Campus de São Carlos

UM ESTUDO PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE POTÊNCIA REATIVA
UTILIZANDO O MÉTODO DOS MULTIPLICADORES DE LAGRANGE

Autor

MARCOS PEREIRA

Orientador

Prof. Dr. Gereldo Roberto Martins da Costa

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica

Um Estudo para Alocação Ótima de Potência Reativa
Utilizando o Método dos Multiplicadores de Lagrange

Marcos Pereira

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036116

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Roberto M. da Costa

São Carlos
1995

Class.	Tese - EESC
Cutt.	4341
Tombo	010/96

Eletridade

At 0744239

✓

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

Pereira, Marcos

P436e Um estudo para alocação ótima de potência reativa
utilizando o método dos multiplicadores de Lagrange /
Marcos Pereira. -- São Carlos, 1995.
69p.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1995.
Orientador: Prof. Dr. Geraldo Roberto M. da Costa

1. Otimização. 2. Alocação ótima de reativos. 3.
Multiplicadores de Lagrange. 4. Fluxo de carga ótimo.
5. Sistemas elétricos de potência. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 14-11-1995
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA - Orientador
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor TAKAAKI OHISHI
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)

Engenheiro PAULO ROBERTO EIRAS DA SILVA
(Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG)

Presidente da Comissão de Pós-Graduação
Prof. Dr. MOUNIR KHALIL EL DEBS

Coordenador da Área - Engenharia Elétrica
Prof. Dr. GERALDO ROBERTO M. DA COSTA

*Aos meus pais,
Josefa e Durvalino,
meus primeiros educadores.*

Agradecimentos

Ao professor Dr. Geraldo Roberto Martins da Costa, pela ótima orientação e pelos diálogos, importantes para a motivação e desenvolvimento do trabalho

À secretaria de Pós-Graduação e a todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP/São Carlos pela colaboração.

Aos colegas de graduação e pós-graduação pela amizade e auxílio, quando necessário, para realização deste trabalho.

À FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Auxílio à Pesquisa - processo nº 94/5793-6.

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - pela bolsa de estudo fornecida como apoio.

À Ana Lúcia pela revisão gramatical.

Sumário

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
RESUMO.....	x
<i>ABSTRACT</i>	xi
1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Organização do trabalho.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	17
3. ELEMENTOS PARA O ESTUDO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE REATIVOS.....	28
3.1 Fluxo de Carga.....	29
3.2 O problema de planejamento de reativos.....	33
3.3 O Método Simplex.....	35
3.4 O Método dos Multiplicadores.....	39

4. TESTES E RESULTADOS.....	50
4.1 Introdução.....	50
4.2 Procedimentos seguidos para utilização do método Simplex.....	51
4.3 Procedimentos seguidos na utilização do método dos Multiplicadores.....	52
4.4 Sistema de 14 barras.....	53
4.5 Sistema de 30 barras.....	58
5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.....	65
BIBLIOGRAFIA.....	67
APÊNDICE 1.....	1
APÊNDICE 2.....	14

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Convenção de sinais para fluxos de carga ativa e reativa.....	29
Figura 4.1 - AEP14.....	53
Figura 4.2 - AEP30.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dados de barra do sistema AEP14.....	54
Tabela 4.2 : Dados de linha do sistema AEP14.....	55
Tabela 4.3 : Fontes reativas alocadas por barra em MVAR.....	57
Tabela 4.4: Perdas de potência ativa (MW) do sistema AEP14.....	58
Tabela 4.5 - Dados de barra do sistema AEP30.....	60
Tabela 4.6 : Dados de linha do sistema AEP30.....	61
Tabela 4.7 : Fontes reativas alocadas por barra em MVAR.....	63
Tabela 4.8: Perdas de potência ativa (MW) do sistema AEP30.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS

α_{km}	-relação entre as magnitudes das tensões dos nós terminais k e m do transformador ideal
b_{km}	-susceptância série
b_{km}^{sh}	-susceptância shunt
g_{km}	-condutância série
nb	-número de barras da rede elétrica
nbc	-número de barras de carga da rede elétrica
nbc_r	-número de barras de controle de reativos da rede elétrica
nbg	-número de barras de geração da rede elétrica
nl	-número de linhas de transmissão da rede elétrica
nt	-número de transformadores com tap variável
P_i	-injeção líquida de potência ativa na barra i
P_i^e	-potência ativa especificada na barra i
P_{fi}	-maior fluxo de potência ativa no ramo i
Q_{fkl}	-fluxo de potência reativa da barra k para a barra l
Q_{fkl}	-fluxo de potência reativa da barra l para a barra k
Q_i	-injeção líquida de potência reativa na barra i
Q_i^e	-potência reativa especificada na barra i
t	-vetor dos taps dos transformadores
V	-vetor das magnitudes das tensões

θ	-vetor dos ângulos das tensões
λ	-vetor dos multiplicadores de Lagrange para restrições de igualdade
μ	-vetor dos multiplicadores de Lagrange para restrições de desigualdade
ν	-vetor do fator de penalidade associado às restrições violadas
θ_{km}	-abertura angular das tensões das barras terminais do ramo k-m
φ_{km}	-ângulo introduzido pelo defasador entre os terminais k e m

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a alocação de fontes de reativos em sistemas de energia elétrica. A metodologia é baseada no multiplicador de Lagrange, o qual indica a sensibilidade entre a função objetivo perdas de potência ativa na transmissão, e as restrições injeções de potência reativa. Os multiplicadores de Lagrange são obtidos impondo-se as condições de estacionaridade à função Lagrangeana Aumentada, a qual é associada ao problema de Fluxo de Carga Ótimo. A metodologia é comparada com o método Simplex e com o sistema original. Testes foram realizados com os sistemas AEP14 e AEP30 que mostraram a eficiência da metodologia.

PALAVRAS-CHAVES

Otimização, alocação ótima de reativos, multiplicadores de Lagrange, fluxo de carga ótimo, sistemas elétricos de potência.

ABSTRACT

This work presents a methodology for the allocation of reactive sources in electrical power systems. The methodology is based on Lagrange's multiplier that points out the sensibility between the objective function - transmission active power loss and the constraints reactive power injections. The Lagrange's multipliers are obtained by imposing the conditions of stationarity at Augmented Lagrangeana function, that is connected to the Optimal Load Flow problem. The methodology is compared with the Simplex method and the original system. Tests were carried out with AEP14 and AEP30 systems, that showed the efficiency of the methodology.

KEYWORDS

Optimization, reactive optimal allocation, Lagrange's multiplier, optimal load flow, power electrical systems.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Entre as formas de energia conhecidas a elétrica é uma das mais utilizadas no mundo. Por esse motivo verifica-se o alto grau de importância dado ao controle e aos projetos de sistemas elétricos de potência, que devem garantir eficiência, segurança e confiabilidade a estes sistemas. Durante muito tempo, a potência reativa vem sendo um fator importante no projeto e operação de sistemas elétricos de potência. A potência reativa é influenciada pela potência ativa devido à ligação de ambas com a tensão do sistema. Esta influência é tanto maior quanto menor for a tensão do sistema. O despacho de potência ativa é controlável e tem uma influência sobre a potência reativa. Neste trabalho vamos considerar que o despacho de potência ativa é resolvido por outro algoritmo antes de considerarmos o despacho de potência reativa, isto é, as variáveis associadas à potência ativa serão mantidas constantes durante o estudo.

O controle de potência reativa é de fundamental importância na qualidade do

fornecimento de energia aos consumidores. A busca da qualidade leva às seguintes conseqüências:

- minimização do fluxo de carga reativa total no sistema para melhorar o fator de potência;
- utilização de dispositivos de compensação, como os capacitores, reatores, capacitores em série, compensadores síncronos e compensadores estáticos, para resolver problemas de estabilidade e controle de tensão, causados pela exploração de recursos hidráulicos situados em locais distantes de fontes consumidoras, o que torna necessário o uso de linhas longas, as quais percorrem espaços físicos desfavoráveis às suas sustentações. Estas linhas, sem compensação com capacitores em série e reatores, sofrem os efeitos da indutância e da capacitância, apresentando tensões diferentes nos terminais receptores e transmissores. A indutância e a capacitância, em linhas de transmissão, são proporcionais ao comprimento da linha.

O uso crescente de aparelhos eletrônicos e aparecimento de indústrias de processo-contínuo exige a qualidade de fornecimento de energia; o controle de potência reativa mantém a qualidade de fornecimento de energia pela prevenção de distúrbios, tais como distorções de frequência e especialmente de tensão, as quais são indesejáveis para as cargas; devido às variações fortes e rápidas na demanda de potência reativa, certas indústrias necessitam de equipamentos de estabilização de tensão que supram as cargas, na forma de compensadores estáticos de potência reativa.

A potência reativa é consumida pela maioria dos elementos da rede elétrica e pelas cargas consumidoras ligadas à rede. Logo, há necessidade de suprir o sistema com potência reativa. Na dificuldade de transmissão de potência reativa, deve-se gerar a mesma onde for necessário. O nível de tensão em condições inaceitáveis, isto é, fora dos limites de tensão estabelecido para o sistema, indicam a necessidade de injeção de potência reativa. Observa-se então, a presença de compensadores, que compõe-se de indutores e capacitores, os quais são responsáveis pelo controle da tensão e gerenciamento da potência reativa.

A potência reativa está fortemente relacionada com a tensão. Uma diferença de tensão entre os pontos transmissor e receptor é necessária para a transmissão de potência reativa. A tensão deve ser suficientemente alta para suportar as cargas e suficientemente baixa para não danificar os equipamentos. Para que se mantenha o nível de tensão de um sistema de energia elétrica em patamares aceitáveis, na ocorrência ou não de contingências, utiliza-se do controle da potência reativa, na tentativa de trazer as tensões violadas de volta aos seus limites. A forma mais comum é determinar a quantidade de fontes geradoras de potência reativa a serem instaladas em determinados locais do sistema.

Não se pode limitar apenas a alocação de reativos para resolver os problemas que ocorrem em um sistema de energia elétrica. Por meio de um planejamento mais amplo pode-se determinar a adição de novas unidades geradoras, a construção de novas linhas de transmissão e/ou subestações, o controle de 'taps' aproveitando-se todos os recursos que o sistema possui e pode receber. Além do compromisso com o planejamento, deve-se

ressaltar a otimização das informações adquiridas. Por exemplo, na alocação de fontes reativas, deve-se considerar as melhores barras a receberem as fontes, a quantidade ótima de reativos em suas respectivas barras, levando-se em conta o custo da instalação de novas fontes geradoras de potência reativa, a segurança e a confiabilidade do sistema planejado. Na distribuição da potência reativa, no sistema de maneira ótima, manipulam-se as variáveis de controle, como os 'taps' de transformadores, a tensão dos geradores, os bancos de capacitores, os indutores e os compensadores síncronos (fontes de potência reativa). A faixa de atuação dessas variáveis tem limites bem definidos.

A utilização do controle da potência reativa tem sua importância aumentada pela pressão crescente para melhorar a capacidade de transmissão e pelo desenvolvimento de novos tipos estáticos de compensadores controláveis de potência reativa.

Vários estudos vêm sendo realizados para melhorar o desempenho do sistema de energia elétrica, utilizando o controle de potência reativa. Uma forma científica empregada é a utilização de métodos de otimização. No caso de utilização dos métodos de otimização por engenheiros de sistemas de potência, pode-se otimizar a alocação de fontes reativas no sistema.

Neste trabalho, o objetivo é a determinação das barras candidatas à alocação de fontes de reativos. Para tanto, o problema foi associado à uma função Lagrangeana aumentada, a qual associa a todas as restrições (de igualdade e desigualdade) um multiplicador de Lagrange. Com o valor dos multiplicadores de Lagrange, podemos

determinar as barras candidatas à alocação de fontes de reativos. Testes de alocação foram realizados e comparados com os resultados obtidos do método Simplex da Programação Linear.

1.1) Organização do trabalho

No capítulo 2, são apresentados alguns trabalhos relacionados com alocação ótima de reativos cada qual utilizando técnicas diferenciadas no processo de alocação.

No capítulo 3, tem-se as ferramentas matemáticas para o estudo do problema de planejamento de reativos. Essas ferramentas são o Fluxo de Carga, o método Simplex e o método dos multiplicadores.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos, empregando-se os métodos dos multiplicadores e Simplex, os quais são comparados com o problema original. Os sistemas elétricos utilizados para testes foram os sistemas AEP14 e AEP30.

No capítulo 5, encontra-se os resultados e comentários dos testes realizados.

Nos Apêndices 1 e 2, são apresentados os dados de entrada e saída dos sistemas AEP14 e AEP30.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A potência reativa tem sido considerada um fator fundamental no planejamento e operação dos sistemas de energia elétrica. O planejamento de reativos busca determinar a quantidade e os locais das fontes de reativos como: capacitores, reatores e compensadores síncronos, que associados com as fontes existentes melhoram o desempenho da tensão, em condições normais ou de contingências.

No início, o planejamento de reativos era resolvido usando o método de tentativa-e-erro. Neste método, o engenheiro (de planejamento) do sistema estudava o problema com a ajuda do programa de Fluxo de Carga. Ele analisava os resultados de um Fluxo de Carga, alocava os reativos e novamente processava o programa de Fluxo de Carga. O processo continuava até que os objetivos do operador fossem atingidos. A experiência do operador, adquirida pelo manuseio constante de programas de Fluxo de Carga, indicaria onde alocar as fontes de reativos. Atualmente, o problema de alocação de potência reativa é definido

como um problema de otimização. Muitas são as abordagens empregadas para a resolução do problema, entre elas podemos citar: a decomposição de Benders, os Sistemas Especialistas, a Programação Linear, a Programação Não Linear, a Programação Linear Inteira Mista, a Programação Não Linear Inteira Mista.

A seguir apresentaremos alguns trabalhos publicados, que abordam o tema planejamento de reativos em sistemas de energia elétrica, os quais são de interesse para nossa pesquisa.

Kishore e Hill [1] utilizaram o modo de otimização estática (um caso especial da otimização dinâmica). Para o problema de otimização, obtiveram as limitações dos equipamentos instalados e de operação do sistema e definiram as restrições do problema. Este fornece a quantidade de potência reativa e as localizações das barras a receberem tais reativos, satisfazendo as restrições de operação de igualdade e desigualdade, enquanto minimiza a função objetivo.

O programa de Fluxo de Carga foi executado para analisar as restrições das tensões do sistema. A Programação Linear foi utilizada baseando-se na relação de sensibilidade entre a magnitude de tensão e a produção de potência reativa. A maioria dos sistemas elétricos contínuos podem ser linearizados se as mudanças nas variáveis são suficientemente pequenas. Quanto maior a não linearidade do sistema mais dependente do ponto de operação será a sensibilidade, tendo em vista que, apenas pequenas alterações nas variáveis podem ser realizadas para obtenção das soluções dos problemas.

Outras variáveis de operação foram consideradas e puderam influenciar no nível

de tensão das barras de carga, como os geradores e os transformadores com mudanças de 'taps'. Mudanças nas variáveis de operação resultam em mudanças nas variáveis controladas, portanto, mesmo que as tensões estejam dentro dos limites, é necessário verificar se o fornecimento de reativos pelos geradores não está fora dos limites especificados aos mesmos.

Os autores desse trabalho utilizaram um sistema simples que, quando linearizado, apresenta resultados satisfatórios. Porém, a abordagem não é suficiente para grandes sistemas.

O trabalho de Sachdeva e Billinton [2] tem a preocupação de manter o nível de tensão do sistema dentro dos limites por meio de alocação de reativos, em condições normais ou de contingências. Essa preocupação é maior do que a preocupação com a redução de perdas. O sistema foi resolvido como um problema não-linear. A alocação de reativos consiste na avaliação da quantidade e dos locais para instalar o mínimo de compensadores estáticos ou síncronos.

O método utiliza todas as vantagens associadas à variação do fluxo de carga ativa e reativa, às variações do ângulo de fase e tensão e posição do 'tap', e aos mínimos VAR extras, requeridos pelos capacitores da rede.

O compromisso com a segurança e com a economia na alocação define o estado do sistema. Na construção do modelo matemático para o problema de planejamento de VAR, são envolvidas todas as variáveis do sistema que precisam ser otimizadas.

Para otimizar problemas de planejamento de VAR de grandes dimensões, utilizando a técnica de Programação Não Linear, empregou-se a conversão das restrições

do problema, numa sequência de problemas de minimizações irrestritas pela penalização da função objetivo, com as restrições violadas, e encontrou-se o mínimo de novas funções irrestritas. Para obter essas funções irrestritas, foi empregada a técnica do Gradiente Conjugado de Fletcher-Powell e Fletcher-Reeve. Essa técnica foi aplicada para resolver a compensação de fontes reativas enquanto minimiza o número total de unidades de capacitores em série.

Para diminuir o tempo e a quantidade de memória computacional, foi utilizada a técnica de decomposição.

Happ e Wirgau [3] utilizaram a Programação Linear. Apresentaram como função objetivo a minimização de perdas, usando o método Simplex Revisado de Dantzig. Empregaram matrizes Jacobianas esparsas e o método Desacoplado Rápido. Para otimização dos problemas, utilizaram as otimizações estática e dinâmica com dispositivos de VAR estático, incluindo simulações dinâmicas para confirmar satisfatoriamente o desempenho do sistema. Houve, num primeiro estágio, alocação de VAR para controlar as tensões e, após testes de desempenho de estabilidade do sistema, foram alocados VAR de forma a melhorar o desempenho econômico.

Happ e Wirgau não aplicaram o Fluxo de Carga Ótimo porque o problema considerado não o exigiu. Na avaliação do desempenho de estabilidade de sistemas, pode ser necessário o julgamento de um engenheiro experiente para determinar os períodos de simulação e modificações nos sistemas considerados.

Hobson [4] buscou o controle de reativos como função objetivo, utilizando a

Programação Linear. Na utilização de técnicas de sensibilidade, ele empregou a que determina quais restrições podem ser liberadas nos seus limites, de forma a corrigir as restrições violadas. Se necessário, mudanças de 'tap' devem ser feitas para controle da potência reativa.

No uso de Programação Linear com objetivo de minimização de perdas, Mamandur e Chenoweth [5] fizeram a linearização do problema, utilizando o método de Newton-Haphson. Empregaram a matriz Jacobiana, pois a mesma possui injeções de potências ativa e reativa aplicadas nas mudanças de tensão e ângulo das barras. Todos os elementos da matriz Jacobiana são utilizados para calcular as relações de sensibilidade. A inversão por triangularização da matriz Jacobiana e a divisão da mesma em partes determinam a sensibilidade do sistema. A linearização da função objetivo perdas de potência ativa na transmissão exige aproximações que comprometem os resultados do problema.

Fernandes et al. [6] apresentaram um trabalho no qual o tempo de execução computacional é um pouco menor que aquele obtido pelo programa de Fluxo de Carga convencional e os problemas de multi-contingência são resolvidos sem a eliminação de barras. Eles exploraram uma estrutura especial das equações da rede. Na elaboração da estrutura especial de planejamento de VAR apoiaram-se em duas propriedades fundamentais para sistemas de grande escala:

- os efeitos da interação entre as potências ativa e reativa são pequenos e, portanto, desprezados;

- na região de interesse, a relação entre a potência reativa e magnitude de tensão é próxima à linear.

Os autores utilizaram a linearização tipo Newton-Raphson e a matriz Jacobiana [5]. A estrutura da matriz Jacobiana é esparsa e simétrica e tem resultados exatos no ponto de operação. A matriz Jacobiana esparsa permite a otimização de VArS existentes (tais como 'taps' de transformadores e geradores) junto à minimização de investimentos de novos VArS.

Não é necessário criar as restrições para todos os casos de contingência, uma vez que elas podem ser derivadas das restrições do caso base. Isso evita um enorme programa de otimização.

Antes da otimização multi-contingência começar, o problema passa por um processo, denominado 'pre-processor', que faz com que o sistema seja convergente, ou seja, traz o sistema para o ponto onde o Fluxo de Carga convergirá para uma solução fisicamente realizável. Por meio de um programa de Fluxo de Carga convencional, obtêm-se os casos divergentes e determina-se o mínimo suporte de potência reativa para fazer os casos convergentes.

O procedimento para o planejamento pode ser explicado em três etapas:

- 1^a obtenção das soluções do fluxo de potência convergente para todos os casos bases e contingências;
- 2^a obtenção do mínimo de compensação reativa, necessária para corrigir todos os problemas de tensão, para as condições de carga em todos os casos base e contingência;
- 3^a Determinar a mínima compensação, adicionada na etapa anterior, que deve ser

excluída para fazer com que os limites superiores de todas as barras de carga sejam válidos.

Sabe-se que os capacitores não são variáveis contínuas e sim discretas e o método da Programação Linear exige funções contínuas. Para resolver esse problema, os autores utilizaram um procedimento de solução próximo do ótimo que pode fornecer uma solução discreta próxima à solução ótima.

Iyer et al. [7] empregaram a Programação Linear Inteira Mista para evitar o ‘zig-zag’ da solução próximo ao ponto ótimo, buscando a minimização de perdas. Dividiram o problema em subproblemas usando a técnica de Decomposição de Benders. Um subproblema é baseado na Programação Inteira com variáveis binárias e outro na Programação Linear. A alocação ótima foi coordenada com a variação da tensão do gerador, ‘taps’ de transformadores e número de capacitores em cada banco.

Lebow et al. [8] utilizaram a Programação Não Linear Inteira Mista, considerando o custo de instalação de VAR numa barra em duas componentes, uma fixa e outra variável. A Programação Não Linear Inteira Mista apresenta dois níveis para realização de alocação de fontes de reativos: o nível 1 possui o programa de Fluxo de Carga Ótimo e o nível 2 a Programação Linear Inteira Mista. Como o definido por Sachdeva e Billinton [2], a alocação de reativos consiste na avaliação da quantidade e dos locais para instalar o mínimo de compensadores estáticos ou síncronos. A separação das funções Linear Inteira Mista e Não Linear foi realizada pela técnica de Decomposição Generalizada de Benders. Os autores fazem distinção entre a minimização de perdas e os problemas operacional e de

planejamento.

No nível 1, Lebow et al. utilizaram o MINOS/aumentado que implementa, com muita eficácia, uma técnica da Lagrangeana Aumentada. Neste nível, o programa apresenta uma deficiência: quando o problema é infactível o programa se satisfaz e pára, ou seja, considera o problema resolvido.

Iba et al. [9] apresentaram um algoritmo de Programação Linear básico que procura tanto a minimização das perdas quanto a do custo de investimento, procurando encontrar uma solução ótima que satisfaça o sistema e seja de convergência rápida.

As principais características matemáticas do algoritmo são:

- emprego de todos os elementos da matriz Jacobiana [5];
- a obtenção das perdas do sistema, a partir das novas restrições para as barras (exceto a 'slack')
- a utilização da esparsidade das matrizes Jacobiana e sensibilidade.

O uso do Fluxo de Carga baseia-se no método Newton-Raphson [6]. A função objetivo é dividida em duas partes, uma representa o efeito de reduções nas perdas de potência e a outra o efeito de reduções no custo de investimento de novos bancos de capacitores ou de reatores. A otimização consiste em minimizar o gasto total anual ao invés de minimizar o custo de investimento. Para melhorar a convergência e definir as perdas do sistema, acrescenta-se novas restrições de potência ativa. Os bancos já existentes no sistema e a instalação de novos bancos podem causar 'zig-zag' numérico nas mudanças de custo da função objetivo, portanto, para evitar o 'zig-zag' separam-se os bancos já existentes e dos novos bancos respectivamente para cada subestação.

Esse trabalho adiciona VAR em poucas barras. Se a solução inicial do Fluxo de Carga for muito distante da solução ótima, a convergência pode levar a uma solução local infactível.

Aoki et al. [10] utilizaram a Programação Linear Inteira Mista resultante de uma linearização aproximada da Programação Não Linear Inteira Mista. Com isto, puderam considerar os capacitores como sendo discretos e ajustáveis em sistemas de escala real. A função objetivo é minimizar o custo de instalação de novas unidades de capacitores. Na resolução de um problema de Programação Não Linear Inteira Mista, o algoritmo explora o conceito de Programação Linear Recursiva pois dessa forma, é possível obter uma solução de Fluxo de Carga 'a.c.' do problema de planejamento de VAR.

Obadina e Berg [11] empregaram a Programação Não Linear Inteira Mista e, como Lebow et al. [8], consideraram o custo de instalação de VAR numa barra em duas componentes. Procuraram otimizar o número de barras candidatas a receberem VARs.

Atendendo ao conceito de colapso de tensão, utilizaram a margem de segurança, que determina se o sistema possui as tensões dentro de seus limites de estabilidade, indicando se o sistema está dentro dos níveis de tensão e segurança. A alocação de potência reativa aumenta a margem de segurança do sistema elétrico considerado.

Opoku [12] apresentou uma aproximação da formulação e nova metodologia de solução para o problema de planejamento de potência reativa. O tempo de trabalho

computacional foi reduzido e o modelo do sistema foi baseado numa matriz admitância esparsa reestruturada. Por essa matriz obtiveram-se os parâmetros de sensibilidade que geraram as restrições do problema. O autor utilizou a Programação Linear para obter a solução do problema. As principais diferenças entre esse trabalho e os anteriores são:

- a execução do Fluxo de Carga só ocorre quando se altera o padrão de geração e/ou padrão de carga;
- as mudanças na rede são verificadas via análise de contingência e não pelos cálculos de Fluxo de Carga;
- a utilização de uma técnica especial de Programação Linear Dual Simplex nos problemas de planejamento de Vars. Este método emprega o processo de relaxamento.

No desenvolvimento da função objetivo, que procura minimizar o custo de instalação de VARs e ações de controle, devem ser considerados os itens:

- antes de colocar novas fontes de VARs, deve-se verificar, entre todas as fontes de VARs já existentes, se algumas podem ser utilizadas;
- uma vez instaladas as novas fontes de VARs, as mesmas passam a ser fontes existentes para despachos;
- o custo de despacho das fontes de VARs é inferior ao custo de compra de novas fontes;
- Todas as variáveis do problema são contínuas.

Nos casos de não convergência do Fluxo de Carga, Opoku utilizou a técnica proposta por Fernandes [6] para obter a convergência.

O Fluxo de Carga emprega o método Desacoplado Rápido.

Losi et al. [13] apresentaram um método com filosofia de trabalho diferente dos trabalhos constantes nesta bibliografia. Este método consiste no gráfico de capacidade, o qual descreve o domínio de operações permissíveis do sistema elétrico, no plano da demanda das potências ativa total e reativa total. No caso de variações da carga, conceitos de confiabilidade e aproximação estocástica são adotados para permitir a descrição, pelos gráficos de capacidade, da possibilidade do sistema suprir a carga e avaliar a efetividade da compensação reativa.

Chen e Liu [14], como Obadina e Berg [11], trabalharam com uma margem de segurança para evitar o colapso de tensão. Acrescentaram ainda o desvio de tensão que procura estabelecer uma tolerância máxima de desvio. As restrições de carga são o balanço das equações de Fluxo de Carga de potências ativa e reativa de todas as barras do sistema elétrico. As restrições de operação consistem em um grupo de geradores de potências ativa e reativa, limites de 'taps' de transformadores controlados, limites de fluxo na linha, restrições de segurança em magnitude de tensão e limites da diferença angular da tensão entre duas barras. As restrições de expansão são os limites de instalação de novas fontes de VARs. A função objetivo é composta pelas perdas, pelo custo de investimento e pelos desvios de magnitude de tensão, sendo que as perdas e o custo devem ser minimizados (investigando como reduzir o risco de colapso de tensão no sistema) pela margem de segurança do sistema, tendo em vista a estabilidade da tensão estática.

Observa-se que todos esses trabalhos utilizaram o programa de Fluxo de Carga para determinar os valores iniciais das variáveis dos algoritmos ou um estado da rede.

Capítulo 3

ELEMENTOS PARA O ESTUDO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE REATIVOS

Neste capítulo, será apresentado o Fluxo de Carga, utilizado pela maioria dos estudos abordados no capítulo anterior, inclusive pelo processo de tentativa-e-erro. Também será apresentada uma abordagem da Programação Linear [15] e do Fluxo de Carga Ótimo. Este é resolvido pelo método de Newton Modificado associado à função Lagrangeana Aumentada [16]. Esta abordagem apresenta a vantagem de associar à todas as restrições, de igualdade e desigualdade, um multiplicador de Lagrange, cujo valor nos orientará na alocação das fontes de potência reativa.

3.1. Fluxo de Carga

O cálculo de Fluxo de Carga [17] em uma rede de energia elétrica, consiste essencialmente na determinação do estado da rede, na distribuição dos fluxos e em algumas outras grandezas de interesse. Neste tipo de problema, a modelagem é estática, ou seja, a rede é representada por equações e inequações algébricas. Esta representação deve considerar uma variação suficientemente lenta do tempo, para que os efeitos transitórios possam ser ignorados.

Na formulação básica do problema, uma formulação simples, a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como incógnitas.

Figura 3.1 - Convenção de sinais para fluxos de cargas ativa e reativa.

onde:

V_k - magnitude da tensão nodal (barra k),

θ_k - ângulo da tensão nodal,

P_k - geração líquida (geração menos carga) de potência ativa,

Q_k - injeção líquida de potência reativa.

Três tipos de barras são definidas de acordo com as variáveis nodais tomadas como dados e com as consideradas incógnitas:

PQ - barras de carga, são dados P_k e Q_k e calculados V_k e θ_k ;

PV - barras de controle de reativos, são dados P_k e V_k e calculados Q_k e θ_k ;

V θ - barra de referência, são dados V_k e θ_k e calculados P_k e Q_k .

As expressões gerais dos fluxos de cargas ativa (P) e reativa (Q), em linhas de transmissão, com transformadores em fase e defasadores puros, são obtidas através do princípio da conservação da potência e são dadas por:

$$\begin{aligned}
 P_{km} &= (\sigma_{km} V_k)^2 g_{km} - (\sigma_{km} V_k) V_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - \\
 &\quad (\sigma_{km} V_k) V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km}) \\
 Q_{km} &= - (\sigma_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + (\sigma_{km} V_k) V_m b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - \\
 &\quad (\sigma_{km} V_k) V_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde:

P_{km} : é o fluxo de carga ativa no ramo k-m;

Q_{km} : é o fluxo de carga reativa no ramo k-m;

σ_{km} : é a relação entre as magnitudes das tensões dos nós terminais k e m do transformador ideal;

g_{km} : é a condutância série;

b_{km} : é a susceptância série;

b_{km}^{sh} : é a susceptância shunt;

θ_{km} : é a abertura angular das tensões das barras terminais do ramo k-m;

φ_{km} : é o ângulo introduzido pelo defasador entre os terminais k e m.

No caso de linhas de transmissão, $\sigma_{km} = 1$ e $\varphi_{km} = 0$. Para transformadores em fase, $b_{km}^{sh} = 0$ e $\varphi_{km} = 0$. Para os defasadores puros, $b_{km}^{sh} = 0$ e $\sigma_{km} = 1$. Finalmente, para os defasadores, $b_{km}^{sh} = 0$.

Passando a expressão (1) para a forma matricial, tem-se:

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ Q_k &= V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \end{aligned} \quad (2)$$

Aplicando-se o método de Newton-Raphson ao Fluxo de Carga tem-se o desenvolvimento a seguir:

$$g(\underline{x}^v) = -J(\underline{x}^v)\Delta\underline{x}^v \quad (3)$$

A equação (3) na forma matricial é representada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta\underline{P}^v \\ \Delta\underline{Q}^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\underline{\theta}^v \\ \Delta\underline{V}^v \end{bmatrix} \quad (4)$$

O algoritmo da aplicação do método de Newton na resolução de problemas é dado a seguir:

- i) Fazer $v = 0$ e escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV ($\theta = \theta^0$) e as magnitudes das tensões das barras PQ ($V = V^0$);
- ii) Calcular $P_k(V^v, \theta^v)$ para as barras PQ e PV, e $Q_k(V^v, \theta^v)$ para as barras PQ, e determinar os resíduos ΔP_k^v e ΔQ_k^v ;
- iii) Testar convergência - se $\text{Max } \{|\Delta P_k^v|\} \leq \varepsilon_P$ e $\text{Max } \{|\Delta Q_k^v|\} \leq \varepsilon_Q$, o processo iterativo convergiu para a solução (V^v, θ^v); caso contrário passar para (iv);
- iv) Calcular a matriz jacobiana:

$$J(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{V}} \\ \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{V}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

- v) Determinar a nova solução ($\underline{V}^{v+1}, \underline{\theta}^{v+1}$):

$$\begin{aligned}\underline{\theta}^{v+1} &= \underline{\theta}^v + \Delta \underline{\theta}^v \\ \underline{V}^{v+1} &= \underline{V}^v + \Delta \underline{V}^v\end{aligned}\tag{6}$$

sendo $\Delta \theta^v$ e ΔV^v determinados, resolvendo-se o sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^v(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \\ \Delta \underline{Q}^v(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{V}} \\ \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{V}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^v \\ \Delta \underline{V}^v \end{bmatrix}\tag{7}$$

vi) Fazer $v + 1 \rightarrow v$ e voltar para o passo (ii).

O processo continua até que os erros da potência ativa e reativa estejam dentro de valores toleráveis. Também podemos incluir no algoritmo, limites de geração de potência reativa, limites de tensão e outros limites operacionais do sistema.

3.2. O problema de planejamento de reativos

O problema de planejamento de reativos pode ser dividido em planejamento de longo prazo e em planejamento de curto prazo. O planejamento de longo prazo tem como interesse a expansão do sistema e procura determinar a localização e a magnitude das fontes de reativos. O planejamento de curto prazo, próximo à

operação, passa a ser um problema de despacho de potência reativa ou de alocação de novas fontes, em locais praticamente definidos. Apesar da maioria dos controles de potência reativa serem discretos, neste trabalho serão considerados como contínuos.

O problema de planejamento de reativos é formulado como um problema de otimização, cuja função objetivo é minimizar os custos de instalação de novas unidades, minimizar as perdas de potência ativa na transmissão ou outra variável qualquer. As restrições devem satisfazer às equações de igualdade do fluxo de carga e os limites operacionais do sistema. Assim, o problema pode ser apresentado como:

$$\begin{aligned}
 &\min_x \quad f(x) \\
 &\text{s.a.} \quad g_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m < n \\
 &\quad \quad h_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, r \\
 &\quad \quad x_{\min} \leq x \leq x_{\max}
 \end{aligned} \tag{8}$$

onde:

$x \in \mathcal{R}^n$ tal que $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$ vetor das variáveis de estado e de

controle do sistema (t, V, θ) ;

$f(x)$ - função objetivo que representa o desempenho do sistema;

$g_i(x)$ - equações do fluxo de carga;

$h_j(x)$ - inequações funcionais do fluxo de carga;

$x_{\min}, x_{\max}$ - limites das variáveis de estado e controle.

As restrições de igualdade representam as equações do fluxo de carga e as restrições de desigualdade representam os limites de operação das variáveis de controle (limites mínimos e máximos das fontes P e Q, limites de tensão e 'tap' dos transformadores) e variáveis funcionais (fluxos nas linhas, etc.).

3.3 O Método Simplex

O método Simplex é um procedimento algébrico e iterativo que fornece a solução exata, se esta existir, de qualquer problema de Programação Linear (PPL), em um número finito de iterações. Também é capaz de indicar se o problema tem solução ilimitada, se não tem solução ou se possui infinitas soluções. Estas características do Simplex permitiram sua codificação em programas extremamente rápidos e eficientes, possibilitando a solução de sistemas com centenas de variáveis [18].

O método Simplex exige que um problema de PL esteja na forma [19]:

$$\begin{aligned} \min_x \quad & f(x) \\ \text{s.a.} \quad & g_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m < n \end{aligned} \quad (9)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$$

onde: $f(x)$ e $g_i(x)$ sejam funções lineares.

Para construir o PPL, visando à alocação de potência reativa, deve-se linearizar a função objetivo e as restrições em torno de um ponto de operação. Considera-se a expressão (10) como sendo as equações de Fluxo de Carga:

$$g(y,u,p) = 0 \quad (10)$$

onde y é igual as variáveis dependentes, u a variáveis independentes e p a variáveis especificadas.

Supondo que $y = y_0$ seja a solução para um vetor de controle específico $u = u_0$ e satisfaça a equação (10), obtém-se:

$$g(y_0,u_0,p) = 0 \quad (11)$$

Considerando-se uma pequena mudança Δu em u_0 , esta causa uma alteração Δy em y_0 e a equação (11) fica expandida pela série de Taylor:

$$g(y_0+\Delta y,u_0+\Delta u,p) \cong g(y_0,u_0,p) + g_y\Delta y + g_u\Delta u \cong 0 \quad (12)$$

onde:

$$g_y = \frac{\partial(g_1,g_2,\dots,g_{2N})}{\partial(y_1,y_2,\dots,y_{2N})}, \quad g_u = \frac{\partial(g_1,g_2,\dots,g_{2N})}{\partial(u_1,u_2,\dots,u_M)} \quad (13)$$

Aplicando-se a expressão (11) em (12) :

$$g_y \Delta y + g_u \Delta u \cong 0 \quad (14)$$

Rearranjando a expressão (14):

$$\Delta y = -g_y^{-1} g_u \Delta u \quad (15)$$

$$\Delta y = S \Delta u \quad (16)$$

onde S é chamada matriz sensibilidade.

$$\begin{aligned} \text{Considerando-se:} \quad \Delta y_i &\Rightarrow \Delta V_i, & i = 1, 2, \dots, k \\ \Delta u_j &\Rightarrow \Delta Q_j, & j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (17)$$

Tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1M} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{K1} & S_{K2} & \dots & S_{KM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_M \end{bmatrix} \quad (18)$$

sendo feitas as seguintes considerações:

$$\begin{aligned} \Delta V_i &\geq V_i^{\min} - V_i \\ \Delta V_i &\leq V_i^{\max} - V_i & i=1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (19)$$

onde:

$V_i^{\min}$: mínima magnitude de tensão desejada na barra i ;

$V_i^{\max}$: máxima magnitude de tensão desejada na barra i ;

V_i : magnitude de tensão atual.

Substitui-se (19) na expressão (18) e tem-se:

$$\begin{aligned} S_{i1}\Delta Q_1 + S_{i2}\Delta Q_2 + \dots + S_{iM}\Delta Q_M &\geq V_i^{\min} - V_i \\ S_{i1}\Delta Q_1 + S_{i2}\Delta Q_2 + \dots + S_{iM}\Delta Q_M &\leq V_i^{\max} - V_i \\ i &= 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (20)$$

O PPL utilizado no método Simplex será:

$$\begin{aligned} \min \quad & \Sigma \Delta Q_j \\ \text{s.a.} \quad & \Sigma S_{ij}\Delta Q_j \geq V_i^{\min} - V_i \\ & \Sigma S_{ij}\Delta Q_j \leq V_i^{\max} - V_i \\ & \Delta Q_j \geq 0 \\ & i = 1, 2, \dots, k \\ & j = 1, 2, \dots, M \\ & k \geq M \end{aligned} \quad (21)$$

Um algoritmo geral do Simplex é dado por:

- i) Achar uma solução factível básica inicial da expressão (9);
- ii) Verificar se a solução é ótima. Se for, pare. Caso contrário, siga para o passo (iii);
- iii) Determinar a variável não-básica que deve entrar na base;
- iv) Determinar a variável básica que deve sair da base;
- v) Achar a nova solução factível básica, e voltar ao passo (ii).

Os sistemas elétricos de potência são sistemas não lineares e deve-se fazer a linearização do sistema elétrico para utilizar o método Simplex. Esta linearização faz com que o problema perca em precisão, comprometendo o resultado final do método Simplex.

3.4 O Método dos Multiplicadores

O Fluxo de Carga Ótimo é um problema de otimização com função objetivo e restrições normalmente não lineares e não convexas. O problema pode ser apresentado como na expressão (8).

Os problemas de alocação de potência reativa nos sistemas elétricos, resolvidos por programas de Fluxo de Carga Ótimo, apresentam excelentes resultados pelo fato de considerar a não linearidade do sistema. Os programas de Fluxo de Carga Ótimo podem apresentar vários métodos associados, para resolver os problemas.

O Método de Fluxo de Carga Ótimo pode ser resolvido pelo Método de Newton Modificado e a Lagrangeana Aumentada. Verifica-se que o problema (8), ao ser resolvido pelo Método de Newton Modificado, é transformado numa sequência de problemas irrestritos, sendo que para isso utilizou-se a Função Lagrangeana Aumentada.

O Método da Lagrangeana Aumentada também é conhecido como método dos multiplicadores e penalidades, já que a cada restrição é associado um multiplicador de Lagrange e às restrições de desigualdade é associado um fator de penalidade quadrático.

Assim o problema (8) pode ser transformado no seguinte problema equivalente:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f(x) + \frac{1}{2} v(h'_j(x) + z_j^2)^2 \\
 \text{s.a.} \quad & g_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \leq n \\
 & h'_j(x) + z_j^2 = 0 \quad j = 1, 2, \dots, r
 \end{aligned} \tag{22}$$

onde se tem um problema somente com restrições de igualdade, já que uma variável de folga (z_j^2) foi introduzida.

O problema (22) que apresenta apenas restrições de igualdade tem Função

Lagrangeana clássica dada por:

$$e_j = z_j^2$$

$$La(x, \lambda, \mu) = f(x) + \frac{1}{2} v \sum_{j=1}^{r+n} (h'_j(x) + e_j)^2 + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) + \sum_{j=1}^{r+n} \mu_j (h'_j(x) + e_j) \quad (23)$$

onde:

- λ_i, μ_j - multiplicadores de Lagrange para as restrições de igualdade e desigualdade respectivamente;
- $h'(x)$ - restrições de desigualdade e limites das variáveis.

Acrescenta-se o fator de penalidade v para restrições de desigualdade.

Minimizando a Função Lagrangeana obtida em (23) com relação a variável de folga (e_j), temos que satisfazer as condições de Kuhn-Tucker, onde:

$$\frac{\partial La}{\partial e_j} = 0$$

que fornece a seguinte solução:

$$e_j = \begin{cases} -h'_j(x) - \frac{\mu_j}{v} & \text{se } -h'_j(x) - \frac{\mu_j}{v} \geq 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (24)$$

ou

$$e_j = \max \left\{ 0, -h'_j(x) - \frac{\mu_j}{v} \right\}$$

Substituindo as relações obtidas em (24) na equação (23), obtém-se a Função Lagrangeana Aumentada:

$$La(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) + \sum \begin{cases} \mu_j h'_j(x) + \frac{1}{2} v h_j'^2(x) & \text{se } h'_j(x) \geq -\frac{\mu_j}{v} \\ -\frac{\mu_j^2}{2v} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (25)$$

O processo consiste em se determinar valores para x , tal que as condições necessárias de otimalidade sobre a Função Lagrangeana sejam satisfeitas. Assim:

$$\frac{\partial La}{\partial x} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial La}{\partial \lambda} = 0$$

A solução do sistema (26) pode ser obtida pelo Método de Newton Modificado, que em sua forma matricial é dado por:

$$\begin{bmatrix} B & J^t \\ J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_x La \\ g(x) \end{bmatrix} \quad (27)$$

onde:

$$B = \frac{\partial^2 La}{\partial x^2} = \nabla_{xx}^2 La:$$

Matriz Hessiana aproximada, considerando-se apenas os elementos diagonais de H

Da solução do sistema (27), atualizam-se as variáveis, os multiplicadores de Lagrange e os fatores de penalidade por:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \Delta \lambda^k$$

$$\mu_j^{k+1} = \begin{cases} \mu_j^k + v h_j'(x^{k+1}), & \text{se } h_j'(x^{k+1}) \geq -\frac{\mu_j^k}{v^k} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (28)$$

$$v^{k+1} > v^k$$

O mínimo da função objetivo será atingido quando os novos valores obtidos em (28), para x e μ , satisfizerem as condições de Kuhn-Tucker.

É um método infactível que trata de forma unificada as restrições de igualdade e desigualdade, evitando aspectos críticos com relação à determinação das restrições “binding”, e apresenta como principal vantagem o monitoramento do crescimento dos fatores de penalidade, evitando que ocorra o mal condicionamento da matriz Lagrangeana [20].

No sistema apresentado em (27) as informações de primeira ordem são

mantidas intactas e as informações de segunda ordem são aproximadas. Com tal aproximação, o processo de otimização passa a realizar um maior número de iterações, mas, por outro lado, ganha-se em economia de memória computacional e de operações realizadas. A equação matricial pode ser representada na forma simplificada.

$$W_B \Delta z = -b \quad (29)$$

A matriz W_B possui alto grau de esparsidade. Esta característica pode ser aproveitada por técnicas especiais de tratamento de matrizes esparsas, a qual ocasiona um ganho substancial em memória e tempo de processamento.

O problema de Fluxo de Carga Ótimo não só resolve o fluxo de carga como otimiza algum aspecto de desempenho do sistema, tornando representável por:

minimizar a função (custo de geração, perdas ativas na transmissão, etc.)

sujeita a:

Barras de Carga

$$P - P^e = 0$$

$$Q - Q^e = 0$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$$

Barras de Controle de Reativos

$$P - P^e = 0$$

$$Q^{\min} \leq Q \leq Q^{\max}$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$$

Barras de Geração

$$P^{\min} \leq P \leq P^{\max}$$

$$Q^{\min} \leq Q \leq Q^{\max}$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$$

Linhas de Transmissão

$$|P_{\text{fluxo}}| \leq P^{\text{limite}}$$

$$Q_{\text{fluxo}}^{\min} \leq Q_{\text{fluxo}} \leq Q_{\text{fluxo}}^{\max}$$

Transformadores

$$\text{tap}^{\min} \leq \text{tap} \leq \text{tap}^{\max}$$

$$|P_{\text{fluxo}}| \leq P^{\text{limite}}$$

$$Q_{\text{fluxo}}^{\min} \leq Q_{\text{fluxo}} \leq Q_{\text{fluxo}}^{\max}$$

A formulação do problema de Fluxo de Carga Ótimo é feita associando ao problema (8) as considerações apresentadas anteriormente sobre este Fluxo e obtendo-se a seguinte formulação:

$$\begin{aligned}
\min \quad & f(t, \theta, V) \\
\text{s.a.} \quad & P_i(t, \theta, V) - P_i^e = 0 \quad i = 1, \dots, nbc + nbc_r \\
& Q_i(t, \theta, V) - Q_i^e = 0 \quad i = 1, \dots, nbc \\
& P_i^{\min} \leq P_i(t, \theta, V) \leq P_i^{\max} \quad i = 1, \dots, nb_g \\
& Q_i^{\min} \leq Q_i(t, \theta, V) \leq Q_i^{\max} \quad i = 1, \dots, nb_g + nbc_r \\
& V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i = 1, \dots, nb \\
& |P_{fi}(t, \theta, V)| \leq P_i^{\text{limite}} \quad i = 1, \dots, nl + nt \\
& Q_{fkl}^{\min} \leq Q_{fkl}(t, \theta, V) \leq Q_{fkl}^{\max} \\
& Q_{fkk}^{\min} \leq Q_{fkk}(t, \theta, V) \leq Q_{fkk}^{\max} \\
& t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad i = 1, \dots, nt
\end{aligned} \tag{30}$$

A Função Lagrangeana Aumentada (20), associada ao problema (30), tem a seguinte representação:

$$\begin{aligned}
La = f(t, \theta, V) + \sum_{i=1}^{nbc+nbc_r} \lambda_{p_i} \Delta P_i + \sum_{i=1}^{nbc} \lambda_{q_i} \Delta Q_i + \\
\sum_{i=1}^{nb_g} \left\{ \begin{array}{ll} \mu_{p_i} \Delta P_i + \frac{1}{2} v \Delta P_i^2 & \text{se } \Delta P_i \geq -\frac{\mu_{p_i}}{v} \\ -\frac{\mu_{p_i}^2}{2v} & \text{caso contrário} \end{array} \right. + \\
\sum_{i=1}^{nbc+nbc_r} \left\{ \begin{array}{ll} \mu_{q_i} \Delta Q_i + \frac{1}{2} v \Delta Q_i^2 & \text{se } \Delta Q_i \geq -\frac{\mu_{q_i}}{v} \\ -\frac{\mu_{q_i}^2}{2v} & \text{caso contrário} \end{array} \right. +
\end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{nb} \left\{ \begin{array}{ll} \mu_{v_i} \Delta V_i + \frac{1}{2} v \Delta V_i^2 & \text{se } \Delta V_i \geq -\frac{\mu_{v_i}}{v} \\ -\frac{\mu_{v_i}^2}{2v} & \text{caso contrário} \end{array} \right. +$$

$$\sum_{i=1}^{nl+nt} \left\{ \begin{array}{ll} \mu_{p_{fi}} \Delta P_{fi} + \frac{1}{2} v \Delta P_{fi}^2 & \text{se } \Delta P_{fi} \geq -\frac{\mu_{p_{fi}}}{v} \\ -\frac{\mu_{p_{fi}}^2}{2v} & \text{caso contrário} \end{array} \right. +$$

$$\sum_{i=1}^{nl+nt} \left\{ \begin{array}{ll} \mu_{q_{kl}} \Delta Q_{kl} + \frac{1}{2} v \Delta Q_{kl}^2 & \text{se } \Delta Q_{kl} \geq -\frac{\mu_{q_{kl}}}{v} \\ -\frac{\mu_{q_{kl}}^2}{2v} & \text{caso contrário} \end{array} \right. +$$

$$\sum_{i=1}^{nt} \left\{ \begin{array}{ll} \mu_{t_i} \Delta t_i + \frac{1}{2} v \Delta t_i^2 & \text{se } \Delta t_i \geq -\frac{\mu_{t_i}}{v} \\ -\frac{\mu_{t_i}^2}{2v} & \text{caso contrário} \end{array} \right. \quad (31)$$

As condições de otimalidade, aplicadas à Função Lagrangeana Aumentada, fornecem o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \nabla_1 La &= 0 \\ \nabla_\theta La &= 0 \\ \nabla_v La &= 0 \\ \nabla_\lambda La &= 0 \end{aligned} \quad (32)$$

que, ao ser resolvido pelo Método de Newton Modificado, dá origem ao seguinte sistema matricial:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \nabla_{tt}^2 La & 0 & 0 & \nabla_{t\alpha}^2 La \\ \hline 0 & \nabla_{\theta\theta}^2 La & 0 & \nabla_{\theta\lambda}^2 La \\ \hline 0 & 0 & \nabla_{vv}^2 La & \nabla_{v\lambda}^2 La \\ \hline \nabla_{\lambda t}^2 La & \nabla_{\lambda\theta}^2 La & \nabla_{\lambda v}^2 La & \nabla_{\lambda\lambda}^2 La \\ \hline \end{array}
 \begin{array}{|c|} \hline \Delta t \\ \hline \Delta \theta \\ \hline \Delta V \\ \hline \Delta \lambda \\ \hline \end{array}
 = -
 \begin{array}{|c|} \hline \nabla_t La \\ \hline \nabla_\theta La \\ \hline \nabla_v La \\ \hline \nabla_\lambda La \\ \hline \end{array}
 \quad (33)$$

onde:

$$\nabla_{\lambda\lambda}^2 La = 0$$

A partir dos valores de x e λ , atualizados por Δx e $\Delta \lambda$ respectivamente, as condições de Kuhn-Tucker são analisadas, e caso tenham sido satisfeitas, a solução foi encontrada, senão os multiplicadores (μ) das restrições violadas e os fatores de penalidade (v) são atualizados pelas regras apresentadas em (28) e mais uma iteração é efetuada.

O sistema (33) é uma forma explícita do sistema apresentado em (29), ou seja, a matriz de coeficientes W_B , o vetor de correções Δz e o termo independente b (representado pelo vetor gradiente da Função Lagrangeana em relação às variáveis x e multiplicadores λ).

A seguir, apresenta-se um algoritmo simplificado [16] para resolver o problema:

1. Ponto inicial: $z = (x, \lambda)$ e μ

x - Estimativa inicial próxima da solução

$\lambda = \mu = 0$ ou uma estimativa melhor

2. Calcule o vetor b em z

3. Se as condições de Kuhn-Tucker estão satisfeitas, o fluxo de carga ótimo está resolvido,

caso contrário

4. Atualize μ , v (28)

5. Calcule a matriz W_B em z

6. Resolva o sistema: $W_B \cdot \Delta z = -b$

7. Atualize z

8. Retorne ao passo 2

Os valores atribuídos às variáveis (x) como estimativa inicial podem estar na região infactível do problema ou ser uma solução do Fluxo de Carga. A matriz W_B , ao ser calculada em z , deve incluir os valores atualizados de μ e v .

Capítulo 4

TESTES E RESULTADOS

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em testes computacionais realizados nos sistemas AEP14 e AEP30 [21].

Os testes foram realizados no Laboratório de Análise Computacional - LACO/EESC/USP. Os algoritmos foram desenvolvidos em linguagem FORTRAN e processados na estação de trabalho SUN IPX. Os testes realizados utilizaram a base de potência comum de 100 MVA.

Os sistemas são estudados fazendo-se comparações dos resultados obtidos pelo método dos multiplicadores com os resultados do método Simplex e com o

sistema original, que já possui fontes reativas alocadas. Esses resultados são a alocação de fontes de potência reativa com o objetivo de manter a factibilidade do problema, minimizando as perdas de potência ativa na transmissão.

Os resultados do problema original, isto é, perdas de potência ativa na transmissão, foram obtidos através do programa de Fluxo de Carga ANAREDE. O ANAREDE é um programa computacional de análise de redes elétricas, desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) para realização de estudos nas áreas de operação e de planejamento de sistemas elétricos de potência. Os resultados obtidos através do ANAREDE encontram-se no Apêndice 1.

Para o estudo realizado, retiramos as potências reativas já alocadas, no sistema original, para que os métodos Simplex e dos multiplicadores possam encontrar as novas fontes de reativos para o sistema.

4.2. Procedimentos seguidos para utilização do método Simplex

Como foi visto na seção 3.1, a linearização das restrições é obtida através da Jacobiana $\left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right]$, a qual nos dá a sensibilidade entre a tensão (ΔV) e a potência reativa (ΔQ).

O problema de Programação Linear consiste na minimização da potência reativa em cada barra PQ, sujeita a restrições de desigualdade $Q_k^{\min} \leq Q_k \leq Q_k^{\max}$ e $V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}$. As restrições de igualdade são garantidas pelo Fluxo de Carga. A minimização das perdas de potência ativa na transmissão não foi utilizada porque sua linearização compromete os resultados do problema.

Os limites de cada restrição são dados pelas diferenças entre as tensões especificadas e os valores das tensões fornecidos pelo Fluxo de Carga, para cada barra. As tensões especificadas possuem um limite mínimo, que é de 0,95 pu, e um limite máximo, que é de 1,1 pu.

Montado o problema, com um programa computacional de Programação Linear, que utiliza o método Simplex, obtém-se as potências reativas necessárias em cada barra para o sistema.

4.3. Procedimentos seguidos na utilização do método dos Multiplicadores

Quando o problema é resolvido por meio do método dos multiplicadores, associa-se um multiplicador de Lagrange para cada equação, a qual, por sua vez, é associada a uma barra. A barra de carga, que apresenta o maior multiplicador em módulo associado com a potência reativa, é transformada em barra de controle de reativo. Repete-se este processo até obter-se a solução do problema, isto é, até que

todas as restrições estejam satisfeitas para o menor valor da função objetivo. A diferença obtida pelo método dos multiplicadores, entre os valores da potência reativa para cada barra de controle de reativo e a potência reativa de carga do sistema, fornece os valores de fontes de potência reativa a serem alocadas nas respectivas barras.

4.4. Sistema de 14 barras

O sistema AEP14, apresentado na figura 4.1, possui 14 barras, sendo:

- 2 barras de geração;
- 3 barras de controle de reativos;
- 9 barras de carga;
- 20 linhas de transmissão.

© COMPENSADORES SINCRONOS

Ⓔ GERADORES

Figura 4.1 - AEP14

A seguir serão apresentados os dados de barra, de linha e os resultados.

Tabela 4.1 - Dados de barra do sistema AEP14.

BARRA	TENSÃO (pu)	ÂNGULO (graus)	CARGA ATIVA (MW)	CARGA REATIVA (MVA)
1	1.060	0.0	0.0	0.0
2	1.045	0.0	-18.3	12.7
3	1.010	0.0	94.2	19.0
4	1.019	0.0	47.8	-3.9
5	1.020	0.0	7.6	1.6
6	1.070	0.0	11.2	7.5
7	1.062	0.0	0.0	0.0
8	1.090	0.0	0.0	0.0
9	1.056	0.0	29.5	16.6
10	1.051	0.0	9.0	5.8
11	1.057	0.0	3.5	1.8
12	1.055	0.0	6.1	1.6
13	1.050	0.0	13.5	5.8
14	1.036	0.0	14.9	5.0

Tabela 4.2 : Dados de linha do sistema AEP14.

BARRA	BARRA	RESISTÊNCIA	REATÂNCIA	SUSCEPTÂNCIA
1	2	1.938	5.917	5.28
1	5	5.403	22.304	4.92
2	3	4.699	19.797	4.38
2	4	5.811	17.632	3.74
2	5	5.695	17.388	3.40
3	4	6.701	17.103	3.46
4	5	1.335	4.211	1.28
4	7	0.000	20.912	0.00
4	9	0.000	55.618	0.00
5	6	0.000	25.202	0.00
6	11	9.498	19.890	0.00
6	12	12.291	25.581	0.00
6	13	6.615	13.027	0.00
7	8	0.001	17.615	0.00
7	9	0.000	11.001	0.00
9	10	3.181	8.450	0.00
9	14	12.711	27.038	0.00
10	11	8.205	19.207	0.00
12	13	22.092	19.988	0.00
13	14	17.093	34.802	0.00

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados de alocação de reativos e perdas de potência ativa do sistema AEP14. Na montagem do problema de Programação Linear, foram utilizadas 24 restrições de desigualdade. Os resultados foram obtidos em duas iterações. Para se obter os resultados com o método dos multiplicadores, foram considerados como fator de penalidade das tensões $v = 10$ e das demais variáveis $v = 1.0$ e $\beta = 1.2$.

A primeira barra escolhida para receber fontes de reativos é a que apresenta o maior valor, em módulo, entre os multiplicadores associados com a potência reativa. Como em todas as iterações o multiplicador era sempre maior para uma única barra, considerou-se a iteração que não apresentasse erro de tensão, isto é, a tensão estivesse dentro de seus limites. O valor do multiplicador era de 0.47, para a barra 14 obtida na 12ª iteração. A segunda barra, escolhida da mesma forma, foi a barra 12, com o multiplicador valendo 0.08 na 3ª iteração. A terceira barra, barra 10, teve o multiplicador valendo 0.05 na 3ª iteração. Após estas alocações, atingiu-se a factibilidade do problema com as perdas de potência ativa otimizadas. Qualquer outra alocação não era interessante ao cenário em estudo, pois a cada nova alocação existe um custo associado, o qual não é objetivo do nosso estudo.

Tabela 4.3 : Fontes reativas alocadas por barra em MVAR.

BARRA	FONTES REATIVAS OBTIDAS PELOS MÉTODOS		FONTES REATIVAS DO SISTEMA ORIGINAL
	MULTIPLICADORES DE LAGRANGE	SIMPLEX	
1	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	2.9
4	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0
6	0.0	9.3	11.6
7	0.0	6.7	0.0
8	0.0	1.7	16.6
9	0.0	15.0	19.0
10	14.1	10.6	0.0
11	0.0	5.6	0.0
12	7.0	3.7	0.0
13	0.0	8.0	0.0
14	3.6	4.8	0.0
TOTAL	24.7	65.4	50.1

A tabela 4.3 apresenta a potência reativa total alocada para os três casos estudados. Verifica-se que, com a técnica dos multiplicadores de Lagrange, obtém-se a menor quantidade de potência reativa para alocá-la e em um número menor de

barras.

Tabela 4.4: Perdas de potência ativa (MW) do sistema AEP14.

	MÉTODO UTILIZADO		SISTEMA ORIGINAL
	MULTIPLICADORES DE LAGRANGE	SIMPLEX	
PERDAS DE POTÊNCIA ATIVA (MW)	12.7631	13.5702	13.3000

Na tabela 4.4, são apresentadas as perdas de potência ativa com a alocação de potência reativa. Observa-se que a perda de potência ativa, na utilização dos multiplicadores de Lagrange, é menor que os demais casos. O sistema original possui uma alocação melhor do que a conseguida pelo método Simplex.

4.5. Sistema de 30 barras

O sistema AEP30, apresentado na figura 4.2, possui 30 barras sendo:

2 barras de geração;

4 barras de controle de reativos;

24 barras de carga;

37 linhas de transmissão.

A seguir serão apresentados os dados de barra, de linha e os resultados.

As cargas do AEP30 foram aumentadas em 15% do valor original. Isto levou o sistema a uma necessidade maior de receber fontes de reativos, para obter a convergência. Sem essa consideração, o sistema se apresentava muito próximo ao ponto ótimo, o que impossibilitava a realização do estudo.

Tabela 4.5 - Dados de barra do sistema AEP30.

BARRA	TENSÃO (pu)	ÂNGULO (graus)	CARGA ATIVA (MW)	CARGA REATIVA (MVA)
1	1.060	0.0	0.0	0.0
2	1.045	0.0	-18.3	14.6
3	1.000	0.0	2.8	1.4
4	1.000	0.0	8.7	1.8
5	1.010	0.0	108.3	21.9
6	1.000	0.0	0.0	0.0
7	1.000	0.0	26.2	12.5
8	1.010	0.0	34.5	34.5
9	1.000	0.0	0.0	0.0
10	1.000	0.0	6.7	2.3
11	1.082	0.0	0.0	0.0
12	1.000	0.0	12.9	8.6
13	1.071	0.0	0.0	0.0
14	1.000	0.0	7.1	1.8
15	1.000	0.0	9.4	2.9
16	1.000	0.0	4.0	2.1
17	1.000	0.0	10.4	6.7
18	1.000	0.0	3.7	1.0
19	1.000	0.0	10.0	3.9
20	1.000	0.0	2.5	0.8
21	1.000	0.0	20.1	12.9
22	1.000	0.0	0.0	0.0
23	1.000	0.0	3.7	1.8
24	1.000	0.0	10.0	7.7
25	1.000	0.0	0.0	0.0
26	1.000	0.0	4.0	2.6
27	1.000	0.0	0.0	0.0
28	1.000	0.0	0.0	0.0
29	1.000	0.0	2.8	1.0
30	1.000	0.0	12.2	2.2

Tabela 4.6 : Dados de linha do sistema AEP30.

BARRA	BARRA	RESISTÊNCIA	REATÂNCIA	SUSCEPTÂNCIA
1	2	1.92	5.75	2.64
1	3	4.52	18.52	2.04
2	4	5.70	17.37	1.84
3	4	1.32	3.79	0.42
2	5	4.72	19.83	2.09
2	6	5.81	17.63	1.87
4	6	1.19	4.14	0.45
5	7	4.60	11.60	1.02
6	7	2.67	8.20	0.85
6	8	1.20	4.20	0.45
6	9	0.00	20.80	0.00
6	10	0.00	55.60	0.00
9	11	.001	20.80	0.00
9	10	.001	11.00	0.00
4	12	0.00	25.60	0.00
12	13	0.00	14.00	0.00
12	14	12.31	25.59	0.00
12	15	6.62	13.04	0.00
12	16	9.45	19.87	0.00
14	15	22.10	19.97	0.00
16	17	8.24	19.23	0.00
15	18	10.70	21.85	0.00
18	19	6.39	12.92	0.00
19	20	3.40	6.80	0.00
10	20	9.36	20.90	0.00
10	17	3.24	8.45	0.00
10	21	3.48	7.49	0.00
10	22	7.27	14.99	0.00
21	22	1.16	2.36	0.00
25	23	10.00	20.20	0.00
22	24	11.50	17.90	0.00
23	24	13.20	27.00	0.00
24	25	18.85	32.92	0.00
25	26	25.44	38.00	0.00
25	27	10.93	20.87	0.00
28	27	0.00	39.60	0.00
27	29	21.98	41.53	0.00
27	30	32.02	60.27	0.00
29	30	23.99	45.33	0.00
8	28	6.36	20.00	2.14
6	28	1.69	5.99	0.65

As tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os resultados de alocação de reativos e perdas de potência ativa do sistema AEP30. Na montagem do problema de Programação Linear, foram utilizadas 48 restrições de desigualdade. Os resultados foram obtidos em 3 iterações. Para chegar-se aos resultados, com o método dos multiplicadores, foram considerados como fator de penalidade das tensões $v = 100$, e das demais variáveis $v = 1.0$ e $\beta = 1.2$.

Para a obtenção da primeira barra candidata, considerou-se a iteração que apresentasse o sistema em princípios de divergência, já que sem as fontes de potência reativa o sistema não tem solução. Obteve-se, então, o maior multiplicador em módulo associado à potência reativa, valendo 65537,4 na 3ª iteração, para a barra 9. A segunda barra candidata foi escolhida na iteração anterior à divergência do sistema. Foi encontrado o valor de 3.63 na 7ª iteração, para a barra 30. Após estas alocações, atingiu-se a factibilidade do problema com as perdas de potência ativa otimizadas.

Tabela 4.7 : Fontes reativas alocadas por barra em MVAR.

BARRA	FONTES REATIVAS OBTIDAS PELOS MÉTODOS		FONTES REATIVAS DO SISTEMA ORIGINAL
	MULTIPLICADORES DE LAGRANGE	SIMPLEX	
1	0.0	0.00	0.0
2	0.0	0.00	0.0
3	0.0	1.07	0.0
4	0.0	3.75	0.0
5	0.0	6.78	27.0
6	0.0	9.37	0.0
7	0.0	4.30	0.0
8	0.0	3.34	16.1
9	74.8	3.75	0.0
10	0.0	10.10	19.0
11	0.0	0.97	24.9
12	0.0	5.45	0.0
13	0.0	1.60	33.5
14	0.0	1.59	0.0
15	0.0	4.17	0.0
16	0.0	2.04	0.0
17	0.0	3.59	0.0
18	0.0	2.73	0.0
19	0.0	4.95	0.0
20	0.0	4.27	0.0
21	0.0	11.70	0.0
22	0.0	11.40	0.0
23	0.0	2.04	0.0
24	0.0	2.65	4.3
25	0.0	2.16	0.0
26	0.0	1.88	0.0
27	0.0	2.23	0.0
28	0.0	2.99	0.0
29	0.0	2.08	0.0
30	8.6	2.85	0.0
TOTAL	83.4	115.80	124.8

A tabela 4.7 apresenta a potência reativa total alocada, para os três casos estudados. O método dos multiplicadores apresenta um número menor de fontes de reativos que os demais casos, e em um número menor de barras.

Tabela 4.8: perdas de potência ativa (MW) do sistema AEP30.

	MÉTODO UTILIZADO		SISTEMA ORIGINAL
	MULTIPLICADORES DE LAGRANGE	SIMPLEX	
PERDAS DE POTÊNCIA ATIVA (MW)	24.519	25.300	24.100

Na tabela 4.8 apresentam-se as perdas de potência ativa com a alocação de potência reativa. Observa-se que a perda de potência ativa, na utilização do método dos multiplicadores de Lagrange, é pouco superior ao sistema original, pois, no método dos multiplicadores o processo de otimização pára ao satisfazer as restrições do problema. No caso de se continuar alocando potência reativa, as perdas melhorariam, ficando inferior ao sistema original, mas isto acarretaria um custo associado à alocação dessas novas fontes, o que não é interessante para o nosso estudo.

Capítulo 5

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvido uma nova metodologia para a demanda de fontes de potência reativa visando o planejamento da operação.

A metodologia apresentada utiliza o multiplicador de Lagrange como elemento de análise para a alocação. Os multiplicadores são obtidos utilizando-se o método da Lagrangeana Aumentada, também conhecido como o método dos Multiplicadores.

Outros métodos, como os apresentados na revisão bibliográfica, determinam as barras candidatas a receberem fontes de reativos por meio da experiência dos engenheiros na operação das redes. Após as barras candidatas terem sido determinadas, o processo de otimização começa com a minimização da função objetivo potência reativa instalada ou da função objetivo custo de instalação. Assim, o

processo é parcialmente otimizado. Na metodologia proposta, as barras candidatas são determinadas pelos multiplicadores de Lagrange para, então, determinar-se o quanto de potência reativa será alocada. Observa-se, nos resultados apresentados, um ganho substancial no número de alocações, quando comparado com o tradicional método Simplex.

Outra vantagem da metodologia proposta é de não fazer aproximações que comprometam o desempenho do sistema, já que o problema é não-linear e um método de programação linear é aplicado.

Observou-se um menor número de iterações no método Simplex, pois o ponto inicial está próximo da solução. Esta é uma característica dos problemas de Fluxo de Carga.

Quanto ao método dos multiplicadores, observou-se que a maior dificuldade está na determinação da penalidade da tensão, pois o método é muito sensível a esta variável.

A perspectiva de continuidade da pesquisa está relacionada à modelagem do sistema, na qual está prevista a inclusão de outros elementos de controle e alternativas para a função objetivo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kishore, A., Hill, E.F., *Static Optimization of Reactive Power Sources by Use of Sensitivity Parameters*, IEEE Trans., v. PAS-90, n. 3, p. 1166-1173, May/June 1971.
- [2] Sachdeva, S.S., Billinton, R., *Optimum Network Var Planning by Nonlinear Programming*, IEEE Trans., v. PAS-92, p.1217-1225, 1973.
- [3] Happ, H.H., Wirgau, K.A., *Static and Dynamic VAr Compensation in System Planning*, IEEE Trans., v. PAS-97, n. 5, p. 1564-1578, Sept./Oct. 1978.
- [4] Hobson, E., *Network Constrained Reactive Power Control Using Linear Programming*, IEEE Trans., v. PAS-99, n. 3, p. 868-875, May/June 1980.
- [5] Mamandur, K.R.C., Chenoweth, R.D., *Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization*, IEEE Trans., v. PAS-100, n. 7, p. 3185-3194, July 1981.
- [6] Fernandes, R.A., Lange, F., Burchett, R.C., Happ, H.H., Wirgau, K.A., *Large Scale Reactive Power Planning*, IEEE Trans., v. PAS-102, n. 5, p.1083-1088, May 1983.
- [7] Iyer, S.R., Ramachandran, K., Hariharan, S., *Optimal Reactive Power Allocation for Improved System Performance*, IEEE Trans. v. PAS-103, n. 6, p. 1509-1515, June 1984.
- [8] Lebow, W.M., Rouhani, R., Nadira, R., Usoro, P.B., Mehra, R.K., Sobieski, D.W., Pal, M.K., Bhavaraju, M.P., *A Hierarchical Approach to Reactive Volt Ampere (VAr) Optimization in System Planning*, IEEE Trans., v. PAS-104, n. 8, p. 2051-2057, August 1985.
- [9] Iba, K., Suzuki, H., Suzuki, K., Suzuki, K., *Practical Reactive Power Allocation/Operation Planning Using Successive Linear Programming*, IEEE Trans., v. 3, n. 2, p. 558-566, May 1988.

- [10] Aoki, K., Fan, M., Nishikori, A., *Optimal Var Planning by Approximation Method for Recursive Mixed-Integer Linear Programming*, IEEE Trans. v. 3, n. 4, p. 1741-1747, November 1988.
- [11] Obadina, O.O., Berg, G.J., *Var Planning for Power System Security*, IEEE Trans., v. 4, n. 2, p. 677-686, May 1989.
- [12] Opoku, G., *Optimal Power System VAR Planning*, IEEE Trans., v. 5, n. 1, p. 53-59, February 1990.
- [13] Losi, A., Rossi, F., Russo, M., Verde, P., *New Tool for Reactive Power Planning*, IEE Proceedings-C, v. 140, n. 4, p. 256-262, July 1993.
- [14] Chen, Y.L., Liu, C.C., *Multiobjective VAR Planning Using the Goal-Attainment Method*, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., v. 141, n. 3, p. 227-232, May 1994.
- [15] Bazaraa, M.S., Jarvis, J.J., Sherali, H.D., *Linear Programming and Network Flows*, New York, John Wiley, 1990.
- [16] Langona, K., *O Método de Newton Modificado-Lagrangeana Aumentada para o Fluxo de Potência Ótimo*, São Carlos, 1994. 87 p. Dissertação (Mestrado) - USP/EESC/DEE.
- [17] Monticelli, A.J., *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, São Paulo, Ed. Edgard Blücher Ltda., 1983.
- [18] Filho, N.M., Pereira, M.V.F., *Programação Linear*, 1ª ed. São Paulo, Editora Atlas S/A, 1980. cap. 2, p.50.
- [19] Puccini, A.L., Pizzolato, N.D., *Programação Linear*, Rio de Janeiro, São Paulo, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 1987, Cap.3, p.77.
- [20] Sun, D.L., Ashley, B., Brewer, B., Hughes, A., Tinney, W.F., *Optimal Power Flow By Newton Approach*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 103, p. 2864-2875, October 1984.
- [21] Freris, L.L., Sasson, A.M., *Investigation of the load flow problem*, PROC. IEEE, v. 115, p. 1459-1470, 1968.
- [22] Luenberger, D.G., *Linear and Nonlinear Programming*, Second Edition, Addilson-Wesley Publishing Company, 1984.

- [23] Mantovani, J.R.S. *Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica: Solução Via Programação Linear Sucessiva Utilizando um Modelo Implicitamente Acoplado*. Campinas, 1987. Dissertação (Mestrado) - UNICAMP.
- [24] Gill, P.E., Murray, W. and Wright, M.H., *Practical Optimization*, New York, Ed. Academic Press, 1992.
- [25] Langona, K., Costa, G.R.M., *Uma Nova Abordagem do Método de Newton Modificado para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo*. In: XXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Campinas, 1993, *Anais*. Campinas, 1993. p.382-386.

APÊNDICE 1

Sistema AEP14

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

----- SISTEMA 14 BARRAS SEL -----

CASO BASE

RELATORIO DE CONVERGENCIA

OPCOES ATIVADAS:

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X											
ITERACAO			ERRO MAX		BARRA	ERRO MAX		BARRA	ERRO MAX		CONV
FC	P	Q	V	MW	NUM.	MVAR	NUM.	TENSAO %	NUM.	FM	
X-X-X-X-X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-X											
1				23.52	4						FM
	1					10.87	5				FM
2				2.09	5						
.....											

CONVERGENCIA FINAL

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X												
ITERACAO				ERRO MAX		BARRA	ERRO MAX		BARRA	ERRO MAX		CONV
FC	P	Q	V	MW	NUM.	MVAR	NUM.	TENSAO %	NUM.			
X-X-X-X-X-----X-----X-----X-----X-----X-----X												
0				0.00	0	0.00	0					
	2	1	0	0.37	13	0.48	5	0.000		0		

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

----- SISTEMA 14 BARRAS SEL -----

CASO BASE

RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
BARRA	TENSAO	GERACAO	INJEQV	FATOR	CARGA	ELO CC	SHUNT	MOTOR	
NUM. TIPO	MOD/	MW/	MW/	GER %	MW/	MW/	MVAR/	MW/	
NOME	ANG	MVAR	MVAR	EQV %	MVAR	MVAR	EQUIV	MVAR	
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
1 2	1.060	232.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA1	0.0	-18.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2 1	1.045	0.0	0.0	0.0	-18.3	0.0	0.0	0.0	
BARRA2	-5.0	38.5	0.0	0.0	12.7	0.0	0.0	0.0	
3 1	1.010	0.0	0.0	0.0	94.2	0.0	0.0	0.0	
BARRA3	-12.7	21.9	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0	
4 0	1.021	0.0	0.0	0.0	47.8	0.0	0.0	0.0	
BARRA4	-10.3	0.0	0.0	0.0	-3.9	0.0	0.0	0.0	
5 0	1.024	0.0	0.0	0.0	7.6	0.0	0.0	0.0	
BARRA5	-8.8	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	
6 1	1.070	0.0	0.0	0.0	11.2	0.0	0.0	0.0	
BARRA6	-14.3	19.1	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	0.0	
7 0	1.063	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA7	-13.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8 1	1.090	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA8	-13.4	16.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9 0	1.058	0.0	0.0	0.0	29.5	0.0	21.3	0.0	
BARRA9	-15.0	0.0	0.0	0.0	16.6	0.0	0.0	0.0	
10 0	1.052	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA10	-15.2	0.0	0.0	0.0	5.8	0.0	0.0	0.0	
11 0	1.057	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	
BARRA11	-14.9	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	
12 0	1.055	0.0	0.0	0.0	6.1	0.0	0.0	0.0	
BARRA12	-15.2	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	
13 0	1.051	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	
BARRA13	-15.2	0.0	0.0	0.0	5.8	0.0	0.0	0.0	
14 0	1.037	0.0	0.0	0.0	14.9	0.0	0.0	0.0	
BARRA14	-16.1	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

----- SISTEMA 14 BARRAS SEL -----

CASO BASE

RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

X----- DADOS-BARRA -----X----- FLUXOS - CIRCUITOS -----X

DA BARRA			TENSÃO		PARA BARRA		FLUXOS				
NUM.	TIPO	MOD	ANG	NUM.	NOME	NC	MW	MVAR	TAP	DEFAS	TIE
NOME											
X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----
1	2	1.060									
BARRA1		0.0									
				2	BARRA2	1	156.6	-20.3			
				5	BARRA5	1	75.7	1.6			
2	1	1.045									
BARRA2		-5.0									
				1	BARRA1	1	-152.3	27.6			
				3	BARRA3	1	73.1	3.6			
				4	BARRA4	1	56.1	-3.8			
				5	BARRA5	1	41.4	-1.6			
3	1	1.010									
BARRA3		-12.7									
				2	BARRA2	1	-70.8	1.5			
				4	BARRA4	1	-23.6	1.4			
4	0	1.021									
BARRA4		-10.3									
				2	BARRA2	1	-54.4	4.8			
				3	BARRA3	1	23.9	-4.0			
				5	BARRA5	1	-61.8	12.2			
				7	BARRA7	1	28.3	-8.7		0.978*	
				9	BARRA9	1	16.2	-0.1		0.969*	
5	0	1.024									
BARRA5		-8.8									
				1	BARRA1	1	-73.0	4.5			
				2	BARRA2	1	-40.5	0.7			
				4	BARRA4	1	62.3	-11.9			
				6	BARRA6	1	43.7	5.6		0.9501	
6	1	1.070									
BARRA6		-14.3									
				5	BARRA5	1	-43.7	-1.4			
				11	BARRA11	1	7.2	3.5			
				12	BARRA12	1	8.1	2.6			
				13	BARRA13	1	17.3	7.0			
7	0	1.063									
BARRA7		-13.4									
				4	BARRA4	1	-28.3	10.4			
				8	BARRA8	1	0.0	-16.2			

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

----- SISTEMA 14 BARRAS SEL -----

CASO BASE

RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

X----- DADOS-BARRA -----X-----				FLUXOS - CIRCUITOS -----X						
NUM.	TIPO	TENSAO MOD ANG	PARA BARRA NUM.	NOME	NC	MW	MVAR	TAP	DEFAS	TIE
NOME										
X-----X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----
			9	BARRA9	1	28.3	5.8			
8 1		1.090								
BARRA8		-13.4								
			7	BARRA7	1	0.0	16.6			
9 0		1.058								
BARRA9		-15.0								
			4	BARRA4	1	-16.2	1.4			
			7	BARRA7	1	-28.3	-4.9			
			10	BARRA10	1	5.5	4.4			
			14	BARRA14	1	9.6	3.8			
10 0		1.052								
BARRA10		-15.2								
			9	BARRA9	1	-5.5	-4.4			
			11	BARRA11	1	-3.5	-1.2			
11 0		1.057								
BARRA11		-14.9								
			6	BARRA6	1	-7.1	-3.3			
			10	BARRA10	1	3.5	1.2			
12 0		1.055								
BARRA12		-15.2								
			6	BARRA6	1	-8.0	-2.4			
			13	BARRA13	1	1.6	0.6			
13 0		1.051								
BARRA13		-15.2								
			6	BARRA6	1	-17.1	-6.6			
			12	BARRA12	1	-1.5	-0.6			
			14	BARRA14	1	5.5	1.6			
14 0		1.037								
BARRA14		-16.1								
			9	BARRA9	1	-9.4	-3.6			
			13	BARRA13	1	-5.5	-1.5			

TOTAIS DA AREA 1

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
GERACAO	INJ EQV	CARGA	ELO CC	SHUNT	EXPORT	IMPORT	PERDAS	
MW/ MVAR	MW/ MVAR	MW/ MVAR	MW/ MVAR	MVAR/ EQUIV	MW/ MVAR	MW/ MVAR	MW/ MVAR	
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
232.4	0.0	219.0	0.0	21.3	0.0	0.0	13.3	
77.3	0.0	73.5	0.0	0.0	0.0	0.0	25.8	

Sistema AEP30

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

-----SISTEMA DE 30 BARRAS-----

CASO BASE

RELATORIO DE CONVERGENCIA

OPCOES ATIVADAS:

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X			
ITERACAO	ERRO MAX BARRA	ERRO MAX BARRA	ERRO MAX CONV
FC P Q V	MW NUM.	MVAR NUM.	TENSAO % NUM. FM
X--X--X--X--X-----X-----X-----X-----X-----X			
1	107.27 5		FM
1		56.47 12	FM
2	15.51 6		
2		5.66 6	
3	1.10 8		

CONVERGENCIA FINAL

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X			
ITERACAO	ERRO MAX BARRA	ERRO MAX BARRA	ERRO MAX CONV
FC P Q V	MW NUM.	MVAR NUM.	TENSAO % NUM.
X--X--X--X--X-----X-----X-----X-----X-----X			
0	0.00 0	0.00 0	
3 2 0	0.13 2	0.19 4	0.000 0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

-----SISTEMA DE 30 BARRAS-----

CASO BASE

RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
BARRA	TENSAO	GERACAO	INJ EQV	FATOR	CARGA	ELO CC	SHUNT	MOTOR
NUM. TIPO	MOD/	MW/	MW/	GER %	MW/	MW/	MVAR/	MW/
NOME	ANG	MVAR	MVAR	EQV %	MVAR	MVAR	EQUIV	MVAR
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
1 2	1.060	306.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA1 SLACK	0.0	-25.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2 1	1.045	0.0	0.0	0.0	-18.3	0.0	0.0	0.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

-----SISTEMA DE 30 BARRAS-----

CASO BASE

RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
BARRA	TENSAO	GERACAO	INJEQV	FATOR	CARGA	ELO CC	SHUNT	MOTOR	
NUM. TIPO	MOD/	MW/	MW/	GER %	MW/	MW/	MVAR/	MW/	
NOME	ANG	MVAR	MVAR	EQV %	MVAR	MVAR	EQUIV	MVAR	
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
BARRA2 GERA.	-6.5	73.8	0.0	0.0	14.6	0.0	0.0	0.0	
3 0	1.020	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0	
BARRA3 CARG.	-9.4	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	
4 0	1.012	0.0	0.0	0.0	8.7	0.0	0.0	0.0	
BARRA4 CARG.	-11.3	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	
5 1	1.010	0.0	0.0	0.0	108.3	0.0	0.0	0.0	
BARRA5 C.RE.	-16.8	48.9	0.0	0.0	21.9	0.0	0.0	0.0	
6 0	1.008	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA6 CARG.	-13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7 0	0.999	0.0	0.0	0.0	26.2	0.0	0.0	0.0	
BARRA7 CARG.	-15.4	0.0	0.0	0.0	12.5	0.0	0.0	0.0	
8 1	1.010	0.0	0.0	0.0	34.5	0.0	0.0	0.0	
BARRA8 C.RE.	-14.2	50.6	0.0	0.0	34.5	0.0	0.0	0.0	
9 0	1.034	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA9 CARG.	-17.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10 0	1.019	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	19.7	0.0	
BARRA10 CARG	-19.1	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	
11 1	1.082	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA11 C.RE	-17.1	24.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
12 0	1.027	0.0	0.0	0.0	12.9	0.0	0.0	0.0	
BARRA12 CARG	-18.2	0.0	0.0	0.0	8.6	0.0	0.0	0.0	
13 1	1.071	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA13 C.RE	-18.2	33.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
14 0	1.000	0.0	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	0.0	
BARRA14 CARG	-19.0	0.0	0.0	0.0	8.6	0.0	0.0	0.0	
15 0	1.003	0.0	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	0.0	
BARRA15 CARG	-19.4	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	
16 0	1.015	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA16 CARG	-18.9	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	
17 0	1.012	0.0	0.0	0.0	10.4	0.0	0.0	0.0	
BARRA17 CARG	-19.3	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	
18 0	0.994	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0	
BARRA18 CARG	-20.1	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
19 0	0.993	0.0	0.0	0.0	10.9	0.0	0.0	0.0	
BARRA19 CARG	-20.3	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	
20 0	0.998	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0	

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

-----SISTEMA DE 30 BARRAS-----

CASO BASE

RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
BARRA	TENSAO	GERACAO	INJEQV	FATOR	CARGA	ELO CC	SHUNT	MOTOR	
NUM.	TIPO	MOD/	MW/	MW/	GER %	MW/	MW/	MVAR/	MW/
NOME	ANG	MVAR	MVAR	EQV %	MVAR	MVAR	EQUIV	MVAR	
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
BARRA20	CARG	-20.1	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
21	0	1.004	0.0	0.0	0.0	20.1	0.0	0.0	0.0
BARRA21	CARG	-19.6	0.0	0.0	0.0	12.9	0.0	0.0	0.0
22	0	1.004	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA22	CARG	-19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0	0.992	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0
BARRA23	CARG	-19.8	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0
24	0	0.987	0.0	0.0	0.0	10.0	0.0	4.2	0.0
BARRA24	CARG	-20.0	0.0	0.0	0.0	7.7	0.0	0.0	0.0
25	0	0.983	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA25	CARG	-19.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0	0.962	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0
BARRA26	CARG	-20.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0
27	0	0.991	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA27	CARG	-18.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0	1.004	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA28	CARG	-14.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0	0.967	0.0	0.0	0.0	2.8	0.0	0.0	0.0
BARRA29	CARG	-20.3	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
30	0	0.953	0.0	0.0	0.0	12.2	0.0	0.0	0.0
BARRA30	CARG	-21.4	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

-----SISTEMA DE 30 BARRAS-----

CASO BASE

RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

-----SISTEMA DE 30 BARRAS-----

CASO BASE

RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

X----- DADOS-BARRA -----X----- FLUXOS - CIRCUITOS -----X

DA BARRA		TENSAO	PARA BARRA		FLUXOS				
NUM.	TIPO	MOD	NUM.	NOME	NC	MW	MVAR	TAP	DEFAS TIE
NOME	ANG								
X-----	X-----		X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----X

			6	BARRA6 CARG.	1	-33.1	8.9		
			10	BARRA10 CARG	1	33.1	14.9		
			11	BARRA11 C.RE	1	0.0	-23.8		

10	0	1.019
BARRA10 CARG		-19.1

6	BARRA6 CARG.	1	-18.7	1.0
9	BARRA9 CARG.	1	-33.1	-13.5
17	BARRA17 CARG	1	6.9	6.3
20	BARRA20 CARG	1	10.9	5.3
21	BARRA21 CARG	1	18.4	12.4
22	BARRA22 CARG	1	8.9	5.8

11	1	1.082
BARRA11 C.RE		-17.1

9	BARRA9 CARG.	1	0.0	24.9
---	--------------	---	-----	------

12	0	1.027
BARRA12 CARG		-18.2

4	BARRA4 CARG.	1	-49.2	4.9
13	BARRA13 C.RE	1	0.0	-32.1
14	BARRA14 CARG	1	8.4	6.8
15	BARRA15 CARG	1	20.3	9.3
16	BARRA16 CARG	1	7.6	2.6

13	1	1.071
BARRA13 C.RE		-18.2

12	BARRA12 CARG	1	0.0	33.5
----	--------------	---	-----	------

14	0	1.000
BARRA14 CARG		-19.0

12	BARRA12 CARG	1	-8.2	-6.5
15	BARRA15 CARG	1	1.1	-2.2

15	0	1.003
BARRA15 CARG		-19.4

14

12	BARRA12 CARG	1	-20.0	-8.7
	BARRA14 CARG	1	-1.0	2.2
18	BARRA18 CARG	1	6.4	0.9
23	BARRA23 CARG	1	5.3	2.7

16	0	1.015
BARRA16 CARG		-18.9

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

-----SISTEMA DE 30 BARRAS-----

CASO BASE

RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

X----- DADOS-BARRA -----X----- FLUXOS - CIRCUITOS -----X

DA BARRA			TENSÃO		PARA BARRA		FLUXOS				
NUM.	TIPO	MOD	ANG	NUM.	NOME	NC	MW	MVAR	TAP	DEFAS	TIE
X		X		X	X	X	X	X	X	X	X

		12			BARRA12 CARG	1	-7.6	-2.5			
				17	BARRA17 CARG	1	3.6	0.4			
17	0	1.012									
BARRA17 CARG		-19.3									
				10	BARRA10 CARG	1	-6.8	-6.3			
				16	BARRA16 CARG	1	-3.6	-0.4			
18	0	0.994									
BARRA18 CARG		-20.1									
				15	BARRA15 CARG	1	-6.4	-0.8			
				19	BARRA19 CARG	1	2.7	-0.2			
19	0	0.993									
BARRA19 CARG		-20.3									
				18	BARRA18 CARG	1	-2.7	0.3			
				20	BARRA20 CARG	1	-8.2	-4.2			
20	0	0.998									
BARRA20 CARG		-20.1									
				10	BARRA10 CARG	1	-10.8	-5.0			
				19	BARRA19 CARG	1	8.3	4.2			
21	0	1.004									
BARRA21 CARG		-19.6									
				10	BARRA10 CARG	1	-18.2	-12.0			
				22	BARRA22 CARG	1	-1.8	-0.8			
22	0	1.004									
BARRA22 CARG		-19.6									
			10		BARRA10 CARG	1	-8.8	-5.7			
				21	BARRA21 CARG	1	1.8	0.8			
				24	BARRA24 CARG	1	7.0	4.9			
23	0	0.992									
BARRA23 CARG		-19.8									
				15	BARRA15 CARG	1	-5.2	-2.7			
				24	BARRA24 CARG	1	1.5	0.9			
24	0	0.987									
BARRA24 CARG		-20.0									
				22	BARRA22 CARG	1	-6.9	-4.7			
				23	BARRA23 CARG	1	-1.5	-0.9			
				25	BARRA25 CARG	1	-1.5	2.1			

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V05-07/94

-----SISTEMA DE 30 BARRAS-----

CASO BASE

RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

X----- DADOS-BARRA -----X----- FLUXOS - CIRCUITOS -----X

DA BARRA		TENSAO	PARA BARRA		FLUXOS				
NUM.	TIPO	MOD	NUM.	NOME	NC	MW	MVAR	TAP	DEFAS TIE
NOME	ANG								
X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----	X-----

25 0 0.983
BARRA25 CARG -19.5

24 BARRA24 CARG 1 1.5 -2.0
26 BARRA26 CARG 1 4.1 2.7
27 BARRA27 CARG 1 -5.6 -0.7

26 0 0.962
BARRA26 CARG -20.0

25 BARRA25 CARG 1 -4.0 -2.7

27 0 0.991
BARRA27 CARG -18.8

25 BARRA25 CARG 1 5.7 0.8
28 BARRA28 CARG 1 -21.1 -4.7
29 BARRA29 CARG 1 7.2 2.0
30 BARRA30 CARG 1 8.2 2.0

28 0 1.004
BARRA28 CARG -14.1

6 BARRA6 CARG. 1 -21.6 -2.2
8 BARRA8 C.RE. 1 0.5 -4.5
27 BARRA27 CARG 1 21.1 6.6 0.9901

29 0 0.967
BARRA29 CARG -20.3

27 BARRA27 CARG 1 -7.1 -1.7
30 BARRA30 CARG 1 4.3 0.7

30 0 0.953
BARRA30 CARG -21.4

27 BARRA27 CARG 1 -8.0 -1.6
29 BARRA29 CARG 1 -4.2 -0.6

TOTAIS DA AREA 1

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
GERACAO	INJ EQV	CARGA	ELO CC	SHUNT	EXPORT	IMPORT	PERDAS	
MW/	MW/	MW/	MW/	MVAR/	MW/	MW/	MW/	
MVAR	MVAR	MVAR	MVAR	EQUIV	MVAR	MVAR	MVAR	
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X								
306.4	0.0	282.6	0.0	23.9	0.0	0.0	24.1	
206.3	0.0	151.8	0.0	0.0	0.0	0.0	78.5	

APÊNDICE 2

Sistema AEP14

TITU

----- SISTEMA 14 BARRAS SEL -----

DBAR

1	2	BARRA1	1060	.0	0.0	0.0-9999	9999	0.0	0.0
2	1	BARRA2	1045	-5.	0.0	0.0	-40. 50.	-18.3	12.7
3	1	BARRA3	1010	-13.	0.0	0.0	0. 40.	94.2	19.0
4		BARRA4	1019	-10.	0.0	0.0		47.8	-3.9
5		BARRA5	1020	-8.8	0.0	0.0		7.6	1.6
6	1	BARRA6	1070	-14.	0.0	0.0	-6. 24.	11.2	7.5
7		BARRA7	1062	-13.	0.0	0.0		0.0	0.0
8	1	BARRA8	1090	-13.	0.0	0.0	-6. 24.	0.0	0.0
9		BARRA9	1056	-15.	0.0	0.0		29.5	16.6 19.
10		BARRA10	1051	-15.	0.0	0.0		9.0	5.8
11		BARRA11	1057	-15.	0.0	0.0		3.5	1.8
12		BARRA12	1055	-15.	0.0	0.0		6.1	1.6
13		BARRA13	1050	-15.	0.0	0.0		13.5	5.8
14		BARRA14	1036	-16.	0.0	0.0		14.9	5.0

9999

DLIN

1	2	1.938	5.917	5.28
1	5	5.403	22.304	4.92
2	3	4.699	19.797	4.38
2	4	5.811	17.632	3.74
2	5	5.695	17.388	3.40
3	4	6.701	17.103	3.46
4	5	1.335	4.211	1.28
4	7	20.912		0.9780.9501.050
4	9	55.618		0.9690.9501.050
5	6	25.202		0.9320.9501.050

continua...

6	11	9.49819.890
6	12	12.29125.581
6	13	6.61513.027
7	8	0.00117.615
7	9	11.001
9	10	3.181 8.450
9	14	12.71127.038
10	11	8.20519.207
12	13	22.09210.988
13	14	17.09334.802

9999

DGLT

0 0.95 1.1

9999

FIM

Sistema AEP30

TITU

-----SISTEMA DE 30 BARRAS-----									
DBAR									
1	1	BARRA1 SLACK01060	.0	-9999	9999	0.	0.		1.
2	-1	BARRA2 GERA.01045	.0	-40.	50.	-18.3	12.7		1.
3	0	BARRA3 CARG.01000	.0			2.4	1.2		1.
4	0	BARRA4 CARG.01000	.0			7.6	1.6		1.
5	-1	BARRA5 C.RE.01010	.0	-40.	40.	94.2	19.0		1.
6	0	BARRA6 CARG.01000	.0			.0	.0		1.
7	0	BARRA7 CARG.01000	.0			22.8	10.9		1.
8	-1	BARRA8 C.RE.01010	.0	-10.	40.	30.0	30.0		1.
9	0	BARRA9 CARG.01000	5			.0	.0		1.
10	0	BARRA10 CARG01000	.0			5.8	2.0	19.	1.
11	-1	BARRA11 C.RE01082	10	-6.	24.	.0	.0		1.
12	0	BARRA12 CARG01000	.0			11.2	7.5		1.
13	-1	BARRA13 C.RE01071	.0	-6.	24.	.0	.0		1.
14	0	BARRA14 CARG01000	.0			6.2	1.6		1.
15	0	BARRA15 CARG01000	.0			8.2	2.5		1.
16	0	BARRA16 CARG01000	.0			3.5	1.8		1.
17	0	BARRA17 CARG01000	.0			9.0	5.8		1.
18	0	BARRA18 CARG01000	.0			3.2	0.9		1.
19	0	BARRA19 CARG01000	.0			9.5	3.4		1.
20	0	BARRA20 CARG01000	.0			2.2	0.7		1.
21	0	BARRA21 CARG01000	.0			17.5	11.2		1.
22	0	BARRA22 CARG01000	.0			.0	.0		1.
23	0	BARRA23 CARG01000	.0			3.2	1.6		1.
24	0	BARRA24 CARG01000	.0			8.7	6.7	4.3	1.
25	0	BARRA25 CARG01000	.0			.0	.0		1.
26	0	BARRA26 CARG01000	.0			3.5	2.3		1.
27	0	BARRA27 CARG01000	.0			.0	.0		1.
28	0	BARRA28 CARG01000	.0			.0	.0		1.
29	0	BARRA29 CARG01000	.0			2.4	0.9		1.
30	0	BARRA30 CARG01000	.0			10.6	1.9		1.

9999

DLIN

1	2	1.92	5.75	2.64	9000
1	3	4.52	18.52	2.04	9000
2	4	5.70	17.37	1.84	9000
3	4	1.32	3.79	0.42	9000
2	5	4.72	19.83	2.09	9000

continua...