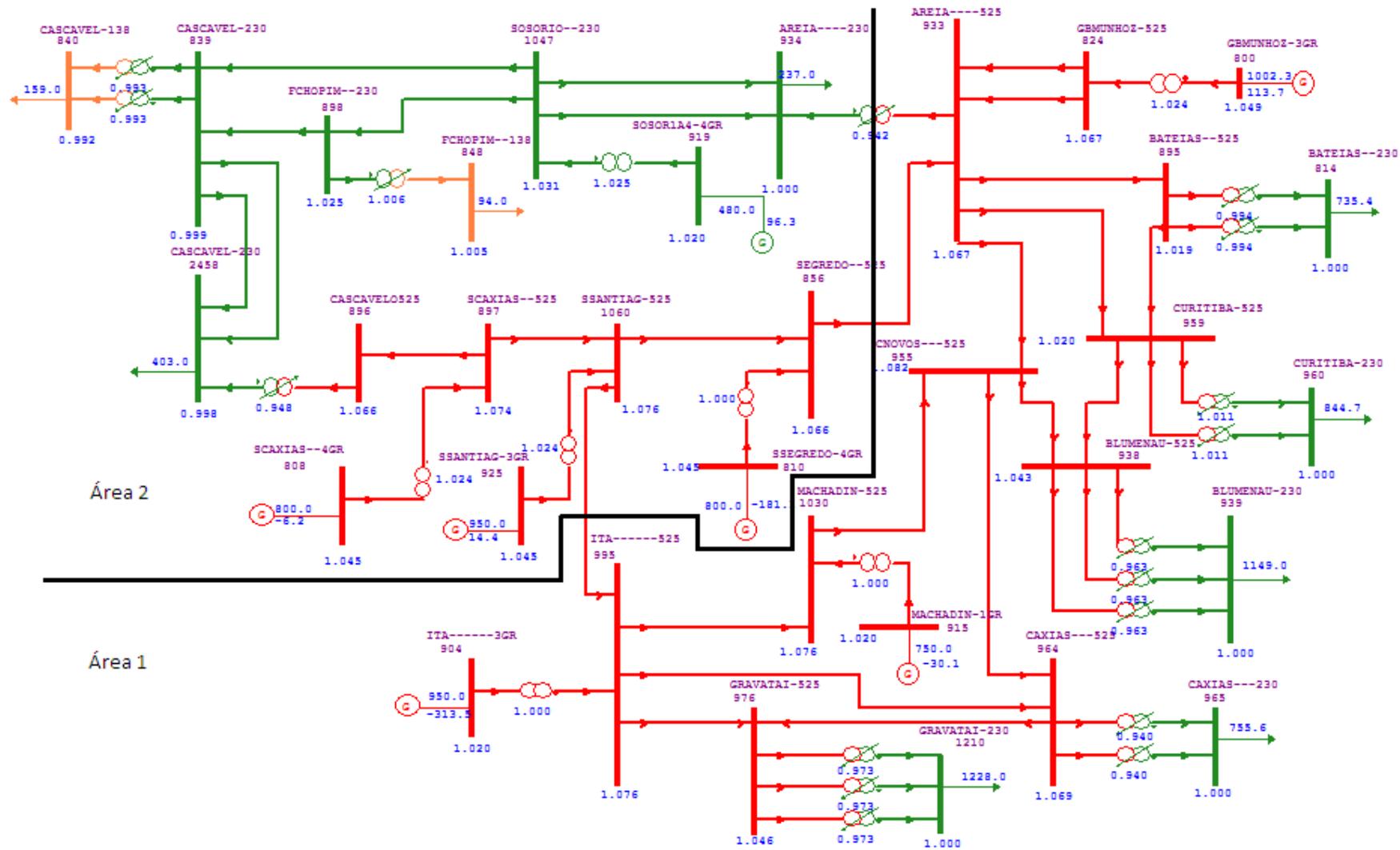


Figura 5: Diagrama unifilar do sistema-teste no ponto de operação relativo ao caso base

O cálculo do intercâmbio entre áreas realizado pelo FLUPOT é feito somando-se os fluxos de potência ativa dos circuitos/transformadores que compõem a interligação. Os valores de potência considerados nessa soma são aqueles medidos na barra não proprietária definida nos dados de rede. Assim sendo, o intercâmbio no caso-teste corresponde a adição dos seguintes fluxos:

- Fluxo medido na SE Areia 230 kV do TR 525/230 kV Areia
- Fluxo medido na SE Areia da LT 525 kV Segredo – Areia
- Fluxo medido na SE Salto Santiago da LT 525 kV Salto Santiago – Itá

Após carregar o arquivo de otimização mostrado na Figura 4, o programa atinge o valor ótimo de 3699 MW para o intercâmbio que flui área 2 em direção à área 1. A Tabela 5 faz uma comparação do quantitativo de potência ativa que circula em cada elemento que constitui a interligação antes e depois da otimização.

Tabela 5: Comparação do intercâmbio entre o caso base e o caso otimizado

Intercâmbio	Fluxo de Potência (MW)	
	Caso Base	Caso Otimizado
LT 525 kV Segredo - Areia	1434,2	1937,1
LT 525 kV Salto Santiago - Itá	707,8	1643,3
TR 500/230 kV Areia	-28,9	118,7
Total	2113,1	3699,1

Pode-se perceber que no ponto de operação do caso base, a potência no transformador de Areia fluía da região importadora para a região exportadora e, após a solução do fluxo de potência ótimo, este fluxo foi invertido para atingir o objetivo. Já a Tabela 6 compara a geração em cada um desses casos.

Tabela 6: Comparação de geração entre o caso base e o caso otimizado

Região	Barra	Geração de Potência Ativa (MW)	
		Caso Base	Caso Otimizado
Região Exportadora (Área 2)	808	800	1240
	810	800	1260
	919	480	728
	925	950	1420
Região Importadora (Área 1)	800	1002	1157
	904	950	5
	915	750	7

Neste ponto em que o intercâmbio alcançou 3699 MW, os despachos de geração nas usinas hidrelétricas de Itá (barra 904) e Machadinho (barra 915) foram quase nulos. Entretanto, em um sistema real, tal situação dificilmente ocorre em uma área de controle, visto que, por questões de desempenho dinâmico, é necessário manter um nível mínimo de geração como margem de regulação [1].

Durante o processo de otimização, o FLUPOT não permite que ocorram violações das restrições impostas no problema, mas indica quando alguma das variáveis como, por exemplo, a capacidade de carregamento das linhas, tensão nos barramentos ou geração de potência ativa e reativa atinge seus limites. No teste em questão, o relatório de grandezas no limite mostrado na Figura 6 indica o esgotamento da geração de potência ativa em todos os geradores da área 2.

RELATORIO DE GRANDEZAS NO LIMITE (Ordenado do mais critico até o menos critico)								
X-----	BARRA	-----X-----	GRANDEZA	-----X-----	VALOR LIMITE	-----X--	VALOR MULTIPLICADOR	--X
	810 SSEGREDO-4GR		Potencia ativa gerada		1260.00 SUP		0.982	
	925 SSANTIAG-3GR		Potencia ativa gerada		1420.00 SUP		0.972	
	808 SCAXIAS--4GR		Potencia ativa gerada		1240.00 SUP		0.960	
	919 SOSOR1A4-4GR		Potencia ativa gerada		728.00 SUP		0.902	

Figura 6: Relatório de grandezas no limite do caso otimizado

A fim de que intercâmbio máximo seja limitado por outra restrição que não seja a capacidade nominal de geração das usinas da área exportadora, foi simulado um caso considerando um aumento de 5% da carga desse sistema-teste. O diagrama unifilar do sistema nesse novo ponto de operação é mostrado na Figura 7.

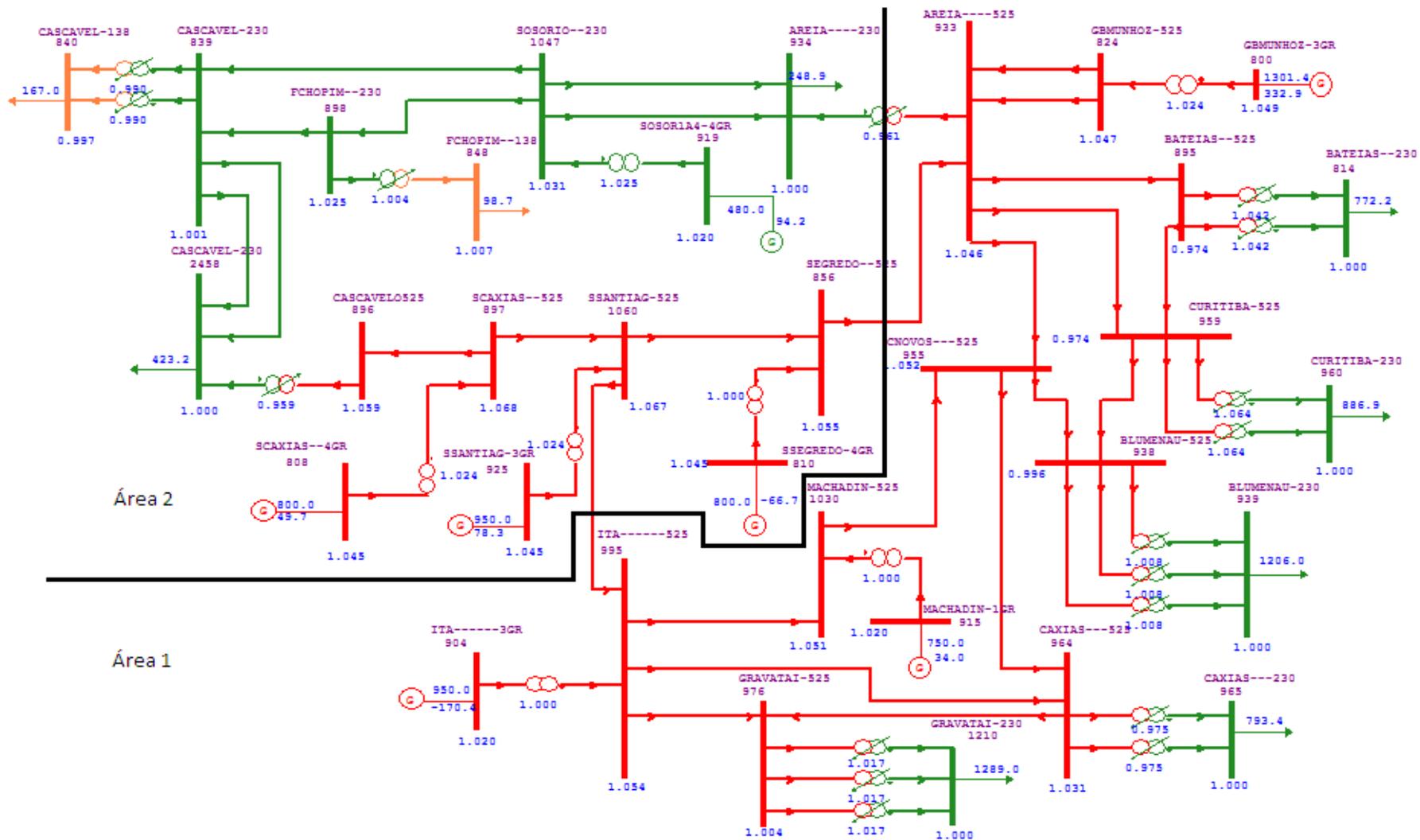


Figura 7: Diagrama unifilar do caso com aumento de 5% da carga

O aumento do carregamento do sistema faz com que as tensões nos barramentos caiam de um modo geral. Esta alteração também provoca um impacto no intercâmbio da área 2 para a área 1, que passou a ser de 2070 MW. Paralelamente a essa mudança, foi inserido no código DGEP um valor mínimo de despacho de potência em cada usina, de forma que a geração na área importadora não se aproxime de zero afastando-se da realidade. Os limites inferiores foram retirados do arquivo BNT1.DAT disponibilizado pelo ONS, que contém os dados das principais unidades geradoras que operam no sistema brasileiro. Por conseguinte, o arquivo de otimização carregado no caso com o aumento de carga é o mesmo do primeiro caso, excetuando-se os dados de controle de geração ativa, que se encontram na Figura 8.

. DADOS NECESSÁRIOS PARA O PGEN					
DGEP IMPR					
(Num)	(Pmn)	(Pmx)	(Cst)	(n)	(fp)
800	240.	1674.	1.0		
808	235.	1240.	1.0		
810	180.	1260.	1.0		
904	200.	1450.	1.0		
915	260.	1140.	1.0		
919	130.	728.	1.0		
925	220.	1420.	1.0		
99999					

Figura 8: Código DGEP do arquivo de otimização do caso com aumento de 5% da carga

Após calcular o fluxo de potência ótimo, o programa fornece uma máxima transferência de potência de 3609 MW. Diferentemente do caso inicial, apenas duas usinas da área exportadora atingiram suas capacidades máximas de geração ativa. Além disso, outras grandezas tais como tensões em barras PV e carregamento de transformadores também atingiram seus limites, conforme apresentado no relatório a seguir.

RELATORIO DE GRANDEZAS NO LIMITE (Ordenado do mais critico até o menos critico)							
X-----	BARRA	-----X-----	GRANDEZA	-----X-----	VALOR LIMITE	-----X--	VALOR MULTIPLICADOR --X
	800 GBMUNHOZ-3GR		Tensao em barra PV		1.0500 SUP		6.35
1	925 -> 1060		Fluxo em circuitos (MVA)		1402.00 SUP		4.81
	808 SCAXIAS--4GR		Tensao em barra PV		1.0500 SUP		4.53
	904 ITA-----3GR		Tensao em barra PV		1.0500 SUP		4.47
	915 MACHADIN-1GR		Tensao em barra PV		1.0500 SUP		1.76
	808 SCAXIAS--4GR		Potencia ativa gerada		1240.00 SUP		0.919
	919 SOSOR1A4-4GR		Potencia ativa gerada		728.00 SUP		0.876
1	810 -> 856		Fluxo em circuitos (MVA)		1260.00 SUP		0.427E-01

Figura 9: Relatório de grandezas no limite do caso com 5% de aumento de carga otimizado

Pode-se reparar que o relatório de grandezas no limite está disposto em ordem decrescente dos valores dos multiplicadores de Lagrange associados a cada restrição imposta ao problema, o que facilita a identificação das grandezas que são mais sensíveis ao resultado obtido pelo programa. Caso as restrições mais severas estejam ocorrendo fora da área de interesse do usuário, pode-se considerar a relaxação das mesmas para alcançar um melhor resultado [9].

A simulação mostra que a restrição mais rigorosa reside em respeitar o limite superior da tensão no barramento da usina de Governador Bento Munhoz, que está diretamente atrelada a sua geração de potência reativa. No ponto de operação otimizado, a geração de potência reativa nessa barra é de 341 Mvar, enquanto o máximo possível é 800 Mvar. Caso esse limite e tensão fosse relaxado de forma a drenar mais potência reativa para a rede, percebe-se uma elevação pouco significativa, de apenas 1 MW, do intercâmbio entre as áreas. Conclui-se, portanto, que as restrições impostas ao problema, inclusive aquela que possui maior multiplicador de Lagrange, apresentam pouca sensibilidade ao valor calculado da função objetivo.

3.2 Teste no Sistema Interligado Nacional

3.2.1 Interligações do SIN

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. É um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e múltiplos proprietários [19].

Uma das principais características do SIN é a sua dimensão continental, o que lhe confere uma maior complexidade operacional quando comparado aos sistemas de outros países. Nesse contexto, o sistema brasileiro é atualmente dividido em quatro grandes subsistemas:

- Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO): Abrange as regiões Sudeste e Centro-Oeste do país, com exceção do estado do Mato Grosso do Sul;
- Sul (S): Abrange a região Sul do país, além do estado do Mato Grosso do Sul;
- Nordeste (NE): Engloba a região Nordeste do país, com a exceção do estado do Maranhão;
- Norte (N): Engloba parte dos estados do Pará, Tocantins, Maranhão, Rondônia e Acre.

A experiência brasileira tem demonstrado que a operação de forma coordenada do SIN, aproveitando-se das diversidades observadas entre os subsistemas, no que se refere à hidrologia e ao comportamento da carga, proporciona maior disponibilidade de energia do que a operação de cada subsistema isoladamente. Para tal, existem instalações de transmissão pelas quais é realizada a troca de energia entre bacias hidrográficas localizadas nas diferentes regiões do extenso território brasileiro. Essas instalações são denominadas interligações inter-regionais. A Figura 10 mostra um esquema de como os subsistemas do SIN são interligados.

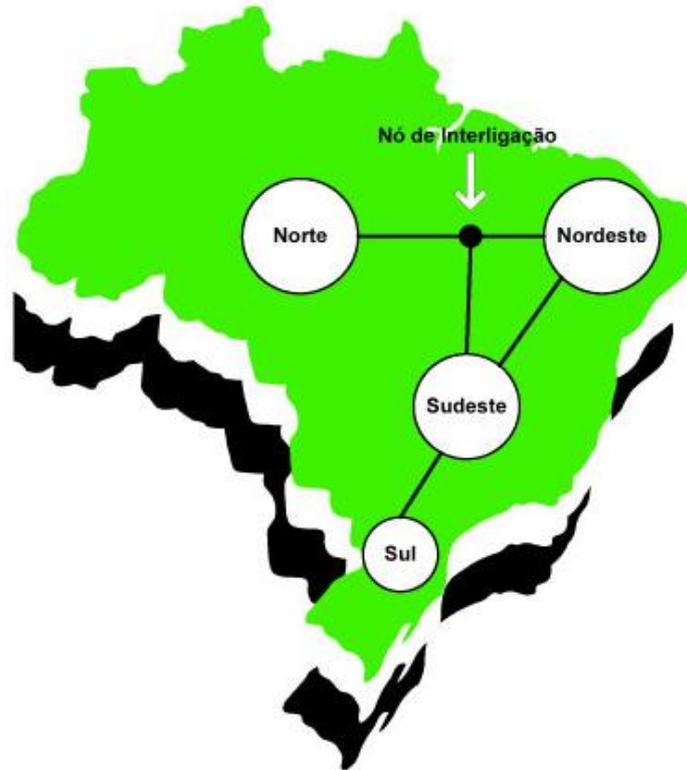


Figura 10: Interligações entre os subsistemas do SIN [20]

A interligação entre os subsistemas é feita de forma a aproveitar melhor a sazonalidade dos rios e permitir a troca dos excedentes de energia elétrica durante o período das cheias em cada região. Esses subsistemas apresentam comportamentos diferentes quanto ao sentido do fluxo de potência que flui para os demais, conforme a caracterização a seguir [21]:

- Subsistema Sudeste/Centro-Oeste: É um grande mercado de demanda do país e, por conta disso, é importador de outras regiões durante a maior parte do ano. Possui grande capacidade de armazenamento em múltiplos reservatórios. As maiores afluências ocorrem no período compreendido entre dezembro e abril;
- Subsistema Sul: Os sentidos dos intercâmbios com o subsistema SE/CO são altamente dependentes da sua hidrologia, que é mais favorável no segundo semestre do ano. Possui grande variabilidade de armazenamento;
- Subsistema Nordeste: É importador ou exportador dependendo das condições hidrológicas da região. Devido ao recente crescimento da oferta de energia eólica, a tendência é que passe a exportar grande quantidade de energia ao longo dos próximos anos.

- Subsistema Norte: Tem praticamente o mesmo comportamento de afluência do subsistema NE, mas é um notável exportador de energia, principalmente no primeiro semestre. Fornece energia para o período de ponta por pelo menos nove meses no ano.

De acordo com as condições hidrológicas de cada subsistema e visando explorar as interligações, são estudados diferentes casos de intercâmbio no âmbito do planejamento, destacando-se [22]:

1. Interligação entre os subsistemas Sul e SE/CO
 - i. Cenário Sul Exportador (Recebimento de Energia pelo Sudeste – RSE)
 - ii. Cenário Sudeste Exportador (Recebimento de Energia pelo Sul – RSUL)
2. Interligação entre os subsistemas Norte, Nordeste e SE/CO
 - i. Cenário Norte Exportador
 - ii. Cenário Nordeste Exportador
 - iii. Cenário Sudeste Exportador
 - iv. Cenário Norte Importador

Deve-se ressaltar que além dos cenários supracitados, podem ser estudados outros casos de intercâmbio que sejam relevantes para a análise de uma determinada área do sistema.

3.2.2 Descrição do Cenário RSUL

Neste trabalho, o teste de fluxo de potência ótimo será aplicado a um caso de cenário RSUL, no qual o Sul recebe energia do Sudeste. Esse intercâmbio é atualmente formado pelos fluxos que escoam por um circuito duplo de 500 kV e outro de 88 kV, dois circuitos de 525 kV, cinco circuitos de 230 kV, um circuito de 138 kV e três transformadores de 765/525 kV. Além disso, está prevista a entrada em operação de mais uma linha de 500 kV em 2017. A Tabela 7 define estas instalações.

Tabela 7: Fluxos que compõem o intercâmbio RSUL

Recebimento do Sul (RSUL)	
LT 525 kV	Londrina - Assis
	Foz do Iguaçu - Cascavel Oeste
LT 500 kV	Bateias - Ibiúna C1 e C2
	Bateias - Itatiba (em 2017)
LT 230 kV	Guaíra - Dourados
	Londrina - Assis
	Londrina (Copel) - Assis
	Jaguariaíva - Itararé 2
	Figueira - Chavantes
LT 138 kV	Loanda - Rosana
LT 88 kV	Andira - Salto Grande C1 e C2
TR 765/525 kV	Ivaiporã T1, T2 e T3

A maioria dos circuitos que compõem o intercâmbio parte do estado de São Paulo e vai até o Paraná. As exceções ficam por conta da LT 230 kV Dourados – Guaíra que interliga o Mato Grosso do Sul ao Paraná e da LT 525 kV Foz do Iguaçu – Cascavel Oeste que fica no Paraná. Essa última é contabilizada no cálculo do RSUL porque recebe diretamente o fluxo proveniente da usina hidrelétrica de Itaipu, considerada a parte, por injetar um grande bloco de energia no sistema. Os fluxos de potência ativa nos transformadores de Ivaiporã são incluídos, pois essa subestação também deriva de Itaipu. A Figura 11 mostra o mapa geoeletrico com todas as linhas que estabelecem o RSUL.

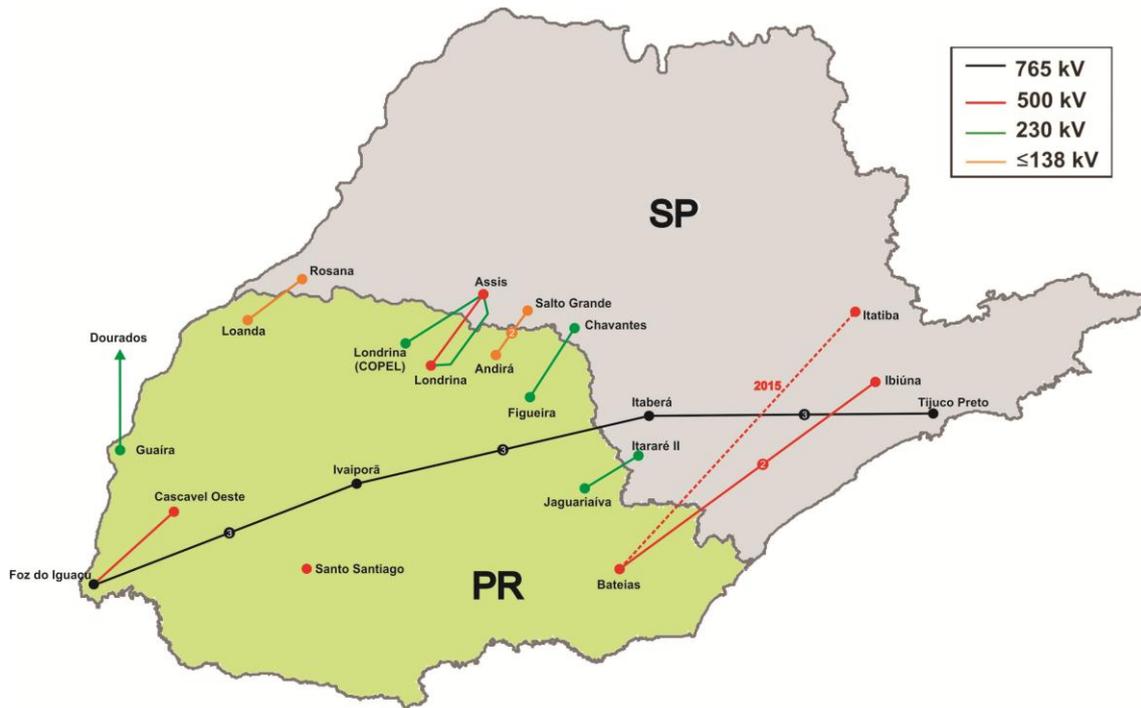


Figura 11: Localização geográfica das linhas que compõem o RSUL – Adaptado de [22]

O objetivo do teste é obter o maior valor possível de RSUL. Segundo [22], os fatores limitantes de tal cenário se encontram na contingência dupla da LT 765 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã C1 e C2 ou na contingência dupla da LT 500 kV Bateias – Ibiúna C1 e C2, que podem causar oscilações de tensão pouco amortecidas ou até mesmo a perda de sincronismo entre as regiões Sul e Sudeste. Logo, pode-se explorar o limite RSUL por meio do FPO sem se preocupar com a ocorrência de eventuais problemas em regime normal de operação.

O cenário de máximo recebimento de energia pela região Sul é caracterizado pela transferência de energia dos subsistemas Norte e Nordeste para o SE/CO via interligação Norte-Sul e, deste para o Sul, por meio da interligação Sul-Sudeste. Para tanto, são considerados despachos hidráulicos elevados nas usinas dos subsistemas N, NE e SE/CO, podendo atingir valores da ordem de 95%. Já o subsistema Sul apresenta baixa geração hidráulica.

O teste foi realizado utilizando-se um caso de trabalho do Plano de Ampliações e Reforços (PAR) elaborado anualmente pelo ONS, visando preservar a segurança e o desempenho da rede nos quatro anos subsequentes a sua

divulgação. O caso escolhido para simulação é referente ao ano de 2017, patamar de carga média e época do verão, onde as afluências são maiores no Norte do país.

Neste caso, foi considerado o despacho de usinas térmicas na inflexibilidade e das usinas nucleares de Angra I e II. A geração no sistema de 60 Hz da UHE Itaipu, que é escoado através do tronco de 765 kV e da LT 525 kV Foz do Iguaçu Cascavel Oeste mostrados anteriormente na Figura 11, é de 7000 MW.

3.2.3 Utilização do FLUPOT em um Caso do SIN

O caso histórico do ANAREDE que contém a configuração do Sistema Interligado Nacional apresenta em sua totalidade mais de 6000 barras e mais de 8700 dados de circuito, incluindo transformadores e linhas de transmissão. Essa grande quantidade de informações requer uma análise minuciosa para identificar quais são as reais áreas de interesse do usuário em um determinado estudo, a fim de monitorar na otimização somente o que é considerado relevante. Isto se faz necessário, pois o programa pode, eventualmente, não alcançar uma solução ótima devido a uma restrição imposta em uma área que não era o foco do estudo.

Quando são feitas análises referentes à transmissão de energia elétrica é fundamental que sejam atendidos os limites operativos ou físicos nos equipamentos da Rede Básica, isto é, nas instalações cuja tensão nominal é igual ou superior a 230 kV. O perfil das tensões nas barras de fronteira da Rede Básica com a distribuição também são objetos de estudo e a monitoração dessas grandezas se torna importante. Como a maioria das transformações de fronteira no sistema brasileiro, embora haja exceções, tem seu secundário na tensão de 138 kV ou 69 kV, foi adotado como ponto de partida para as simulações o critério de inserir na área de monitoração somente os barramentos com classe de tensão superior a 69 kV.

Entretanto, nos dados do caso do SIN, a área a qual pertence determinada barra é classificada por agentes do setor elétrico. Por exemplo, a Área 1 pertence a FURNAS, a Área 2 pertence a CEMIG, e assim por diante. Assim sendo, foi feita uma manipulação dos dados, de forma a transferir para uma área fictícia todas as barras acima de 69 kV. Essa nova área foi definida com o número 199 e será a única a integrar a região de monitoração no arquivo de otimização. Já a região de controle será formada por todas as áreas do sistema, inclusive a 199, o que

significa que para alcançar a solução do problema de fluxo de potência ótimo, o FLUPOT poderá buscar recurso de controle em qualquer parte do sistema. Essa situação é ilustrada na Figura 12.



Figura 12: Identificação das regiões de monitoração e controle

Outra questão está relacionada com a função objetivo MXTR. Sabe-se que o FLUPOT é capaz de sugerir ajustes nas diversas variáveis de controle do sistema elétrico, de forma a eliminar as violações dentro da região de monitoração. No entanto, o emprego dos controles definidos para atuar na otimização pode não ser suficiente para a remoção de todas as violações, impedindo o alcance da máxima transferência de potência. Tais violações podem estar sendo causadas por problemas estruturais na rede, como por exemplo, ausência de suporte de potência reativa. Dessa maneira, para se alcançar a solução ótima, pode ser necessária potência reativa adicional capacitiva ou indutiva, a qual evidentemente deve ser minimizada, mas em montante suficiente para alcançar a convergência sem violações das grandezas em questão.

Com o propósito de minimizar a utilização dessa compensação adicional, será utilizada, juntamente com o código MXTR, a função objetivo ASHN, que minimiza o custo da instalação de bancos capacitivos ou indutivos nas barras da região de monitoração onde o programa define como necessário para tal. Neste trabalho, foi considerado que custo de qualquer instalação será o mesmo para todas as barras do sistema, o que sugere que a mínima alocação reativa seja feita de forma pontual, desprezando eventuais gastos. Deve-se ressaltar que a utilização deste recurso tem o objetivo único de eliminar as violações identificadas no caso, de modo a facilitar o cumprimento do objetivo de máximo intercâmbio entre duas áreas.

Após o FLUPOT resolver o problema, é necessário avaliar o montante de potência reativa que foi alocada no sistema e retirá-la, resultando provavelmente em subtensão ou sobretensão nas barras onde foram realizadas essa injeção fictícia. É possível que tal alocação tenha sido feita em barras distantes do intercâmbio maximizado e, portanto, essa violação de tensão não compromete o resultado encontrado, mas sem o auxílio da função ASHN não seria possível alcançá-lo.

No âmbito da operação, pode ser que os limites de tensão dos barramentos onde ocorreriam violações sejam ligeiramente flexibilizados, a critério do ONS, para eliminação das mesmas. Já no contexto do planejamento elétrico, caso as alocações sejam significantes na área ao entorno de onde está sendo maximizado o fluxo, a indicação de um reforço no sistema deve ser considerada para atingir o valor do intercâmbio desejado.

3.2.3.1 Montagem do Arquivo de Otimização

A utilização da função objetivo ASHN no FLUPOT requer como dado complementar o código DCAQ, onde deverão ser listadas as barras elegíveis para alocação de *shunt* reativo. A utilização do comando “00000” neste código significa que todas as barras da área de monitoração são candidatas. Após a otimização, a indicação das barras nas quais foram injetadas potência reativa é mostrada no relatório de saída. Essa alocação é feita no grupo 99 dos dados de banco *shunt* (DBSH) do arquivo histórico do caso.

Neste caso de RSUL, a maximização da transferência de potência é realizada através de um conjunto de linhas e transformadores, como foi mostrado na Tabela 7. Assim sendo, esses dados de circuitos devem ser inseridos no código de execução DVES, diferentemente do caso do sistema de 33 barras onde o intercâmbio se deu através de áreas vizinhas, sendo necessária a utilização do código DTRF.

Na utilização do controle PGEN, é obrigatório que o código DGEP contenha pelo menos as barras do tipo *swing* para que o balanço de potência seja fechado. A *swing* da rede CA dos casos do ONS é a barra de geração da UHE Ilha Solteira (número 501), cuja faixa de potência no DGEP deve ser definida de acordo com o patamar de carga – na carga média o intervalo de despacho é de 2400 a 2800 MW. Já as barras V θ que existem devido ao elo de corrente contínua devem ter suas

faixas de potência ativa mínima e máxima próximas ao valor que está no caso base, para que a execução do FPO seja bem sucedida. Por exemplo, se as máquinas de Itaipu que geram em 50 Hz estiverem despachadas com 7000 MW, o intervalo desta barra no DGEP deve estar entre 6999 MW e 7001 MW. Isto se faz necessário porque a potência injetada na barra CA após o inversor é considerada constante – no exemplo do elo de Itaipu, essa barra é a de Ibiúna. Dessa maneira, caso houvesse uma variação acentuada de potência na barra de folga durante a otimização, ocorreria um conflito e o FLUPOT não chegaria à convergência.

No cenário de máximo recebimento de energia pelo Sul é premissa que todas as usinas térmicas dessa região estejam com despacho nulo, com exceção daquelas que apresentam inflexibilidade¹ declarada, conforme mostra a Tabela 8. Deve-se ressaltar que eventualmente pode ser necessário despacho de térmica por razões elétricas.

Tabela 8: Inflexibilidade das UTEs da região Sul

Usina	Barra	Potência (MW)
Candiota 3	1173	210
Charqueadas	901	36
Jorge Lacerda A1	907	25
Jorge Lacerda A2	909	66
Jorge Lacerda B	911	200
Jorge Lacerda C	913	340
Presidente Médice B	1172	155

Conforme mencionado anteriormente, também foi utilizada como premissa a geração de 650 MW e 1350 MW nas usinas nucleares de Angra I e II, respectivamente, e 7000 MW de despacho no lado de 60 Hz da UHE Itaipu. As demais UHEs do sistema foram definidas no DGEP com um intervalo de 0 a 95% de suas capacidades máximas, cabendo ao FLUPOT a escolha do montante de geração adequada para atender a função objetivo. A opção de 95% como limite máximo, ao invés de 100%, é um ato conservador no planejamento, levando-se em consideração, por exemplo, que manutenções podem afetar a disponibilidade e que os níveis dos reservatórios podem baixar.

¹ A inflexibilidade de uma usina é o montante de potência mínima que deve ser obrigatoriamente despendido devido a motivos tecnológicos ou econômicos, não estando sujeito, portanto, à regra de despacho do ONS.

A restrição de fluxo nos circuitos não foi considerada nesta simulação, visto que o caso retrata o ano de 2017 e, no contexto do planejamento, haveria tempo hábil para a proposição e execução de obras de ampliação e/ou reforço, caso possíveis violações fossem encontradas. Os controles habilitados na simulação foram: geração de potência ativa e reativa, manobra de capacitores e reatores, tapes dos transformadores com comutador sob carga, tensão das barras PV e compensadores estáticos. O arquivo de otimização utilizado no cálculo do limite RSUL encontra-se no Anexo 1.

3.2.4 Resultados Obtidos

Por se tratar de um caso representativo do verão, os despachos nas usinas hidrelétricas das regiões Norte e Nordeste estão altos, ao passo que na região Sul a geração hidráulica apresenta valores reduzidos. Dessa maneira, a transferência de energia flui do Norte para o Sul do país, resultando num intercâmbio RSUL de 4919 MW. Após calcular o fluxo de potência ótimo a partir das premissas estabelecidas no item anterior, chegou-se a um valor de 6620 MW. A Tabela 9 compara os valores dos fluxos que passam em cada elemento que compõe o RSUL, antes e depois da otimização.

Tabela 9: Comparação do intercâmbio RSUL entre o caso base e o caso otimizado

Intercâmbio	Fluxo de Potência (MW)	
	Caso Base	Caso Otimizado
LT 525 kV Londrina - Assis	567	996
LT 525 kV Foz do Iguaçu - Cascavel Oeste	1466	1789
LT 500 kV Bateias - Ibiúna C1	487	619
LT 500 kV Bateias - Ibiúna C2	487	619
LT 500 kV Bateias - Itatiba	671	814
LT 230 kV Guaíra - Dourados	-31	34
LT 230 kV Londrina - Assis	113	172
LT 230 kV Londrina (Copel) - Assis	29	68
LT 230 kV Jaguariaíva - Itararé 2	-89	-85
LT 230 kV Figueira - Chavantes	66	116
LT 138 kV Loanda - Rosana	157	194
LT 88 kV Andira - Salto Grande C1	24	33
LT 88 kV Andira - Salto Grande C2	24	33
TRs 765/525 kV Ivaiporã	3 x 316	3 x 406
Valor total do RSUL	4919	6620

Pode-se perceber que o FLUPOT aumentou o fluxo de potência ativa em todos os circuitos e transformadores da interligação, exceto na LT 230 kV Jaguariaíva – Itararé 2, que apresenta o fluxo no sentido oposto ao RSUL. O intercâmbio na LT 230 kV Guaíra – Dourados fluía inicialmente do Paraná para o Mato Grosso do Sul e, após a otimização, este fluxo foi invertido para atingir o objetivo.

Entretanto, para alcançar a solução ótima, o programa encontrou necessidade de alocar potência reativa em 14 barras, num total de 152 Mvar, que corresponde ao valor da função objetivo ASHN. Os valores das funções objetivo e as barras onde foram injetados *shunts* fictícios são mostrados no relatório de saída do FLUPOT, aqui apresentados na Figura 13.

Minimo Alocação Shunt	:	151.95 K\$/Mvar	
Maxima Transferencia	:	6619.55 MW	
RELATORIO DA POTENCIA REATIVA ALOCADA (> 1.0 Mvar)			
X-----	BARRA -----X	Mvar NOM.	Mvar GER.
79	TPR-REA---69	46.2	41.7
1307	Panambi---69	1.2	1.0
1310	Erexim2--138	15.4	13.9
2281	TRIANON--138	5.7	5.1
2297	ARACATUBA-69	9.4	10.3
2299	BAGUACU---69	5.7	5.9
2317	GUARARAPE-69	3.6	3.9
2327	PIACATU---69	1.8	2.0
2537	SE-PD-----69	12.7	11.5
2673	S.MATEUS--69	15.6	14.1
2930	MINEIROS-138	5.8	5.3
3878	STAFESUL--69	16.8	15.2
4512	C.MAGAL--230	-9.2	-10.2
4777	PARANATIN138	2.1	1.9

Figura 13: Relatório de saída do FLUPOT no caso de limite RSUL

Ao eliminar o grupo 99 criado nos dados de banco *shunt* dessas barras, são notadas violações de tensão conforme era esperado e o RSUL passa a ser de 6622 MW. A diferença de apenas 2 MW em relação ao caso otimizado mostra que a alocação fictícia não interfere significativamente na maximização da transferência de potência. No entanto, não seria possível obter a convergência do fluxo de potência ótimo somente com a função objetivo MXTR, pois não há recursos de controle disponíveis no sistema para fazer com que a tensão de todas as barras se mantenha dentro dos limites especificados.

Foi realizado um teste com a retirada das 14 barras da área de monitoração, porém o programa acaba alocando potência reativa em barras adjacentes àquelas, o que significa que a potência injetada pelo FLUPOT não foi feita isoladamente, e sim em pontos estratégicos para solucionar os problemas de tensão em determinadas regiões do sistema.

A Tabela 10 faz uma comparação entre o caso base e o caso otimizado acerca da quantidade de despacho da geração proveniente dos recursos hídricos (UHEs e PCHs) por subsistema. É dada a relação entre a potência que está sendo gerada e a capacidade instalada das usinas.

Tabela 10: Despacho de geração por subsistema do SIN

Subsistema	Caso Base	Caso Otimizado
Norte	84%	78%
Nordeste	98%	95%
Sudeste/Centro-Oeste	84%	91%
Sul	80%	73%
Intercâmbio RSUL	4919 MW	6622 MW

Analisando a tabela, verifica-se que a restrição imposta de máxima geração hidráulica (95%) foi atendida. Para maximizar o RSUL, o FLUPOT aumentou o despacho no subsistema SE/CO que é a região exportadora e diminuiu no Sul por ser importador de energia. Tais informações validam os resultados encontrados. Uma forma de aumentar mais este intercâmbio seria liberar a geração nas usinas térmicas do SE/CO, inicialmente não despachadas, o que forçaria mais o fluxo na interligação. No caso dessa escolha, o despacho térmico deveria ser feito por

ordem de mérito, devido às questões econômicas, até alcançar o intercâmbio desejado ou até alguma restrição não ser satisfeita.

Como se pode observar na Figura 13, todas as barras que tiveram injeção fictícia de potência reativa, excetuando uma, pertencem a uma classe de tensão inferior a 230 kV. Neste contexto, na busca por um caso onde não seja necessária alocação alguma, foi realizado outro teste mantendo-se na região de monitoração somente os barramentos do sistema pertencentes à Rede Básica.

Nesta simulação, o valor do limite RSUL verificado passou a ser de 6726 MW. O aumento de aproximadamente 100 MW em relação ao teste anterior é justificado pela diminuição do número de restrições impostas ao problema, o que dá mais liberdade para que o FLUPOT encontre a solução ótima. Contudo, o programa identificou a necessidade de alocação de 1,4 Mvar em uma barra do sistema, conforme é mostrado na Figura 14.

FUNCOES OBJETIVO		TOTAIS	
Minimo Alocao Shunt	:	1.44	K\$/Mvar
Maxima Transferencia	:	6725.87	MW
RELATORIO DA POTENCIA REATIVA ALOCADA (> 1.0 Mvar)			
X-----	BARRA	-----X	
		Mvar NOM.	Mvar GER.
6541	RUOP.---	230	
		1.4	1.3

Figura 14: Relatório emitido quando somente as barras da Rede Básica são monitoradas

O relatório de grandezas no limite emitido pelo FLUPOT mostra que o maior multiplicador de Lagrange dessa otimização tem o valor de 127 e se refere a uma barra de 440 kV em São Paulo em que havia sobretensão no caso base, violação essa que desaparece no caso otimizado. Já o multiplicador da barra 6541, onde ocorreu a injeção fictícia de potência reativa, é 3,87. Esta informação significa que essa restrição não é tão sensível às funções objetivo, porém o programa não encontrou recursos no sistema que mantivesse a tensão dentro dos limites preestabelecidos.

A barra 6541, que representa a SE Rurópolis 230 kV, fica localizada no Pará e, portanto, está eletricamente distante da área onde está sendo realizada a máxima transferência de potência. Em virtude disso, o barramento em questão foi excluído da área de monitoração, com a certeza de que não comprometerá a análise. Após rodar novamente a otimização, o programa chega a um intercâmbio RSUL de 6727 MW, confirmando que a restrição indicada anteriormente por meio dos multiplicadores de Lagrange não está diretamente associada aos objetivos. Conforme era esperado, dessa vez não foi necessário suporte de potência reativa adicional, como mostra a Figura 15.

FUNCOES OBJETIVO	TOTAIS
Maxima Transferencia	: 6726.87 MW
RELATORIO DA POTENCIA REATIVA ALOCADA (> 1.0 Mvar)	
ALOCACAO DE POTENCIA REATIVA DESPREZIVEL	

Figura 15: Relatório emitido após a retirada da SE Rurópolis 230 kV da área de monitoração

Baseando-se no fato de que não foram alocados *shunts* fictícios, tentou-se retirar a função objetivo de mínima alocação de potência reativa do arquivo de otimização e maximizar o intercâmbio somente com a função MXTR. Todavia, o programa excede o número máximo de iterações e não consegue alcançar um resultado, indicando que a função ASHN auxilia o FLUPOT no decorrer do processo de otimização.

Durante a execução do FPO, o programa calcula as variáveis do problema em diversas iterações até atingir a solução ótima. Quando é solicitada a atuação do controle de bancos de capacitores ou reatores, é realizado outro processo iterativo para definir a melhor combinação de chaveamento que atende as necessidades do problema. Faz-se necessário que as seguintes condições sejam satisfeitas ao longo das iterações para que um programa de fluxo de potência ótimo alcance a convergência [9]:

- *Mismatches* de potência ativa e reativa nas equações de balanço devem ser menores do que determinadas tolerâncias definidas previamente;
- Parâmetro barreira deve ser igual a um valor mínimo;
- Valor do *gap* menor do que uma dada tolerância

Dando continuidade à análise do caso em questão, percebe-se no relatório de saída do FLUPOT que ao inserir somente o objetivo de máxima transferência de potência, a única condição imposta não satisfeita é o *mismatch* de potência reativa em um barramento do Nordeste, que se aproxima, mas não fica abaixo da tolerância definida em 1 Mvar. Após a realização de um ajuste de tensão na região onde se localiza essa barra, foi possível obter uma solução para o problema utilizando-se somente a função MXTR.

Neste ponto de operação, o intercâmbio RSUL atinge o valor de 6727 MW tanto na simulação em que o objetivo é a máxima transferência de potência, quanto na simulação em que esse objetivo é combinado com a mínima alocação de *shunt*. Entretanto, nota-se que para este foram realizadas 44 iterações até o alcance da convergência, ao passo que para aquele foram necessárias 64 iterações. Os relatórios de saída indicam que, para ambos os casos, os multiplicadores de Lagrange associados a cada grandeza que se encontra no limite são idênticos.

Portanto, pode-se concluir que a utilização das duas funções objetivo citadas anteriormente de forma combinada não interfere no resultado final da otimização, visto que o programa alcançou rigorosamente o mesmo valor de intercâmbio para as duas simulações (somente com MXTR e com MXTR e ASHN combinados) e alcançou também pontos de operação idênticos. O artifício de utilizar estas duas funções em conjunto é válido, pois acelera o processo de convergência, além de indicar, se for o caso, onde é necessária compensação reativa para alcançar um determinado intercâmbio, informação essa que não seria possível obter ao utilizar unicamente a função de máxima transferência de potência.

4 Aplicação do Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança

Este capítulo tem como finalidade mostrar a aplicação do fluxo de potência ótimo com restrições de segurança para o cálculo da máxima transferência de potência entre duas áreas de um sistema elétrico. O programa utilizado nas simulações, assim como no Capítulo 3, foi o FLUPOT, que nesse aspecto deve ser capaz de fornecer o melhor ponto de operação do sistema, maximizando o intercâmbio desejado, de forma que satisfaça as restrições físicas e operacionais, tanto para o caso base quanto para as contingências listadas. Vale ressaltar que a característica de FPORS incorporada ao programa vem sendo desenvolvida ao longo de anos, porém até o momento da divulgação deste trabalho, algumas funcionalidades já consolidadas para o caso base ainda não foram validadas para um caso com restrição de segurança.

Neste contexto, serão realizados testes para diferentes listas de contingências simples no mesmo sistema de 33 barras utilizado anteriormente, visando o atendimento ao critério N-1, onde o sistema é capaz de permanecer operando sem violações das grandezas elétricas e sem atingir os limites de sobrecarga dos equipamentos mesmo com a indisponibilidade de um elemento. Em seguida, serão relatados os empecilhos para calcular o FPORS em um caso do Sistema Interligado Nacional.

4.1 Utilização do FPORS no FLUPOT

Quando se fala de análise de segurança em sistemas de potência, dois conceitos importantes devem ser lembrados no que se referem às medidas pós-contingências que serão consideradas. O primeiro é o modo de segurança preventivo, onde o ponto de operação do caso otimizado deve ser capaz de suportar qualquer uma das contingências da lista sem que seja necessário tomar alguma ação corretiva após o desligamento do elemento. O segundo conceito é o modo de segurança corretivo, onde os controles que atuam no caso base podem ser alterados após a contingência para impedir a ocorrência de violações.

Assim sendo, a utilização da análise de segurança no FLUPOT é feita basicamente por meio de dois códigos adicionais no arquivo de otimização. O primeiro deles é o comando DCCT que deve estar presente somente na atuação do modo corretivo. Neste código é feita a leitura dos controles que podem ser modificados do caso base para as contingências. No caso em que se deseja a atuação de todos os controles do caso base na emergência, basta introduzir a sequência “00000” nas linhas de comando. O outro código necessário é o comando DLIS, onde é inserida a lista de contingência que deve ser levada em consideração na otimização. Dependendo do tipo de elemento do sistema que será desligado na simulação, os campos do comando DLIS são preenchidos com nomes distintos, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11: Nome do código para cada tipo de contingência

Tipo de Contingência	Nome do código
Barra	BARELIM
Circuito	CIRCELIM
Banco <i>Shunt</i>	SHUNT
Carga	CARGA
Geração	GERACAO

O método de solução adotado pelo FLUPOT para resolver cada subproblema de contingência consiste em inserir as funções objetivo de mínimo custo de alocação de potência ativa e mínimo custo de alocação de potência reativa, de forma a minimizar as violações dos casos pós-contingência. Se para determinada contingência o programa verificar a necessidade de alguma injeção fictícia de potência ativa ou reativa, essa informação é encaminhada para o caso base, gerando restrições adicionais denominados cortes de Benders, conforme foi explicado na Seção 2.4.2. Dessa maneira, é iniciada uma nova iteração a partir do caso base, que passa a ter seu objetivo otimizado levando-se em consideração também os cortes de Benders associados a cada contingência. O problema de FPORS é dado como convergido no momento em que todas as contingências listadas não necessitem de alocação alguma adicional, indicando que se alcançou um ponto de operação otimizado do caso base em que todas as contingências são viáveis.

4.2 Teste do FPORS em um Sistema de Pequeno Porte

O sistema de pequeno porte onde foram realizados os testes de fluxo de potência ótimo com restrições de segurança é o mesmo utilizado na Seção 3.1. A Tabela 12 resume os resultados do intercâmbio entre as duas áreas do sistema, encontrados anteriormente. Os testes de análise de segurança mostrados a seguir partiram do caso que houve um incremento de 5% de carga.

Tabela 12: Intercâmbios encontrados no sistema-teste de 33 barras

Transferência de Potência (MW)			
Caso Inicial		Caso com Aumento de 5% de Carga	
Caso Base	Caso Otimizado	Caso Base	Caso Otimizado
2113	3699	2070	3609

Conforme será explicado adiante, a definição de uma lista com uma grande quantidade de contingências pode resultar na não convergência do caso, devido a conflitos entre duas ou mais contingências. Diante desta situação, serão realizados testes em três listas de contingências distintas, de forma a identificar mais facilmente quaisquer problemas encontrados.

4.2.1 Lista 1 - Contingências de Duas Linhas de Transmissão

O primeiro teste foi realizado considerando apenas as LTs 230 kV Cascavel – Salto Osório e Cascavel – Foz do Chopin na lista de contingências. Este estudo inicial com apenas duas contingências tem o objetivo de testar as ferramentas que constituem a análise de segurança do FLUPOT. Para tanto, foi considerada a resolução do problema através dos modos preventivo e corretivo.

4.2.1.1 Modo Preventivo

Neste modo, como nenhum controle do caso base pode atuar na contingência, o código DCCT não está presente nos dados de entrada. Assim sendo, o conteúdo do arquivo de otimização utilizado na simulação é o mesmo apresentado na Figura 4, com a inclusão da lista de contingência logo abaixo dos dados da área de interesse, conforme mostra a Figura 16.

```

. Não tem DCCT - É preventivo
.
. Lista de contingências
.
DLIS IMPR
CASO 01
    CIRCELIM 839          898 1
CASO 02
    CIRCELIM 839          1047 1
99999
.

```

Figura 16: Dados de entrada para atuação da restrição de segurança no modo preventivo

Após calcular a otimização, o resultado encontrado é 3604 MW. Este valor corresponde ao máximo fluxo de potência ativa que pode ser transferido da área 2 para a área 1 que deixa o sistema em estado seguro. Ou seja, caso ocorra uma das duas contingências listadas, o sistema continuará atendendo a carga sem nenhuma violação operativa.

Nessa simulação verifica-se claramente a influência do corte de Benders para alcançar a solução ótima. Na primeira iteração, o valor proposto no caso base para o máximo intercâmbio era 3609 MW, conforme encontrado na simulação sem análise de segurança. Entretanto, é constatado que no ponto de operação em questão são necessárias injeções fictícias de potência para que o sistema suporte as contingências da lista. Assim sendo, as contingências informam o grau de inviabilidade ao caso base, onde são geradas as restrições adicionais associadas aos cortes de Benders, iniciando-se uma nova iteração que propõe um valor de máxima transferência de potência menor do que a proposta anterior. A Tabela 13 mostra que foram necessárias oito iterações para não alocar potência ativa ou reativa e, conseqüentemente, alcançar a convergência.

Tabela 13: Caminho percorrido pelo FLUPOT até alcançar a convergência

Iteração	Máximo Intercâmbio (MW)	Injeção de Potência Ativa (MW)		Injeção de Potência Reativa (Mvar)	
		CTG 1	CTG 2	CTG 1	CTG 2
1	3609,16	-1,17	-1,29	0	0
2	3808,90	0	-1,08	0	0
3	3608,49	0	-1,10	0	0
4	3607,93	0	-1,11	0	0
5	3607,24	0	-1,10	0	0
6	3606,53	-1,09	-1,23	0	0
7	3605,59	0	-1,01	0	0
8	3604,49	0	0	0	0

4.2.1.2 Modo Corretivo

A simulação com o modo de segurança corretivo foi realizada inicialmente considerando que, para evitar violações após as contingências, todos os controles do caso base podem ser alterados, isto é, a quantidade de geração de potência ativa, bem como a tensão de excitação das usinas. Assim sendo, foram incluídos no arquivo de otimização os comandos mostrados na Figura 17.

```
. Controles do caso base que podem atuar na contingência
DCCT
PGEN
VGEN
99999
.
. Lista de contingências
.
DLIS IMPR
CASO 01
      CIRCELIM 839          898 1
CASO 02
      CIRCELIM 839          1047 1
99999
.
```

Figura 17: Dados de entrada para atuação da restrição de segurança no modo corretivo

O resultado encontrado para o máximo intercâmbio foi 3609 MW, ou seja, o mesmo valor encontrado para o caso sem análise de segurança. Isso significa que ao permitir que os recursos de controle atuem na contingência, as funções objetivo de mínima alocação de potência ativa e reativa alcançam o valor nulo nas contingências logo na primeira iteração, não sendo necessária redução alguma no intercâmbio entre as áreas.

Entretanto, permitir o redespacho de geração para solucionar uma contingência é eficaz somente no desligamento programado de uma linha, onde é possível encontrar um novo ponto de operação, de forma que não ocorram violações operativas. Na ocorrência de uma contingência de emergência, é mais correto que se leve em consideração somente os recursos de controle de tensão existentes no sistema.

Assim sendo, foi feita outra simulação retirando-se a geração de potência ativa dos controles que podem ser alterados para resolver as contingências e o valor encontrado de máxima transferência de potência foi o mesmo – 3609 MW. Portanto, a modificação das tensões de excitação das máquinas é capaz de manter o valor máximo de potência na interligação entre as áreas 1 e 2, respeitando-se todos

os limites operativos, mesmo na ocorrência de uma das contingências listadas. Os relatórios de variação de controles apresentados nas Figura 18 e Figura 19 indicam as grandezas do caso otimizado que foram alteradas para resolver cada uma das contingências.

```

* CONTINGENCIA * 1

Eliminacao do Circuito      1 Barra DE      839 Barra PARA      898 X
CONT      BARRA/CIRCUITO      VARIACAO
TIPO  NUM      NOME      INICIAL  DESVIO  FINAL  UNID  ITER
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X

GE_V  810  SSEGREDO-4GR      1.050  -0.009  1.041  p.u.  0
GE_V  915  MACHADIN-1GR      1.050  -0.001  1.049  p.u.  0
GE_V  919  SOSOR1A4-4GR      1.049  -0.005  1.045  p.u.  0
GE_V  925  SSANTIAG-3GR      1.050  -0.009  1.041  p.u.  0

```

Figura 18: Variação de controles para atender a contingência 1

```

* CONTINGENCIA * 2

Eliminacao do Circuito      1 Barra DE      839 Barra PARA      1047 X
CONT      BARRA/CIRCUITO      VARIACAO
TIPO  NUM      NOME      INICIAL  DESVIO  FINAL  UNID  ITER
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X

GE_V  810  SSEGREDO-4GR      1.050  -0.009  1.041  p.u.  0
GE_V  915  MACHADIN-1GR      1.050  -0.001  1.049  p.u.  0
GE_V  919  SOSOR1A4-4GR      1.049  -0.004  1.046  p.u.  0
GE_V  925  SSANTIAG-3GR      1.050  -0.009  1.041  p.u.  0

```

Figura 19: Variação de controles para atender a contingência 2

4.2.2 Lista 2 – Contingências nas LTs da Área Exportadora

O próximo teste consiste em incluir todas as linhas de transmissão da área 2 na lista de contingências, conforme mostra a Figura 20 com os dados inseridos no arquivo de otimização.

```

. Lista de contingências
.
DLIS IMPR
CASO 01
CIRCELIM 839 898 1
CASO 02
CIRCELIM 839 1047 1
CASO 03
CIRCELIM 839 2458 1
CASO 04
CIRCELIM 839 2458 2
CASO 05
CIRCELIM 856 1060 1
CASO 06
CIRCELIM 896 897 1
CASO 07
CIRCELIM 898 1047 1
CASO 08
CIRCELIM 934 1047 1
CASO 09
CIRCELIM 934 1047 2
CASO 10
CIRCELIM 1060 897 1
99999
.

```

Figura 20: Contingências inseridas na Lista 2

4.2.2.1 Modo Preventivo

Após executar a otimização neste modo de segurança, o programa não consegue alcançar a convergência sob a alegação de que as contingências listadas são conflitantes, ou seja, uma certa contingência requer a injeção positiva de potência ativa ou reativa (capacitiva), ao passo que outra contingência na mesma lista exige alocação negativa de potência reativa (indutiva) ou a retirada de potência ativa do sistema. A Figura 21 mostra a mensagem que é exibida no relatório de saída. O valor do campo RSHC informa o quão rigorosa é determinada contingência.

```

=> Contingencias Mais Rigorosas

Caso CTG - 5
Caso CTG - 6
Caso CTG - 10
Caso CTG - 7

Alocacao de Potencia Reativa nas Contingencias Mais Rigorosas

Casos CTG      Alocacao (MW)      Alocacao (Mvar)      Valor de RHSC
5              -4.6               0.0                  24.4
6              119.3              145.6                16.4
10             -631.1              0.0                  9.2
7              0.0                9.5                  8.8

```

Figura 21: Mensagem exibida no FLUPOT informando as contingências conflitantes

Conforme citado em [23], a apresentação de uma modelagem que resolva este conflito existente no fluxo de potência ótimo com restrições de segurança é um grande desafio que ainda não é factível, dificultando a inserção de uma lista com muitas contingências. Assim sendo, a definição dos casos de contingência deve ser criteriosa de forma a evitar a formação de contingências conflitantes, o que impossibilita a obtenção de uma solução global para o problema de otimização.

4.2.2.2 Modo Corretivo

O modo de segurança corretivo pode levar o programa a encontrar a solução de um problema de otimização que não seria possível caso não fosse considerada a atuação dos controles durante as contingências. Todavia, contingências severas podem fazer com que o resultado ótimo não seja encontrado mesmo no modo corretivo, como acontece com a Lista 2 de contingências. O relatório de convergência informa que são necessários mais de 130 MW e mais de 100 Mvar para suportar o desligamento da LT 525 kV Salto Caxias – Cascavel Oeste, que é a contingência 6 da lista.

Esta necessidade de alocação de potência no sistema é justificável, pois conforme mostra a Figura 22 com a distribuição dos fluxos de potência no caso base, a referida linha de transmissão é responsável pelo suprimento a uma carga superior a 400 MW, representada no barramento de 230 kV de Cascavel. O desligamento dessa linha levaria a um colapso de tensão no sistema de 230 kV, além de sobrecarga inadmissíveis em alguns circuitos.

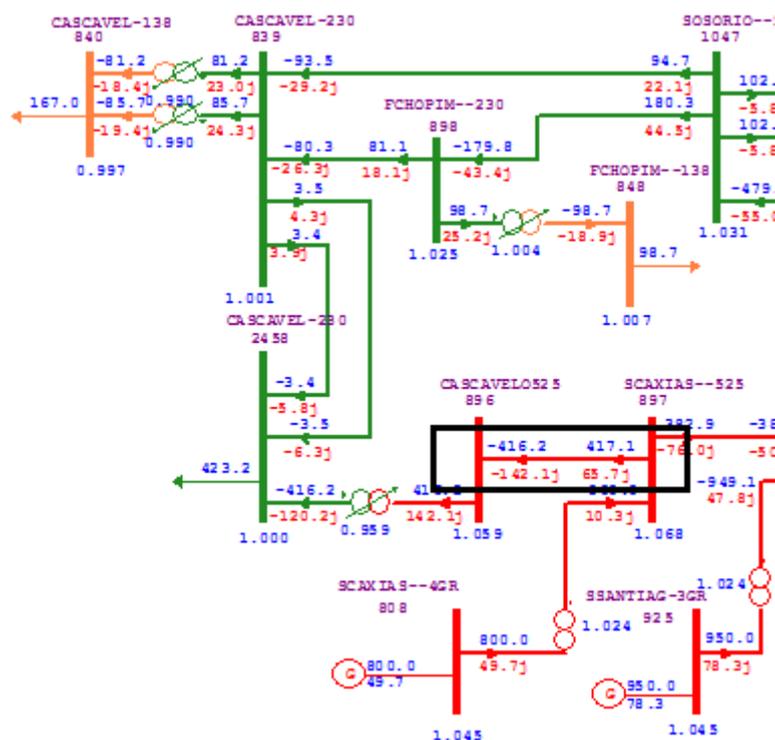


Figura 22: Distribuição dos fluxos de potência no caso base

Esta constatação faz com que o sistema seja classificado como em estado de alerta, visto que no caso base toda a demanda é suprida sem haver violações nos limites operativos, porém a ocorrência da contingência 6 da lista levará o sistema ao estado de emergência, não atendendo as restrições operativas.

Caso o sistema esteja operando nesse ponto, será necessária a atuação de um esquema de corte de carga para contornar a situação. As simulações apontam que 100 MW e 250 MW de carga deixariam de ser atendidas através das subestações de 138 kV e 230 kV de Cascavel, respectivamente, para que o sistema continuasse operando sem violações.

Já no âmbito do planejamento da expansão, a indicação de um reforço seria uma saída para solucionar o problema. Assim sendo, foi realizada uma nova simulação considerando a construção de um segundo circuito entre as subestações de Salto Caxias e Cascavel Oeste. Com essa nova configuração, ao calcular a otimização com restrição de segurança sem que ocorra redespacho de geração nas contingências, são identificadas três contingências conflitantes, conforme mostra a Figura 23.

=> Contingências Conflitantes - Sinal de RHSC			
Casos CTG	Alocacao (MW)	Alocacao (Mvar)	Sinal de RHSC
5	-8.2	22.1	-
7	0.0	4.5	+
10	-159.0	0.0	+

Figura 23: Contingências conflitantes no modo corretivo sem redespacho de geração

Já com a atuação do controle de potência ativa nas contingências, chega-se ao valor de 3613 MW para o máximo intercâmbio da área 2 para 1. Como mencionado anteriormente, a consideração de redespacho de geração muda notadamente a característica do fluxo de potência nos casos e, portanto não deve ser considerado na análise de segurança de contingências não programadas. Com base nisso, foi montada a Tabela 14 que mostra o fluxo na interligação considerando a variação dos controles entre o caso otimizado e cada uma das contingências.

Tabela 14: Intercâmbio da área 2 para a área 1 após cada contingência

Configuração	Intercâmbio (MW)
Contingência 1	1932,2
Contingência 2	1931,8
Contingência 3	1934,6
Contingência 4	1934,5
Contingência 5	1872,9
Contingência 6	1924,7
Contingência 7	1570,8
Contingência 8	1906,6
Contingência 9	1906,7
Contingência 10	1765,0

Pode-se perceber que o menor intercâmbio acontece após a atuação dos controles do sistema devido à ocorrência da contingência 7. Logo, conclui-se que a máxima transferência de potência entre as duas áreas que mantém o sistema no estado seguro caso ocorra emergencialmente qualquer desligamento na área exportadora é 1570,8 MW. Além disso, foi comprovado que a sugestão de um reforço na rede, motivado pela indicação do FLUPOT de que havia uma contingência severa na lista, foi suficiente para encontrar um ponto de operação que atendessem as restrições de segurança.

4.2.3 Lista 3 – Contingência nos Elementos da Interligação

O último teste consiste em incluir as duas linhas de transmissão e o transformador que compõem a interligação entre as áreas 1 e 2 do sistema com o objetivo de analisar sua influência no cálculo do limite de intercâmbio. A Figura 24 mostra os dados da lista de contingência deste teste inseridos no arquivo de otimização.

. Lista de contingências				
.				
DLIS	IMPR			
CASO	01			
	CIRCELIM	934	933	1
CASO	02			
	CIRCELIM	856	933	1
CASO	03			
	CIRCELIM	995	1060	1
99999				
.				

Figura 24: Contingências inseridas na Lista 3

Ao executar a otimização no modo de segurança corretivo com a atuação de todos os controles do caso base, o programa não chega a uma solução devido à severidade da contingência da LT 525 kV Segredo – Areia. Esse resultado era esperado, pois essa linha transporta aproximadamente 1370 MW no caso base, o que corresponde a mais de 65% do fluxo que passa inicialmente na interligação.

Uma possibilidade de contornar a gravidade desse desligamento e tirar o sistema do estado de alerta seria a construção de um segundo circuito em paralelo ao primeiro. Como o relatório de saída do FLUPOT indica a necessidade de alocação de 16,1 Mvar na SE 230 kV Curitiba na ocorrência da contingência supracitada, a injeção de suporte reativo capacitivo nessa barra também poderia solucionar o problema. A alternativa de reforçar a rede com um capacitor é uma medida mais vantajosa do ponto vista econômico, além de demandar menos tempo para a entrada em operação. Visto isso, foi inserido um banco de capacitores de 20 Mvar na subestação de Curitiba, conforme mostra a Figura 25.

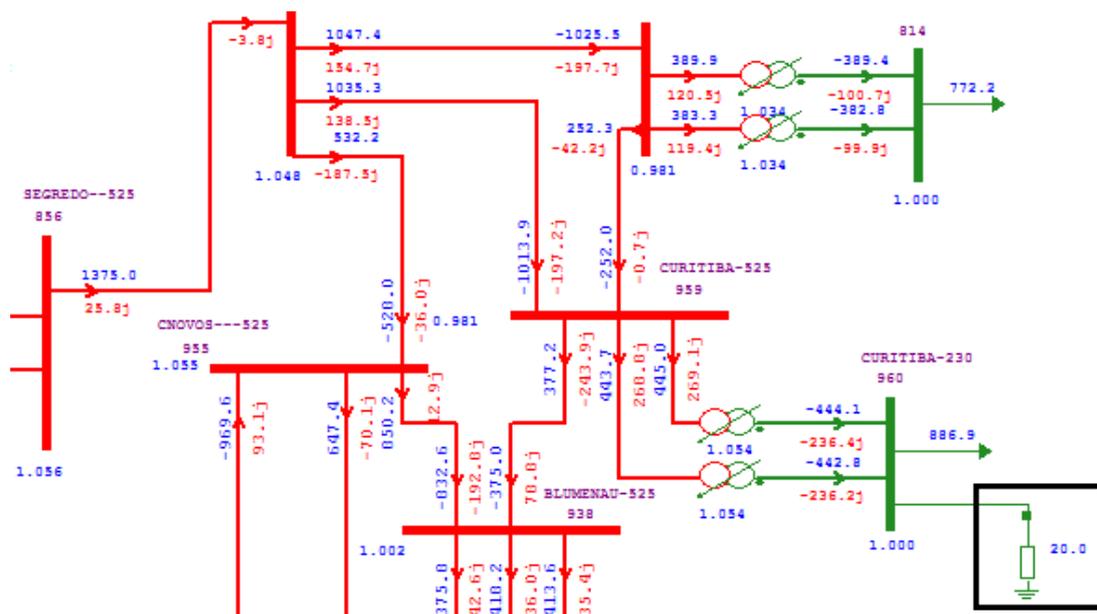


Figura 25: Configuração da rede com o capacitor de 20 Mvar na SE Curitiba

A simulação a partir do novo ponto de operação no modo corretivo para contingências não programadas mostra que, ao resolver o subproblema do caso base, a máxima transferência de potência entre as áreas é 3620 MW. Contudo, para viabilizar as contingências listadas a partir deste ponto otimizado de modo que não ocorra alocação de potência ativa ou reativa, são feitos diversos cortes em tal valor. A Tabela 15 mostra os resultados das iterações relativas à decomposição de Benders até que todas as contingências sejam viáveis.

Tabela 15: Atuação da decomposição de Benders no processo de convergência

Iteração	Máximo Intercâmbio (MW)	Módulo da Injeção de Potência Ativa (MW)			Módulo da Injeção de Potência Reativa (Mvar)		
		CTG 1	CTG 2	CTG 3	CTG 1	CTG 2	CTG 3
1	3620,3	0	1501,2	1508,2	16,7	0	112,7
2	2822,3	0	689,3	394,5	7,7	320,7	4,4
3	2309,9	0	0	0	0	202,0	160,3
4	2274,5	0	73,8	1,4	0	89,3	109,9
5	2009,2	0	54,7	0	0	87,8	62,2
6	1971,9	0	17,1	0	0	57,9	30,5
7	1813,0	0	0	0	0	112,1	0
8	1654,1	0	18,5	0	0	36,0	0
9	1653,1	0	11,4	0	0	39,1	0
10	1635,1	0	0	0	0	35,4	0
11	1614,5	0	0	0	0	59,2	0
12	1582,3	0	3,3	0	0	21,0	0
13	1573,9	0	0	0	0	22,0	0
14	1538,4	0	59,0	0	0	0	0
15	1473,1	0	27,2	0	0	0	0
16	1472,5	0	18,7	0	0	0	0
17	1416,4	0	0	0	0	0	0

Pode-se perceber que a atuação da decomposição de Benders no processo de convergência aponta que o intercâmbio máximo que deixa o sistema no estado seguro caso ocorra alguma contingência na interligação é 1416 MW. Este valor é menor do que os 2070 MW que a área 2 estava transmitindo para a área 1 no caso base, que deixava o sistema em alerta. Outra informação obtida a partir da Tabela 15 é que os maiores cortes na função objetivo de máxima transferência aconteceram devido à contingência 2 (LT 525 kV Segredo – Areia), por onde passa o maior fluxo da interligação.

Este teste comprova que a sugestão inicial feita pelo FLUPOT acerca da necessidade de alocação de suporte reativo foi suficiente para encontrar a solução do problema de análise de segurança. Tal conclusão mostra que a ferramenta, mesmo quando não alcança a convergência devido à severidade de algumas contingências ou ao conflito entre elas, é de grande utilidade, pois indica por meio de seus relatórios uma direção correta do que pode ser feito para solucionar o caso de FPORS.

4.3 Teste do FPORS no Sistema Interligado Nacional

O próximo passo do trabalho consistiria em analisar o problema de fluxo de potência ótimo com restrições de segurança no mesmo caso do SIN utilizado na Seção 3.2.3. Foram realizadas diversas tentativas de simulação para encontrar um resultado que maximizasse o intercâmbio RSUL e atendesse simultaneamente todas as restrições físicas e operativas do sistema, mesmo na ocorrência de qualquer contingência de uma determinada lista. Entretanto, os testes esbarraram em alguns detalhes do FLUPOT que, até a data da divulgação deste trabalho, ainda encontram-se em fase de desenvolvimento pelo CEPEL, conforme é brevemente relatado a seguir.

O recurso de controle associado ao acoplamento dos transformadores LTCs em paralelo é uma função desenvolvida recentemente, a fim de que no ponto de operação otimizado os transformadores em paralelo convirjam para o mesmo valor de tape. Essa funcionalidade foi implementada na solução do caso base de FPO, mas não está validada para resolver os subproblemas de contingências. Assim sendo, ao inserir o controle de tape no arquivo de otimização que resolverá um caso de FPORS, o programa exibe uma mensagem de erro e não executa a otimização.

A atuação dos controles de tape dos transformadores é fundamental para convergir um caso de fluxo de potência do SIN e, no atual contexto onde tais grandezas não podem ser alteradas, não é possível encontrar um caso onde a otimização do caso base possa ser feita sem esse recurso. Vale ressaltar que alguns artifícios, tais como a abertura dos limites de potência reativa das máquinas do sistema e a flexibilização das tensões nos barramentos entre 0,9 p.u. e 1,1 p.u., foram tentados, porém sem sucesso.

Logo, esta importante restrição impossibilita a execução dos testes de FPORS no SIN, sendo necessárias algumas melhorias para que a ferramenta em questão seja utilizada num sistema de grandes dimensões.

Vale destacar que o programa FLUPOT foi a ferramenta computacional utilizada em diversos outros trabalhos que abordaram o fluxo de potência ótimo como tema, o que tem contribuído para a evolução do programa nos últimos anos. O trabalho apresentado em [1], especificamente, impulsionou o desenvolvimento da ferramenta em diversos aspectos, os quais se destaca a melhoria na modelagem

do elo de corrente contínua, o aperfeiçoamento da modelagem de compensadores estáticos e a representação de *shunts* discretos.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Considerações Finais

A importância da utilização do fluxo de potência ótimo no planejamento da operação e expansão de sistemas elétricos de potência vem crescendo de forma significativa na busca de soluções para problemas nos quais se deseja otimizar uma função objetivo e garantir o atendimento às restrições físicas e operacionais do sistema. Especificamente no ONS, o fluxo de potência ótimo tem sido utilizado na montagem e nos ajustes de diferentes casos de fluxo de potência que servirão de base para as análises de desempenho do SIN. Adicionalmente, o FPO tem sido aplicado no cálculo dos limites de intercâmbio entre regiões do sistema, o qual, dependendo das dimensões do sistema analisado e dos critérios adotados, pode demandar grandes esforços dos profissionais envolvidos caso não sejam utilizadas técnicas de otimização.

Este trabalho buscou avaliar a utilização do programa de fluxo de potência ótimo FLUPOT para o cálculo de limites de intercâmbio entre áreas do sistema. Para tal, foram realizados testes em um sistema de 33 barras para consolidar as funcionalidades do programa e, posteriormente, aplicou-se a ferramenta em um caso do Sistema Interligado Nacional para estabelecer o limite de recebimento de energia pela região Sul do Brasil.

Durante a realização das simulações foi constatado que a utilização de uma ferramenta de FPO é capaz de reduzir expressivamente o tempo que é empregado na definição da máxima transferência de potência em comparação à maneira convencional, onde se eleva a geração na área exportadora e se reduz o despacho na área importadora, a fim de aumentar o fluxo de potência na interligação. O crescimento no grau de automatismo é uma grande vantagem do fluxo de potência ótimo.

Este trabalho mostrou que ao calcular a otimização para um caso do SIN é necessária uma manipulação prévia dos dados, de forma a definir corretamente as áreas onde as grandezas do sistema serão monitoradas e aquelas onde os controles poderão ser alterados para alcançar o objetivo.

Foi verificado também que a utilização da função objetivo de mínima alocação de bancos *shunt* (ASHN) juntamente com a máxima transferência de potência (MXTR) é um artifício que auxilia o programa na otimização, pois aumenta o espaço de soluções do problema, dando mais liberdade para que se encontre a convergência. Entretanto, caso a ferramenta não encontre recursos de controle suficientes para respeitar as restrições operativas, são alocados bancos de capacitores ou reatores fictícios em determinadas barras que, considerando a possibilidade de flexibilização da tensão em tais barramentos, devem ser retirados para não comprometer a análise.

A análise dos relatórios de saída emitidos pelo programa pode ser útil para identificar algumas características do ponto de operação atingido, como por exemplo, as grandezas do sistema que estão no limite, os controles que variaram entre o caso base e o caso otimizado, em quais pontos do sistema foi eventualmente injetada potência reativa fictícia, entre outras. Para cada variável do problema que atinge seu limite é exibido seu multiplicador de Lagrange, por meio do qual se identifica o quanto que tal restrição é sensível ao valor obtido da função objetivo.

No âmbito da análise de segurança, foi notada neste trabalho, a dificuldade de solucionar casos que contenham contingências conflitantes na lista, ou seja, se uma determinada perda de equipamento demandar alocação de potência reativa capacitiva e outra de potência reativa indutiva, a execução da otimização é interrompida. Este fato impede a inclusão de uma lista grande de contingências. Logo, deve ser feita uma análise minuciosa na montagem da lista a fim de que sejam inseridas somente contingências que causem impactos semelhantes no sistema.

Mesmo com esta dificuldade, foram obtidos resultados satisfatórios na análise de segurança do sistema de pequeno porte estudado. Entretanto, ainda são necessários alguns aperfeiçoamentos para que a ferramenta seja aplicada a um sistema de grandes dimensões como o SIN.

A ferramenta consegue obter um ponto de operação seguro que satisfaça todas as contingências através do método da decomposição de Benders, no qual são inseridas restrições adicionais ao problema. Foi possível observar a atuação deste método em algumas simulações, onde são realizados cortes na função objetivo até que nenhuma contingência cause violações no sistema.

Pode-se concluir que quanto menos variáveis de controles sejam alteradas na contingência, menor é o espaço de soluções que o programa pode percorrer para alcançar a convergência. Isto explica o fato da resolução de um problema com modo de segurança preventivo gerar maior número de corte de Benders quando comparado ao mesmo problema no modo corretivo.

O programa de fluxo de potência ótimo também pode ser útil no planejamento do sistema quando há contingências severas na lista. Neste caso, embora não seja possível a obtenção da solução, é indicado em que ponto do sistema há um déficit de potência ativa ou reativa, permitindo a indicação de uma obra que contorne a situação.

Em suma, o fluxo de potência ótimo é uma ferramenta poderosa para cálculo de limites de intercâmbio e tende a ser cada vez mais disseminado em estudos elétricos de sistemas de potência, à medida que vão sendo estabelecidos aprimoramentos e melhorias nos programas computacionais que desenvolvem esta técnica.

5.2 Trabalhos Futuros

O fluxo de potência ótimo é um assunto que tem sido alvo de inúmeras pesquisas e investimentos no setor elétrico. Assim sendo, serão listadas a seguir algumas sugestões de trabalhos futuros que podem contribuir para o desenvolvimento do tema.

- A avaliação da análise de segurança neste trabalho ficou restrita a contingências simples de equipamentos. A aplicação do critério de segurança N-2, que vem sendo utilizado em regiões do sistema em que contingências duplas tenham um grande impacto sistêmico, pode ser o foco de outros trabalhos.
- O fluxo de potência ótimo possui, além da máxima transferência de potência, diversas outras funções objetivo que podem ser úteis no planejamento elétrico de um sistema. Assim sendo, podem ser estudadas, por exemplo, a função de mínimas perdas para que o sistema opere de forma mais econômica, a função de máximo carregamento para identificar

até que ponto a demanda de uma determinada área pode crescer sem que sejam necessários reforços do sistema, entre outras.

- Investigação de uma metodologia que solucione o problema de contingências conflitantes na análise de segurança.
- Ao utilizar o controle de potência ativa na otimização, os dados de reatância dos transformadores elevadores das usinas, bem como os limites de geração reativa das máquinas não são alterados, o que faz com que seja necessária a atualização desses dados, de acordo com o despacho de geração efetuado, a cada vez que se executa a otimização. O desenvolvimento de uma funcionalidade no programa que realize esta tarefa automaticamente seria um grande benefício.

6 Referências Bibliográficas

- [1] E. G. S. Sant'Anna, “Cálculo de Limites de Intercâmbio em Sistemas Elétricos de Potência Através de Ferramentas de Otimização,” *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais*, 2009.
- [2] E. G. S. Sant'Anna, A. Y. Takahata, T. M. L. Assis *et al.*, “Proposição de uma Metodologia de Avaliação dos Limites de Intercâmbio em Sistemas de Grande Porte: Desafios para Automação,” *Sba Controle & Automação*, vol. 22, n. 2.
- [3] J. Carpentier, “Contribution á L'étude du Dispatching Économique,” *Bulletin de la Societe Fronçoice dos Electriciens*, vol. 3, pp. 431-447, 1962.
- [4] A. J. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, São Paulo: Edgar Blüchel Ltda., 1983.
- [5] C. L. T. Borges, Análise de Sistemas de Potência - Notas de Aula, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - Departamento de Engenharia Elétrica, Março, 2005.
- [6] W. F. Tinney e C. E. Hart, Power Flow Solution by Newton's Method, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967.
- [7] M. L. Latorre, “Aplicação do Método de Pontos Interiores Primal-Dual para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo,” *Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro*, Março, 1995.
- [8] C. L. T. Borges e J. M. T. Alves, Análise de Segurança Estática em Sistemas de Potência - Notas de Aula, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - Departamento de Engenharia Elétrica, Outubro, 2010.
- [9] “Manual do Programa de Fluxo de Potência Ótimo - FLUPOT - Versão 7.4.2 - desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobrás)”.
- [10] J. A. Momoh, “Optimal Power Flow with Multiple Objective Functions,” *North American Power Symposium*, 1989.
- [11] “Universidade Federal de Juiz de Fora,” [Online]. Available: <http://www.ufjf.br/epd015/files/2010/06/ProgramacaoNaoLinear.pdf>. [Acesso em 6 Maio 2013].

- [12] P. M. Ribeiro, “Remuneração dos Serviços Ancilares de Suporte de Potência Reativa e Reserva de Potência Quando Providos por Geradores,” *Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro*, 2005.
- [13] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali e C. M. Shetty, *Nonlinear Programming: Theory And Algorithms*, Wiley, 1993.
- [14] O. S. Méndez, “Solução Concorrente do Problema do Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança,” *Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo*, 1993.
- [15] J. M. T. Alves, “Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança Aplicado à Operação em Tempo Real Utilizando Processamento Distribuído,” *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*, 2005.
- [16] S. Granville e M. Lima, “Application of Decomposition Techniques to VAR Planning: Methodological & Computational Aspects,” *IEEE Transactions on Power System*, vol. 9, n. 4, pp. 1780-1787, 1994.
- [17] W. F. Alves, “Proposição de Sistemas-Teste para Análise Computacional de Sistemas de Potência,” *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro*, 2007.
- [18] “Manual do Programa de Análise de Redes - ANAREDE - Versão 9.7.5 - desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Eletrobrás)”.
- [19] “Site do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS,” [Online]. Available: www.ons.org.br. [Acesso em 16 Junho 2013].
- [20] T. P. Ramos, B. H. Dias, J. A. P. Filho, *et al.*, “Modelo para o despacho de usinas individualizadas no planejamento hidrotérmico de médio prazo baseado em PNL,” *Sba Controle & Automação*, vol. 23, n. 5, 2012.
- [21] M. L. D. Deus, “Séries Temporais Aplicadas ao Planejamento da Operação do Sistema Interligado Nacional – SIN,” *Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro*, 2008.
- [22] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, “Evolução dos Limites de Intercâmbio nas Interligações Inter-Regionais,” *Plano de Ampliações e Reforços na Rede Básica - Período 2013 a 2015*, 2012.

- [23] J. A. Momoh, R. J. Koessler, B. Stott, *et al.*, "Challenges to Optimal Power Flow," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 12, 1997.

Anexo I

```

. DADOS DE CONSTANTES E/OU TOLERÂNCIAS
DCTE
DEBG 1.0
PTOL 1.0
QTOL 1.0
MXIT 300
JUMP 0.01
99999

.
. DADOS DA FUNÇÃO OBJETIVO
DOBJ MXTR ASHN

.
. DADOS DOS CONTROLES
DCON PGEN QGEN SHNC VGEN TAPC CCER VREF LTCF

.
RELA CONV
COMP

.
. BARRAS ELEGÍVEIS PARA ALOCAÇÃO DE SHUNT REATIVO
. 00000 SIGNIFICA QUE O PROGRAMA PODE ALOCAR EM QUALQUER BARRA DO SISTEMA
DCAQ
(Num)          (Qmxi (Qmxc          (Csti (Cstc
00000          1000 1000          1     1
99999

.
. DADOS DE CONTROLE E DE CUSTO DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA
. SE ESTE CÓDIGO ESTIVER COMENTADO SIGNIFICA QUE O PROGRAMA
. NÃO UTILIZARÁ O CONTROLE DE POTÊNCIA ATIVA DE NENHUMA USINA
DGEP
(Num)          (Pmn) (Pmx)          (Cst)
.....
.          CCC GARABI          .
.....
(Num)          (Pmn) (Pmx)          (Cst)
1040          0.8  0.9          .
.....
.          ITAIPU 50 Hz          .
.....
(Num)          (Pmn) (Pmx)          (Cst)
1100          6954 6955          .
.....
.          STO. ANTÔNIO          .
.....
(Num)          (Pmn) (Pmx)          (Cst)
7051          1899 1900          .
.....
.          ALUMAR          .
.....
(Num)          (Pmn) (Pmx)          (Cst)
8004          -238 -237          .
.....
.
. UHE SUL (MÍN. 0 > MÁX. 95%)
(Num)          (Pmn) (Pmx)          (Cst)
1864          0.  46.          1
9740          0. 128.          1
800           0. 1590.          1
804           0. 239.          1
806           0. 114.          1
808           0. 1178.          1
810           0. 1197.          1
904           0. 1378.          1
915           0. 1083.          1
917           0. 215.          1
919           0. 692.          1
921           0. 333.          1
925           0. 1349.          1
931           0. 70.          1
983           0. 335.          1
1070          0. 812.          1
1150          0. 661.          1
1155          0. 475.          1
1157          0. 842.          1

```

1159	0.	124.	1
1162	0.	171.	1
1166	0.	124.	1
1168	0.	98.	1
1175	0.	152.	1
1176	0.	119.	1
2475	0.	114.	1
2836	0.	118.	1
2863	0.	174.	1
9218	0.	110.	1
9220	0.	49.	1
9735	0.	165.	1
9356	0.	333.	1
. UTE SUL (INFLEXIBILIDADE)			
(Num)	(Pmn)	(Pmx)	(Cst)
802	0.	1.	1
803	0.	1.	1
900	0.	1.	1
901	35.	36.	1
907	24.	25.	1
1170	0.	1.	1
1172	154.	155.	1
1173	209.	210.	1
909	65.	66.	1
911	199.	200.	1
913	339.	340.	1
923	0.	1.	1
924	0.	1.	1
927	0.	1.	1
928	0.	1.	1
929	0.	1.	1
1152	0.	1.	1
1169	0.	1.	1
1164	0.	1.	1
1165	0.	1.	1
. UHE SUDESTE (MÍN. 0 > MÁX. 95%)			
(Num)	(Pmn)	(Pmx)	(Cst)
12	0.	1049.	1
14	0.	211.	1
16	0.	1246.	1
18	0.	2166.	1
20	0.	1414.	1
21	0.	205.	1
22	0.	308.	1
24	0.	171.	1
28	0.	312.	1
35	0.	362.	1
36	0.	1228.	1
250	0.	361.	1
253	0.	125.	1
255	0.	95.	1
257	0.	171.	1
296	0.	53.	1
300	0.	1132.	1
301	0.	380.	1
302	0.	485.	1
303	0.	1596.	1
304	0.	371.	1
305	0.	361.	1
306	0.	133.	1
312	0.	371.	1
317	0.	57.	1
343	0.	200.	1
400	18.	19.	1
401	14.	15.	1
407	0.	1.	1
500	0.	1326.	1
501	2400.	2800.	1
502	0.	1263.	1
503	0.	211.	1
505	0.	168.	1
511	0.	168.	1
506	0.	93.	1
507	0.	608.	1
508	0.	77.	1
509	0.	68.	1
510	0.	1463.	1

512	0.	70.	1
513	0.	500.	1
514	0.	393.	1
515	0.	87.	1
516	0.	134.	1
517	0.	125.	1
518	0.	315.	1
519	0.	251.	1
520	0.	767.	1
521	0.	76.	1
522	0.	103.	1
523	0.	30.	1
524	0.	43.	1
525	0.	24.	1
526	0.	82.	1
614	0.	77.	1
750	0.	32.	1
751	0.	103.	1
752	0.	51.	1
753	0.	239.	1
754	0.	194.	1
1107	6999.	7000.	1
1496	0.	134.	1
1501	0.	93.	1
1502	0.	97.	1
1511	0.	57.	1
1559	0.	136.	1
1594	0.	112.	1
1599	0.	74.	1
2031	0.	42.	1
2600	0.	171.	1
2601	0.	30.	1
2602	0.	16.	1
2696	0.	52.	1
3014	0.	202.	1
3641	0.	123.	1
3642	0.	89.	1
3744	0.	30.	1
3964	0.	442.	1
3968	0.	231.	1
4016	0.	50.	1
4039	0.	100.	1
4042	0.	314.	1
4044	0.	171.	1
4052	0.	212.	1
4054	0.	211.	1
4064	0.	360.	1
4068	0.	83.	1
4520	0.	167.	1
4523	0.	58.	1
4525	0.	90.	1
4804	0.	118.	1
4809	0.	115.	1
4831	0.	41.	1
4846	0.	41.	1
4890	0.	213.	1
4891	0.	27.	1
6831	0.	70.	1
6891	0.	205.	1
9442	0.	115.	1
9443	0.	81.	1
9446	0.	51.	1
9447	0.	65.	1
9448	0.	62.	1
9449	0.	86.	1
9500	0.	290.	1
9503	0.	27.	1
2948	0.	57.	1
. UTE SUDESTE			
(Num)	(Pmn)	(Pmx)	(Cst)
403	0.	1.	1
404	0.	1.	1
405	0.	1.	1
406	0.	1.	1
1585	0.	1.	1
1586	0.	1.	1
3962	569.	570.	1

3963	290.	291.	1
3974	0.	1.	1
3977	0.	1.	1
3978	0.	1.	1
4100	42.	43.	1
4180	42.	43.	1
4203	239.	240.	1
4204	183.	184.	1
4205	119.	120.	1
4206	239.	240.	1
4207	239.	240.	1
4208	119.	120.	1
4300	127.	128.	1
4301	127.	128.	1
8906	195.	196.	1
4596	0.	1.	1
4597	0.	1.	1
9026	200.	201.	1
9628	179.	180.	1
9627	339.	340.	1
32	349.	350.	1
. UTN SUDESTE (ANGRA I)			
(Num)	(Pmn)	(Pmx)	(Cst)
10	649.	650.	1
11	1349.	1350.	1
. UHE NORTE (MÍN. 0 > MÁX. 95%)			
(Num)	(Pmn)	(Pmx)	(Cst)
4462	0.	285.	1
4492	0.	1729.	1
5595	0.	1033.	1
6419	1399.	1400.	1
6420	1049.	1050.	1
6422	1399.	1400.	1
6424	1479.	1480.	1
6425	2589.	2590.	1
7110	0.	474.	1
7206	0.	855.	1
7061	1484.	1485.	1
7050	499.	500.	1
7062	777.	778.	1
7064	1555.	1556.	1
6729	2901.	2902.	1
. UHE NORDESTE (MÍN. 0 > MÁX. 95%)			
(Num)	(Pmn)	(Pmx)	(Cst)
5006	0.	171.	1
5009	0.	67.	1
5010	0.	67.	1
5011	0.	71.	1
5012	0.	72.	1
5013	0.	72.	1
5014	0.	72.	1
5015	0.	380.	1
5016	0.	380.	1
5022	0.	2166.	1
5030	0.	190.	1
5032	0.	190.	1
5051	0.	656.	1
5054	0.	656.	1
5061	0.	2850.	1
5520	0.	93.	1
5522	0.	121.	1
5888	0.	154.	1
5975	0.	428.	1
6294	0.	832.	1
. UTE NORDESTE			
(Num)	(Pmn)	(Pmx)	(Cst)
5151	207.	208.	1
5154	139.	140.	1
5466	0.	1.	1
5654	146.	147.	1
5655	85.	86.	1
5660	0.	1.	1
5770	0.	1.	1
5827	0.	1.	1
5978	0.	1.	1
5764	0.	1.	1
5134	0.	1.	1

5557	0.	1.	1
5558	0.	1.	1
6447	0.	1.	1
6448	0.	1.	1
5762	0.	1.	1
5820	0.	1.	1
5823	0.	1.	1
5219	0.	1.	1
5218	0.	1.	1
5220	0.	1.	1
5240	0.	1.	1
5242	0.	1.	1
5188	0.	1.	1
5187	0.	1.	1
5275	0.	1.	1
5658	0.	1.	1
5609	0.	1.	1
6021	0.	1.	1
6022	0.	1.	1
6023	0.	1.	1
6024	0.	1.	1
6025	0.	1.	1
6026	0.	1.	1
5774	0.	1.	1
5775	0.	1.	1
5776	0.	1.	1
5779	0.	1.	1
5780	0.	1.	1
5781	0.	1.	1
5365	0.	1.	1
5307	0.	1.	1
5112	0.	1.	1
5368	0.	1.	1
5178	0.	1.	1
5659	0.	1.	1
99999			

. DADOS COMPLEMENTARES DE GERAÇÃO MÍNIMA E MÁXIMA DE POTÊNCIA REATIVA

DGLM

. UHE SUL (MÍN. 0 > MÁX. 95%)

(Num)	(Qmn)	(Qmx)	(Qmn)	(Qmx)
1864	-22	22	-22	22
800	-800	800	-800	800
804	-132	136	-132	136
806	-58	58	-58	58
808	-600	600	-600	600
810	-400	532	-400	532
904	-475	475	-475	475
915	-516	465	-516	465
917	-100	76	-100	76
919	-116	216	-116	216
921	-124	170	-124	170
925	-440	420	-440	420
931	-36	36	-36	36
983	-173	135	-173	135
1070	-380	380	-380	380
1150	-228	228	-228	228
1155	-240	244	-240	244
1157	-291	291	-291	291
1159	-86	60	-86	60
1162	-48	78	-48	78
1166	-45	63	-45	63
1168	-56	60	-56	60
1175	-62	90	-62	90
1176	-66	52	-66	52
2475	-58	58	-58	58
2836	-85	59	-85	59
2863	-88	88	-88	88
9218	-72	104	-72	104
9220	-32	50	-32	50
9735	-73	73	-73	73
9356	-140	140	-140	140

. UTE SUL (INFLEXIBILIDADE)

(Num)	(Qmn)	(Qmx)	(Qmn)	(Qmx)
901	-26	36	-26	36
907	-26	48	-26	48
909	-18	72	-18	72

911	-32	180	-32	180
913	-80	195	-80	195
1170	0	1	0	1
1172	-56	188	-56	188
1173	-50	214	-50	214
802	0	1	0	1
803	0	1	0	1
900	0	1	0	1
923	0	1	0	1
924	0	1	0	1
927	0	1	0	1
928	0	1	0	1
929	0	1	0	1
1152	0	1	0	1
1169	0	1	0	1
1164	0	1	0	1
1165	0	1	0	1

. UHE SUDESTE (MÍN. 0 > MÁX. 95%)

(Num)	(Qmn)	(Qmx)	(Qmn)	(Qmx)
12	-540	420	-540	420
14	-150	150	-150	150
16	-720	480	-720	480
18	-546	600	-546	600
20	-640	640	-640	640
21	-80	84	-80	84
22	-120	126	-120	126
24	-24	62	-24	62
28	-100	100	-100	100
35	-180	180	-180	180
36	-570	570	-570	570
250	-85	230	-85	230
253	-25	80	-25	80
255	-20	70	-20	70
257	-28	70	-28	70
296	-25	25	-25	25
300	-440	392	-440	392
301	-140	140	-140	140
302	-150	150	-150	150
303	-600	600	-600	600
304	-90	90	-90	90
305	-120	120	-120	120
306	-68	68	-68	68
312	-120	120	-120	120
317	-20	20	-20	20
343	-70	70	-70	70
400	-102	87	-102	87
401	-237	217	-237	217
407	-96	86	-96	86
500	-540	540	-540	540
501	-1000	1000	-1000	1000
502	-576	576	-576	576
503	-96	96	-96	96
505	-72	72	-72	72
511	-72	72	-72	72
506	-45	38	-45	38
507	-308	308	-308	308
508	-18	24	-18	24
509	-24	30	-24	30
510	-630	630	-630	630
512	-36	36	-36	36
513	-240	240	-240	240
514	-200	200	-200	200
515	-46	46	-46	46
516	-56	56	-56	56
517	-54	54	-54	54
518	-144	144	-144	144
519	-141	141	-141	141
520	-250	250	-250	250
521	-50	50	-50	50
522	-68	68	-68	68
523	-17	17	-17	17
524	-23	23	-23	23
525	-18	11	-18	11
526	-52	39	-52	39
614	-50	39	-50	39
750	-16	16	-16	16
751	-50	50	-50	50

752	-25	25	-25	25
753	-105	105	-105	105
754	-90	80	-90	80
1107	-2680	3060	-2680	3060
1496	-125	102	-125	102
1501	-44	44	-44	44
1502	-208	160	-208	160
1511	-20	20	-20	20
1559	-154	100	-154	100
1594	-40	37	-40	37
1599	-58	58	-58	58
2031	-23	22	-23	22
2600	-60	60	-60	60
2601	-15	15	-15	15
2602	-8	8	-8	8
2696	-25	25	-25	25
3014	-103	103	-103	103
3641	-48	48	-48	48
3642	-32	32	-32	32
3744	-15	15	-15	15
3964	-294	153	-294	153
3968	-118	118	-118	118
4016	-24	24	-24	24
4039	-47	52	-47	52
4042	-210	109	-210	109
4044	-142	59	-142	59
4052	-57	57	-57	57
4054	-57	57	-57	57
4064	-189	143	-189	143
4068	-82	60	-82	60
4520	-58	60	-58	60
4523	-42	30	-42	30
4525	-74	48	-74	48
4804	-86	59	-86	59
4809	-86	59	-86	59
4831	-20	20	-20	20
4846	-20	20	-20	20
4890	-128	128	-128	128
4891	-16	16	-16	16
6831	-24	24	-24	24
6891	-70	105	-70	105
9442	-65	65	-65	65
9443	-46	46	-46	46
9446	-52	52	-52	52
9447	-34	34	-34	34
9448	-32	32	-32	32
9449	-44	44	-44	44
9500	-148	148	-148	148
9503	-16	16	-16	16
2948	-24	24	-24	24
. UTE SUDESTE (INFLEXIBILIDADE)				
(Num)	(Qmn)	(Qmx)	(Qmn)	(Qmx)
403	0	1	0	1
404	0	1	0	1
405	0	1	0	1
406	0	1	0	1
1585	0	1	0	1
1586	0	1	0	1
3962	-210	360	-210	360
3963	-110	180	-110	180
3974	0	1	0	1
3977	0	1	0	1
3978	0	1	0	1
4100	-19	19	-19	19
4180	-19	19	-19	19
4203	-122	154	-122	154
4204	-79	110	-79	110
4205	-61	76	-61	76
4206	-122	154	-122	154
4207	-122	154	-122	154
4208	-61	76	-61	76
4300	-57	57	-57	57
4301	-57	57	-57	57
8906	-88	88	-88	88
4596	0	1	0	1
4597	0	1	0	1
9026	-151	151	-151	151

9628	-72	72	-72	72
9627	-136	136	-136	136
32	-90	110	-90	110
. UTN SUDESTE (ANGRA I)				
(Num)	(Qmn)	(Qmx)	(Qmn)	(Qmx)
10	-211	414	-211	414
11	-600	600	-600	600
. UHE NORTE (MÍN. 0 > MÁX. 95%)				
(Num)	(Qmn)	(Qmx)	(Qmn)	(Qmx)
4462	-105	150	-105	150
4492	-530	755	-530	755
5595	-528	528	-528	528
6419	-525	525	-525	525
6420	-315	315	-315	315
6422	-420	420	-420	420
6424	-472	472	-472	472
6425	-826	826	-826	826
7110	-300	165	-300	165
7206	-285	285	-285	285
6729	-1395	1470	-1395	1470
. UHE NORDESTE (MÍN. 0 > MÁX. 95%)				
(Num)	(Qmn)	(Qmx)	(Qmn)	(Qmx)
5006	-27	36	-27	36
5009	-39	23	-39	23
5010	-39	23	-39	23
5011	-39	25	-39	25
5012	-67	54	-67	54
5013	-67	54	-67	54
5014	-67	54	-67	54
5015	-288	194	-288	194
5016	-288	194	-288	194
5022	-1380	1230	-1380	1230
5030	-86	96	-86	96
5032	-86	96	-86	96
5051	-360	375	-360	375
5054	-360	375	-360	375
5061	-1320	1038	-1320	1038
5520	-52	52	-52	52
5522	-80	74	-80	74
5888	-101	78	-101	78
5975	-321	192	-321	192
6294	-408	582	-408	582
. UTE NORDESTE (INFLEXIBILIDADE)				
(Num)	(Qmn)	(Qmx)	(Qmn)	(Qmx)
5151	-128	223	-128	223
5154	-107	150	-107	150
5466	0	1	0	1
5654	-79	158	-79	158
5655	-48	76	-48	76
5660	0	1	0	1
5770	0	1	0	1
5827	0	1	0	1
5978	0	1	0	1
5764	0	1	0	1
5134	0	1	0	1
5557	0	1	0	1
5558	0	1	0	1
6447	0	1	0	1
6448	0	1	0	1
5762	0	1	0	1
5820	0	1	0	1
5823	0	1	0	1
5219	0	1	0	1
5218	0	1	0	1
5220	0	1	0	1
5240	0	1	0	1
5242	0	1	0	1
5188	0	1	0	1
5187	0	1	0	1
5275	0	1	0	1
5658	0	1	0	1
5609	0	1	0	1
6021	0	1	0	1
6022	0	1	0	1
6023	0	1	0	1
6024	0	1	0	1
6025	0	1	0	1

```

6026      0      1      0      1
5774      0      1      0      1
5775      0      1      0      1
5776      0      1      0      1
5779      0      1      0      1
5780      0      1      0      1
5781      0      1      0      1
5365      0      1      0      1
5307      0      1      0      1
5112      0      1      0      1
5368      0      1      0      1
5178      0      1      0      1
5659      0      1      0      1
99999
.
. DADOS DE BARRAS PV CUJAS TENSÕES PODEM SER ALTERADAS NA OTIMIZAÇÃO
. 00000 SIGNIFICA QUE O PROGRAMA PODE UTILIZAR TODAS AS BARRAS DO TIPO PV
. E QUE TODOS OS GERADORES DEVEM OBEDECER UMA LÓGICA DE CONTROLE REMOTO
. CAMPO S DEVE SER PREENCHIDO COM A LETRA R P/ ESPECIFICAR QUE O GERADOR
. DEVE OBEDECER A LÓGICA DE CONTROLE REMOTO
DVGE
(Num)   S
00000
99999
.
. DADOS DE GERAÇÃO MÍNIMA E MÁXIMA DE COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE REATIVO
DLCE
(Num)   (Qmn) (Qmx)
99999
.
. DADOS DE LTC CUJOS TAPES PODEM SER ALTERADOS NA OTIMIZAÇÃO
. SE ESTE CÓDIGO ESTIVER COMENTADO SIGNIFICA QUE O PROGRAMA UTILIZARÁ
. O CONTROLE DE TODOS OS TRANSFORMADORES DEFINIDOS COMO LTC NO ANAREDE
.DLTC
.(De ) (Pa ) Nc (Tmn) (Tmx) S (Bc )
.99999
.
. DADOS DE CIRCUITOS CUJOS FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA DEVEM SER OTIMIZADOS
DVES
( (De ) (Pa )Nc (De ) (Pa )Nc (De ) (Pa )Nc Tot (Lmin.) (Lmax.)
  546  865  1
  551  1029 1
  553  1028 1
  615  884  1
  613  876  1
  613  876  2
  627  827  1
  1086 978  1
  122  125  1
  122  130  1
  556  1027 1
  9435 896  1
  66   999  1
  66   999  2
  6609 115  1
  66   999  3
99999
.
. DADOS DE ÁREAS DE MONITORACAO E CONTROLE
. ÁREA DE MONITORAÇÃO: SERÃO OBSERVADAS AS FAIXAS DE TENSÃO NAS BARRAS
. LIMITES DE CARREGAMENTO NOS CIRCUITOS E RESTRIÇÕES DE FATOR DE POTÊNCIA
. ÁREA DE CONTROLE: ÁREAS ONDE OS CONTROLES PODERÃO SER OTIMIZADOS
.
DRMI
(Ar (Ar (Ar (Ar (Ar (Ar
199
99999
DRCC
(Ar (Ar (Ar (Ar (Ar (Ar
1
2
3
4
6
7
8
9

```

10
11
12
13
14
15
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
51
52
53
54
55
56
57
58
59
61
62
63
64
66
68
70
71
72
73
75
80
81
82
85
86
91
124
126
199
99999
.
RELA RLIN RVAR RGER RLMB
.
FIM