

ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE REATIVOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

THALES SOUSA

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 R. M. da Costa

São Carlos
2003

Aos meus Pais, incentivadores e responsáveis por todas as minhas conquistas.

"Tente,
Levante tua mão sedenta e recomece a andar
não pense que a cabeça agüenta se você parar.
Queira,
e basta ser sincero e desejar profundo
você será capaz de sacudir o mundo.
Tente,
não diga que a vitória está perdida
se é de batalhas que se vive a vida
Tente outra vez."

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Geraldo Roberto Martins da Costa pela amizade, compreensão, dedicação e paciência despendida durante a elaboração deste trabalho.

Aos companheiros do LOSEP: Alessandra, Cristiano, Edmarcio, e Vanusa pelo apoio, amizade e paciência.

Aos meus pais Vicente de Paulo e Geralda, ao meu irmão Júlio e a minha esposa Thaís por todo apoio nos momentos de maiores dificuldades e confiança em todas as minhas ações.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP pela colaboração.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Objetivo.....	3
1.2 - Organização do Trabalho.....	3
2 - ESTADO DA ARTE DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE REATIVOS.....	4
2.1 - Introdução.....	4
2.2 - Histórico.....	5
3 - O PROBLEMA DE FLUXO POTÊNCIA ÓTIMO.....	19
3.1 - Introdução.....	19
3.2 - O Problema de Fluxo de Potência Ótimo.....	20
3.3 - O Método Primal-Dual Barreira Logarítmica associada ao problema de Fluxo de Potência Ótimo.....	23
3.3.1 - O Método de Newton.....	25
3.3.2 - Matriz Lagrangiana.....	27
3.3.3 - Tamanho do Passo e Atualização das Variáveis.....	27
3.3.4 - O Parâmetro de Barreira.....	29
3.3.5 - Inicialização das Variáveis.....	30
4 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE REATIVOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	31

4.1 - Introdução.....	31
4.2 - Escolha das Barras Candidatas à Alocação de Reativos.....	33
4.3 - O Problema de Fluxo de Carga.....	34
4.4 - Obtenção da Matriz Sensibilidade.....	36
4.5 - Formulação do Problema de Programação Linear.....	38
5 - TESTES E RESULTADOS.....	41
5.1- Introdução.....	41
5.2 - Sistema WARD & HALE.....	42
5.3 - Sistema de 8 barras.....	50
5.4 - Sistema AEP - 30 barras.....	56
5.5 - Sistema IEEE - 118 barras.....	60
6 - CONCLUSÃO.....	64
7 - BIBLIOGRAFIA.....	66
APÊNDICE 1 - Programação Linear - Método do Simplex	
APÊNDICE 2 - Banco de Dados dos Sistemas Elétricos	
APÊNDICE 3 - Estado Final dos Sistemas Elétricos	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Sistema WARD & HALE	42
FIGURA 2- Gráfico representando os testes realizados segundo abordagem proposta	48
FIGURA 3- Sistema 8 barras	50
FIGURA 4- Sistema 30 barras	56
FIGURA 5- Sistema 118 barras	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Dados iniciais do sistema WARD & HALE	43
TABELA 2 - Ponto de operação do sistema WARD & HALE, resultante do fluxo de carga convencional	43
TABELA 3 – Resultados do sistema WARD & HALE para alocação reativa nas barras de carga do sistema	45
TABELA 4 - Solução do sistema WARD & HALE resultante do Fluxo de Potência Ótimo	45
TABELA 5 - Resultados do sistema WARD & HALE para alocação reativa na barra 5 do sistema	46
TABELA 6 - Solução do sistema WARD & HALE resultante do Fluxo de Potência Ótimo após a injeção de reativos na barra 5	47
TABELA 7 - Resultados do sistema WARD & HALE para alocação reativa na barra 3 e 5 do sistema.....	48
TABELA 8 - Dados iniciais do sistema de 8 barras	51
TABELA 9 - Ponto de operação do sistema de 8 barras resultante do fluxo de carga convencional	51
TABELA 10 - Resultados do sistema de 8 barras para alocação reativa nas barras de carga do sistema	53
TABELA 11 - Solução do sistema de 8 barras, resultante do Fluxo de Potência Ótimo	53
TABELA 12 - Resultados do sistema de 8 barras para alocação reativa na barra 8 do sistema	54
TABELA 13 - Ponto de operação do sistema AEP - 30 barras, resultante do fluxo de carga convencional	57
TABELA 14 - Resultado do sistema AEP - 30 barras para a alocação reativa nas barras de carga do sistema	58

TABELA 15 - Resultado do sistema AEP - 30 barras para a alocação reativa nas barras determinadas pela abordagem proposta	59
TABELA 16 - Resultado do sistema IEEE-118 barras para a alocação reativa nas barras de carga do sistema	62
TABELA 17 - Resultado do sistema IEEE-118 barras para a alocação reativa nas barras determinadas pela abordagem proposta	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

p.u. - por unidade;

PLS - programação linear seqüencial;

PLI - programação linear inteira;

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers;

MPI - método dos pontos interiores;

Min - minimizar;

MAX - maximizar;

s.a. - sujeito a;

NB - número de barras do sistema elétrico;

NBC - número de barras de carga;

NBCR - número de barras de controle de reativo;

NBCCR - número de barras de carga e de controle de reativos;

NT - número de transformadores;

MPDBL - método primal-dual barreira logarítmica;

La - matriz Lagrangiana;

J - matriz Jacobiana;

α_p - passo primal;

α_d - passo dual;

H, M, N, L - blocos da matriz Jacobiana;

S - matriz de sensibilidade;

W&H- sistema WARD & HALE;

Mbytes - Mega bytes;

RAM - Random Access Memory;

MHz - Mega Hertz;

LOSEP - Laboratório de Otimização em Sistemas Elétricos de Potência;

EESC - Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos;

USP - Universidade de São Paulo;

MW - Mega Watts;

MVA - Mega Volts Ampere;

MVAr - Mega Volt Ampere Reativo;

VAr - Volt Ampere Reativo;

LINDO - Linear Interactive Discrete Optimizer;

API - Application Programming Interface;

LISTA DE SÍMBOLOS

- \bar{X} - limite máximo da grandeza X ;
- \underline{X} - limite mínimo da grandeza X ;
- V - vetor das magnitudes das tensões;
- θ - vetor dos ângulos das tensões;
- t - vetor dos taps dos transformadores;
- s - vetor das variáveis de folga ou excesso;
- λ - vetor dos multiplicadores de Lagrange para as restrições de igualdade;
- π - vetor dos multiplicadores de Lagrange para as restrições de desigualdade transformada em igualdade pelas variáveis de folga;
- μ - parâmetro de barreira;
- β - parâmetro utilizado na atualização de μ ;
- P - potência ativa;
- P^G - potência ativa gerada;
- P^C - potência ativa consumida;
- P^{esp} - potência ativa especificada;
- Q^{esp} - potência reativa especificada;
- P_i - potência ativa no nó i ;
- Q - potência reativa;
- Q^G - potência reativa gerada;
- Q^C - potência reativa consumida;
- Q_j - potência reativa no nó j ;
- ΔQ - variação de potencia reativa;
- ΔV - variação de magnitude de tensão;
- ΔV_{max} - variação de magnitude de tensão máximo;
- I - matriz identidade;
- ∇L - gradiente da função;
- Δ - correção das variáveis;

$f(x)$ - função objetivo;
 $g(x)$ - restrições de igualdade;
 $h(x)$ - restrições de desigualdade;
 S - função custo;
 K_E - custo de energia;
 ΔE - variação de energia;
 K_p - custo de potência;
 ΔP - variação de potência;
 K_c - custo do banco de capacitores;
 C - tamanho do banco de capacitores;
 x - variáveis de estado ou variáveis dependentes;
 Y - admitância de linha na matriz Y barra;
 G - condutância de linha na matriz Y barra;
 B - susceptância de linha na matriz Y barra;
 y - admitância de linha;
 g - condutância da linha;
 b - susceptância da linha;
 Ω - conjunto de barras vizinhas a uma barra k ;
 K - conjunto das barras vizinhas, incluindo a própria barra k ;
 k, m - barras terminais de linha;
 u - variáveis de controle ou independentes;
 σ - valor empírico;
 g_x - matriz Jacobiana com relação ao vetor x ;
 g_u - matriz Jacobiana com relação ao vetor u ;

RESUMO

SOUSA, T. (2003). *Estudo de Planejamento de Reativos em Sistemas Elétricos de Potência*. São Carlos, 2003. 71p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma nova abordagem para a resolução do problema de planejamento de reativos em sistemas elétricos de potência. Um levantamento bibliográfico para explicitar as diferentes pesquisas realizadas nesta área foi feito. Este trabalho utiliza os multiplicadores de Lagrange obtidos da solução de um fluxo de potência ótimo, via método dos Pontos Interiores, para determinar as barras onde serão alocados reativos. A partir da determinação destas barras, um problema de programação linear para quantificar a potência reativa a ser alocada, é resolvido. Foram realizados estudos para validação e verificação da abordagem proposta nos sistemas WARD & HALE de 6 barras, sistema de 8 barras, sistema IEEE 30 e 118 barras.

Palavras-chave: Planejamento Ótimo de Reativos, Fluxo de Potência ótimo, Método dos Pontos Interiores, Sistemas Elétricos de Potência.

ABSTRACT

SOUSA, T. (2003). *Study of Reactive Planning in Electrical Power Systems*. São Carlos, 2003. 71p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The present dissertation proposes the development of a novel approach to the solution of reactive planning problem in electrical power systems. A bibliographical survey to show the different researches developed in this area was done. This study uses Lagrange multipliers obtained from the Optimal Power Flow solution, through Interior Point method, to determine the buses where reactive power will be allocated. Starting from the determination of these buses, a Linear Programming problem is solved to quantify the reactive power to be allocated. Studies were carried out for the proposed approach validation and verification in the systems WARD & HALE of 6 buses, system of 8 buses, systems IEEE of 30 and 118 buses.

Keywords: Optimal Reactive Planning, Optimal Power Flow, Interior Points Method, Electrical Power Systems.

INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda nos sistemas elétricos de potência, o gerenciamento de potência reativa tem se tornado cada vez mais importante para as empresas fornecedoras de energia, que necessitam manter as tensões dentro de seus limites pré-estabelecidos, fornecendo, desta forma energia dentro de padrões de qualidade e confiabilidade para os consumidores. Alterações no sistema podem resultar em variações dos níveis de tensões nos barramentos, podendo assim, comprometer a qualidade no fornecimento de energia elétrica. Entretanto, o estado do sistema com níveis de tensões violados pode ser melhorado através dos ajustes dos dispositivos de controle de tensão existentes e caso seja necessário, pelo planejamento ótimo de fontes reativas considerando características físicas, econômicas e de operação.

Trabalhos publicados descrevendo técnicas de solução para o problema de planejamento de reativos são abundantes. Estas técnicas de solução podem ser divididas em quatro categorias: métodos analíticos, métodos de programação

numérica, métodos heurísticos e métodos baseados em inteligência artificial, EL-HAWARY (2002).

Na prática, muitas empresas fornecedoras de energia elétrica utilizam o conhecimento prático de seus operadores para realizar a alocação de potência reativa. Por sua vez, os operadores realizam seus trabalhos com base em suas experiências com o sistema, fazendo, às vezes, a alocação de reativos de forma não otimizada. Um exemplo disso é considerar que as barras de menor tensão são necessariamente as barras que necessitam de alocação de reativos. Diante da possibilidade de se estar dimensionando de forma errada a localização e a magnitude das fontes reativas a serem instaladas, se faz necessário o uso de um método de determinação destas grandezas com bases científicas, procurando-se chegar o mais próximo do planejamento ótimo destas fontes.

A solução proposta neste trabalho para o planejamento ótimo de reativos, como exemplo de um método de programação numérica, trata a determinação das barras, onde serão alocados os reativos a partir da análise dos multiplicadores de Lagrange, associados às restrições de igualdade de potência reativa e resultantes de um processo de otimização não linear, realizado por um programa de fluxo de potência ótimo. A partir da escolha das barras, é construído um problema de programação linear, que tem como função objetivo minimizar a quantidade de potência reativa a ser instalada nestas barras de forma a trazer o problema de volta a uma solução operacional e a respeitar as restrições do problema de programação linear.

1.2) Objetivo

O objetivo deste trabalho de pesquisa é desenvolver uma nova abordagem para a resolução do problema de alocação de reativos, utilizando o método dos Pontos Interiores para determinar as barras onde serão alocados reativos. A partir da determinação das barras é construído um problema de programação linear com o intuito de quantificar a potência reativa a ser alocada.

1.3) Organização do Trabalho

Este **capítulo** apresenta a justificativa, a motivação e o objetivo para o desenvolvimento deste trabalho e sua organização.

O **capítulo 2** apresenta o estado da arte, onde algumas metodologias desenvolvidas para a solução do problema de alocação ótima de reativos são apresentadas de forma resumida.

O **capítulo 3** apresenta de forma detalhada o método de Pontos Interiores associado ao problema de fluxo de potência ótimo.

O **capítulo 4** apresenta detalhadamente a nova metodologia proposta para a resolução do problema de alocação ótima de reativos.

O **capítulo 5** apresenta alguns testes e resultados da abordagem proposta para os sistemas de 6, 8, 30 e 118 barras.

O **capítulo 6** apresenta conclusões referentes à abordagem proposta.

ESTADO DA ARTE DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE REATIVOS

2.1) Introdução

Para assegurar a qualidade e a confiabilidade do suprimento de energia para os consumidores é necessário que se mantenha a tensão das barras do sistema entre seus limites pré-estabelecidos. O crescimento de cargas, distante das unidades geradoras; as linhas de transmissão longas, operando em condições de cargas leves; o crescimento dos sistemas de transmissão e sub-transmissão, com a adição de novas linhas podem resultar na variação indesejada da tensão no sistema.

Os efeitos destas mudanças podem ser melhorados pelo operador do sistema através da determinação dos ajustes dos dispositivos de controle de tensão e das fontes reativas existentes no sistema e, caso necessário, da obtenção da expansão ótima de fontes reativas considerando características físicas, econômicas e de operação. O processo de

alocação de reativos pode ser feito através do ajuste dos “taps” dos transformadores, das tensões dos geradores e também com a alocação de novas fontes de reativos (VAr). Isso possibilita um menor nível de tensão e a minimização das perdas ativa do sistema.

Assim, a alocação de reativos no sistema tem uma dupla função:

- Melhorar os perfis de tensão do sistema, mantendo seus níveis de tensão o mais próximo de seus valores nominais;
- Minimizar as perdas do sistema.

2.2) Histórico

Os primeiros trabalhos de alocação ótima de reativos - mais especificamente alocação ótima de capacitores - usaram métodos analíticos. Estes algoritmos foram desenvolvidos quando os recursos computacionais eram caros ou de difícil acesso. Métodos analíticos envolvem o uso de cálculos para determinar o máximo de uma função custo referente à alocação dos capacitores. Essa função custo pode ser dada por:

$$S = K_E \Delta E + K_P \Delta P - K_C C \quad (2.1)$$

Sendo $K_E \Delta E$ a economia de energia, $K_P \Delta P$ a redução no pico das perdas de potência e $K_C C$ o custo de instalação dos capacitores.

Os pioneiros do problema de alocação ótima de capacitores, NEAGLE & SAMSON (1956), COOK (1959) e, mais tarde, SCHMILL (1965) e BAE (1978), usaram métodos

analíticos para maximizar algum tipo da função custo dada em (2.1). Embora soluções simples tenham sido alcançadas, estes métodos foram baseados em suposições não realistas de sistemas. Estes primeiros métodos são de fácil entendimento e implementação.

Para encontrar resultados mais exatos, os modelos das linhas foram melhorados. GRAINGER & LEE (1981) e SALAMA et al. (1985) formularam linhas equivalentes normalizadas, que consideravam linhas com seções de diferentes tamanhos de condutores e cargas distribuídas não uniformemente. GRAINGER & CIVANLAR (1985) também incluíram o planejamento de capacitores em seus algoritmos e melhoraram seus trabalhos incluindo alocação de reguladores de tensão em publicações subsequentes. Estes últimos métodos analíticos utilizaram modelamentos reais de linhas de distribuição radiais e consideraram a variação de carga dos sistemas de distribuição.

Uma desvantagem de todos os métodos analíticos é o modelamento dos locais de alocação dos capacitores, e tamanhos destes, como variáveis contínuas. Conseqüentemente, o cálculo do tamanho dos capacitores pode não combinar com os tamanhos padrões disponíveis, e a localização pode não coincidir com a localização física do nó do sistema. Os resultados podem precisar de arredondamentos para um valor acima ou abaixo do valor especificado para se aproximarem do valor prático, podendo acarretar em uma situação de sobretensão ou uma economia menor que a calculada. Os métodos mais recentes são mais exatos e adequados para sistemas de distribuição de tamanhos consideráveis, mas exigem maiores informações dos sistemas e tempo computacional.

Quando os recursos computacionais tornaram-se mais acessíveis, métodos de programação numérica foram formulados para resolver problemas de otimização. Métodos de programação numérica são técnicas iterativas usadas para maximizar ou minimizar uma função objetivo de variáveis de decisão. Para a alocação ótima de reativos, uma função custo ou uma função perdas podem representar a função objetivo que deve satisfazer a um grupo de restrições. A localização, tamanho ou número de fontes reativas, os valores das tensões e as correntes nas barras podem expressar as variáveis de decisão que devem satisfazer as restrições operacionais. A função objetivo pode considerar todas as tensões e limites de carga na linha, a capacidade das fontes de potência reativa e a localidade física dos nós do sistema. O problema de alocação de fontes reativas no sistema pode ser formulado como segue:

$$\begin{aligned} (MAX) \quad S &= K_L \Delta L - K_C C \\ \text{sujeito a} \quad \Delta V &\leq \Delta V_{MAX} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Sendo $K_L \Delta L$ a economia na redução de energia e na redução das perdas de potência, $K_C C$ o custo de instalação e ΔV a variação de tensão, devido à instalação das fontes de reativos, que não devem exceder um máximo de ΔV_{MAX} .

DURAN (1968) foi o primeiro a usar um método de programação dinâmica para o problema de alocação de capacitores. A formulação é simples e apenas considera a redução da perda de energia e informa o tamanho discreto dos capacitores. Mais tarde,

FAWZI (1983) seguiu o trabalho de DURAN (1968) incluindo a injeção de reativos às funções de economia.

KISHORE & HILL (1970) desenvolveram um método para determinar a quantidade mínima de potência reativa necessária para satisfazer as condições das restrições das tensões do sistema. Os autores utilizam uma relação de sensibilidade que mede a relação da magnitude de tensão V_i no nó i com a respectiva injeção de potência reativa Q_j no nó j . A relação linear entre ΔV_i no nó i e o ΔQ_j no nó j é usada na forma de um problema de programação linear, determinando o incremento de potência reativa a ser instalada em vários nós do sistema, fazendo com que a magnitude de tensão fique dentro dos limites desejáveis.

MAMANDUR & CHENOWETH (1981) desenvolveram uma formulação matemática para o problema de controle ótimo de potência reativa que minimiza as perdas de potência ativa no sistema. O modelo emprega relações linearizadas de sensibilidade do sistema de potência para estabelecer uma relação entre a função objetivo e o desempenho das sensibilidades do sistema relativo as variáveis dependentes e de controle. Foi utilizada uma técnica de programação linear dual para determinar o ajuste ótimo das variáveis de controle, satisfazendo simultaneamente os limites de potência reativa dos geradores; os limites de tensão nas barras de carga e os limites operacionais das variáveis de controle, isto é, a posição dos “taps” dos transformadores, a tensão nos terminais dos geradores e o chaveamento de fontes de potência reativa. Esta técnica é satisfatória para melhorar os perfis de tensão e minimizar as perdas do sistema sob condições operacionais.

IYER et al. (1984) apresentaram um método de programação numérica de rápida convergência para determinar a magnitude de tensão dos geradores, a posição dos “taps” dos transformadores e a alocação estática de capacitores em um sistema de potência, a fim de minimizar as perdas de potência e melhorar a qualidade de suprimento do sistema. Os valores ótimos para estas variáveis são determinados, definindo-se um problema de otimização sujeito às restrições baseadas nas equações do fluxo de carga e variáveis do sistema. A função objetivo para o problema de otimização representa o rendimento resultante da redução das perdas depois de deduzirem-se as despesas de instalação dos capacitores. As restrições são baseadas nas variáveis do sistema. A função objetivo e as restrições são linearizadas sobre o ponto de operação corrente do sistema decidido por uma programação de geração de potência ativa. A programação usa variável discreta para representar o tamanho dos capacitores e variáveis contínuas para representar a mudança nas tensões dos geradores e “tap’s” dos transformadores. As variáveis discretas são transformadas em variáveis binárias. O problema de alocação de capacitores é, então, formulado como um problema de programação linear inteira mista, baseado em decomposição de Benders, em que o problema é decomposto em dois subproblemas menores. As soluções dos dois subproblemas são combinadas para alcançar a solução do problema original. A precisão do modelo foi verificada pelos valores pré-determinados e pelos valores obtidos do fluxo de carga no sistema final.

DEEB & SHAHIDEHPOUR (1989) apresentaram um método baseado em programação linear para encontrar a solução ótima do problema de alocação de potência reativa. O problema foi decomposto em dois subproblemas - subproblema operacional e subproblema de investimento - baseado no método de decomposição de Benders. O

objetivo do subproblema operacional é minimizar as perdas de potência ativa e o do subproblema de investimento é minimizar o custo de instalação de novos capacitores e indutores. O método de decomposição Dantzig-Wolfe é implementado para solucionar os subproblemas. Os resultados indicam que o método proposto converge muito rápido com uma solução ótima para problemas operacionais e de investimento.

NOUREDDINE & CHANDRASEKARAN (1992) linearizaram o problema de minimização de perdas, alocação e tamanho dos capacitores. A linearização é feita em termos de compensação de reativos e mudança de tensão. Esse processo elimina a necessidade de recalcular o problema de fluxo de carga. A fórmula linearizada é derivada das funções de mudanças de tensão e grupos de capacitores. Um exemplo numérico foi considerado para ilustrar as vantagens da técnica de compensação proposta. Uma comparação entre os modelos de programação linear e não linear é apresentada.

GRUDININ (1998) apresentou um modelo de otimização de potência reativa baseado em métodos de programação quadrática sucessiva. A formulação matemática junto ao algoritmo supõe diferentes funções objetivos, dependendo do tipo e propósito do problema. Um modelo de otimização de potência reativa bi-criterioso, que representa o compromisso entre funções objetivos econômicas e de segurança, é proposto. O problema de programação quadrática é resolvido com base no método do tipo Newton. Alguns dos principais problemas em se usar programação quadrática em otimização de potência reativa são: o fato de o processo interagir ciclicamente; a grande dimensão do problema de programação; a complexidade e a confiabilidade dos algoritmos de programação quadrática.

MANTOVANI et al. (2001b) apresentaram um algoritmo que utiliza a técnica de Decomposição de Benders para resolver o problema de Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica. A Decomposição de Benders separa o problema de planejamento em dois subproblemas: um subproblema de investimento (mestre) e outro de operação (escravo). O subproblema de operação é resolvido usando-se um algoritmo de programação linear sucessiva (PLS). Já o subproblema de investimento, que é um problema de programação linear inteira (PLI), envolvendo variáveis discretas, é resolvido usando-se um algoritmo do tipo Branch-and-Bound.

REZANIA & SHAHIDEHPOUR (2001) aplicaram um eficiente método dos pontos interiores preditor-corretor primal-dual para solucionar o problema de otimização de potência reativa através de programação linear sucessiva. Um modelo linear é introduzido, no qual as variáveis de controle e o incremento de tensão são ligados por uma matriz Jacobiana modificada e as perdas na transmissão são representadas como uma função do incremento de tensão. O método não calcula a inversa da matriz, nem calcula a derivada de segunda ordem da matriz Hessiana a cada iteração, para resolver o programa linear e com isso a solução pode economizar tempo computacional e espaço de memória.

HSIAO & CHIEN (2001) reformularam o problema de alocação de capacitores como um problema de otimização restrito, multi-objetivo e não diferenciável. Esse trabalho considera quatro diferentes funções objetivos relacionadas ao custo de investimento, à eficiência operacional, à segurança do sistema e à qualidade do serviço. O trabalho emprega um algoritmo de solução de dois estágios, baseado na técnica

iterativa de restrição \mathcal{E} . A noção de um fator de preferência é introduzida através de um processo iterativo para determinar a solução ótima mais satisfatória. Essa formulação não requer que as funções objetivas sejam diferenciáveis e nem que as variáveis sejam contínuas.

ELRAZAZ (2001) propôs um algoritmo para determinar simultaneamente a localização do reator como também seus valores, levando em consideração as diferentes restrições do sistema. O algoritmo utiliza sensibilidades de potência reativa com respeito às tensões das barras de carga e à compensação de potência reativa para minimizar o custo de instalação dos reatores. Aplicações são usadas para demonstrar a efetividade do algoritmo proposto, em sistemas de potência, operando em condições de carga leve.

CHAVES et al. (2002) apresentaram uma metodologia baseada no uso de ferramentas de otimização e numa hierarquia de tomada de decisões que propiciam a elaboração de planos de expansão dos sistemas de energia. A ferramenta de otimização computacional utilizada para este trabalho foi o PPS (*Power System Simulator*). O procedimento compreende da entrada de dados, da seleção das barras (candidatas à alocação de reativos), da imposição das restrições do sistema e da escolha dos parâmetros de otimização. No fim, um relatório é apresentado com a solução obtida. Caso a solução não seja satisfatória, são feitas alterações nos parâmetros, seguidas de alterações nas restrições, seguidas de alteração das barras candidatas até que seja alcançada uma solução conveniente.

Com inspeção a todos os métodos de programação numérica, pode-se observar que o nível de sofisticação e complexidade dos modelos incrementou em ordem cronológica de suas datas de publicação. Vários dos métodos de programação numérica têm a vantagem de considerar a localização das barras nas linhas e o tamanho das fontes reativas como variáveis discretas. Contudo, a preparação dos dados e o desenvolvimento da interface para técnicas numéricas podem exigir um maior tempo computacional que para outros tipos de métodos de programação, como, por exemplo, o método analítico.

Métodos baseados em técnicas de buscas heurísticas, são regras de manuseio desenvolvidas através de intuição, experiência e decisão. Tais métodos produzem estratégias rápidas e práticas, que reduzem o espaço de busca e podem conduzir a uma solução com segurança e que esteja próxima ao ótimo.

ABDEL-SALAM et al. (1994) propuseram uma técnica heurística para identificar uma parte do sistema que possui as maiores perdas devido às correntes de cargas reativas e, então, definiram o ponto sensível na seção com o maior efeito na redução de perdas do sistema. O tamanho dos capacitores colocados nas barras sensíveis é então determinado por maximizar a redução de perdas de potência com a compensação capacitiva. Os métodos heurísticos são intuitivos, de fácil compreensão e simples implementação, se comparados aos métodos analíticos e de programação numérica. Contudo, os resultados produzidos pelos algoritmos heurísticos não garantem bons resultados.

Outra forma de abordagem é dada pela recente popularidade da inteligência artificial que tem conduzido várias pesquisas a investigarem seu uso para aplicações em engenharia de potência. Em particular, algoritmos genéticos, simulação “annealing”, sistemas especialistas, redes neurais artificiais e teoria de lógica “fuzzy” têm sido implementadas no problema de alocação ótima de fontes de reativos, mais especificamente de capacitores e compensadores síncronos.

BOONE & CHIANG (1993) desenvolveram um método baseado em algoritmos genéticos para determinar o tamanho e a localização ótima das fontes de reativos, mais especificamente dos capacitores. O tamanho e a localização destas fontes são codificados em seqüências binárias, e uma combinação é feita para gerar um novo conjunto de dados capaz de produzir resultados ainda melhores. Esta formulação do problema apenas considera os custos dos capacitores e a redução das perdas de potência do sistema elétrico.

LEE & YANG (1998) propuseram um estudo comparativo para três algoritmos evolutivos para solução do problema de planejamento ótimo de potência reativa: programação evolutiva, estratégia evolutiva e algoritmos genéticos. Os algoritmos evolutivos são métodos de inteligência artificial para otimização baseados em mecanismos de seleção natural, como mutação, recombinação, reprodução e seleção. Estes métodos compartilham muitas similaridades. Neste trabalho, o problema de planejamento ótimo de potência reativa é decomposto em módulos de otimização P (potência ativa) e Q (potência reativa) e cada módulo é otimizado pelos algoritmos evolutivos, em um modo iterativo, para obter uma solução global. Os métodos para solução do problema de planejamento ótimo de potência reativa são avaliados pelo

sistema IEEE-30 barras, e os resultados são comparados com as soluções apresentadas pelos três tipos de algoritmos evolutivos e com a solução apresentada pelo método de programação linear.

MANTOVANI et al. (2001a) propuseram um método que usa a programação linear sucessiva e um algoritmo genético simples para resolver o problema de planejamento ótimo de reativos em sistemas elétricos de potência. O problema é dividido em subproblemas de operação e planejamento. O subproblema operacional, que é um problema não-linear, mal condicionado e não-convexo, consiste na determinação do controle de tensão e do ajuste das fontes reativas. O subproblema de planejamento consiste em obter a expansão ótima das fontes reativas considerando as características operacionais, econômicas e físicas do sistema. A programação linear sucessiva resolve o problema de despacho ótimo de reativos relacionado às variáveis reais, enquanto o algoritmo genético simples é usado para determinar os ajustes necessários entre as variáveis binárias e discretas existentes no problema modelado. O programa implementado dá a localização e tamanho das fontes reativas necessárias, para atender as restrições operacionais e de segurança. O método foi testado na solução do planejamento ótimo de reativos do sistema IEEE-30 barras e de um sistema real de 309 barras. Adotando um tamanho de população conveniente, que é uma função do número de variáveis discretas consideradas pelo algoritmo genético, o algoritmo apresenta uma boa proposta de solução, e o ajuste das variáveis discretas existentes no sistema se dá após a trigésima iteração.

GALLEGO et al. (2001) propuseram um método híbrido originado do método de busca Tabu, estendido com características vindas de outras aproximações

combinatoriais, como algoritmos genéticos e simulação “annealing”, e de aproximações heurísticas práticas, para solucionar o problema de alocação de reativos em sistemas de distribuição radial. O método foi testado extensivamente em vários sistemas disponíveis na literatura e em sistemas reais, apresentando resultados superiores tanto para soluções de custos como soluções de qualidade.

CHIANG et al. (1990) apresentaram um problema geral de alocação de capacitores, levando em consideração aspectos práticos dos capacitores, limites de cargas e os limites operacionais com diferentes níveis de carga. A nova formulação aproxima a função objetivo custo, não diferenciável, por uma função diferenciável, facilitando a aplicação das técnicas de otimização não lineares. A técnica de simulação “annealing” foi adaptada a problemas de otimização levando-se em consideração certas limitações. Uma das características atrativas do método é a capacidade de busca de um mínimo global da função objetivo, enquanto a maioria das técnicas de otimização estão presas aos mínimos locais. Para a eficiência da metodologia apresentada, foi necessário um eficiente algoritmo de fluxo de carga a fim de conferir a nova configuração gerada pelo método.

SALAMA et al. (1995) desenvolveram um sistema especialista contendo técnicas de habilidade em informação e habilidade humana para o controle de reativos em sistemas de potência. As técnicas de habilidade em informação incluem o método de alocação de capacitores para a máxima redução das perdas de potência e energia. O componente de habilidade humana contém informações para guiar o usuário e para executar o controle

de potência reativa nas áreas de planejamento, operação e expansão dos sistemas de distribuição.

SANTOSO & TAN (1990) usaram redes neurais artificiais para o controle ótimo de capacitores. Neste trabalho, duas redes neurais são usadas. Uma rede é usada para prever o nível de carga de um grupo de valores de carga obtidos da medida direta de várias barras, e uma segunda rede neural é usada para selecionar a posição ótima do “tap” dos capacitores baseada no nível de carga como previsto pela primeira rede. A primeira rede é treinada com um grupo de pré-registro de níveis de carga, e a segunda rede é treinada para maximizar a redução de perda energética para uma dada condição de carga. Ambas redes treinadas, cálculos iterativos são exigidos, e uma solução rápida para um dado grupo de entradas pode ser estabelecida. O algoritmo foi testado em um sistema de 30-barras. Para reduzir a complexidade do treinamento, o caso teste foi separado em seis subsistemas. Embora este método seja satisfatório para uma implementação “on-line” do sistema apresentado, ele pode não ser apropriado para um sistema de distribuição maior. Desde então, pode ser necessário particionar um sistema grande em vários subsistemas menores. E, como é do conhecimento dos próprios autores, o tempo exigido para treinamento da rede neural pode ser muito grande.

ZADEH (1965) introduziu a lógica “fuzzy” como uma ferramenta formal para lidar com um modelamento incerto e flexível. Uma variável “fuzzy” é modelada por um grupo de funções que fixa um grau de agrupamento para o grupo.

CHIN (1995) usou a teoria de lógica “fuzzy” e fixou três grupos de funções para descrever perdas, divergência de tensão e distorção harmônica. Uma variável de decisão, para determinar os nós onde serão alocadas as fontes de reativos, é então calculado para escolher a interseção dos três grupos de funções para cada nó do sistema. Os nós com melhores valores de decisão são selecionados para instalação das fontes de reativos. Nenhum procedimento de otimização matemática é dado para calcular o tamanho das fontes a serem alocadas nos nós selecionados pela teoria “fuzzy”.

H. N. NG et al. (2000a) também aplicaram teoria de lógica “fuzzy” para o problema de alocação de capacitores usando raciocínio aproximado de “fuzzy”. Índices de tensão e perdas de potência dos nós do sistema são modelados por um grupo de funções e um sistema “fuzzy” especialista contendo um grupo de regras heurísticas executa a conclusão para determinar um índice para alocação dos capacitores de cada nó. Os capacitores são alocados aos nós com maior índice de conveniência. O sistema “fuzzy” proposto pode também considerar alguma incerteza nos parâmetros usados ou na falta de dados.

O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

3.1) Introdução

Um sistema elétrico tem por objetivo fornecer energia dentro de padrões de qualidade e confiabilidade para seus consumidores, para isto, se faz necessário que todas as variáveis do sistema estejam dentro de seus limites previamente especificados. Modificações na configuração da rede, como alterações na geração ou na carga, podem fazer com que as variáveis do sistema sejam alteradas, podendo violar os seus limites. Quando estas variáveis são alteradas, um ajuste nos equipamentos (variáveis de controle) é realizado para situações localizadas. À medida que há um aumento no número de variáveis de controle a serem ajustadas, para satisfazer as condições de operação do sistema, estes ajustes tornam-se um exaustivo processo de tentativas e erros. Neste caso o fluxo de potência ótimo é o instrumento ideal, ajustando simultaneamente, de maneira ótima, todas as variáveis de controle do sistema satisfazendo, critérios pré-estabelecidos.

O problema de fluxo de potência ótimo foi definido no início da década de 60. Sua formulação foi inicialmente proposta por CARPENTIER (1962), o qual

elaborou o problema de fluxo de potência ótimo com base no problema de despacho econômico, que compreende o quanto cada gerador tem de produzir de potência ativa para atender a demanda do sistema. O problema de fluxo de potência ótimo é um problema de programação não linear, não convexo e de grande porte, tornando-se de difícil aplicação em tempo real. Sendo o fluxo de potência ótimo um problema de otimização de grande porte e que, quando resolvido gera um sistema de equações lineares esparsas, qualquer algoritmo eficiente para a solução do problema deve explorar técnicas e estruturas de esparsidade.

Entre as técnicas de programação matemática, utilizadas em algoritmos para solução do fluxo de potência ótimo, podemos citar: programação linear sucessiva (PLS), programação quadrática e métodos de programação não linear baseados em métodos do tipo Newton. Desde a década de 80, o interesse pela aplicação dos métodos de pontos interiores (MPI), para sistemas de potência, tem aumentado devido ao progresso de seu desempenho e das suas propriedades de convergência.

Neste capítulo será apresentado o método primal-dual barreira logarítmica que será utilizado na determinação das barras onde serão alocadas as fontes reativas.

3.2) O Problema de Fluxo de Potência Ótimo

O fluxo de potência ótimo é um problema de otimização restrito e, como já citado anteriormente, não linear, não convexo e de grande porte. A solução deste problema determina o melhor ponto de operação do sistema através da otimização de uma função objetivo que representa um dado desempenho do sistema, como exemplo, a minimização das perdas ativas na transmissão, a minimização dos custos de geração, etc. O fluxo de potência ótimo pode ser representado matematicamente

através de um problema geral de otimização com restrições de igualdade e desigualdade como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f(x) \\
 & \text{s.a.: } g(x)=0 \\
 & \quad \underline{h} \leq h(x) \leq \bar{h} \\
 & \quad \underline{x} \leq x \leq \bar{x}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

O vetor das variáveis de estado x representa a magnitude de tensão (V), ângulo (θ) e tap dos transformadores (t). A função objetivo $f(x)$ é uma função escalar e representa, para os nossos estudos, as perdas de potência ativa na transmissão. Essa função é não separável e não permite simplificações.

As restrições de igualdade $g(x)$ são as equações do fluxo de potência obtidas quando impõe-se o princípio da conservação de potência em cada barra da rede. As restrições de desigualdade $h(x)$ representam as restrições funcionais, como a potência reativa nas barras de controle de reativos, os fluxos ativos e reativos nas linhas de transmissão, fluxo de intercâmbio, etc.

Ao rescrever (3.1) utilizando as equações de fluxo de potência apresentadas por MONTICELLI (1983), temos o seguinte problema de fluxo de potência ótimo:

$$\begin{aligned}
\text{Min} \quad & \sum_{i=1}^{NL} g_i [V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}] \\
\text{s.a. :} \quad & P_k^G - P_k^C - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) = 0 \quad k = 1, \dots, NBCCR \\
& Q_k^G - Q_k^C - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) = 0 \quad k = 1, \dots, NBC \\
& \underline{Q}_j \leq V_j \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \leq \bar{Q}_j \quad j = 1, \dots, NBCR \quad (3.2) \\
& \underline{t}_i \leq t \leq \bar{t}_i \quad i = 1, \dots, NT \\
& \underline{V}_k \leq V_k \leq \bar{V}_k \quad k = 1, \dots, NB
\end{aligned}$$

O problema de fluxo de potência ótimo com função objetivo representando as perdas ativas na transmissão é conhecido como fluxo de potência ótimo reativo. Essa definição se dá pelo fato de todas as variáveis associadas às potências ativas estarem fixas, com exceção da potência gerada na barra de referência. A função objetivo, apresentada pela equação (3.2), representa as perdas ativas nas linhas de transmissão, sendo considerada um fator complicante para a solução do problema de fluxo de potência ótimo, por ser uma função não linear.

Muitas técnicas de otimização para a solução do problema de fluxo de potência ótimo foram estudadas. A técnica de solução que utiliza pontos interiores tem se mostrado uma alternativa eficiente na solução de problemas de otimização de sistemas de potência. Entre os métodos de otimização que utilizam pontos interiores, o método primal-dual barreira logarítmica tem sido aplicado para solução do problema de fluxo de potência ótimo, GRANVILLE (1994).

3.3) O Método Primal-Dual Barreira Logarítmica associado ao problema de Fluxo de Potência Ótimo

A seguir será apresentado o método primal-dual barreira logarítmica (PDBL), SOUSA (2001). Para tal apresentação, e ainda para facilitar a notação, será usado o problema de fluxo potência ótimo apresentado pela equação (3.1). Para a resolução deste problema pelo método PDBL, é necessário que as restrições de desigualdades se tornem igualdades através da adição de variáveis de folga ou excesso, positivas. O problema modificado pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f(x) \\
 & \text{s.a.: } g(x) = 0 \\
 & \quad h(x) + s_1 = \bar{h} \\
 & \quad h(x) - s_2 = \underline{h} \\
 & \quad x + s_3 = \bar{x} \\
 & \quad x - s_4 = \underline{x} \\
 & \quad s_1, s_2, s_3, s_4 \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Estas variáveis de folga e excesso estritamente positivas são incorporadas à função objetivo através da função barreira logarítmica. Assim, o problema (3.3) passa a ser reescrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \left\{ f(x) - \mu \sum_{i=1}^{NBCR} \ln(s_{1i}) - \mu \sum_{i=1}^{NBCR} \ln(s_{2i}) - \mu \sum_{i=1}^{NB} \ln(s_{3i}) - \mu \sum_{i=1}^{NB} \ln(s_{4i}) \right\} \\
 & \text{s.a.: } g(x) = 0 \\
 & \quad h(x) + s_1 = \bar{h} \\
 & \quad h(x) - s_2 = \underline{h} \\
 & \quad x + s_3 = \bar{x} \\
 & \quad x - s_4 = \underline{x}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Sendo μ o parâmetro de barreira, positivo, que tende a zero durante o processo de otimização, isto é, $\mu_0 > \mu_1 > \mu_2 > \dots > \mu_\infty = 0$.

Os termos logarítmicos asseguram que as condições das variáveis de folga ou excesso serão estritamente positivas. A partir do problema restrito, representado por (3.4), constrói-se a função Lagrangiana, como mostrado a seguir:

$$L = f(x) - \mu \sum_{i=1}^{NBCR} \ln(s_{1i}) - \mu \sum_{i=1}^{NBCR} \ln(s_{2i}) - \mu \sum_{i=1}^{NB} \ln(s_{3i}) - \mu \sum_{i=1}^{NB} \ln(s_{4i}) - \lambda^t g(x) \\ - \pi_1(h(x) + s_1 - \bar{h}) - \pi_2(h(x) - s_2 - \underline{h}) - \pi_3(x + s_3 - \bar{x}) - \pi_4(x - s_4 - \underline{x}) \quad (3.5)$$

Sendo $\lambda, \pi_1, \pi_2, \pi_3$ e π_4 vetores dos multiplicadores de Lagrange.

Os multiplicadores de Lagrange, λ_i representam a mudança marginal do valor ótimo na função objetivo enquanto a disponibilidade da quantidade de recurso i disponível está sendo variada. Em outras palavras, λ_i , mostra o acréscimo ou decréscimo na função objetivo, por acréscimo unitário na disponibilidade de recurso i , FRITZSCHE (1978). Isso pode ser representado por:

$$\frac{\partial f(x(b))}{\partial b_i} = \lambda_i \quad (3.6)$$

Sendo $x(b)$ o valor ótimo da função e b_i uma limitação da quantidade de recurso i disponível.

Aplicando as condições de otimalidade em (3.5), obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\nabla_x L = \nabla_x f(x) - \nabla_x g(x)^t \lambda - \nabla_x h(x)^t \pi_1 - \nabla_x h(x)^t \pi_2 - \pi_3 - \pi_4 \quad (3.7)$$

$$\nabla_\lambda L = -g(x) = 0 \quad (3.8)$$

$$\nabla_{\pi_1} L = -(h(x) + s_1 - \bar{h}) = 0 \quad (3.9)$$

$$\nabla_{\pi_2} L = -(h(x) - s_2 - \underline{h}) = 0 \quad (3.10)$$

$$\nabla_{\pi_3} L = -(x + s_3 - \bar{x}) = 0 \quad (3.11)$$

$$\nabla_{\pi_4} L = -(x - s_4 - \underline{x}) = 0 \quad (3.12)$$

$$\nabla_{s_1} L = -\mu S_1^{-1} e - \pi_1 = 0 \quad (3.13)$$

$$\nabla_{s_2} L = -\mu S_2^{-1} e + \pi_2 = 0 \quad (3.14)$$

$$\nabla_{s_3} L = -\mu S_3^{-1} e - \pi_3 = 0 \quad (3.15)$$

$$\nabla_{s_4} L = -\mu S_4^{-1} e + \pi_4 = 0 \quad (3.16)$$

Sendo $e = (1, 1, \dots, 1)^t$, S_1, S_2, S_3, S_4 matrizes diagonais, cujos elementos são

s_1, s_2, s_3, s_4 , respectivamente e $\nabla f(x)$ é o gradiente de $f(x)$.

3.3.1) O Método de Newton

O método de Newton é utilizado com o intuito de solucionar o sistema de equações (3.7) a (3.16). Este método utiliza a expansão em série de Taylor até primeira ordem das equações do sistema, e gera as direções de busca $(\Delta x, \Delta \lambda, \Delta \pi_1, \Delta \pi_2, \Delta \pi_3, \Delta \pi_4, \Delta s_1, \Delta s_2, \Delta s_3, \Delta s_4)$ que serão utilizadas para a atualização das variáveis do sistema. Desta forma, as equações de Newton para se obterem as direções são as seguintes:

$$\begin{aligned} W(x, \lambda, \pi_1, \pi_2) \Delta x - \nabla_x g(x)^t \Delta \lambda - \nabla_x h(x)^t \Delta \pi_1 - \nabla_x h(x)^t \Delta \pi_2 - \Delta \pi_3 - \Delta \pi_4 &= -\nabla_x L \\ -(\nabla_x g(x)) \Delta x &= -\nabla_\lambda L \\ -(\nabla_x h(x) \Delta x + \Delta s_1) &= -\nabla_{\pi_1} L \\ -(\nabla_x h(x) \Delta x - \Delta s_2) &= -\nabla_{\pi_2} L \\ -(\Delta x + \Delta s_3) &= -\nabla_{\pi_3} L \\ -(\Delta x - \Delta s_4) &= -\nabla_{\pi_4} L \\ \mu S_1^{-2} \Delta s_1 - \Delta \pi_1 &= -\nabla_{s_1} L \\ \mu S_2^{-2} \Delta s_2 + \Delta \pi_2 &= -\nabla_{s_2} L \\ \mu S_3^{-2} \Delta s_3 - \Delta \pi_3 &= -\nabla_{s_3} L \\ \mu S_4^{-2} \Delta s_4 + \Delta \pi_4 &= -\nabla_{s_4} L \end{aligned} \quad (3.17)$$

Rescrevendo (3.17) na forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} W(x, \lambda, \pi_1, \pi_2) & -J(x)^t & -\nabla_x h(x)^t & -\nabla_x h(x)^t & -I & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -J(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x h(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x h(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & \mu S_1^{-2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & \mu S_2^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & \mu S_3^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I & 0 & 0 & 0 & \mu S_4^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \\ \Delta \pi_1 \\ \Delta \pi_2 \\ \Delta \pi_3 \\ \Delta \pi_4 \\ \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \Delta s_3 \\ \Delta s_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_x L \\ \nabla_\lambda L \\ \nabla_{\pi_1} L \\ \nabla_{\pi_2} L \\ \nabla_{\pi_3} L \\ \nabla_{\pi_4} L \\ \nabla_{s_1} L \\ \nabla_{s_2} L \\ \nabla_{s_3} L \\ \nabla_{s_4} L \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Sendo:

$$W(x, \lambda, \pi_1, \pi_2) = \nabla^2 f(x) - \sum_{i=1}^{2 \times NB} \lambda_i \nabla^2 g_i(x) - \sum_{i=1}^{NBCR} \pi_{1i} \nabla^2 h(x) - \sum_{i=1}^{NBCR} \pi_{2i} \nabla^2 h(x);$$

$J(x) = \nabla_x g(x)$, a matriz Jacobiana do fluxo de carga convencional;

I , a matriz identidade.

Pode-se escrever $W(x, \lambda, \pi_1, \pi_2)$ na forma matricial:

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial t^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \theta} & \frac{\partial^2 L}{\partial t \partial V} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \partial t} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial \theta \partial V} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial V \partial t} & \frac{\partial^2 L}{\partial V \partial \theta} & \frac{\partial^2 L}{\partial V^2} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

O sistema matricial (3.18) pode ser representado da seguinte maneira:

$$La * \Delta d = -\nabla L \quad (3.20)$$

Sendo:

La = matriz Lagrangiana;

Δd = vetor das direções de busca;

∇L = vetor gradiente.

3.3.2) Matriz Lagrangiana

A matriz Lagrangiana (La), do sistema (3.18), é esparsa, ou seja, possui muitos elementos nulos, e esta característica deve ser explorada no processo de solução do sistema. A dimensão da matriz Lagrangiana (La), construída devido à aplicação do método primal-dual barreira logarítmica para a solução do problema (3.1) é maior que a dimensão da matriz utilizada nos métodos da Penalidade, de Newton, entre outros. Nestes métodos o sistema a ser resolvido é apenas uma parte do sistema dado em (3.18), isto é:

$$\begin{bmatrix} W(x,\lambda) & -J(X)^T \\ -J(X) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_x L \\ \nabla_\lambda L \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

A matriz Lagrangiana em (3.18) tem dimensão total (N) dada por:

$$N = 8 * NB + 3 * NBCR + 5 * NT - 3 \quad (3.22)$$

Esta matriz possui elementos unitários e as submatrizes referentes às variáveis de folga são de fácil implementação. Assim, o esforço computacional necessário para a obtenção de (3.18) não é muito elevado, quando comparado com os métodos que utilizam a expressão (3.21).

3.3.3) Tamanho do Passo e Atualização das Variáveis

Conhecendo as direções de busca, a próxima etapa é calcular os passos α_p e α_d , que serão usados na atualização das variáveis primais e duais respectivamente. Estes passos são calculados de maneira que cada componente das variáveis de folga ou excesso primais ($s_i, i = 1,2,3,4$) permaneçam estritamente positivas, e que os

elementos do vetor $(\pi_i, i = 1, 2, 3, 4)$ permaneçam com os seus respectivos sinais, isto é, $\pi_1 < 0, \pi_2 > 0, \pi_3 < 0, \pi_4 > 0$.

Esse processo é feito encontrando-se o menor elemento entre o mínimo tamanho de passo de todos os componentes dos vetores. Em seguida este menor elemento é multiplicado por um fator σ , menor que “1”, que garante que o próximo ponto irá satisfazer as condições de positividade e, então, comparado com o valor “1”, o menor entre eles é escolhido como tamanho do passo primal ou dual.

Isso se traduz por:

$$\alpha_p = \min \left\{ \sigma \left(\min_{\Delta S_i < 0} \frac{s_i}{|\Delta S_i|}, \min_{\Delta S_i < 0} \frac{s_2}{|\Delta S_2|}, \min_{\Delta S_i < 0} \frac{s_3}{|\Delta S_3|}, \min_{\Delta S_i < 0} \frac{s_4}{|\Delta S_4|} \right), 1 \right\} \quad (3.23)$$

$$\alpha_d = \min \left\{ \sigma \left(\min_{\Delta \pi_i > 0} \frac{-\pi_i}{|\Delta \pi_i|}, \min_{\Delta \pi_i < 0} \frac{\pi_2}{|\Delta \pi_2|}, \min_{\Delta \pi_i > 0} \frac{-\pi_3}{|\Delta \pi_3|}, \min_{\Delta \pi_i < 0} \frac{\pi_4}{|\Delta \pi_4|} \right), 1 \right\} \quad (3.24)$$

Sendo $\sigma = 0,9995$ um valor determinado empiricamente.

Conhecendo as direções de busca e os passos primais e duais respectivamente, todas as variáveis do problema podem ser atualizadas por:

$$\begin{aligned} x &= x + \alpha_p \Delta x & \lambda &= \lambda + \alpha_d \Delta \lambda \\ s_1 &= s_1 + \alpha_p \Delta s_1 & \pi_1 &= \pi_1 + \alpha_d \Delta \pi_1 \\ s_2 &= s_2 + \alpha_p \Delta s_2 & \pi_2 &= \pi_2 + \alpha_d \Delta \pi_2 \\ s_3 &= s_3 + \alpha_p \Delta s_3 & \pi_3 &= \pi_3 + \alpha_d \Delta \pi_3 \\ s_4 &= s_4 + \alpha_p \Delta s_4 & \pi_4 &= \pi_4 + \alpha_d \Delta \pi_4 \end{aligned} \quad (3.25)$$

3.3.4) O Parâmetro de Barreira

Uma etapa muito importante no algoritmo primal-dual barreira logarítmica é a escolha inicial do parâmetro de barreira. O valor do multiplicador μ para cada ponto é proporcional ao *gap* de dualidade. Este *gap* é a diferença entre o valor da função objetivo do problema primal e o valor da função objetivo do problema dual. A cada iteração o valor de μ deverá ser calculado de tal forma que o seu valor atual seja sempre inferior ao anterior e, desta forma, é proposto um cálculo para atualização de μ , utilizando a equação (3.26), na qual o numerador corresponde ao *gap* de dualidade:

$$\mu = \frac{-(s_1\pi_1 + s_3\pi_3) + (s_2\pi_2 + s_4\pi_4)}{2 * NB * \beta} \quad (3.26)$$

Sendo $\beta > 1$ e especificado pelo usuário.

Como visto em (3.26) o parâmetro μ é reduzido a cada iteração de forma empírica, pois o valor de β é determinado pelo usuário. Uma escolha inadequada do parâmetro β poderá comprometer a convergência do método. Outra forma para atualizar o parâmetro μ é reduzi-lo a cada iteração de um valor β' (Granville, 1994), especificado pelo usuário, isto é:

$$\mu^{(k+1)} = \frac{\mu^k}{\beta'} \quad (3.27)$$

3.3.5) Inicialização das Variáveis

Com respeito aos valores iniciais das variáveis, a única exigência que deve ser observada é que as variáveis do sistema, ou seja, as tensões, os *taps* e as injeções de reativos devem estar dentro de seus limites pré-estabelecidos. As equações de balanço do sistema e as inequações, que foram transformadas em equações através da inclusão das variáveis de folga ou excesso, não precisam ser satisfeitas na inicialização do problema. As variáveis de folga ou excesso ($s_i, i = 1,2,3,4$) podem ser inicializadas utilizando as equações (3.9) a (3.12) respectivamente.

Estas variáveis devem ser estritamente positivas. Isto é esperado desde que as variáveis do sistema estejam dentro de seus limites, porém, caso exista algum componente deste vetor, que seja nulo ou negativo, o mesmo poderá assumir o valor 0,02 como proposto por QUINTANA et al. (1995). Após terem sido inicializados os vetores referentes às variáveis de folga, os vetores dos multiplicadores de Lagrange ($\pi_i, i = 1,2,3,4$) podem ser inicializados utilizando-se as equações (3.13) a (3.16), respectivamente. E os vetores dos multiplicadores de Lagrange para as restrições de igualdades (λ) são sempre inicializados em zero. O valor inicial do parâmetro de barreira e o multiplicador β para atualização de μ são determinados pelo usuário, como mencionado anteriormente.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE REATIVOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

4.1) Introdução

O problema do planejamento ótimo de reativos para sistemas elétricos de potência pode ser formulado como um problema de alocação de fontes reativas em um sistema de energia elétrica, a partir de cenários de operação definidos considerando restrições de segurança e de atendimento da demanda. As características econômicas, físicas e de operação das fontes de reativos existentes, e das novas fontes a serem instaladas no sistema, devem estar bem definidas para a obtenção de uma proposta adequada de planejamento.

O conjunto dos equipamentos que constitui um sistema de energia elétrica geralmente é capaz de suprir toda a demanda ativa e reativa para manter o sistema em condições normais de carga e de topologia. A demanda reativa necessária é suprida pelas capacidades de geração de reativos das máquinas geradoras, pelas linhas de transmissão longas, pela eliminação de problemas de violações de tensões

através do uso de transformadores com *taps* variáveis e por uma topologia adequada do sistema.

O sistema planejado considerando certas condições de carga e topologia tem reservas reativas necessárias para operar atendendo às restrições de segurança e de operação. Com a evolução do sistema, o sistema originalmente planejado sofre alterações de topologia e de crescimento de cargas podendo não mais atender as restrições do sistema. Assim, as principais condições que exigem o planejamento de reativos são crescimento de cargas distantes das unidades geradoras, causando problemas na qualidade do serviço; problemas de instabilidade de tensão e perdas excessivas na transmissão; linhas de transmissão longas de alta tensão operando em condições de cargas leves, o que causa problemas de sobretensões nos terminais; necessidade de uma estratégia adequada de planejamento; crescimento dos sistemas de transmissão e subtransmissão, e necessidade de substituir equipamentos por motivos técnicos e/ou econômicos.

O planejamento ótimo de reativos consiste em determinar, considerando todos os cenários definidos, a localização e a magnitude das fontes reativas que assegurem a operação do sistema de energia elétrica atendendo os limites físicos e de segurança pré-estabelecidos, MANTOVANI (1994).

Na formulação e solução do problema deve-se considerar alguns aspectos importantes: as fontes reativas e os controles disponíveis precisam ser levados em consideração na alocação de novas fontes, e o conjunto de barras à alocação de novas fontes deve ser também um processo de otimização incorporado ao problema do planejamento ótimo de reativos.

4.2) Escolha das Barras para a Alocação de Reativos

Um item importante no problema de alocação de reativos é a escolha correta das barras para a alocação de reativos. É necessário que esta escolha tenha um conteúdo científico incorporado ao problema de alocação de reativos. Na literatura especializada as barras são escolhidas pelos operadores do sistema, usando muitas das vezes métodos de escolha heurísticos.

O modelo proposto neste trabalho para a solução do planejamento de reativos trata a determinação destas barras a partir de uma análise aos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade de potência reativa, resultantes de um programa de fluxo de potência ótimo.

A partir do ponto de operação inicial do sistema, um programa de fluxo carga convencional é executado. Caso a resposta do fluxo de carga convencional esteja fora de seus limites será feita uma análise aos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade de potência reativa. Observa-se, então, qual destes multiplicadores tem maior sensibilidade em relação à variação de potência reativa. Assim, as barras do sistema referentes a esses multiplicadores tornam-se as barras onde serão alocados os reativos.

4.3) O Problema de Fluxo de Carga

A seguir será apresentada a formulação do problema de fluxo de carga que terá parte de sua matriz Jacobiana, resultante do processo de linearização das equações não lineares, utilizada na determinação da matriz sensibilidade S.

Considere-se que a modelagem do sistema elétrico de potência é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas. Assim, a solução do problema de fluxo de carga tem como objetivo determinar o ponto de operação do sistema de energia elétrica, ou seja, as tensões e os ângulos em todas as barras, e os taps dos transformadores. Estas equações são obtidas impondo-se o princípio da conservação das potências ativas e reativas em cada barra do sistema, enquanto que as inequações são dadas pelas restrições das magnitudes de tensões, pelos limites das injeções de potência reativa nas barras de controle de reativo e pelos taps de transformadores.

As equações de fluxo de carga para um sistema elétrico de potência são dadas por (MONTICELLI, 1983):

$$\Delta P_K = P_K^{esp} - V_K^2 G_{KK} - V_K \sum_{m \in \Omega} V_m (G_{Km} \cos \theta_{Km} + B_{Km} \sin \theta_{Km}) = 0 \quad (4.1)$$

$$\Delta Q_K = Q_K^{esp} + Q_K^{sh} + V_K^2 B_{KK} - V_K \sum_{m \in \Omega} V_m (G_{Km} \sin \theta_{Km} - B_{Km} \cos \theta_{Km}) = 0 \quad (4.2)$$

Para $k = 1, \dots, NB$ e:

$$P_k^{esp} = P_k^G - P_k^c ;$$

$$Q_k^{esp} = Q_k^G - Q_k^c ;$$

As inequações do fluxo de carga são dadas por:

$$\begin{aligned} V_k^{min} &\leq V_k \leq V_k^{max} \\ Q_k^{min} &\leq Q_k \leq Q_k^{max} \\ t_i^{min} &\leq t_i \leq t_i^{max} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Sendo t_i o *tap* do transformador da linha i .

Um dos métodos utilizados para a solução do problema é o método de Newton-Raphson, que consiste na expansão, em série de Taylor até 1ª ordem, das equações. O sistema linearizado (4.4) é resolvido iterativamente, até que o critério de convergência estabelecido seja atingido (MONTICELLI, 1983).

$$g(x) = J(x)\Delta x \quad (4.4)$$

Onde $g(x)$ representa o conjunto de equações:

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} = 0$$

e:

$$x = \text{vetor das variáveis dependentes, } x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \\ t \end{bmatrix};$$

Δx = vetor das correções;

$J(x)$ = matriz Jacobiana.

A matriz Jacobiana é dada por:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Sendo as componentes das submatrizes jacobianas H, N, M, L dadas por:

$$H \begin{cases} H_{km} = \partial P_k / \partial \theta_m = V_k V_m (G_{km} \sen \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ H_{kk} = \partial P_k / \partial \theta_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sen \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \end{cases} \quad (4.6)$$

$$N \begin{cases} N_{km} = \partial P_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sen \theta_{km}) \\ N_{kk} = \partial P_k / \partial V_k = V_k G_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sen \theta_{km}) \end{cases} \quad (4.7)$$

$$M \begin{cases} M_{km} = \partial Q_k / \partial \theta_m = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sen \theta_{km}) \\ M_{kk} = \partial Q_k / \partial \theta_k = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sen \theta_{km}) \end{cases} \quad (4.8)$$

$$L \begin{cases} L_{km} = \partial Q_k / \partial V_m = V_k (G_{km} \sen \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ L_{kk} = \partial Q_k / \partial V_k = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sen \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \end{cases} \quad (4.9)$$

Determinado o ponto de operação do sistema, $x = x_0$, verifica-se se as tensões estão ou não dentro de seus limites. Caso não estejam, há a necessidade de injetar reativos no sistema, através de equipamentos existentes ou, na falta destes, alocar novas fontes de reativos.

4.4) Obtenção da Matriz de Sensibilidade

A matriz sensibilidade entre tensão e potência reativa será utilizada na construção do problema de programação linear, na alocação de reativos.

Considere um vetor u , formado pelas variáveis independentes ou controle do sistema, que, neste problema, corresponde às injeções de reativos (Q_k^{sh}) a serem instaladas em m barras do sistema. Como mencionado anteriormente, caso $x = x_0$ seja solução do problema de fluxo de carga para um dado vetor $u = u_0$ especificado, tem-se que:

$$g(x_0, u_0) = 0 \quad (4.10)$$

Suponha que uma pequena variação Δu no vetor u cause uma mudança Δx no vetor x , então a expansão em série de Taylor da equação (4.10) até 1ª ordem é dada por:

$$g(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u) = g(x_0, u_0) + g_x \Delta x + g_u \Delta u = 0 \quad (4.11)$$

Sendo g_x a matriz Jacobiana de $g(x, u)$ com relação ao vetor x . A matriz g_x é quadrada e não singular, sendo definida por:

$$g_x = \frac{\partial(g_1, g_2, \dots, g_{2nb})}{\partial(x_1, x_2, \dots, x_{2nb})} \quad (4.12)$$

Sendo g_u a matriz Jacobiana de $g(x, u)$ com relação ao vetor u . A matriz g_u não é necessariamente quadrada, sendo definida por:

$$g_u = \frac{\partial(g_1, g_2, \dots, g_{2nb})}{\partial(u_1, u_2, \dots, u_m)} \quad (4.13)$$

Sendo Δx e Δu os vetores de correções de x e u , respectivamente. Combinando as equações (4.10) e (4.11) tem-se que:

$$g_x \Delta x + g_u \Delta u = 0 \quad (4.14)$$

Rescrevendo a equação acima, pode-se definir a matriz de sensibilidade $[S]$ como sendo:

$$S = \frac{\Delta x}{\Delta u} = -g_x^{-1} * g_u \quad (4.15)$$

Para um caso geral a dimensão da matriz de sensibilidade $[S]$ é igual a $2nb \times m$, sendo m o número de variáveis independentes.

4.5) Formulação do Problema de Programação Linear

O vetor x , como mencionado anteriormente, é formado pelas variáveis dependentes do sistema, ou seja, pelas tensões e seus respectivos ângulos. Com o intuito de alocar reativos no sistema, apenas parte deste vetor será utilizada, isto é, as magnitudes das tensões nas barras de carga. Assim, considerando que uma mudança na injeção de reativo ΔQ_j na barra j , cause uma variação ΔV_i na tensão da barra de carga i , a equação (4.15) na forma matricial, em função das variáveis do problema, (KISHORE, 1971), pode ser rescrito por:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{k1} & S_{k2} & \cdots & S_{km} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Sendo k o número de barras de carga e m o número de barras onde serão alocados reativos.

Devido à alocação de reativos no sistema, uma variação ΔV_i nas tensões V_i das barras de carga i , fará com que as tensões fiquem dentro de seus limites, ou seja:

$$V_i^{min} \leq V_i + \Delta V_i \leq V_i^{max} \quad (4.17)$$

Sendo V_i^{min} e V_i^{max} os valores mínimos e máximos desejados nas barras de carga i . Desmembrando a equação (4.17) e substituindo em (4.16), tem-se:

$$\begin{aligned} S_{i1}\Delta Q_1 + S_{i2}\Delta Q_2 + \dots + S_{im}\Delta Q_m &\geq V_i^{min} - V_i \\ S_{i1}\Delta Q_1 + S_{i2}\Delta Q_2 + \dots + S_{im}\Delta Q_m &\leq V_i^{max} - V_i \end{aligned} \quad (4.18)$$

A formulação do problema de alocação ótima de reativos utilizando programação linear, como será apresentado neste trabalho, pode ser representada por:

$$\begin{aligned} \text{Min } F(Q) &= \sum_{j=1}^m \Delta Q_j \\ \text{s.a. } [S][\Delta Q] &\geq V_i^{min} - V_i \\ [S][\Delta Q] &\leq V_i^{max} - V_i \\ \Delta Q_j &\geq 0 \\ j &= 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4.19)$$

Sendo:

$F(Q)$ a função objetivo a ser minimizada;

ΔQ_j a variação de potência reativa das barras à alocação de reativos, obtidas

a partir do programa de fluxo de potência ótimo;

m o número de barras a serem alocados reativos;

$[S]$ a matriz de sensibilidade;

$[\Delta Q]$ o vetor das variáveis independentes.

A função objetivo do problema de programação linear apresentado pela equação (4.19) representa a variação de potência reativa alocada nas barras de j a m . As barras são determinadas a partir dos valores dos multiplicadores de Lagrange (λ) associados às restrições de igualdade de potência reativa ($\Delta Q = 0$), e resultantes do processo de otimização realizado a partir do programa de fluxo de carga ótimo, como mencionado anteriormente. A matriz de sensibilidade, para o problema proposto, será calculada a partir da equação (4.9).

TESTES E RESULTADOS

5.1) Introdução

Mostraremos, a seguir, os resultados obtidos utilizando a nova abordagem proposta para a resolução do problema de planejamento de reativos. Para os sistemas apresentados foram feitos dois testes distintos a fim de certificar a consistência dos resultados apresentados. Primeiramente foi feito um teste utilizando um método clássico, proposto por KISHORE (1970). Em seguida utilizou-se a abordagem proposta.

Os testes foram realizados nos sistemas WARD & HALE (W&H), 8, 30 e 118 barras. Os limites máximo e mínimo de tensão utilizados para os sistemas foram 1.1 p.u e 0.95 p.u., respectivamente. Os testes foram realizados em um microcomputador Pentium III – 500MHz, com 128 Mbytes de memória RAM, do Laboratório de Otimização em Sistemas Elétricos de Potência (LOSEP), do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos (EESC – USP).

5.2) Sistema WARD & HALE

O sistema WARD & HALE, utilizado para realização dos testes, é apresentado na Figura 1. O sistema apresentado possui as seguintes características:

- 1 barra de referência;
- 1 barra de geração;
- 4 barras de carga;
- 7 linhas de transmissão.

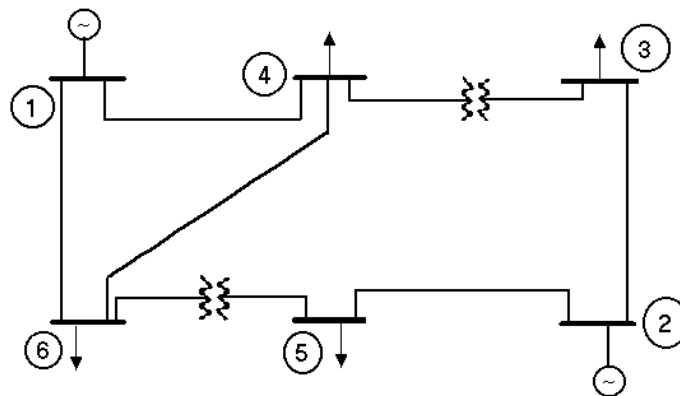


Figura 1- Sistema WARD & HALE

Os dados iniciais de tensões, gerações e cargas do sistema são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados iniciais do sistema WARD & HALE

Barra	Tipo	Tensão		Geração		Carga	
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	Referência	1,05	0,0	-	-	-	-
2	Geração	1,10	-	50,0	-	0,0	0,0
3	Carga	1,00	-	-	-	55,0	13,0
4	Carga	1,00	-	-	-	0,0	0,0
5	Carga	1,00	-	-	-	30,0	18,0
6	Carga	1,00	-	-	-	50,0	5,0

A tabela 2 apresenta o estado final do sistema WARD & HALE, obtido via fluxo de carga. O programa de fluxo de carga utilizado foi o ANAREDE¹.

Tabela 2 - Ponto de operação do sistema WARD & HALE, resultante do fluxo de carga convencional

Barra	Tipo	Tensão		Geração		Carga	
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	Referência	1,0500	0,0000	96,6123	38,1103	-	-
2	Geração	1,1000	-6,1424	50,0000	34,8010	0,0	0,0
3	Carga	0,8552	-13,8286	-	-	55,0	13,0
4	Carga	0,9526	-9,9223	-	-	0,0	0,0
5	Carga	0,9009	-13,4223	-	-	30,0	18,0
6	Carga	0,9332	0,0000	-	-	50,0	5,0
PERDAS = 11,61MW							

Pode-se observar que as tensões nas barras 3, 5 e 6 estão fora de seus limites especificados, fazendo-se necessário alocar reativos para que as tensões fiquem

¹ O programa de fluxo de carga ANAREDE foi desenvolvido pelo CEPPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

dentro de seus limites. Determinada a necessidade de se alocarem reativos, foram feitos os dois testes com o intuito de certificar a validade do resultado apresentado como solução do problema.

O primeiro teste foi realizado a partir do método apresentado por KISHORE (1970), em que todas as barras de carga são candidatas à alocação de reativos. Para o ponto de operação deste sistema, uma matriz sensibilidade foi determinada a partir da matriz Jacobiana representada pela Equação 4.9. Os coeficientes desta matriz são usados para construir o problema de programação linear segundo a Equação 4.19, resultando em:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar } \Delta Q_3 + \Delta Q_4 + \Delta Q_5 + \Delta Q_6 \\
 & \text{sujeito à} \\
 & 0,3477\Delta Q_3 + 0,2127\Delta Q_4 + 0,0789\Delta Q_5 + 0,1046\Delta Q_6 \geq 0,092 \\
 & 0,2368\Delta Q_3 + 0,2493\Delta Q_4 + 0,0935\Delta Q_5 + 0,1226\Delta Q_6 \geq -0,005 \\
 & 0,0820\Delta Q_3 + 0,0864\Delta Q_4 + 0,4062\Delta Q_5 + 0,2038\Delta Q_6 \geq 0,048 \\
 & 0,1115\Delta Q_3 + 0,1174\Delta Q_4 + 0,2112\Delta Q_5 + 0,2770\Delta Q_6 \geq 0,015 \\
 & 0,3477\Delta Q_3 + 0,2127\Delta Q_4 + 0,0789\Delta Q_5 + 0,1046\Delta Q_6 \leq 0,242 \\
 & 0,2368\Delta Q_3 + 0,2493\Delta Q_4 + 0,0935\Delta Q_5 + 0,1226\Delta Q_6 \leq 0,145 \\
 & 0,0820\Delta Q_3 + 0,0864\Delta Q_4 + 0,4062\Delta Q_5 + 0,2038\Delta Q_6 \leq 0,198 \\
 & 0,1115\Delta Q_3 + 0,1174\Delta Q_4 + 0,2112\Delta Q_5 + 0,2770\Delta Q_6 \leq 0,165 \\
 & \Delta Q_3, \Delta Q_4, \Delta Q_5, \Delta Q_6 \geq 0
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Resolvendo o problema de programação linear com a utilização do *software* LINDO API, que utiliza como interface o *software* MATLAB, foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 3. A tabela apresenta os novos reativos e as novas tensões obtidas com o fluxo de carga convencional, após a instalação das novas fontes de potência reativa. Observa-se que as tensões atingiram níveis mais adequados para operação do sistema.

Tabela 3 - Resultado do sistema WARD & HALE para a alocação reativa nas barras de carga do sistema

Barra	Tipo	Tensão		Geração		Carga		Q _{sh} (MVar) (alocado)
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Referência	1,0500	0,000	94,4023	14,1957	-	-	-
2	Geração	1,1000	-4,038	50,0000	20,3751	0,0	0,0	-
3	Carga	0,9376	-13,348	-	25,5300	55,0	13,0	25,5300
4	Carga	1,0112	-9,982	-	-	0,0	0,0	-
5	Carga	0,9422	-12,522	-	6,8900	30,0	18,0	6,8900
6	Carga	0,9722	-12,123	-	-	50,0	5,0	-
PERDAS = 9,40MW								

Realizado o primeiro teste, foram feitos novos testes seguindo a abordagem proposta. A abordagem proposta utiliza os multiplicadores de Lagrange, resultantes da solução do fluxo de potência ótimo, para determinar as barras onde serão alocados reativos. A partir de uma análise aos multiplicadores de Lagrange, concluiu-se que a barra que possui uma maior sensibilidade à variação de potência reativa do sistema é a barra 5, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Solução do sistema WARD & HALE resultante do Fluxo de Potência Ótimo

Barra	Tipo	Tensão		Potência		λ_Q
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Referência	1,093	0,0	95,0	53,2	-
2	Geração	1,086	-2,3	50,0	17,3	-
3	Carga	0,955	-12,1	-55,0	-13,0	0,09769
4	Carga	0,968	-8,9	0,0	0,0	0,09157
5	Carga	0,928	-11,4	-30,0	-18,0	0,14396
6	Carga	0,948	-11,2	-50,0	-5,0	0,11837
PERDAS = 10,043W						

Formulando o problema de programação linear, como em KISHORE (1970), utilizando os dados referentes à barra 5, provenientes do fluxo de carga convencional, tem-se:

Minimizar ΔQ_5

sujeito à

$$0,4062\Delta Q_5 \geq 0,048 \quad (5.2)$$

$$0,4062\Delta Q_5 \leq 0,198$$

$$\Delta Q_5 \geq 0$$

O problema de programação linear representado pela Equação 5.2 tem como solução:

Tabela 5 - Resultado do sistema WARD & HALE para a alocação reativa na barra 5, resultante do problema de programação linear

Barra	Tipo	Tensão		Geração		Carga		Q _{sh} (MVar) (alocado)
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Referência	1,0500	0,000	95,5758	30,9166	-	-	-
2	Geração	1,1000	-5,316	50,0000	26,8454	0,0	0,0	-
3	Carga	0,8630	-13,584	-	-	55,0	13,0	-
4	Carga	0,9625	-9,7946	-	-	0,0	0,0	-
5	Carga	0,9444	-13,227	-	12,0700	30,0	18,0	12,07
6	Carga	0,9559	-12,565	-	-	50,0	5,0	-
PERDAS = 10,58MW								

A partir da quantidade de reativo alocado, apresentado pela Tabela 5, realiza-se um novo teste, através do fluxo de carga, acrescentando aos dados iniciais essa potência reativa alocada e novamente se faz um estudo de análise aos multiplicadores de Lagrange. Neste novo estudo, a solução do fluxo de potência ótimo apresentou

uma maior sensibilidade à variação de potência reativa do sistema, para o multiplicador de Lagrange que representa a barra 3, como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Solução do sistema WARD & HALE resultante do Fluxo de Potência Ótimo após a injeção de reativos na barra 5

Barra	Tipo	Tensão		Potência		λ_Q
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Referência	1,083	0,0	94,5	45,8	-
2	Geração	1,080	-1,9	50,0	10,3	-
3	Carga	0,953	-12,2	-55,0	-13,0	0,08154
4	Carga	0,967	-9,0	0,0	0,0	0,07461
5	Carga	0,962	-11,6	-30,0	-5,9	0,07415
6	Carga	0,960	-11,4	-50,0	-5,0	0,07362
PERDAS = 9,467MW						

Formulando um novo problema de programação linear com dados provenientes da barra 3, resultante do fluxo de carga convencional, obteve-se:

Minimizar ΔQ_3

sujeito à

$$0,3477\Delta Q_3 \geq 0,092$$

$$0,3477\Delta Q_3 \leq 0,242 \quad (5.3)$$

$$\Delta Q_3 \geq 0$$

A solução do problema de programação linear representada pela Equação 5.3, acrescida da solução apresentada pela equação 5.2, pode ser analisado na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado do sistema WARD & HALE para a alocação reativa nas barras 3 e 5

Barra	Tipo	Tensão		Geração		Carga		Q _{sh} (MVar) (alocado)
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Referência	1,0500	0,000	94,0824	10,2575	-	-	-
2	Geração	1,1000	-3,697	50,0000	16,6364	0,0	0,0	-
3	Carga	0,9449	-13,269	-	27,1100	55,0	13,0	27,11
4	Carga	1,0179	-9,959	-	-	0,0	0,0	-
5	Carga	0,9608	-12,458	-	12,0700	30,0	18,0	12,07
6	Carga	0,9827	-12,096	-	-	50,0	5,0	-

PERDAS = 9,08MW

Para uma melhor visão da evolução dos valores de tensão para os testes realizados, segundo abordagem proposta, para o sistema WARD & HALE, foi traçado o gráfico representado pela Figura 2. Os valores de potência reativa alocada apresentado na Figura 2 são valores acumulativos, provenientes da solução do problema de programação linear.

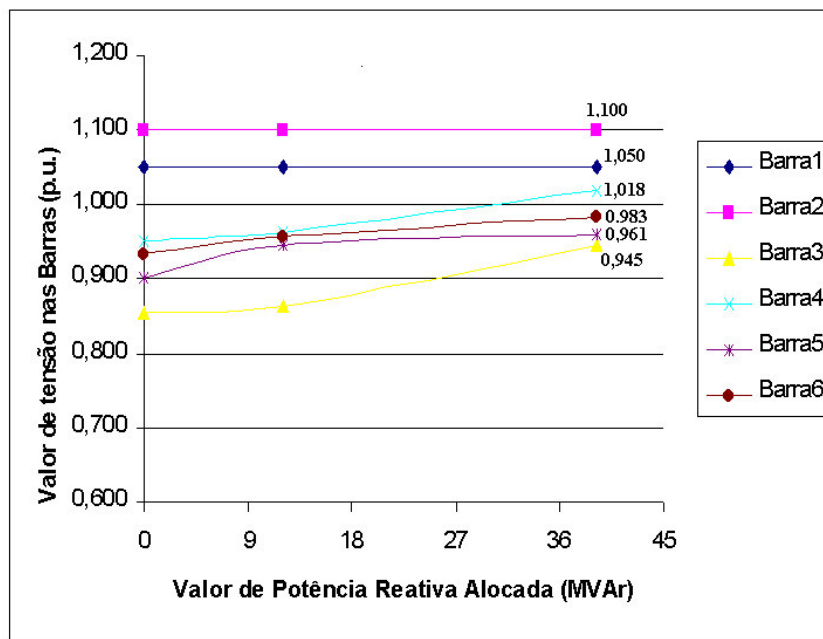


Figura 2 - Gráfico representando os testes realizados segundo abordagem proposta

Um novo estudo de análise aos multiplicadores de Lagrange e uma nova formulação do problema de programação linear se repetem até que a solução apresentada não modifique o ponto de operação do sistema.

Este exemplo mostra que o conhecimento prévio das barras determinadas para a alocação de reativos traz uma grande economia na formulação do problema de programação linear, sem que se perca na qualidade dos resultados. Outro fato que deve ser considerado é que caso haja o conhecimento prévio das barras, a formulação do problema de programação linear se torna ainda mais simples trazendo assim respostas que melhorem ainda mais o ponto de operação do sistema.

5.2) Sistema de 8 Barras

O sistema de 8 barras (Figura 3), utilizado para realização dos testes, possui as seguintes características:

- 1 barra de referência;
- 1 barra de geração;
- 6 barras de carga;
- 9 linhas de transmissão.

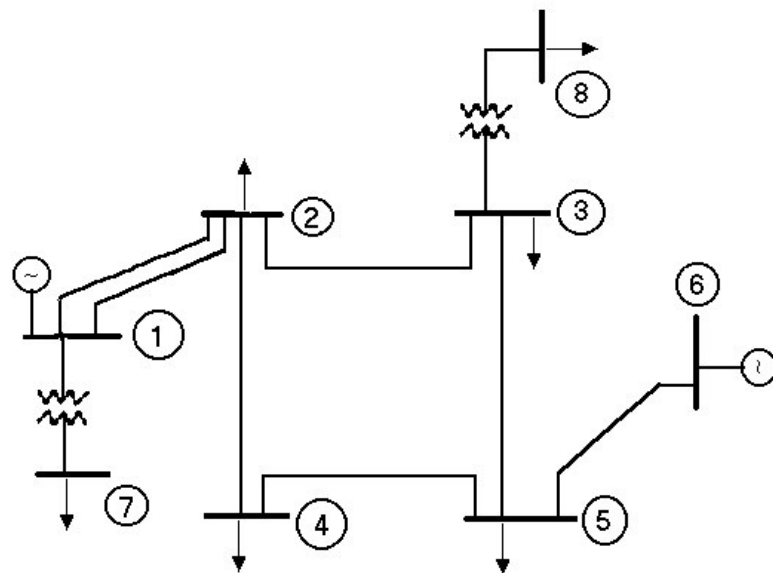


Figura 3- Sistema de 8 barras

Os dados iniciais de tensões, gerações e cargas para sistema de 8 barras são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados iniciais do sistema de 8 barras

Barra	Tipo	Tensão		Geração		Carga		
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	Q_{sh} (MVAr)
1	Referência	1,05	0,0	-	-	0,0	0,0	-
2	Carga	1,00	-	-	-	0,0	0,0	-300,0
3	Carga	1,00	-	-	-	0,0	0,0	-75,0
4	Carga	1,00	-	-	-	134,0	-32,0	-140,0
5	Carga	1,00	-	-	-	1300,0	50,0	-140,0
6	Geração	1,00	-	240,0	-	0,0	0,0	-
7	Carga	1,00	-	-	-	180,0	86,0	-
8	Carga	1,00	-	-	-	290,0	48,0	-

A Tabela 9 apresenta o estado final do sistema de 8 barras. Para o sistema representado pela Figura 3, têm-se os seguintes valores resultantes do fluxo de carga convencional.

Tabela 9 - Ponto de operação do sistema de 8 barras, resultante do fluxo de carga convencional

Barra	Tipo	Tensão		Geração		Carga	
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	Referência	1,0500	0,0000	1711,9291	236,3154	-	-
2	Carga	1,0068	-11,9714	-	-	-	-
3	Carga	0,9903	-23,5582	-	-	-	-
4	Carga	0,9953	-23,0094	-	-	134,0	-32,0
5	Carga	0,9917	-32,7981	-	-	1300,0	50,0
6	Geração	1,0000	-31,4360	240,00	28,6728	-	-
7	Carga	1,0291	-2,2913	-	-	180,00	86,00
8	Carga	0,8837	-28,5983	-	-	290,00	48,00
PERDAS = 47,93MW							

No primeiro teste realizado para o sistema de oito barras, a função objetivo do problema de programação linear foi minimizar a injeção de potência reativa de todas as barras de carga. A matriz sensibilidade foi calculada a partir da matriz Jacobiana, e o problema de programação linear foi formulado a partir dos dados obtidos na Tabela 9, sendo representado por:

Minimizar $\Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4 + \Delta Q_5 + \Delta Q_7 + \Delta Q_8$

sujeito à

$$\begin{aligned}
&0,0266\Delta Q_2 + 0,0171\Delta Q_3 + 0,0160\Delta Q_4 + 0,0064\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0176\Delta Q_8 \geq -0,0568 \\
&0,0164\Delta Q_2 + 0,0259\Delta Q_3 + 0,0112\Delta Q_4 + 0,0070\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0266\Delta Q_8 \geq -0,0403 \\
&0,0155\Delta Q_2 + 0,0153\Delta Q_3 + 0,0239\Delta Q_4 + 0,0070\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0116\Delta Q_8 \geq -0,0453 \\
&0,0060\Delta Q_2 + 0,0069\Delta Q_3 + 0,0068\Delta Q_4 + 0,0086\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0071\Delta Q_8 \geq -0,0417 \\
&\quad 0,0\Delta Q_2 + \quad 0,0\Delta Q_3 + \quad 0,0\Delta Q_4 + \quad 0,0\Delta Q_5 + 0,0238\Delta Q_7 + 0,0\Delta Q_8 \geq -0,0791 \\
&0,0151\Delta Q_2 + 0,0238\Delta Q_3 + 0,0103\Delta Q_4 + 0,0064\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0522\Delta Q_8 \geq 0,0663 \\
&0,0266\Delta Q_2 + 0,0171\Delta Q_3 + 0,0160\Delta Q_4 + 0,0064\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0176\Delta Q_8 \leq 0,0932 \quad (5.4) \\
&0,0164\Delta Q_2 + 0,0259\Delta Q_3 + 0,0112\Delta Q_4 + 0,0070\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0266\Delta Q_8 \leq 0,1097 \\
&0,0155\Delta Q_2 + 0,0153\Delta Q_3 + 0,0239\Delta Q_4 + 0,0070\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0116\Delta Q_8 \leq 0,1047 \\
&0,0060\Delta Q_2 + 0,0069\Delta Q_3 + 0,0068\Delta Q_4 + 0,0086\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0071\Delta Q_8 \leq 0,1083 \\
&\quad 0,0\Delta Q_2 + \quad 0,0\Delta Q_3 + \quad 0,0\Delta Q_4 + \quad 0,0\Delta Q_5 + 0,0238\Delta Q_7 + 0,0\Delta Q_8 \leq 0,0709 \\
&0,0151\Delta Q_2 + 0,0238\Delta Q_3 + 0,0103\Delta Q_4 + 0,0064\Delta Q_5 + 0,0\Delta Q_7 + 0,0522\Delta Q_8 \leq 0,2163 \\
&\Delta Q_2, \Delta Q_3, \Delta Q_4, \Delta Q_5, \Delta Q_7, \Delta Q_8 \geq 0
\end{aligned}$$

Resolvendo o problema de programação linear, foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 10. Pode ser observado que, devido à alocação de reativos na barra 8, as tensões atingiram níveis mais adequados.

Tabela 10 - Resultado do sistema de 8 barras para a alocação reativa nas barras de carga do sistema

Barra	Tipo	Tensão		Geração		Carga		Q _{sh} (MVar) (alocado)
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Referência	1,0500	0,0000	1710,56	151,534	-	-	-
2	Carga	1,0183	-11,8618	-	-	-	-	-
3	Carga	1,0206	-23,1164	-	-	-	-	-
4	Carga	1,0062	-22,5531	-	-	134,0	-32,0	-
5	Carga	1,0000	-32,0426	-	-	1300,0	50,0	-
6	Geração	1,0000	-30,6634	240,0	-53,931	-	-	-
7	Carga	1,0291	-2,2913	-	-	180,0	86,0	-
8	Carga	0,9450	-27,6885	-	127,10	290,0	48,0	127,10
PERDAS = 46,57MW								

Um novo teste foi realizado aplicando-se a abordagem proposta. A partir dos resultados obtidos na Tabela 11 foi feito um estudo dos multiplicadores de Lagrange. Este estudo determinou a barra 8 como sendo a de maior sensibilidade à variação de potência reativa.

Tabela 11 - Solução do sistema de 8 barras, resultante do Fluxo de Potência Ótimo

Barra	Tipo	Tensão		Potência		λ_Q
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Referência	1,068	0,0	1708,4	127,5	-
2	Carga	1,038	-11,4	-0,1	-0,2	0,01232
3	Carga	1,031	-22,2	0,0	-0,1	0,02171
4	Carga	1,034	-21,7	-134,0	31,9	0,01310
5	Carga	1,035	-30,7	-1299,7	-49,8	0,01181
6	Geração	1,043	-29,5	239,9	27,3	-
7	Carga	1,023	-2,3	-180,0	-86,0	0,00071
8	Carga	0,997	-26,2	-290,0	-47,9	0,03424
PERDAS = 44,431MW						

Formulando o problema de programação linear com dados provenientes da barra 8, obteve-se:

Minimizar ΔQ_8

sujeito à

$$0,0522\Delta Q_8 \geq 0,0663$$

$$0,0522\Delta Q_8 \leq 0,2163 \quad (5.5)$$

$$\Delta Q_8 \geq 0$$

Determinada a quantidade de reativos a serem instalados, o estado do sistema, via fluxo de carga convencional, é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado do sistema de 8 barras para a alocação reativa na barra 8, segundo método proposto

Barra	Tipo	Tensão		Geração		Carga		Q _{sh} (MVar) (alocado)
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Referência	1,0500	0,000	1710,565	151,534	-	-	-
2	Carga	1,0183	-11,862	-	-	-	-	-
3	Carga	1,0206	-23,116	-	-	-	-	-
4	Carga	1,0062	-22,553	-	-	134,0	-32,0	-
5	Carga	1,0000	-32,043	-	-	1300,0	50,0	-
6	Geração	1,0000	-30,663	240,0	-53,931	-	-	-
7	Carga	1,0291	-2,291	-	-	180,0	86,0	-
8	Carga	0,9450	-27,688	-	127,10	290,0	48,0	127,10
PERDAS = 46,57MW								

Os resultados dos testes realizados para o sistema de oito barras apresentaram os mesmos valores, como é possível de se observar nas Tabela 10 e Tabela 12. A

vantagem em se utilizar o método proposto é o ganho na dimensão do problema de programação linear, como foi mostrado nos testes realizados, e o ganho computacional, visto que a formulação do problema de programação linear se torna mais simples.

5.3) Sistema AEP - 30 barras

O sistema AEP-30 barras, utilizado para realização dos testes, é apresentado na Figura 4. O sistema apresentado possui as seguintes características:

- 1 barra de referência;
- 5 barras de controle de reativos;
- 24 barras de carga;
- 37 linhas de transmissão;
- 4 transformadores com *tap* variável;

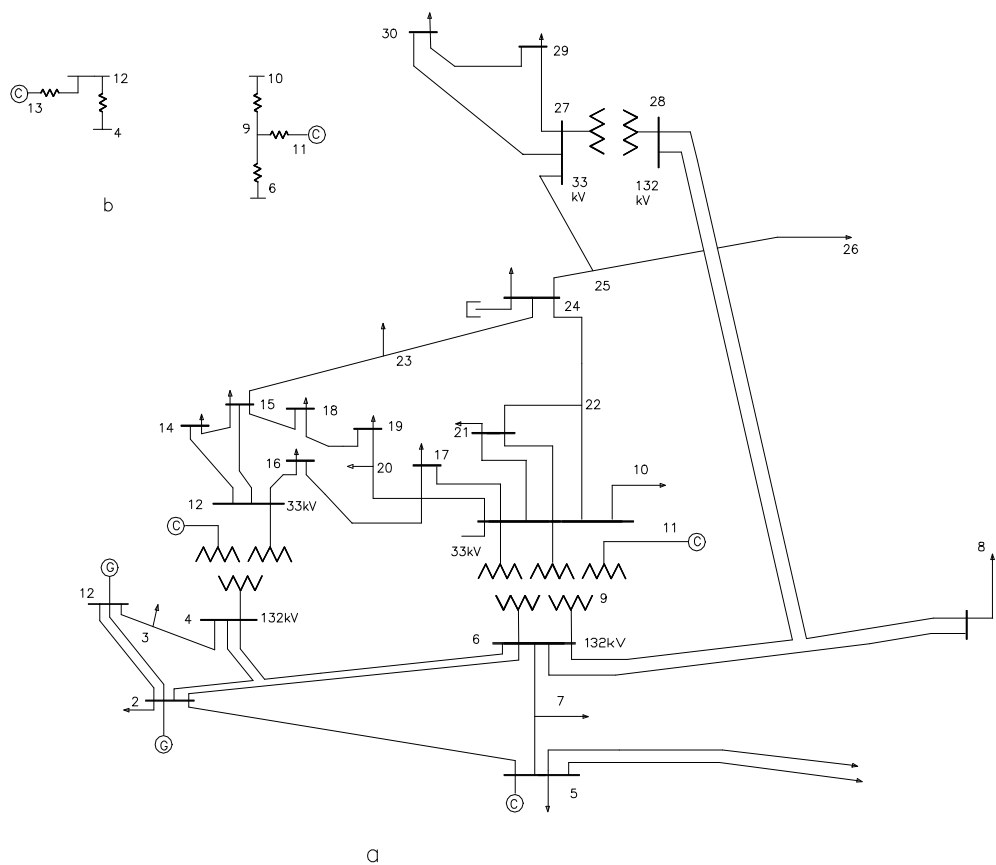


Figura 4- Sistema AEP-30 barras

A Tabela 13 apresenta o estado final do sistema AEP - 30 barras, representado pela Figura 4.

Tabela 13 - Ponto de operação do sistema AEP - 30 barras, resultante do fluxo de carga convencional

Barra	Tipo	Tensão		Potência	
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)
1	Slack	1,053	0,0	290,4	17,4
2	Gera.	1,021	-6,1	20,1	36,0
3	Carga	0,996	-9,0	-2,6	-1,3
4	Carga	0,984	-10,8	-8,4	-1,8
5	C. Reat.	0,975	-16,4	-103,6	19,0
6	Carga	0,977	-12,8	0,0	0,0
7	Carga	0,967	-14,9	-25,1	-12,0
8	C. Reat.	0,975	-13,7	-33,0	7,0
9	Carga	0,943	-17,2	0,0	0,0
10	Carga	0,925	-19,5	-6,4	-2,2
11	C. Reat.	0,993	-17,2	24,0	0,0
12	Carga	0,934	-18,6	-12,3	-8,3
13	C. Reat.	0,969	-18,6	0,0	24,0
14	Carga	0,916	-19,9	-6,8	-1,8
15	Carga	0,911	-20,0	-9,0	-2,8
16	Carga	0,922	-19,4	-3,9	-2,0
17	Carga	0,918	-19,7	-9,9	-6,4
18	Carga	0,901	-20,8	-3,5	-1,1
19	Carga	0,899	-21,0	-10,4	-3,7
20	Carga	0,904	-20,7	-2,4	-0,8
21	Carga	0,909	-20,1	-19,2	-12,3
22	Carga	0,910	-20,1	0,0	0,0
23	Carga	0,898	-20,4	-3,5	-1,8
24	Carga	0,892	-20,6	-9,6	-7,4
25	Carga	0,889	-19,9	0,0	0,0
26	Carga	0,867	-20,5	-3,9	-2,5
27	Carga	0,898	-19,1	0,0	0,0
28	Carga	0,971	-13,5	0,0	0,0
29	Carga	0,873	-20,9	-2,6	-1,0
30	Carga	0,858	-22,2	-11,7	-2,1
PERDAS = 22,8 MW					

No primeiro teste realizado para o sistema de 30 teve-se como objetivo minimizar a injeção de potência reativa de todas as barras de carga. Os resultados obtidos para este teste são mostrados na Tabela 14. Pode-se observar que foram alocados reativos em 11 barras diferentes, somando um total de 39,67 MVar. Para os

reativos alocados, apresentados na Tabela 14, as tensões atingiram níveis mais adequados.

Tabela 14 - Resultado do sistema AEP - 30 barras para a alocação reativa nas barras de carga do sistema

Barra	Tipo	Tensão		Potência		Q _{sh} Alocado (MVar)
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Slack	1,053	0,0	289,5	-14,0	-
2	Gera.	1,032	-6,2	20,1	36,7	-
3	Carga	1,017	-9,1	-2,6	-1,3	-
4	Carga	1,010	-11,0	-8,4	-1,8	-
5	C. Reat.	0,994	-16,2	-103,6	19,0	-
6	Carga	1,001	-12,9	0,0	0,0	-
7	Carga	0,989	-14,8	-25,1	-12,0	-
8	C. Reat.	1,000	-13,7	-33,0	7,0	-
9	Carga	1,058	-16,4	0,0	0,0	-
10	Carga	1,056	-18,3	-6,4	-2,2	-
11	C. Reat.	1,072	-16,4	0,0	7,0	-
12	Carga	1,033	-17,2	-12,3	-8,3	-
13	C. Reat.	1,057	-17,2	0,0	18,3	-
14	Carga	1,030	-18,4	-6,8	1,2	3,0
15	Carga	1,031	-18,6	-9,0	-2,8	-
16	Carga	1,036	-18,0	-3,9	-0,7	1,33
17	Carga	1,044	-18,4	-9,9	-6,0	0,35
18	Carga	1,034	-19,5	-3,5	1,1	2,19
19	Carga	1,038	-19,7	-10,4	2,1	5,82
20	Carga	1,041	-19,4	-2,4	0,8	-
21	Carga	1,047	-18,9	-19,2	-6,7	5,62
22	Carga	1,047	-18,8	0,0	0,0	-
23	Carga	1,041	-19,4	-3,5	6,8	8,60
24	Carga	1,042	-19,5	-9,6	-4,2	3,22
25	Carga	1,049	-18,9	0,0	0,0	-
26	Carga	1,041	-19,8	-3,9	0,3	2,81
27	Carga	1,058	-18,2	0,0	0,0	-
28	Carga	0,999	-13,7	0,0	0,0	-
29	Carga	1,048	-19,8	-2,6	-0,3	0,69
30	Carga	1,046	-20,9	-11,7	3,9	6,04

PERDAS = 21,8MW

Em seguida, foram feitos novos testes seguindo a abordagem proposta. A partir de uma análise dos multiplicadores de Lagrange, determinaram-se as barras com maior sensibilidade à variação de potência reativa do sistema. A partir da determinação destas barras utilizou-se a programação linear para quantificar a potência reativa a ser alocada. A solução final para este teste é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado do sistema AEP - 30 barras para a alocação reativa nas barras determinadas pela abordagem proposta

Barra	Tipo	Tensão		Potência		Q _{sh} Alocado (MVar)
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVar)	
1	Slack	1,053	0,0	289,9	-12,0	-
2	Gera.	1,031	-6,2	20,1	36,0	-
3	Carga	1,016	-9,1	-2,6	-1,3	-
4	Carga	1,009	-11,0	-8,4	-1,8	-
5	C. Reat.	0,992	-16,2	-103,6	19,0	-
6	Carga	0,999	-12,9	0,0	0,0	-
7	Carga	0,987	-14,9	-25,1	-12,0	-
8	C. Reat.	0,998	-13,8	-33,0	7,0	-
9	Carga	1,053	-16,5	0,0	0,0	-
10	Carga	1,045	-18,4	-6,4	-2,2	-
11	C. Reat.	1,072	-16,5	0,0	9,8	-
12	Carga	1,017	-17,3	-12,3	-8,3	-
13	C. Reat.	1,049	-17,3	0,0	24,0	-
14	Carga	1,030	-18,4	-6,8	1,2	-
15	Carga	1,013	-18,7	-9,0	-2,8	-
16	Carga	1,021	-18,1	-3,9	-2,0	-
17	Carga	1,032	-18,5	-9,9	-6,4	-
18	Carga	1,025	-19,7	-3,5	-1,1	-
19	Carga	1,037	-20,1	-10,4	12,2	15,87
20	Carga	1,038	-19,8	-2,4	-0,8	-
21	Carga	1,033	-18,9	-19,2	-12,3	-
22	Carga	1,034	-18,9	0,0	0,0	-
23	Carga	1,014	-19,1	-3,5	1,8	-
24	Carga	1,025	-19,4	-9,6	-7,4	-
25	Carga	1,052	-19,2	0,0	0,0	-
26	Carga	1,059	-20,6	-3,9	4,9	7,38
27	Carga	1,063	-18,4	0,0	0,0	-
28	Carga	0,998	-13,8	0,0	0,0	-
29	Carga	1,057	-20,1	-2,6	-1,0	-
30	Carga	1,061	-21,4	-11,7	7,4	9,51
PERDAS = 22,2MW						

Observa-se que foram alocados reativos em 3 diferentes barras somando um total de 32,76 MVar. Para os reativos alocados, apresentados na Tabela 15, as tensões atingiram níveis mais adequados.

5.4) Sistema IEEE - 118 barras

O sistema IEEE - 118 barras, utilizado para realização dos testes, é apresentado na Figura 5. O sistema apresentado possui as seguintes características:

- 1 barra de referência;
- 51 barras de controle de reativos;
- 66 barras de carga;
- 169 linhas de transmissão;
- 9 transformadores com *tap* variável;

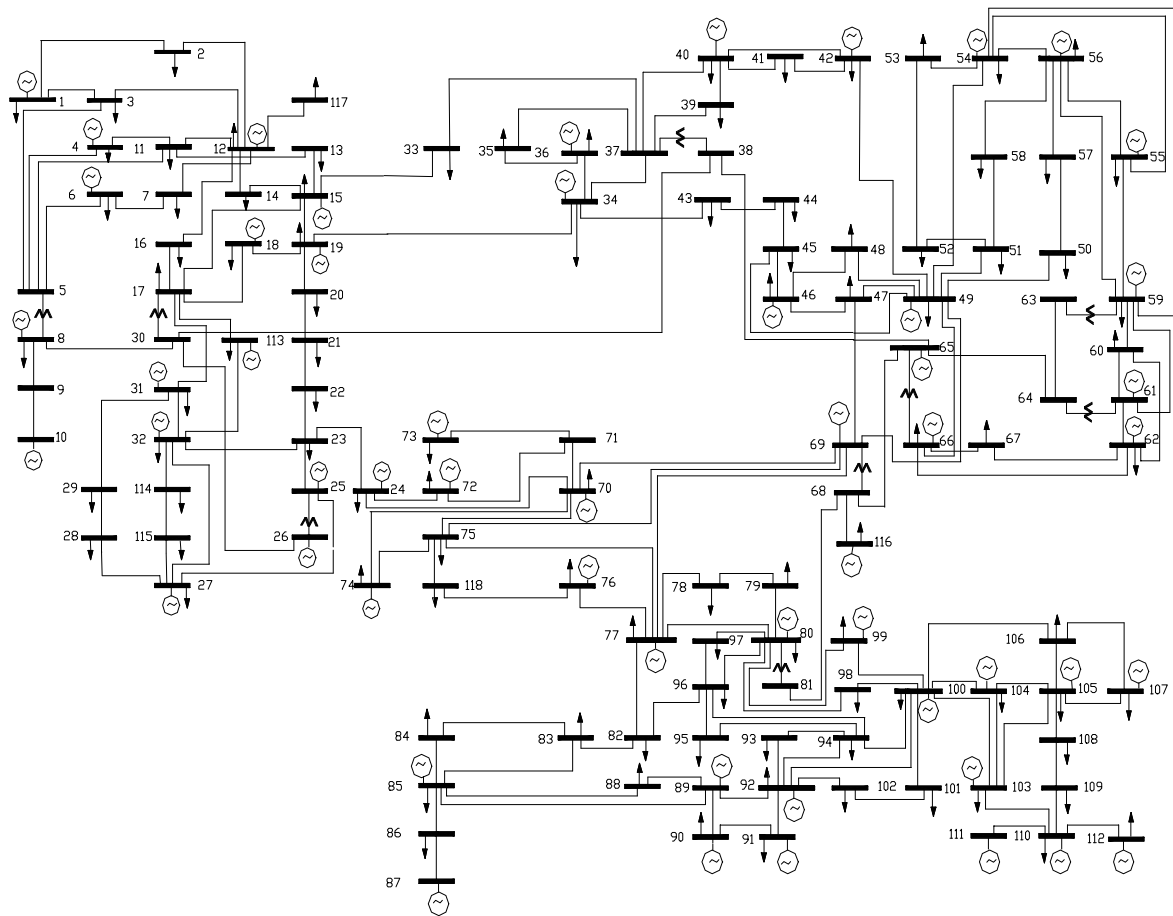


Figura 5- Sistema IEEE-118 barras

O estado final do sistema IEEE - 118 barras representado pela Figura 5 apresentou valores de tensões fora de seus limites. A tensão mínima foi apresentada pela Barra 112 alcançando o valor de 0,917 p.u., e a tensão máxima foi apresentada pela Barra 116 alcançando o valor de 1,001 p.u.. Mediante o valor mínimo de tensão apresentado pelo sistema, torna-se necessária à alocação de reativos.

No primeiro teste realizado para o sistema de 118 barras, a função objetivo do problema de programação linear foi minimizar a injeção de potência reativa de todas as barras de carga. Resolvendo o problema de programação linear, foi obtida uma quantidade de reativos, a ser alocada em 6 barras diferentes, com um total de 85,84

MVAr, como apresentado pela Tabela 16. As tensões mostraram-se todas dentro de seus limites.

Tabela 16 - Resultado do sistema IEEE-118 barras para a alocação reativa nas barras de carga do sistema

Barra	Tipo	Tensão		Potência Gerada		Q _{sh} Alocado (MVAr)
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVAr)	
21	Carga	0,953	-2,6	0,0	5,20	5,20
44	Carga	0,952	-3,9	0,0	5,60	5,57
95	Carga	0,950	15,1	0,0	19,00	19,01
106	Carga	0,970	2,7	0,0	17,2	17,21
108	Carga	0,976	1,3	0,0	3,00	3,02
109	Carga	0,978	0,6	0,0	35,8	35,83

Novos testes, seguindo a abordagem proposta, foram realizados. A partir de uma análise aos multiplicadores de Lagrange determinaram-se as barras com maior sensibilidade à variação de potência reativa do sistema. A partir da determinação destas barras, utilizou-se a programação linear para quantificar a potência reativa a ser alocada. Os resultados determinados pela abordagem proposta são apresentados pela Tabela 17.

Tabela 17 - Resultado do sistema IEEE-118 barras para a alocação reativa nas barras determinadas pela abordagem proposta

Barra	Tipo	Tensão		Potência Gerada		Q _{sh} Alocado (MVAr)
		V (p.u.)	θ (graus)	P (MW)	Q (MVAr)	
21	Carga	0,952	-2,6	0,0	5,20	5,20
45	Carga	0,951	-1,5	0,0	3,60	3,64
95	Carga	0,950	15,1	0,0	19,01	19,01
106	Carga	0,970	2,7	0,0	17,21	17,21
109	Carga	0,977	0,6	0,0	38,0	37,95

A solução final para este teste alocou reativos em 5 barras diferentes, somando um total de 83,01 MVar. Para os reativos alocados, as tensões atingiram níveis mais adequados apresentando para a Barra 44 a menor tensão com valor de 0,946 p.u.. O limite superior não foi violado e apresentou para a Barra 5 o maior nível de tensão no valor de 1,003 p.u..

CONCLUSÃO

A abordagem proposta neste trabalho visa a contribuir no planejamento de reativos em sistemas elétricos de potência, utilizando métodos de otimização com o intuito de determinar a localização e a magnitude das fontes reativas assegurando, assim, a operação do sistema de energia elétrica de forma que atenda os limites físicos e de segurança pré-estabelecidos.

Para este trabalho, propõe-se o emprego do método primal-dual barreira logarítmica, como método de otimização não linear, para determinar as barras do sistema em que serão alocados os reativos via multiplicadores de Lagrange. A partir da determinação destas barras, aplica-se o método Simplex com a finalidade de determinar a quantidade de reativos a serem alocados. Para a implementação do método primal-dual barreira logarítmica, foi utilizada a linguagem de programação FORTRAN. Para a implementação do método Simplex, foi empregado o *software* LINDO API, que utiliza como interface o *software* MATLAB.

Os resultados obtidos pelos testes mostraram-se coerentes com a teoria e produziram excelentes respostas, levando-nos a concluir que o método proposto para o planejamento de reativos apresenta boas perspectivas para a melhoria das condições operacionais dos sistemas elétricos de potência.

Para os testes realizados, a solução do problema de programação linear alocou reativos elevando os níveis de tensão para valores bem próximos do limite mínimo desejado, o qual não foi atingido em alguns casos. Nestes casos, esse limite não foi atingido devido ao fato de o fluxo de carga ser um problema não linear e de a abordagem apresentada utilizar uma aproximação linear para quantificar a potência reativa a ser alocada.

BIBLIOGRAFIA

- ABDEL-SALAM, T.S.; CHIKHANI, A.Y.; HACKAM, R. (1994). A New Technique for Loss Reduction Using Compensating Capacitors Applied to Distribution Systems with Varying Load Condition. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.9, n.2, p. 819-827, April.
- BAE, Y.G. (1978). Analytical Method of Capacitor Allocation on Distribution Primary Feeders. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v.88, n.11, p. 1232-1238, July/August.
- BOONE, G.; CHIANG, H.D. (1993). Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems by Genetic Algorithm. *Electrical Power and Energy Systems*, v. 15, n.3, p. 155-162.
- CARPENTIER, J.L. (1962). Contribution a L'etude du Dispatching Economique. *Bull-Soc. Fr. Elec. Ser. B3*, p. 431-447.
- CHAVES, F.S.; VALE, M. H. M. (2002). Controle de Tensão e Compensação Reativa - Procedimento Aplicado à Expansão de Sistemas Elétricos. *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, Setembro.
- CHIN, H.C. (1995). Optimal Shunt Capacitor Allocation by Fuzzy Dynamic Programming. *Electrical Power Systems Research*, v.35, p. 133-139.

- CHIANG, H.D.; WANG, J.C.; COCKINGS, O.; SHIN, H.D. (1990). Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems. Part 1: A New Formulation and the Overall Problem. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.5, n.2, p. 634-642, April.
- _____. Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems. Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.5, n.2, p. 643-649, April.
- CIVANLAR S.; GRAINGER, J.J. (1985). Volt/VAr control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part 2: The Solution Method. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v.104, n.11, p. 3284-3290, November.
- _____. Volt/VAr control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part 3: The Numerical Results. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v.104, n.11, p. 3291-3297, November.
- COOK, R.F. (1959). Analysis of Capacitor Application as Affected by Load Cycle. *AIEE Trans.*, v.78, p.950-957, October.
- DEEB, N.; SHAHIDEHPOUR, S.M. (1989). Economic Allocation of Reactive Power Supply in an Electric Power Network. *ISCAS - IEEE*, p.1859-1862.
- DURAN, H. (1968). Optimum Number, Location and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeders. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v.87, n.9, p. 1769-1774, September.
- EL-HAWARY, M. E.; MEKHAMER, S. F.; MANSOUR, M. M.; MOUSTAFA, M. A.; SOLIMAN, S. A. (2002). State of the Art in Optimal Capacitor Allocation for Reactive Power Compensation in Distribution Feeders. *Proceedings of the 2002 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, p.61-75.

- ELRAZAZ, Z.S. (2001). Optimal Allocation of Reactors for Light Load Operation. *IEE Proc. – Gener. Transm, Distrib.*, v.148, n.4, p.350-354, July.
- FAWZI, T.H.; EL-SOBKI, S.M.; ABDEL-HALIM, M.A. (1983). New Approach for the Application of Shunt Capacitors to the Primary Distribution Feeders. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v.102, n.1, p. 10-13, January.
- FRITZSCHE, H. (1978). *Programação Não-Linear: Análise e Métodos*. São Paulo, Edgard Blücher Ltda.
- GALLEGO, R.A.; MONTICELLI, A.J.; ROMERO, R. (2001). Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks. *IEEE Trans. on Power Systems*, v.16, n.4, p. 630-637, November.
- GRAINGER, J.J.; LEE, S.H. (1981). Optimum Size and Location of Shunt Capacitors for Reduction of Losses on Distribution Feeders. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v.100, n.3, p. 1105-1118, March.
- GRAINGER, J.J.; CIVANLAR S. (1985). Volt/VAr control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. Part 1: The Overall Problem. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v.104, n.11, p. 3278-3283, November.
- GRANVILLE, S. (1994). Optimal Reactive Dispatch through Interior Point Method. *IEEE Trans. on Power Systems*, v.9, n.1, p. 136-146, February.
- GRUDININ, N. (1998). Reactive Power Optimization Using Successive Quadratic Programming Method. *IEEE Trans. on Power Systems*, v.13, n.4, p. 1219-1225, November.

- HSIAO, Y.T.; CHIEN, C.Y. (2001). Optimisation of Capacitor Allocation Using an Interactive Trade-off Method. *IEE Proc. – Gener. Transm, Distrib.*, v.148, n.4, p.371-376, July.
- IYER, S.R.; RAMACHANDRAN, K.; HARIHARAN, S. (1984). Optimal Reactive Power Allocation for Improved System Performance. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v. PAS-103, n.6, p. 1509-1515, June.
- KISHORE, A.; HILL, E.F. (1970). Static Optimization of Reactive Power Sources by Use of Sensitivity Parameters. *IEEE Power Group*, p.1166-1173, April.
- LEE, K.Y.; YANG, F.F. (1998). Optimal Reactive Power Planning Using Evolutionary Algorithms: A Comparative Study for Evolutionary Programming, Evolutionary Strategy, Genetic Algorithm and Linear Programming. *IEEE Trans. on Power Systems*, v.13, n.1, p. 101-108, February.
- MAMANDUR, K.R.C.; CHENOWETH, R.D. (1981). Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v. PAS-100, n.7, p. 3185-3194, July.
- MANTOVANI, J.R.S. (1994). *Um Modelo Heurístico para Solução do Problema de Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Unicamp, Campinas, Dezembro.
- MANTOVANI, J.R.S.; MODESTO, S.A.G.; GARCIA, A.V. (2001a). VAR Planning Using Genetic Algorithm and Linear Programming. *IEE Proc. – Gener. Transm, Distrib.*, v.148, n.3, p.257-262, May.
- MANTOVANI, J.R.S.; SCUCUGLIA, J.W.; ROMERO,R.; GARCIA, A.V. (2001b). Planejamento de Fontes Reativas em Sistemas de Energia Elétrica Utilizando a

Técnica de Decomposição de Benders e o Algoritmo de Branch-and-Bound. *SBA Controle e Automação*, v.12, n.2, p.131-140, Maio – Agosto.

MONTICELLI, A. (1983). *Fluxo de Carga em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*. São Paulo, Edgard Blücher Ltda.

NEAGLE, N.M.; SAMSON, D.R. (1956). Loss Reduction from Capacitors Installed on Primary Feeders. *AIEE Trans.*, v.75, p.950-959, October.

NG, H.N.; SALAMA, M.M.A.; CHIKHANI, A.Y. (2000a). Capacitor Allocation by Approximate Reasoning: Fuzzy Capacitor Placement. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.13, n.1, p. 393-398, January.

NG, H.N.; SALAMA, M.M.A.; CHIKHANI, A.Y. (2000b). Classification of Capacitor Allocation Techniques. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.13, n.1, p. 387-392, January.

NOUREDDINE, A.H.; CHANDRASEKARAN, A. (1992). Linear Programming Approach to Loss Minimization and Capacitor Sizing and Placement. *SSST/CSA 92*, p.454-458.

QUINTANA, V.H.; GOMEZ, A.; MARTINEZ, J. L. (1995). Nonlinear Optimal Power Flows by Logarithmic-Barrier Primal-Dual Algorithm. *IEEE NAPS Meeting*.

RAMALHETE, M.; GUERREIRO, J.; MAGALHÃES, A. (1984). *Programação Linear*. McGRAW-HILL, v.1.

REZANIA, E.; SHAHIDEHPOUR, S.M. (2001). Real Power Loss Minimization Using Interior Point Method. *Electrical Power and Energy Systems*, n.23, p.45-56.

- SALAMA, M.M.A.; CHIKHANI, A.Y.; HACKAM, R. (1985). Control of Reactive Power in Distribution Systems with an End-load and Fixed Load Conditions. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v. 104, n.4, p. 941-947, April.
- SALAMA, M.M.A.; LAFRAMBOISE, J.R.P.R.; FERLAND, G.; CHIKHANI, A.Y. (1995). An Expert System For Reactive Power Control of a Distribution System. Part 2: System Implementation. *IEEE Trans. Power Systems*, v.10, n.3, p. 1433-1441, August.
- SANTOSO, N.I.; TAN, O.T. (1990). Neural-net Based Real-time Control of Capacitors Installed on Distribution Systems. *IEEE Trans. Power Delivery*, v.5, n.1, p. 266-272, January.
- SCHMILL, J.V. (1965). Optimum Size and Location of Shunt Capacitors on Distribution Feeders. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, v. 84, n.9, p. 825-832, September.
- SOUSA, V. A. (2001). *A Função Barreira Logarítmica Associada ao Método de Newton Modificado para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Usp, São Carlos.
- SOUZA, A. M. (1998). *O Método Primal Dual Barreira Logarítmica Aplicado ao Problema de Fluxo de Carga Ótimo*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Usp, São Carlos.
- ZADEH, L.A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, v.8, p.338-353.

PROGRAMAÇÃO LINEAR - MÉTODO DO SIMPLEX

A programação linear visa fundamentalmente encontrar a melhor solução para problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares. A tarefa da programação linear consiste na maximização ou minimização de uma função linear, sobre um conjunto poliédrico denominado de função objetivo, respeitando-se um sistema linear de igualdade ou desigualdade que recebem o nome de restrições do modelo ou região factível. As restrições representam normalmente limitações de recursos disponíveis ou, então, exigências e condições que devem ser cumpridas no problema. Essas restrições do modelo determinam uma região à qual dá-se o nome de conjunto das soluções viáveis ou admissíveis. O método é principalmente baseado na exploração dos pontos extremos do conjunto das soluções viáveis e nas direções do conjunto poliédrico definido no problema.

A melhor das soluções admissíveis, isto é, aquela que maximiza ou minimiza a função objetivo denomina-se solução ótima. O objetivo da programação linear consiste na determinação dessa solução ótima. Dois passos são fundamentais para a resolução de um problema de programação linear. O primeiro é a modelagem do problema, seguido do método de solução do modelo.

O modelo matemático que representa a programação linear é freqüentemente apresentado na forma:

$$\text{Maximizar(Minimizar) } z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_Nx_N \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeito a:} \quad & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1N}x_N \leq b_1 \\ & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2N}x_N \leq b_2 \\ & \dots \\ & a_{M1}x_1 + a_{M2}x_2 + \dots + a_{MN}x_N \leq b_M \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{A.3})$$

A função maximizar (minimizar), $z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_Nx_N$, designa-se por função objetivo; as inequações (A.2) designam-se por restrições funcionais ou simplesmente restrições; as desigualdades (A.3) designam-se por condições de não negatividade. As variáveis x_j são chamadas por variáveis principais, de decisão ou controláveis; as constantes a_{ij}, b_i e c_j são chamados de coeficientes técnicos, termos independentes e coeficientes da função objetivo, respectivamente, constituindo os parâmetros do modelo.

Uma forma de resolução de grande utilidade quando se inicia o estudo de programação linear é a representação gráfica dos problemas. O grande inconveniente destas representações é o fato de só serem possíveis quando não estão envolvidas mais de três variáveis, sendo incapazes de resolver problemas de maiores dimensões. Diante desse inconveniente, torna-se necessário utilizar um procedimento analítico suficientemente geral que não restrinja a dimensão do problema.

Como em geral é mais conveniente trabalhar com igualdades do que com desigualdades, o primeiro passo a cumprir com o objetivo de resolver um problema de programação linear consiste em converter as restrições funcionais de desigualdade em restrições equivalentes sob a forma de igualdade, obtendo-se assim um sistema de equações lineares. Esse processo é alcançado pela introdução no problema original de

novas variáveis, igualmente não negativas, designadas por variáveis auxiliares. Diz-se então que se reduziu o problema original à forma estandardizada. Assim, a redução à forma estandardizada do problema de programação linear pode ser representada por:

$$\text{Maximizar (Minimizar) } z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_N x_N + c_{N+1} x_{N+1} + \dots + c_{N+M} x_{N+M} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeito a:} \quad & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1N}x_N + a_{1,N+1}x_{N+1} & = b_1 \\ & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2N}x_N & + x_{N+2} & = b_2 \\ & \dots & & \\ & a_{M1}x_1 + a_{M2}x_2 + \dots + a_{MN}x_N & + a_{M,N+M}x_{N+M} & = b_M \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N, N+1, \dots, N+M \quad (\text{A.6})$$

O conjunto das soluções que satisfazem as restrições funcionais (A.5) e as restrições de não negatividade (A.6), K , de um problema de programação linear é um conjunto convexo fechado. Uma função linear sobre esse conjunto convexo, K , atinge o ótimo em um ponto extremo de K . O conjunto de pontos extremos de K é finito e para este conjunto existe pelo menos um ponto extremo de K que otimiza a função objetivo.

Um conjunto de m variáveis tais que a matriz dos coeficientes respectivos no sistema de equações lineares (A.5) seja não singular (isto é, cujo determinante seja não nulo) chama-se base do sistema (A.5) e as m variáveis por variáveis básicas. As restantes $n - m$ variáveis são designadas por variáveis não básicas. Atribuindo a estas variáveis o valor zero, as variáveis básicas serão então determinadas, designando-se a solução assim obtida por solução básica. Se as variáveis básicas forem não negativas, designa-se por solução básica admissível.

O problema de programação linear, no caso de K ser um poliedro convexo, é então teoricamente resolvido, pois a investigação exaustiva no conjunto das soluções

básicas admissíveis é suficiente. Contudo, na generalidade dos casos de interesse prático, tal procedimento constitui tarefa impraticável. Além disso, no caso de K ser não limitado, o exame exaustivo dos seus pontos extremos não detecta se o problema tem solução não limitada. Torna-se então necessário apresentar um procedimento que permita resolver qualquer problema de programação linear.

É natural que o processo de resolução mais generalizado seja um método iterativo que procura examinar o menor número possível de soluções básicas admissíveis. Um método que permite resolver este tipo de problema é designado por Método do Simplex, proposto em 1947 por George B. Dantzig.

O Método do Simplex é um procedimento sistemático para solucionar um problema de programação linear por mover de um ponto extremo a um ponto extremo com um melhor valor de função objetivo. Esse processo continua até que um ponto extremo ótimo é alcançado. Para um melhor entendimento do Método do Simplex, um exemplo pode ser explorado em RAMALHETE (1984).

BANCO DE DADOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

- Banco de dados do sistema de 6 barras

1	1	barra1	1050	0.	0.0	0.0	-9999	9999	0.0	0.0
2	-1	barra2	1100	0.	50	0.0			0.0	0.0
3	0	barra3	1000	0.	0.0	0.0			55.	13.
4	0	barra4	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0
5	0	barra5	1000	0.	0.0	0.0			30.	18.
6	0	barra6	1000	0.	0.0	0.0			50.	5.
9999										
1	6		12.30	51.80	0.00				900	
1	4		8.000	37.00	0.00				900	
4	6		9.700	40.70	0.00				900	
6	5		0.000	30.00	0.00	1.025	.98	1.050	900	
5	2		28.20	64.00	0.00				900	
2	3		72.30	105.0	0.00				900	
4	3		0.000	13.30	0.00	1.100	.98	1.050	900	
9999										
	0.95	1.10								
9999										
		100								
9999										

- Banco de dados do sistema de 8 barras

1	1	barra1	1050	0.			-9999	9999	0.0	0.0
2	0	barra2	1000	0.	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
3	0	barra3	1000	0.	0.0	0.0	0	0		-300
4	0	barra4	1000	0.	0.0	0.0			134	-32.
5	0	barra5	1000	0.	0.0	0.0			1300	50.
6	-1	barra6	1000	0.	240	0.0	-9999	9999	0.0	0.0
7	0	barra7	1000	0.	0.0	0.0			180	86
8	0	barra8	1000	0.	0.0	0.0	0	0	290	48
9999										
1	2		0.170	2.890	216.5				900	
2	1		0.170	2.920	218.8				900	
2	3		0.15	2.580	192.9				900	
2	4		0.160	2.640	197.4				900	
4	5		0.175	2.860	214.3				900	
3	5		0.190	3.270	245.9				900	
5	6		0.060	1.000	84.50				900	
1	7		0.000	2.400		1.00	0.98	1.050	900	
3	8		0.000	2.410		1.10	0.98	1.050	900	

9999
 0.95 1.10
 9999
 100
 9999

- Banco de dados do sistema AEP-30 barras

1	2	BARRA1	SLACK	1053	.0	-9999	9999	0.	0.	
2	1	BARRA2	GERA.	1032	-.09	-40.	50.	-20.1	14.0	
3	0	BARRA3	CARG.	1018	-.14			2.6	1.3	
4	0	BARRA4	CARG.	1010	-.17			8.4	1.8	
5	1	BARRA5	C.RE.	1010	-.25	-40.	40.	103.6	21.0	
6	0	BARRA6	CARG.	1004	-.20			.0	.0	
7	0	BARRA7	CARG.	998	-.23			25.1	12.0	
8	1	BARRA8	C.RE.	1010	-.21	-10.	40.	33.0	33.0	
9	0	BARRA9	CARG.	1017	-.26			.0	.0	
10	0	BARRA10	CARG	1015	-.29			6.4	2.2	19.
11	1	BARRA11	C.RE	1072	-.26	-6.	24.	.0	.0	
12	0	BARRA12	CARG	1019	-.27			12.3	8.3	
13	1	BARRA13	C.RE	1057	-.27	-6.	24.	.0	.0	
14	0	BARRA14	CARG	1005	-.29			6.8	1.8	
15	0	BARRA15	CARG	1001	-.29			9.0	2.8	
16	0	BARRA16	CARG	1010	-.29			3.9	2.0	
17	0	BARRA17	CARG	1008	-.29			9.9	6.4	
18	0	BARRA18	CARG	994	-.30			3.5	1.1	
19	0	BARRA19	CARG	992	-.31			10.4	3.7	
20	0	BARRA20	CARG	997	-.30			2.4	0.8	
21	0	BARRA21	CARG	1003	-.30			19.2	12.3	
22	0	BARRA22	CARG	1004	-.29			.0	.0	
23	0	BARRA23	CARG	994	-.30			3.5	1.8	
24	0	BARRA24	CARG	994	-.30			9.6	7.4	4.3
25	0	BARRA25	CARG	1001	-.29			.0	.0	
26	0	BARRA26	CARG	983	-.30			3.9	2.5	
27	0	BARRA27	CARG	1013	-.28			.0	.0	
28	0	BARRA28	CARG	997	-.21			.0	.0	
29	0	BARRA29	CARG	993	-.31			2.6	1.0	
30	0	BARRA30	CARG	982	-.32			11.7	2.1	
9999										
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
2	6			5.81	17.63	1.87				9000
4	6			1.19	4.14	0.45				9000
5	7			4.60	11.60	1.02				9000
6	7			2.67	8.20	0.85				9000
6	8			1.20	4.20	0.45				9000
6	9			.0	20.80		1.0380	.9501	.05	9000
6	10			.0	55.60		0.9560	.9501	.05	9000
9	11			.001	20.80					9000
9	10			.001	11.00					9000
4	12			.0	25.60		1.0150	.9501	.05	9000
12	13			.0	14.00					9000
12	14			12.31	25.59					9000
12	15			6.62	13.04					9000
12	16			9.45	19.87					9000
14	15			22.10	19.97					9000
16	17			8.24	19.23					9000
15	18			10.70	21.85					9000
18	19			6.39	12.92					9000
19	20			3.40	6.80					9000
10	20			9.36	20.90					9000
10	17			3.24	8.45					9000
10	21			3.48	7.49					9000
10	22			7.27	14.99					9000
21	22			1.16	2.36					9000
15	23			10.00	20.20					9000

22	24	11.50	17.90			9000
23	24	13.20	27.00			9000
24	25	18.85	32.92			9000
25	26	25.44	38.00			9000
25	27	10.93	20.87			9000
28	27	0.0	39.60	.9580.9501.05		9000
27	29	21.98	41.53			9000
27	30	32.02	60.27			9000
29	30	23.99	45.33			9000
8	28	6.36	20.00	2.14		9000
6	28	1.69	5.99	0.65		9000
9999						
	0.95	1.1				
9999						
		100.				
9999						

- Banco de dados do sistema IEEE-118 barras

12	2	BARRA12	1000	.0	-9999	9999	.0	.0	
2	0	BARRA2	1000	.0			30.0	13.5	
3	0	BARRA3	1000	.0			58.5	15.0	
4	1	BARRA4	1000	.0	-50.	50.	58.5	18.0	
5	0	BARRA5	1000	.0			.0	.0	40.
6	1	BARRA6	1000	.0	-50.	50.	78.0	33.0	
7	0	BARRA7	1000	.0			28.5	3.0	
8	1	BARRA8	1000	.0	-50.	50.	42.0	0.0	
9	0	BARRA9	1000	.0			.0	.0	
10	1	BARRA10	1000	.0	-250.	250.	-675.	.0	
11	0	BARRA11	1000	.0			105.	34.5	
1	1	BARRA1	1000	.0	-50.	50.	76.5	40.5	
13	0	BARRA13	1000	.0			51.0	24.0	
14	0	BARRA14	1000	.0			21.0	1.5	
15	1	BARRA15	1000	.0	-50.	50.	135.	45.0	
16	0	BARRA16	1000	.0			37.5	15.0	
17	0	BARRA17	1000	.0			16.5	4.5	
18	1	BARRA18	1000	.0	-50.	50.	90.0	51.0	
19	1	BARRA19	1000	.0	-50.	115.	67.5	37.5	
20	0	BARRA20	1000	.0			27.0	4.5	
21	0	BARRA21	1000	.0			21.0	12.0	
22	0	BARRA22	1000	.0			15.0	7.5	
23	0	BARRA23	1000	.0			10.5	4.5	
24	0	BARRA24	1000	.0			19.5	.0	
25	1	BARRA25	1000	.0	-250.	250.	-330.	.0	
26	1	BARRA26	1000	.0	-250.	250.	-471.	.0	
27	1	BARRA27	1000	.0	-50.	50.	107.	19.5	
28	0	BARRA28	1000	.0			25.5	10.5	
29	0	BARRA29	1000	.0			36.0	6.0	
30	0	BARRA30	1000	.0			0.0	0.0	
31	1	BARRA31	1000	.0	-50.	50.	54.0	40.5	
32	1	BARRA32	1000	.0	-50.	100.	88.5	34.5	
33	0	BARRA33	1000	.0			34.5	13.5	
34	0	BARRA34	1000	.0			88.5	39.0	13.99
35	0	BARRA35	1000	.0			49.5	13.5	
36	1	BARRA36	1000	.0	-50.	50.	46.5	25.5	
37	0	BARRA37	1000	.0			.0	.0	25.
38	0	BARRA38	1000	.0			.0	.0	
39	0	BARRA39	1000	.0			40.5	16.5	
40	1	BARRA40	1000	.0	-50.	150.	99.0	34.5	
41	0	BARRA41	1000	.0			55.5	15.0	
42	1	BARRA42	1000	.0	-50.	50.	144.	34.5	
43	0	BARRA43	1000	.0			27.0	10.5	
44	0	BARRA44	1000	.0			24.0	12.0	10.
45	0	BARRA45	1000	.0			79.5	33.0	10.
46	1	BARRA46	1000	.0	-50.	50.	13.5	15.0	10.
47	0	BARRA47	1000	.0			51.0	.0	
48	0	BARRA48	1000	.0			30.0	16.5	15.04

49	1	BARRA49	1000	.0	-250.	250.	-176.	45.0	
50	0	BARRA50	1000	.0			25.5	6.0	
51	0	BARRA51	1000	.0			25.5	12.0	
52	0	BARRA52	1000	.0			27.0	7.5	
53	0	BARRA53	1000	.0			34.5	16.5	
54	1	BARRA54	1000	.0	-50.	150.	97.5	48.0	
55	1	BARRA55	1000	.0	-50.	150.	94.5	33.0	
56	1	BARRA56	1000	.0	-50.	150.	126.	27.0	
57	0	BARRA57	1000	.0			18.0	4.5	
58	0	BARRA58	1000	.0			18.0	4.5	
59	1	BARRA59	1000	.0	-50.	50.	183.01	69.5	
60	0	BARRA60	1000	.0			117.0	4.5	
61	1	BARRA61	1000	.0	-250.	250.	-240.	.0	
62	1	BARRA62	1000	.0	-50.	50.	116.	21.0	
63	0	BARRA63	1000	.0			.0	.0	
64	0	BARRA64	1000	.0			.0	.0	
65	1	BARRA65	1000	.0	-250.	250.	-587.	.0	
66	1	BARRA66	1000	.0	-250.	250.	-530.	27.0	
67	0	BARRA67	1000	.0			42.0	10.5	
68	0	BARRA68	1000	.0			.0	.0	
69	1	BARRA69	1000	.0	-250.	250.	-494.	0.	
70	1	BARRA70	1000	.0	-50.	50.	99.0	30.0	
71	0	BARRA71	1000	.0			.0	.0	
72	1	BARRA72	1000	.0	-50.	50.	18.0	.0	
73	1	BARRA73	1000	.0	-50.	50.	9.0	.0	
74	1	BARRA74	1000	.0	-50.	80.	102.	40.5	12.
75	0	BARRA75	1000	.0			70.5	16.5	
76	1	BARRA76	1000	.0	-50.	100.	102.	54.0	
77	1	BARRA77	1000	.0	-50.	50.	91.5	42.0	
78	0	BARRA78	1000	.0			107.	39.0	
79	0	BARRA79	1000	.0			58.5	48.0	20.
80	1	BARRA80	1000	.0	-250.	250.	-521.	39.0	
81	0	BARRA81	1000	.0			.0	.0	
82	0	BARRA82	1000	.0			81.0	40.5	20.
83	0	BARRA83	1000	.0			30.0	15.0	10.
84	0	BARRA84	1000	.0			16.5	10.5	
85	1	BARRA85	1000	.0	-50.	80.	36.0	22.5	
86	0	BARRA86	1000	.0			31.5	15.0	
87	1	BARRA87	1000	.0	-250.	250.	-6.0	.0	
88	0	BARRA88	1000	.0			72.0	15.0	
89	1	BARRA89	1000	.0	-250.	250.	-911.	.0	
90	1	BARRA90	1000	.0	-50.	100.	244.5	63.0	
91	1	BARRA91	1000	.0	-50.	50.	15.0	.0	
92	1	BARRA92	1000	.0	-50.	100.	97.5	15.0	
93	0	BARRA93	1000	.0			18.0	10.5	
94	0	BARRA94	1000	.0			45.0	24.0	
95	0	BARRA95	1000	.0			63.0	46.5	
96	0	BARRA96	1000	.0			57.0	22.5	
97	0	BARRA97	1000	.0			22.5	13.5	
98	0	BARRA98	1000	.0			51.0	12.0	
99	1	BARRA99	1000	.0	-50.	50.	63.0	.0	
100	1	BARRA100	1000	.0	-250.	250.	-323.	27.0	
101	0	BARRA101	1000	.0			33.0	22.5	
102	0	BARRA102	1000	.0			7.5	4.5	
103	1	BARRA103	1000	.0	-250.	250.	-25.5	24.0	
104	1	BARRA104	1000	.0	-50.	0.	57.0	37.5	
105	1	BARRA105	1000	.0	-50.	20.	46.5	39.0	20.
106	0	BARRA106	1000	.0			64.5	24.0	
107	1	BARRA107	1000	.0	-50.	60.	75.0	18.0	6.
108	0	BARRA108	1000	.0			3.0	1.5	
109	0	BARRA109	1000	.0			12.0	4.5	
110	1	BARRA110	1000	.0	-50.	0.	58.5	45.0	6.
111	1	BARRA111	1000	.0	-250.	0.	-54.0	.0	
112	1	BARRA112	1000	.0	-50.	50.	102.	19.5	
113	1	BARRA113	1000	.0	-50.	0.	9.0	.0	
114	0	BARRA114	1000	.0			12.0	4.5	
115	0	BARRA115	1000	.0			33.0	10.5	
116	1	BARRA116	1000	.0	-50.	0.	0.0	.0	
117	0	BARRA117	1000	.0			30.0	12.0	
118	0	BARRA118	1000	.0			49.5	22.5	
9999									
1	2	3.03	9.99	2.540				900.	
1	3	1.29	4.24	1.082				900.	
4	5	0.176	0.798	0.210				900.	

3	5	2.41	10.80	2.840				900.
5	6	1.19	5.40	1.426				900.
6	7	0.459	2.08	0.550				900.
8	9	0.244	3.05	116.62				900.
8	5	0.00	2.67	0.000	1.0	.95	1.05	900.
9	10	0.258	3.22	123.00				900.
4	11	2.09	6.88	1.748				900.
5	11	2.03	6.82	1.738				900.
11	12	0.595	1.96	0.502				900.
2	12	1.87	6.16	1.572				900.
3	12	4.84	16.00	4.060				900.
7	12	0.862	3.40	0.874				900.
11	13	2.225	7.31	1.876				900.
12	14	2.15	7.07	1.816				900.
13	15	7.44	24.44	6.268				900.
14	15	5.95	19.50	5.020				900.
12	16	2.12	8.34	2.140				900.
15	17	1.32	4.37	4.440				900.
16	17	4.54	18.01	4.660				900.
17	18	1.23	5.05	1.298				900.
18	19	1.119	4.93	1.142				900.
19	20	2.52	11.70	2.980				900.
15	19	1.20	3.94	1.010				900.
20	21	1.83	8.49	2.160				900.
21	22	2.09	9.70	2.460				900.
22	23	3.42	15.90	4.040				900.
23	24	1.35	4.92	4.980				900.
23	25	1.56	8.00	8.640				900.
26	25	0.00	3.82	0.000	1.0	.95	1.05	900.
25	27	3.18	16.30	17.640				900.
27	28	1.913	8.55	2.160				900.
28	29	2.37	9.43	2.380				900.
30	17	0.00	3.88	0.000	1.0	.95	1.05	900.
8	30	.431	5.04	51.400				900.
26	30	.799	8.60	91.800				900.
17	31	4.74	15.63	3.990				900.
29	31	1.08	3.31	0.830				900.
23	32	3.17	11.53	11.730				900.
31	32	2.98	9.85	2.510				900.
27	32	2.29	7.55	1.926				900.
15	33	3.80	12.44	3.194				900.
19	34	7.52	24.70	6.320				900.
35	36	.224	1.02	.268				900.
35	37	1.10	4.97	1.318				900.
33	37	4.15	14.20	3.660				900.
34	36	.871	2.68	0.568				900.
34	37	.256	0.94	0.988				900.
38	37	0.00	3.75	0.000	1.0	.95	1.05	900.
37	39	3.21	10.60	2.700				900.
37	40	5.93	16.80	4.200				900.
30	38	.464	5.40	42.200				900.
39	40	1.84	6.05	1.552				900.
40	41	1.45	4.87	1.222				900.
40	42	5.55	18.30	4.660				900.
41	42	4.10	13.50	3.440				900.
43	44	6.08	24.54	6.068				900.
34	43	4.13	16.81	4.226				900.
44	45	2.24	9.01	2.240				900.
45	46	4.00	13.56	3.320				900.
46	47	3.80	12.70	3.160				900.
46	48	6.01	18.90	4.720				900.
47	49	1.91	6.25	1.604				900.
42	49	7.15	32.30	8.600				900.
42	49	7.15	32.30	8.600				900.
45	49	6.84	18.60	4.440				900.
48	49	1.79	5.05	1.258				900.
49	50	2.67	7.52	1.874				900.
49	51	4.86	13.70	3.420				900.
51	52	2.03	5.88	1.396				900.
52	53	4.05	16.35	4.058				900.
53	54	2.63	12.20	3.110				900.
49	54	7.30	28.90	7.380				900.
49	54	8.69	29.10	7.310				900.
54	55	1.69	7.07	2.020				900.

54	56	.275	.955	0.732					900.
55	56	.488	1.51	0.374					900.
56	57	3.43	9.66	2.420					900.
50	57	4.74	13.40	3.320					900.
56	58	3.43	9.66	2.420					900.
51	58	2.55	7.19	1.788					900.
54	59	5.03	22.93	5.980					900.
56	59	8.25	25.10	5.690					900.
56	59	8.03	23.90	5.360					900.
55	59	4.739	21.58	5.646					900.
59	60	3.17	14.50	3.760					900.
59	61	3.28	15.00	3.880					900.
60	61	.264	1.35	1.456					900.
60	62	1.23	5.61	1.468					900.
61	62	.824	3.76	0.980					900.
63	59	0.00	3.86	0.000	1.0	.95	1.05		900.
63	64	.172	2.00	21.60					900.
64	61	0.00	2.68	0.000	1.0	.95	1.05		900.
38	65	.901	9.86	114.6					900.
64	65	.269	3.02	38.00					900.
49	66	1.80	9.19	2.480					900.
49	66	1.80	9.19	2.480					900.
62	66	4.82	21.80	5.780					900.
62	67	2.58	11.70	3.100					900.
65	66	0.00	3.70	0.000	1.0	.95	1.05		900.
66	67	2.24	10.15	2.682					900.
65	68	.138	1.60	63.80					900.
47	69	8.44	27.78	7.092					900.
49	69	9.85	32.40	8.280					900.
68	69	0.00	3.70	0.000	1.0	.95	1.05		900.
69	70	3.00	12.70	12.20					900.
24	70	10.221	41.15	10.198					900.
70	71	.882	3.55	0.878					900.
24	72	4.88	19.60	4.880					900.
71	72	4.46	18.00	4.444					900.
71	73	.866	4.54	1.178					900.
70	74	4.01	13.23	3.368					900.
70	75	4.28	14.10	3.600					900.
69	75	4.05	12.20	12.40					900.
74	75	1.23	4.06	1.034					900.
76	77	4.44	14.80	3.680					900.
69	77	3.09	10.10	10.38					900.
75	77	6.01	19.99	4.978					900.
77	78	.376	1.24	1.264					900.
78	79	.546	2.44	0.648					900.
77	80	1.70	4.85	4.720					900.
77	80	2.94	10.50	2.280					900.
79	80	1.56	7.04	1.870					900.
68	81	.175	2.02	80.80					900.
81	80	0.00	3.70	0.000	1.0	.95	1.05		900.
77	82	2.98	8.53	8.174					900.
82	83	1.12	3.665	3.796					900.
83	84	6.25	13.20	2.580					900.
83	85	4.30	14.80	3.480					900.
84	85	3.02	6.41	1.234					900.
85	86	3.50	12.30	2.760					900.
86	87	2.828	20.74	4.450					900.
85	88	2.00	10.20	2.760					900.
85	89	2.39	17.30	4.700					900.
88	89	1.39	7.12	1.934					900.
89	90	5.18	18.80	5.280					900.
89	90	2.38	9.97	10.60					900.
90	91	2.54	8.36	2.140					900.
89	92	0.99	5.05	5.480					900.
89	92	3.93	15.81	4.140					900.
91	92	3.87	12.72	3.268					900.
92	93	2.58	8.48	2.180					900.
92	94	4.81	15.80	4.060					900.
93	94	2.23	7.32	1.876					900.
94	95	1.32	4.34	1.110					900.
80	96	3.56	18.20	4.940					900.
82	96	1.62	5.30	5.440					900.
94	96	2.69	8.69	2.300					900.
80	97	1.83	9.34	2.540					900.

80	98	2.38	10.80	2.860	900.
80	99	4.54	20.60	5.460	900.
92	100	6.48	29.50	7.720	900.
94	100	1.78	5.80	6.040	900.
95	96	1.71	5.47	1.474	900.
96	97	1.73	8.85	2.400	900.
98	100	3.97	17.90	4.760	900.
99	100	1.80	8.13	2.160	900.
100	101	2.77	12.62	3.280	900.
92	102	1.23	5.59	1.464	900.
101	102	2.46	11.20	2.840	900.
100	103	1.60	5.25	5.360	900.
100	104	4.51	20.40	5.410	900.
103	104	4.66	15.84	4.070	900.
103	105	5.35	16.25	4.080	900.
100	106	6.05	22.90	6.200	900.
104	105	.994	3.78	0.986	900.
105	106	1.40	5.47	1.434	900.
105	107	5.30	18.30	4.720	900.
105	108	2.61	7.03	1.844	900.
106	107	5.30	18.30	4.720	900.
108	109	1.05	2.88	0.760	900.
103	110	3.906	18.13	4.610	900.
109	110	2.78	7.62	2.020	900.
110	111	2.20	7.55	2.000	900.
110	112	2.47	6.40	6.200	900.
17	113	.913	3.01	0.768	900.
32	113	6.15	20.30	5.180	900.
32	114	1.35	6.12	1.628	900.
27	115	1.64	7.41	1.972	900.
114	115	0.23	1.04	0.276	900.
68	116	.034	.405	16.40	900.
12	117	3.29	14.00	3.580	900.
75	118	1.45	4.81	1.198	900.
76	118	1.64	5.44	1.356	900.
9999					
	0.90	1.1			
9999					
		900			
9999					

ESTADO FINAL DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

- Estado final do sistema de 6 barras

ARQUIVO DE SAIDA DE DADOS - SISTEMA DE 6 BARRAS

iteracoes = 3

barra	tensao(p.u)	angulo(gra)
1	1.0500	0.0000
2	1.1000	-3.6974
3	0.9449	-13.2693
4	1.0179	-9.9594
5	0.9608	-12.4577
6	0.9827	-12.0959

barra	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pc (MW)	Qc (MVar)
1	94.0824	10.2575	0.0000	0.0000
2	50.0000	16.6364	0.0000	0.0000
3	0.0000	27.1100	55.0000	13.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	12.0700	30.0000	18.0000
6	0.0000	0.0000	50.0000	5.0000

Perdas total do sistema = 0.0908 (pu)

- Estado final do sistema de 8 barras

ARQUIVO DE SAIDA DE DADOS - SISTEMA DE 8 BARRAS

iteracoes = 4

barra	tensao(p.u)	angulo(grau)
1	1.0500	0.0000
2	1.0183	-11.8618
3	1.0206	-23.1164
4	1.0062	-22.5531
5	1.0000	-32.0426
6	1.0000	-30.6634
7	1.0291	-2.2913
8	0.9450	-27.6885

barra	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pc (MW)	Qc (MVar)
1	1710.5650	151.5338	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	134.0000	-32.0000
5	0.0000	0.0000	1300.0000	50.0000
6	240.0000	-53.9314	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	180.0000	86.0000
8	0.0000	127.1000	290.0000	48.0000

Perdas total do sistema = 0.4657 (pu)

• Estado final do sistema AEP - 30barras

CONVERGENCIA FINAL

```

X-----X-----X-----X-----X
ITERACAO  ERRO MAX BARRA  ERRO MAX BARRA  ERRO MAX CONV
FC P Q V      MW    NUM.    Mvar  NUM.  TENSÃO % NUM.
X--X--X--X--X-----X--X-----X--X-----X--X-----X
0
      8 8 0      0.00  0      0.00  0
      8 8 0      0.00  2      0.00  2      0.000  0

```

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V07-0899B

RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

```

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
BARRA      TENSÃO 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
              CE Mvar
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
 1      2  1.053  289.9   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
BARRA1 SLACK   0.0 -12.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
 2      -1  1.031   0.0   0.0  0.0  -20.1  0.0   0.0   0.0
BARRA2 GERA. -6.2  50.0   0.0  0.0  14.0   0.0   0.0   0.0
 3      0  1.016   0.0   0.0  0.0   2.6   0.0   0.0   0.0
BARRA3 CARG. -9.1   0.0   0.0  0.0   1.3   0.0   0.0   0.0
 4      0  1.009   0.0   0.0  0.0   8.4   0.0   0.0   0.0
BARRA4 CARG. -11.0  0.0   0.0  0.0   1.8   0.0   0.0   0.0
 5      -1  0.992   0.0   0.0  0.0  103.6  0.0   0.0   0.0
BARRA5 C.RE. -16.2  40.0   0.0  0.0  21.0   0.0   0.0   0.0
 6      0  0.999   0.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
BARRA6 CARG. -12.9  0.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
 7      0  0.987   0.0   0.0  0.0  25.1   0.0   0.0   0.0
BARRA7 CARG. -14.9  0.0   0.0  0.0  12.0   0.0   0.0   0.0
 8      -1  0.998   0.0   0.0  0.0  33.0   0.0   0.0   0.0
BARRA8 C.RE. -13.8  40.0   0.0  0.0  33.0   0.0   0.0   0.0
 9      0  1.053   0.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
BARRA9 CARG. -16.5  0.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
10      0  1.045   0.0   0.0  0.0   6.4   0.0  20.8   0.0
BARRA10 CARG -18.4  0.0   0.0  0.0   2.2   0.0   0.0   0.0
11      1  1.072   0.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
BARRA11 C.RE -16.5  9.8   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
12      0  1.017   0.0   0.0  0.0  12.3   0.0   0.0   0.0
BARRA12 CARG -17.3  0.0   0.0  0.0   8.3   0.0   0.0   0.0
13      -1  1.049   0.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
BARRA13 C.RE -17.3  24.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
14      0  1.009   0.0   0.0  0.0   6.8   0.0   0.0   0.0
BARRA14 CARG -18.3  0.0   0.0  0.0   1.8   0.0   0.0   0.0
15      0  1.013   0.0   0.0  0.0   9.0   0.0   0.0   0.0
BARRA15 CARG -18.7  0.0   0.0  0.0   2.8   0.0   0.0   0.0
16      0  1.021   0.0   0.0  0.0   3.9   0.0   0.0   0.0
BARRA16 CARG -18.1  0.0   0.0  0.0   2.0   0.0   0.0   0.0
17      0  1.032   0.0   0.0  0.0   9.9   0.0   0.0   0.0
BARRA17 CARG -18.5  0.0   0.0  0.0   6.4   0.0   0.0   0.0
18      0  1.025   0.0   0.0  0.0   3.5   0.0   0.0   0.0
BARRA18 CARG -19.7  0.0   0.0  0.0   1.1   0.0   0.0   0.0
19      0  1.037   0.0   0.0  0.0  10.4   0.0   0.0   0.0
BARRA19 CARG -20.1  15.9   0.0  0.0   3.7   0.0   0.0   0.0
20      0  1.038   0.0   0.0  0.0   2.4   0.0   0.0   0.0
BARRA20 CARG -19.8  0.0   0.0  0.0   0.8   0.0   0.0   0.0
21      0  1.033   0.0   0.0  0.0  19.2   0.0   0.0   0.0
BARRA21 CARG -18.9  0.0   0.0  0.0  12.3   0.0   0.0   0.0
22      0  1.034   0.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
BARRA22 CARG -18.9  0.0   0.0  0.0   0.0   0.0   0.0   0.0
23      0  1.014   0.0   0.0  0.0   3.5   0.0   0.0   0.0
BARRA23 CARG -19.1  0.0   0.0  0.0   1.8   0.0   0.0   0.0
24      0  1.025   0.0   0.0  0.0   9.6   0.0   4.5   0.0

```

BARRA24	CARG	-19.4	0.0	0.0	0.0	7.4	0.0	0.0	0.0
25	0	1.052	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA25	CARG	-19.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0	1.059	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0
BARRA26	CARG	-20.6	7.4	0.0	0.0	2.5	0.0	0.0	0.0
27	0	1.063	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA27	CARG	-18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0	0.998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA28	CARG	-13.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0	1.057	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0
BARRA29	CARG	-20.1	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
30	0	1.061	0.0	0.0	0.0	11.7	0.0	0.0	0.0
BARRA30	CARG	-21.4	9.5	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V07-0899B

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

X--- DADOS-BARRA		X-----X----- CARGA		X-----X----- GERACAO		X-----X-----	
DA BARRA	TENSAO	>	MW	Mvar	>	MW	Mvar
NUM.	TIPO	MOD	PARA BARRA	F L U X O S	-	C I R C U I T O S	
NOME	ANG	NUM.	NOME	NC	MW	Mvar	TAP DEFAS TIE
X-----X-----X-----X-----		X--X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----		X-----X-----X-----X-----		X-----X-----X-----X-----	
1	2	1.053				289.9MW	-12.0MVAR
BARRA1	SLACK	0.0					
			2 BARRA2	GERA.	1	197.4	-16.4
			3 BARRA3	CARG.	1	92.5	4.4
2	-1	1.031	>	-20.1MW	14.0MVAR	>	50.0MVAR
BARRA2	GERA.	-6.2					
			1 BARRA1	SLACK	1	-190.6	33.8
			4 BARRA4	CARG.	1	49.9	-2.1
			5 BARRA5	C.RE.	1	91.8	5.2
			6 BARRA6	CARG.	1	69.0	-0.9
3	0	1.016	>	2.6MW	1.3MVAR		
BARRA3	CARG.	-9.1					
			1 BARRA1	SLACK	1	-89.0	7.8
			4 BARRA4	CARG.	1	86.4	-9.1
4	0	1.009	>	8.4MW	1.8MVAR		
BARRA4	CARG.	-11.0					
			2 BARRA2	GERA.	1	-48.6	4.3
			3 BARRA3	CARG.	1	-85.4	11.4
			6 BARRA6	CARG.	1	83.8	1.3
			12 BARRA12	CARG	1	41.8	-18.8 1.050S
5	-1	0.992	>	103.6MW	21.0MVAR	>	40.0MVAR
BARRA5	C.RE.	-16.2					
			2 BARRA2	GERA.	1	-88.0	8.5
			7 BARRA7	CARG.	1	-15.6	10.5
6	0	0.999					
BARRA6	CARG.	-12.9					
			2 BARRA2	GERA.	1	-66.4	6.9
			4 BARRA4	CARG.	1	-83.0	1.1
			7 BARRA7	CARG.	1	41.3	1.5
			8 BARRA8	C.RE.	1	33.1	-7.6
			9 BARRA9	CARG.	1	33.1	0.3 0.950I
			10 BARRA10	CARG	1	18.8	2.1 0.950I
			28 BARRA28	CARG	1	23.1	-4.2
7	0	0.987	>	25.1MW	12.0MVAR		
BARRA7	CARG.	-14.9					
			5 BARRA5	C.RE.	1	15.8	-11.1
			6 BARRA6	CARG.	1	-40.9	-0.9
8	-1	0.998	>	33.0MW	33.0MVAR	>	40.0MVAR
BARRA8	C.RE.	-13.8					
			6 BARRA6	CARG.	1	-33.0	7.7

			28 BARRA28 CARG	1	0.0	-0.7		
9	0	1.053						
BARRA9	CARG.	-16.5						
			6 BARRA6 CARG.	1	-33.1	1.7		
			10 BARRA10 CARG	1	33.1	7.9		
			11 BARRA11 C.RE	1	0.0	-9.6		
10	0	1.045	>	6.4MW	2.2MVAR			
BARRA10	CARG	-18.4						
			6 BARRA6 CARG.	1	-18.8	-0.3		
			9 BARRA9 CARG.	1	-33.1	-6.7		
			17 BARRA17 CARG	1	8.5	13.2		
			20 BARRA20 CARG	1	11.8	-1.5		
			21 BARRA21 CARG	1	17.1	9.7		
			22 BARRA22 CARG	1	8.2	4.2		
11	1	1.072					>	9.8MVAR
BARRA11	C.RE	-16.5						
			9 BARRA9 CARG.	1	0.0	9.8		
12	0	1.017	>	12.3MW	8.3MVAR			
BARRA12	CARG	-17.3						
			4 BARRA4 CARG.	1	-41.8	24.6		
			13 BARRA13 C.RE	1	0.0	-23.3		
			14 BARRA14 CARG	1	7.3	-0.3		
			15 BARRA15 CARG	1	16.8	-4.9		
			16 BARRA16 CARG	1	5.5	-4.4		
13	-1	1.049					>	24.0MVAR
BARRA13	C.RE	-17.3						
			12 BARRA12 CARG	1	0.0	24.0		
14	0	1.009	>	6.8MW	1.8MVAR			
BARRA14	CARG	-18.3						
			12 BARRA12 CARG	1	-7.2	0.5		
			15 BARRA15 CARG	1	0.4	-2.3		
15	0	1.013	>	9.0MW	2.8MVAR			
BARRA15	CARG	-18.7						
			12 BARRA12 CARG	1	-16.6	5.3		
			14 BARRA14 CARG	1	-0.4	2.3		
			18 BARRA18 CARG	1	4.8	-8.2		
			23 BARRA23 CARG	1	3.2	-2.2		
16	0	1.021	>	3.9MW	2.0MVAR			
BARRA16	CARG	-18.1						
			12 BARRA12 CARG	1	-5.4	4.5		
			17 BARRA17 CARG	1	1.5	-6.5		
17	0	1.032	>	9.9MW	6.4MVAR			
BARRA17	CARG	-18.5						
			10 BARRA10 CARG	1	-8.4	-13.0		
			16 BARRA16 CARG	1	-1.5	6.6		
18	0	1.025	>	3.5MW	1.1MVAR			
BARRA18	CARG	-19.7						
			15 BARRA15 CARG	1	-4.8	8.4		
			19 BARRA19 CARG	1	1.3	-9.5		
19	0	1.037	>	10.4MW	3.7MVAR	>		15.9MVAR
BARRA19	CARG	-20.1						
			18 BARRA18 CARG	1	-1.2	9.6		
			20 BARRA20 CARG	1	-9.2	2.6		
20	0	1.038	>	2.4MW	0.8MVAR			
BARRA20	CARG	-19.8						
			10 BARRA10 CARG	1	-11.6	1.7		
			19 BARRA19 CARG	1	9.2	-2.5		
21	0	1.033	>	19.2MW	12.3MVAR			
BARRA21	CARG	-18.9						
			10 BARRA10 CARG	1	-16.9	-9.4		

```

                22 BARRA22 CARG 1   -2.3   -2.9
22      0   1.034
BARRA22 CARG -18.9
                10 BARRA10 CARG 1   -8.1   -4.1
                21 BARRA21 CARG 1    2.3    2.9
                24 BARRA24 CARG 1    5.9    1.1

23      0   1.014   >   3.5MW   1.8MVAR
BARRA23 CARG -19.1
                15 BARRA15 CARG 1   -3.2    2.2
                24 BARRA24 CARG 1   -0.3   -4.0

24      0   1.025   >   9.6MW   7.4MVAR
BARRA24 CARG -19.4
                22 BARRA22 CARG 1   -5.8   -1.1
                23 BARRA23 CARG 1    0.4    4.1
                25 BARRA25 CARG 1   -4.1   -5.8

25      0   1.052
BARRA25 CARG -19.2
                24 BARRA24 CARG 1    4.2    6.0
                26 BARRA26 CARG 1    4.0   -4.7
                27 BARRA27 CARG 1   -8.2   -1.3
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V07-0899B

```

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

```

X--- DADOS-BARRA ---X----- CARGA -----X----- GERACAO -----X
DA BARRA      TENSÃO >      MW      Mvar >      MW      Mvar
NUM.      TIPO  MOD  PARA BARRA      F L U X O S - C I R C U I T O S
NOME      ANG  NUM.  NOME      NC      MW      Mvar  TAP  DEFAS TIE
X-----X-----X---X-----X--X-----X-----X-----X---X---
26      0   1.059   >   3.9MW   2.5MVAR >      7.4MVAR
BARRA26 CARG -20.6
                25 BARRA25 CARG 1   -3.9    4.9

27      0   1.063
BARRA27 CARG -18.4
                25 BARRA25 CARG 1    8.3    1.4
                28 BARRA28 CARG 1  -22.9    4.3
                29 BARRA29 CARG 1    6.8   -2.0
                30 BARRA30 CARG 1    7.9   -3.7

28      0   0.998
BARRA28 CARG -13.8
                6 BARRA6 CARG.  1  -23.0    3.9
                8 BARRA8 C.RE.  1    0.0   -1.4
                27 BARRA27 CARG 1   22.9   -2.4 0.950I

29      0   1.057   >   2.6MW   1.0MVAR
BARRA29 CARG -20.1
                27 BARRA27 CARG 1   -6.7    2.2
                30 BARRA30 CARG 1    4.1   -3.2

30      0   1.061   >  11.7MW   2.1MVAR >      9.5MVAR
BARRA30 CARG -21.4
                27 BARRA27 CARG 1   -7.6    4.1
                29 BARRA29 CARG 1   -4.1    3.3

```

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
289.9    0.0    267.7    0.0    25.3    0.0    0.0    22.2
184.6    0.0    139.3    0.0     0.0    0.0    0.0    70.5

```

- Estado final do sistema IEEE118

CONVERGENCIA FINAL

```

X-----X-----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
      7 7 0      0.00    0      0.00    0
      0.00    47      0.00    46      0.000    0

```

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V07-0899B

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
  CE Mvar
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
  1      -1  0.976    0.0    0.0  0.0    76.5    0.0    0.0    0.0
  BARRA1   -3.0    50.0    0.0  0.0    40.5    0.0    0.0    0.0
  2      0  0.983    0.0    0.0  0.0    30.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA2   -1.7    0.0    0.0  0.0    13.5    0.0    0.0    0.0
  3      0  0.979    0.0    0.0  0.0    58.5    0.0    0.0    0.0
  BARRA3   -1.6    0.0    0.0  0.0    15.0    0.0    0.0    0.0
  4      1  1.000    0.0    0.0  0.0    58.5    0.0    0.0    0.0
  BARRA4    3.9    8.3    0.0  0.0    18.0    0.0    0.0    0.0
  5      0  1.003    0.0    0.0  0.0     0.0    0.0    40.2    0.0
  BARRA5    4.5    0.0    0.0  0.0     0.0    0.0    0.0    0.0
  6     -1  0.999    0.0    0.0  0.0    78.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA6    0.7    50.0    0.0  0.0    33.0    0.0    0.0    0.0
  7      0  0.998    0.0    0.0  0.0    28.5    0.0    0.0    0.0
  BARRA7    0.2    0.0    0.0  0.0     3.0    0.0    0.0    0.0
  8      1  1.000    0.0    0.0  0.0    42.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA8   11.6    50.5    0.0  0.0     0.0    0.0    0.0    0.0
  9      0  0.996    0.0    0.0  0.0     0.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA9   23.3    0.0    0.0  0.0     0.0    0.0    0.0    0.0
  10     1  1.000    0.0    0.0  0.0   -675.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA10  35.9   -30.4    0.0  0.0     0.0    0.0    0.0    0.0
  11     0  0.987    0.0    0.0  0.0   105.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA11  0.4    0.0    0.0  0.0    34.5    0.0    0.0    0.0
  12     2  1.000   154.3    0.0  0.0     0.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA12  0.0   114.8    0.0  0.0     0.0    0.0    0.0    0.0
  13     0  0.963    0.0    0.0  0.0    51.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA13  -2.3    0.0    0.0  0.0    24.0    0.0    0.0    0.0
  14     0  0.991    0.0    0.0  0.0    21.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA14  -1.9    0.0    0.0  0.0     1.5    0.0    0.0    0.0
  15     -1  0.976    0.0    0.0  0.0   135.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA15  -4.7    50.0    0.0  0.0    45.0    0.0    0.0    0.0
  16     0  0.982    0.0    0.0  0.0    37.5    0.0    0.0    0.0
  BARRA16  -1.3    0.0    0.0  0.0    15.0    0.0    0.0    0.0
  17     0  0.984    0.0    0.0  0.0    16.5    0.0    0.0    0.0
  BARRA17  -0.6    0.0    0.0  0.0     4.5    0.0    0.0    0.0
  18     -1  0.978    0.0    0.0  0.0    90.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA18  -4.5    50.0    0.0  0.0    51.0    0.0    0.0    0.0
  19     -1  0.986    0.0    0.0  0.0    67.5    0.0    0.0    0.0
  BARRA19  -5.6   115.0    0.0  0.0    37.5    0.0    0.0    0.0
  20     0  0.962    0.0    0.0  0.0    27.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA20  -4.7    0.0    0.0  0.0     4.5    0.0    0.0    0.0
  21     0  0.952    0.0    0.0  0.0    21.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA21  -2.6    5.2    0.0  0.0    12.0    0.0    0.0    0.0
  22     0  0.953    0.0    0.0  0.0    15.0    0.0    0.0    0.0
  BARRA22  1.1    0.0    0.0  0.0     7.5    0.0    0.0    0.0
  23     0  0.978    0.0    0.0  0.0    10.5    0.0    0.0    0.0

```


BARRA23		8.3	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0
24	0	0.984	0.0	0.0	0.0	19.5	0.0	0.0	0.0
BARRA24		7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-330.0	0.0	0.0	0.0
BARRA25		20.5	11.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-471.0	0.0	0.0	0.0
BARRA26		23.7	-23.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	-1	0.967	0.0	0.0	0.0	107.0	0.0	0.0	0.0
BARRA27		-0.2	50.0	0.0	0.0	19.5	0.0	0.0	0.0
28	0	0.957	0.0	0.0	0.0	25.5	0.0	0.0	0.0
BARRA28		-2.5	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0
29	0	0.959	0.0	0.0	0.0	36.0	0.0	0.0	0.0
BARRA29		-3.8	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0
30	0	0.998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA30		7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	-1	0.965	0.0	0.0	0.0	54.0	0.0	0.0	0.0
BARRA31		-3.5	50.0	0.0	0.0	40.5	0.0	0.0	0.0
32	-1	0.977	0.0	0.0	0.0	88.5	0.0	0.0	0.0
BARRA32		-1.1	100.0	0.0	0.0	34.5	0.0	0.0	0.0
33	0	0.964	0.0	0.0	0.0	34.5	0.0	0.0	0.0
BARRA33		-6.1	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0
34	0	0.976	0.0	0.0	0.0	88.5	0.0	13.3	0.0
BARRA34		-5.8	0.0	0.0	0.0	39.0	0.0	0.0	0.0
35	0	0.975	0.0	0.0	0.0	49.5	0.0	0.0	0.0
BARRA35		-6.6	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0
36	-1	0.976	0.0	0.0	0.0	46.5	0.0	0.0	0.0
BARRA36		-6.6	50.0	0.0	0.0	25.5	0.0	0.0	0.0
37	0	0.982	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.1	0.0
BARRA37		-5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0	0.997	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA38		3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0	0.975	0.0	0.0	0.0	40.5	0.0	0.0	0.0
BARRA39		-11.3	0.0	0.0	0.0	16.5	0.0	0.0	0.0
40	-1	0.992	0.0	0.0	0.0	99.0	0.0	0.0	0.0
BARRA40		-13.5	150.0	0.0	0.0	34.5	0.0	0.0	0.0
41	0	0.975	0.0	0.0	0.0	55.5	0.0	0.0	0.0
BARRA41		-14.2	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0
42	-1	0.970	0.0	0.0	0.0	144.0	0.0	0.0	0.0
BARRA42		-11.9	50.0	0.0	0.0	34.5	0.0	0.0	0.0
43	0	0.950	0.0	0.0	0.0	27.0	0.0	0.0	0.0
BARRA43		-6.6	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0
44	0	0.946	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	9.0	0.0
BARRA44		-3.9	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0
45	0	0.951	0.0	0.0	0.0	79.5	0.0	9.0	0.0
BARRA45		-1.5	3.6	0.0	0.0	33.0	0.0	0.0	0.0
46	-1	0.999	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	10.0	0.0
BARRA46		2.2	50.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0
47	0	0.992	0.0	0.0	0.0	51.0	0.0	0.0	0.0
BARRA47		5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	0	0.995	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	14.9	0.0
BARRA48		5.0	0.0	0.0	0.0	16.5	0.0	0.0	0.0
49	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-176.0	0.0	0.0	0.0
BARRA49		6.6	135.4	0.0	0.0	45.0	0.0	0.0	0.0
50	0	0.987	0.0	0.0	0.0	25.5	0.0	0.0	0.0
BARRA50		3.1	0.0	0.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0
51	0	0.966	0.0	0.0	0.0	25.5	0.0	0.0	0.0
BARRA51		-1.3	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0
52	0	0.959	0.0	0.0	0.0	27.0	0.0	0.0	0.0
BARRA52		-2.8	0.0	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	0.0
53	0	0.967	0.0	0.0	0.0	34.5	0.0	0.0	0.0
BARRA53		-4.5	0.0	0.0	0.0	16.5	0.0	0.0	0.0
54	1	1.000	0.0	0.0	0.0	97.5	0.0	0.0	0.0
BARRA54		-3.4	122.3	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0	0.0
55	1	1.000	0.0	0.0	0.0	94.5	0.0	0.0	0.0
BARRA55		-3.8	79.4	0.0	0.0	33.0	0.0	0.0	0.0
56	1	1.000	0.0	0.0	0.0	126.0	0.0	0.0	0.0
BARRA56		-3.6	143.4	0.0	0.0	27.0	0.0	0.0	0.0
57	0	0.989	0.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0
BARRA57		-1.4	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0
58	0	0.977	0.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0
BARRA58		-2.7	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0
59	-1	0.953	0.0	0.0	0.0	183.0	0.0	0.0	0.0
BARRA59		4.7	50.0	0.0	0.0	169.5	0.0	0.0	0.0
60	0	0.993	0.0	0.0	0.0	117.0	0.0	0.0	0.0

BARRA60		10.7	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0
61	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-240.0	0.0	0.0	0.0
BARRA61		12.0	38.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
62	-1	0.997	0.0	0.0	0.0	116.0	0.0	0.0	0.0
BARRA62		11.1	50.0	0.0	0.0	21.0	0.0	0.0	0.0
63	0	0.995	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA63		10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
64	0	0.998	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA64		13.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-587.0	0.0	0.0	0.0
BARRA65		18.3	-120.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
66	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-530.0	0.0	0.0	0.0
BARRA66		18.0	-27.5	0.0	0.0	27.0	0.0	0.0	0.0
67	0	0.987	0.0	0.0	0.0	42.0	0.0	0.0	0.0
BARRA67		13.5	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0
68	0	1.003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA68		18.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-494.0	0.0	0.0	0.0
BARRA69		18.0	-55.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70	-1	0.987	0.0	0.0	0.0	99.0	0.0	0.0	0.0
BARRA70		6.6	50.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0
71	0	0.994	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA71		6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	1	1.000	0.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0
BARRA72		5.4	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
73	1	1.000	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0
BARRA73		5.9	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
74	-1	0.975	0.0	0.0	0.0	102.0	0.0	11.4	0.0
BARRA74		4.4	80.0	0.0	0.0	40.5	0.0	0.0	0.0
75	0	0.963	0.0	0.0	0.0	70.5	0.0	0.0	0.0
BARRA75		6.6	0.0	0.0	0.0	16.5	0.0	0.0	0.0
76	-1	0.960	0.0	0.0	0.0	102.0	0.0	0.0	0.0
BARRA76		4.5	100.0	0.0	0.0	54.0	0.0	0.0	0.0
77	-1	0.968	0.0	0.0	0.0	91.5	0.0	0.0	0.0
BARRA77		14.0	50.0	0.0	0.0	42.0	0.0	0.0	0.0
78	0	0.961	0.0	0.0	0.0	107.0	0.0	0.0	0.0
BARRA78		13.6	0.0	0.0	0.0	39.0	0.0	0.0	0.0
79	0	0.962	0.0	0.0	0.0	58.5	0.0	18.5	0.0
BARRA79		14.4	0.0	0.0	0.0	48.0	0.0	0.0	0.0
80	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-521.0	0.0	0.0	0.0
BARRA80		18.6	70.4	0.0	0.0	39.0	0.0	0.0	0.0
81	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA81		18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
82	0	0.952	0.0	0.0	0.0	81.0	0.0	18.1	0.0
BARRA82		14.6	0.0	0.0	0.0	40.5	0.0	0.0	0.0
83	0	0.956	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	9.1	0.0
BARRA83		16.2	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0
84	0	0.972	0.0	0.0	0.0	16.5	0.0	0.0	0.0
BARRA84		19.6	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0
85	-1	0.991	0.0	0.0	0.0	36.0	0.0	0.0	0.0
BARRA85		21.6	80.0	0.0	0.0	22.5	0.0	0.0	0.0
86	0	0.979	0.0	0.0	0.0	31.5	0.0	0.0	0.0
BARRA86		19.8	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0
87	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-6.0	0.0	0.0	0.0
BARRA87		20.4	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
88	0	0.980	0.0	0.0	0.0	72.0	0.0	0.0	0.0
BARRA88		26.4	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0
89	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-911.0	0.0	0.0	0.0
BARRA89		32.6	-70.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90	-1	0.986	0.0	0.0	0.0	244.5	0.0	0.0	0.0
BARRA90		22.7	100.0	0.0	0.0	63.0	0.0	0.0	0.0
91	1	1.000	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0
BARRA91		22.4	21.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
92	-1	0.997	0.0	0.0	0.0	97.5	0.0	0.0	0.0
BARRA92		23.6	100.0	0.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0
93	0	0.973	0.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0
BARRA93		19.5	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0
94	0	0.966	0.0	0.0	0.0	45.0	0.0	0.0	0.0
BARRA94		16.5	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
95	0	0.950	0.0	0.0	0.0	63.0	0.0	0.0	0.0
BARRA95		15.1	19.0	0.0	0.0	46.5	0.0	0.0	0.0
96	0	0.956	0.0	0.0	0.0	57.0	0.0	0.0	0.0
BARRA96		15.2	0.0	0.0	0.0	22.5	0.0	0.0	0.0
97	0	0.970	0.0	0.0	0.0	22.5	0.0	0.0	0.0

BARRA97		16.3	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0
98	0	0.986	0.0	0.0	0.0	51.0	0.0	0.0	0.0
BARRA98		15.5	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0
99	1	1.000	0.0	0.0	0.0	63.0	0.0	0.0	0.0
BARRA99		14.2	11.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-323.0	0.0	0.0	0.0
BARRA100		15.6	67.6	0.0	0.0	27.0	0.0	0.0	0.0
101	0	0.975	0.0	0.0	0.0	33.0	0.0	0.0	0.0
BARRA101		17.7	0.0	0.0	0.0	22.5	0.0	0.0	0.0
102	0	0.987	0.0	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	0.0
BARRA102		21.5	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0
103	1	1.000	0.0	0.0	0.0	-25.5	0.0	0.0	0.0
BARRA103		9.5	100.4	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
104	-1	0.964	0.0	0.0	0.0	57.0	0.0	0.0	0.0
BARRA104		5.1	0.0	0.0	0.0	37.5	0.0	0.0	0.0
105	-1	0.971	0.0	0.0	0.0	46.5	0.0	18.9	0.0
BARRA105		3.2	20.0	0.0	0.0	39.0	0.0	0.0	0.0
106	0	0.970	0.0	0.0	0.0	64.5	0.0	0.0	0.0
BARRA106		2.7	17.2	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
107	-1	0.996	0.0	0.0	0.0	75.0	0.0	5.9	0.0
BARRA107		-1.9	60.0	0.0	0.0	18.0	0.0	0.0	0.0
108	0	0.975	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0
BARRA108		1.3	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0
109	0	0.977	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0
BARRA109		0.6	38.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0
110	-1	0.960	0.0	0.0	0.0	58.5	0.0	5.5	0.0
BARRA110		-0.2	0.0	0.0	0.0	45.0	0.0	0.0	0.0
111	-1	0.972	0.0	0.0	0.0	-54.0	0.0	0.0	0.0
BARRA111		2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
112	-1	0.952	0.0	0.0	0.0	102.0	0.0	0.0	0.0
BARRA112		-4.8	50.0	0.0	0.0	19.5	0.0	0.0	0.0
113	-1	0.983	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0
BARRA113		-0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
114	0	0.965	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0
BARRA114		-1.6	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0
115	0	0.964	0.0	0.0	0.0	33.0	0.0	0.0	0.0
BARRA115		-1.6	0.0	0.0	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0
116	-1	1.001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA116		18.3	-50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
117	0	0.974	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0
BARRA117		-2.3	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0
118	0	0.952	0.0	0.0	0.0	49.5	0.0	0.0	0.0
BARRA118		4.9	0.0	0.0	0.0	22.5	0.0	0.0	0.0

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

X--- DADOS-BARRA ---X-----		CARGA -----X-----		GERACAO -----X-----					
DA BARRA	TENSAO	>	MW	Mvar	>	MW	Mvar		
NUM.	TIPO	MOD	PARA BARRA	FLUXOS	-	CIRCUITOS			
NOME	ANG	NUM.	NOME	NC	MW	Mvar	TAP	DEFAS	TIE
X-----X-----X-----X-----		X-----X-----		X-----X-----		X-----X-----		X-----X-----	
1	-1	0.976	>	76.5MW	40.5MVAR	>			50.0MVAR
BARRA1		-3.0							
				2 BARRA2	1	-21.6	-0.6		
				3 BARRA3	1	-54.9	10.1		
2	0	0.983	>	30.0MW	13.5MVAR				
BARRA2		-1.7							
				1 BARRA1	1	21.8	-1.4		
				12 BARRA12	1	-51.8	-12.1		
3	0	0.979	>	58.5MW	15.0MVAR				
BARRA3		-1.6							
				1 BARRA1	1	55.3	-9.7		
				5 BARRA5	1	-95.0	3.5		
				12 BARRA12	1	-18.8	-8.8		
4	1	1.000	>	58.5MW	18.0MVAR	>			8.3MVAR
BARRA4		3.9							
				5 BARRA5	1	-143.6	-3.9		
				11 BARRA11	1	85.1	-5.8		

5 BARRA5	0	1.003 4.5						
			3 BARRA3	1	97.3	3.9		
			4 BARRA4	1	144.0	5.3		
			6 BARRA6	1	118.9	-15.9		
			8 BARRA8	1	-463.1	51.8		
			11 BARRA11	1	102.9	-5.0		
6 BARRA6	-1	0.999 0.7	> 78.0MW	33.0MVAR	>			50.0MVAR
			5 BARRA5	1	-117.2	22.2		
			7 BARRA7	1	39.2	-5.2		
7 BARRA7	0	0.998 0.2	> 28.5MW	3.0MVAR				
			6 BARRA6	1	-39.1	4.9		
			12 BARRA12	1	10.6	-7.9		
8 BARRA8	1	1.000 11.6	> 42.0MW		>			50.5MVAR
			5 BARRA5	1	463.1	5.8	1.003*	
			9 BARRA9	1	-652.4	73.8		
			30 BARRA30	1	147.3	-29.1		
9 BARRA9	0	0.996 23.3						
			8 BARRA8	1	663.2	-54.8		
			10 BARRA10	1	-663.2	54.8		
10 BARRA10	1	1.000 35.9	> -675.0MW		>			-30.4MVAR
			9 BARRA9	1	675.0	-30.4		
11 BARRA11	0	0.987 0.4	> 105.0MW	34.5MVAR				
			4 BARRA4	1	-83.6	9.1		
			5 BARRA5	1	-100.7	10.5		
			12 BARRA12	1	14.0	-67.8		
			13 BARRA13	1	65.4	13.7		
12 BARRA12	2	1.000 0.0			>	154.3MW	114.8MVAR	
			2 BARRA2	1	52.3	12.4		
			3 BARRA3	1	19.0	5.4		
			7 BARRA7	1	-10.6	7.1		
			11 BARRA11	1	-13.7	68.2		
			14 BARRA14	1	45.9	-0.9		
			16 BARRA16	1	31.0	12.6		
			117 BARRA117	1	30.3	10.0		
13 BARRA13	0	0.963 -2.3	> 51.0MW	24.0MVAR				
			11 BARRA11	1	-64.3	-12.1		
			15 BARRA15	1	13.3	-11.9		
14 BARRA14	0	0.991 -1.9	> 21.0MW	1.5MVAR				
			12 BARRA12	1	-45.4	0.6		
			15 BARRA15	1	24.4	-2.1		
15 BARRA15	-1	0.976 -4.7	> 135.0MW	45.0MVAR	>			50.0MVAR
			13 BARRA13	1	-13.1	6.7		
			14 BARRA14	1	-24.1	-1.6		
			17 BARRA17	1	-146.6	31.1		
			19 BARRA19	1	28.9	-33.2		
			33 BARRA33	1	19.9	2.0		
16 BARRA16	0	0.982 -1.3	> 37.5MW	15.0MVAR				

				12 BARRA12	1	-30.8	-13.7		
				17 BARRA17	1	-6.7	-1.3		
17 BARRA17	0	0.984 -0.6	>	16.5MW		4.5MVAR			
				15 BARRA15	1	149.7	-25.1		
				16 BARRA16	1	6.7	-3.1		
				18 BARRA18	1	125.1	-15.6		
				30 BARRA30	1	-342.1	39.9		
				31 BARRA31	1	31.9	0.7		
				113 BARRA113	1	12.3	-1.3		
18 BARRA18	-1	0.978 -4.5	>	90.0MW		51.0MVAR	>		50.0MVAR
				17 BARRA17	1	-123.1	22.7		
				19 BARRA19	1	33.1	-23.7		
19 BARRA19	-1	0.986 -5.6	>	67.5MW		37.5MVAR	>		115.0MVAR
				15 BARRA15	1	-28.6	33.1		
				18 BARRA18	1	-32.9	23.4		
				20 BARRA20	1	-8.4	20.9		
				34 BARRA34	1	2.4	0.1		
20 BARRA20	0	0.962 -4.7	>	27.0MW		4.5MVAR			
				19 BARRA19	1	8.5	-23.0		
				21 BARRA21	1	-35.5	18.5		
21 BARRA21	0	0.952 -2.6	>	21.0MW		12.0MVAR	>		5.2MVAR
				20 BARRA20	1	35.8	-19.0		
				22 BARRA22	1	-56.8	12.2		
22 BARRA22	0	0.953 1.1	>	15.0MW		7.5MVAR			
				21 BARRA21	1	57.6	-10.8		
				23 BARRA23	1	-72.6	3.3		
23 BARRA23	0	0.978 8.3	>	10.5MW		4.5MVAR			
				22 BARRA22	1	74.6	2.2		
				24 BARRA24	1	34.0	-23.2		
				25 BARRA25	1	-249.1	45.5		
				32 BARRA32	1	130.0	-29.1		
24 BARRA24	0	0.984 7.2	>	19.5MW					
				23 BARRA23	1	-33.8	19.3		
				70 BARRA70	1	2.0	-6.1		
				72 BARRA72	1	12.3	-13.1		
25 BARRA25	1	1.000 20.5	>	-330.0MW			>		11.9MVAR
				23 BARRA23	1	259.6	-0.1		
				26 BARRA26	1	-142.9	3.9		
				27 BARRA27	1	213.2	8.0		
26 BARRA26	1	1.000 23.7	>	-471.0MW			>		-23.5MVAR
				25 BARRA25	1	142.9	3.9	1.000*	
				30 BARRA30	1	328.1	-27.4		
27 BARRA27	-1	0.967 -0.2	>	107.0MW		19.5MVAR	>		50.0MVAR
				25 BARRA25	1	-198.7	49.4		
				28 BARRA28	1	45.3	1.9		
				32 BARRA32	1	16.0	-18.2		
				115 BARRA115	1	30.3	-2.7		
28	0	0.957	>	25.5MW		10.5MVAR			

BARRA28		-2.5							
			27 BARRA27	1	-44.9	-2.0			
			29 BARRA29	1	19.4	-8.5			
29	0	0.959	> 36.0MW	6.0MVAR					
BARRA29		-3.8							
			28 BARRA28	1	-19.3	6.8			
			31 BARRA31	1	-16.7	-12.8			
30	0	0.998							
BARRA30		7.3							
			8 BARRA8	1	-146.4	-11.3			
			17 BARRA17	1	342.1	7.6	1.021*		
			26 BARRA26	1	-319.5	28.6			
			38 BARRA38	1	123.7	-25.0			
31	-1	0.965	> 54.0MW	40.5MVAR	>			50.0MVAR	
BARRA31		-3.5							
			17 BARRA17	1	-31.4	-2.9			
			29 BARRA29	1	16.8	12.2			
			32 BARRA32	1	-39.4	0.2			
32	-1	0.977	> 88.5MW	34.5MVAR	>			100.0MVAR	
BARRA32		-1.1							
			23 BARRA23	1	-124.2	38.9			
			27 BARRA27	1	-15.9	16.8			
			31 BARRA31	1	39.9	-0.9			
			113 BARRA113	1	-3.2	-4.3			
			114 BARRA114	1	14.9	15.1			
33	0	0.964	> 34.5MW	13.5MVAR					
BARRA33		-6.1							
			15 BARRA15	1	-19.8	-4.5			
			37 BARRA37	1	-14.7	-9.0			
34	0	0.976	> 88.5MW	39.0MVAR					
BARRA34		-5.8							
			19 BARRA19	1	-2.4	-6.2			
			36 BARRA36	1	44.5	-13.1			
			37 BARRA37	1	-141.7	-16.7			
			43 BARRA43	1	11.0	10.4			
35	0	0.975	> 49.5MW	13.5MVAR					
BARRA35		-6.6							
			36 BARRA36	1	2.2	-11.5			
			37 BARRA37	1	-51.7	-2.0			
36	-1	0.976	> 46.5MW	25.5MVAR	>			50.0MVAR	
BARRA36		-6.6							
			34 BARRA34	1	-44.4	13.2			
			35 BARRA35	1	-2.1	11.3			
37	0	0.982							
BARRA37		-5.0							
			33 BARRA33	1	14.9	6.0			
			34 BARRA34	1	142.3	17.7			
			35 BARRA35	1	52.0	2.1			
			38 BARRA38	1	-377.6	44.5			
			39 BARRA39	1	92.8	-17.8			
			40 BARRA40	1	75.7	-28.3			
38	0	0.997							
BARRA38		3.5							
			30 BARRA30	1	-123.0	-8.7			
			37 BARRA37	1	377.6	11.8	1.022*		
			65 BARRA65	1	-254.6	-3.1			
39	0	0.975	> 40.5MW	16.5MVAR					
BARRA39		-11.3							
			37 BARRA37	1	-89.8	25.0			
			40 BARRA40	1	49.3	-41.5			
40	-1	0.992	> 99.0MW	34.5MVAR	>			150.0MVAR	
BARRA40		-13.5							

				37 BARRA37	1	-71.8	35.4		
				39 BARRA39	1	-48.5	42.6		
				41 BARRA41	1	31.3	24.6		
				42 BARRA42	1	-10.0	12.8		
41 BARRA41	0	0.975 -14.2	>	55.5MW	15.0MVAR				
				40 BARRA40	1	-31.1	-25.0		
				42 BARRA42	1	-24.4	10.0		
42 BARRA42	-1	0.970 -11.9	>	144.0MW	34.5MVAR	>			50.0MVAR
				40 BARRA40	1	10.2	-16.7		
				41 BARRA41	1	24.7	-12.2		
				49 BARRA49	1	-89.5	22.2		
				49 BARRA49	2	-89.5	22.2		
43 BARRA43	0	0.950 -6.6	>	27.0MW	10.5MVAR				
				34 BARRA34	1	-10.9	-13.8		
				44 BARRA44	1	-16.1	3.3		
44 BARRA44	0	0.946 -3.9	>	24.0MW	12.0MVAR				
				43 BARRA43	1	16.3	-7.9		
				45 BARRA45	1	-40.3	4.9		
45 BARRA45	0	0.951 -1.5	>	79.5MW	33.0MVAR	>			3.6MVAR
				44 BARRA44	1	40.7	-5.2		
				46 BARRA46	1	-50.1	-18.9		
				49 BARRA49	1	-70.1	3.8		
46 BARRA46	-1	0.999 2.2	>	13.5MW	15.0MVAR	>			50.0MVAR
				45 BARRA45	1	51.4	19.9		
				47 BARRA47	1	-42.4	17.6		
				48 BARRA48	1	-22.5	7.4		
47 BARRA47	0	0.992 5.7	>	51.0MW					
				46 BARRA46	1	43.2	-18.0		
				49 BARRA49	1	-26.1	-4.7		
				69 BARRA69	1	-68.1	22.7		
48 BARRA48	0	0.995 5.0	>	30.0MW	16.5MVAR				
				46 BARRA46	1	22.9	-11.0		
				49 BARRA49	1	-52.9	9.3		
49 BARRA49	1	1.000 6.6	>	-176.0MW	45.0MVAR	>			135.4MVAR
				42 BARRA42	1	96.1	-0.7		
				42 BARRA42	2	96.1	-0.7		
				45 BARRA45	1	73.8	2.1		
				47 BARRA47	1	26.2	3.5		
				48 BARRA48	1	53.4	-9.1		
				50 BARRA50	1	77.9	-9.4		
				51 BARRA51	1	96.2	-4.4		
				54 BARRA54	1	57.7	-13.0		
				54 BARRA54	2	56.2	-15.2		
				66 BARRA66	1	-201.8	59.5		
				66 BARRA66	2	-201.8	59.5		
				69 BARRA69	1	-54.1	18.4		
50 BARRA50	0	0.987 3.1	>	25.5MW	6.0MVAR				
				49 BARRA49	1	-76.2	12.2		
				57 BARRA57	1	50.7	-18.2		
51 BARRA51	0	0.966 -1.3	>	25.5MW	12.0MVAR				

				49 BARRA49	1	-91.7	13.8	
				52 BARRA52	1	41.8	-2.6	
				58 BARRA58	1	24.3	-23.2	
52 BARRA52	0	0.959 -2.8	>	27.0MW		7.5MVAR		
				51 BARRA51	1	-41.4	2.4	
				53 BARRA53	1	14.4	-9.9	
53 BARRA53	0	0.967 -4.5	>	34.5MW		16.5MVAR		
				52 BARRA52	1	-14.3	6.6	
				54 BARRA54	1	-20.2	-23.1	
54 BARRA54	1	1.000 -3.4	>	97.5MW		48.0MVAR	>	122.3MVAR
				49 BARRA49	1	-55.2	15.5	
				49 BARRA49	2	-53.4	17.5	
				53 BARRA53	1	20.4	21.3	
				55 BARRA55	1	10.4	-3.5	
				56 BARRA56	1	30.6	-9.1	
				59 BARRA59	1	-50.3	32.6	
55 BARRA55	1	1.000 -3.8	>	94.5MW		33.0MVAR	>	79.4MVAR
				54 BARRA54	1	-10.4	1.5	
				56 BARRA56	1	-27.5	8.8	
				59 BARRA59	1	-56.6	36.1	
56 BARRA56	1	1.000 -3.6	>	126.0MW		27.0MVAR	>	143.4MVAR
				54 BARRA54	1	-30.6	8.5	
				55 BARRA55	1	27.6	-9.0	
				57 BARRA57	1	-30.8	22.4	
				58 BARRA58	1	-5.8	25.2	
				59 BARRA59	1	-42.3	33.6	
				59 BARRA59	2	-44.1	35.8	
57 BARRA57	0	0.989 -1.4	>	18.0MW		4.5MVAR		
				50 BARRA50	1	-49.4	18.8	
				56 BARRA56	1	31.4	-23.3	
58 BARRA58	0	0.977 -2.7	>	18.0MW		4.5MVAR		
				51 BARRA51	1	-24.0	22.3	
				56 BARRA56	1	6.0	-26.8	
59 BARRA59	-1	0.953 4.7	>	183.0MW		169.5MVAR	>	50.0MVAR
				54 BARRA54	1	52.2	-29.6	
				55 BARRA55	1	58.8	-31.3	
				56 BARRA56	1	44.9	-31.2	
				56 BARRA56	2	46.8	-32.7	
				60 BARRA60	1	-70.0	-9.2	
				61 BARRA61	1	-82.9	-8.2	
				63 BARRA63	1	-232.8	22.7	
60 BARRA60	0	0.993 10.7	>	117.0MW		4.5MVAR		
				59 BARRA59	1	71.8	13.5	
				61 BARRA61	1	-176.3	-13.8	
				62 BARRA62	1	-12.5	-4.2	
61 BARRA61	1	1.000 12.0	>	-240.0MW			>	38.2MVAR
				59 BARRA59	1	85.4	15.9	
				60 BARRA60	1	177.1	16.6	
				62 BARRA62	1	44.8	-1.4	
				64 BARRA64	1	-67.2	7.1	

62 BARRA62	-1	0.997 11.1	> 116.0MW	21.0MVAR	>		50.0MVAR
			60 BARRA60	1	12.5	2.9	
			61 BARRA61	1	-44.6	1.2	
			66 BARRA66	1	-51.9	10.5	
			67 BARRA67	1	-32.0	14.5	
63 BARRA63	0	0.995 10.4					
			59 BARRA59	1	232.8	0.6	1.049*
			64 BARRA64	1	-232.8	-0.6	
64 BARRA64	0	0.998 13.1					
			61 BARRA61	1	67.2	-5.9	1.000*
			63 BARRA63	1	233.8	-9.9	
			65 BARRA65	1	-301.0	15.8	
65 BARRA65	1	1.000 18.3	> -587.0MW		>		-120.9MVAR
			38 BARRA38	1	260.7	-44.0	
			64 BARRA64	1	303.5	-25.9	
			66 BARRA66	1	18.4	0.1	1.000*
			68 BARRA68	1	4.4	-51.1	
66 BARRA66	1	1.000 18.0	> -530.0MW	27.0MVAR	>		-27.5MVAR
			49 BARRA49	1	209.7	-21.1	
			49 BARRA49	2	209.7	-21.1	
			62 BARRA62	1	53.3	-9.9	
			65 BARRA65	1	-18.4	0.1	
			67 BARRA67	1	75.6	-2.4	
67 BARRA67	0	0.987 13.5	> 42.0MW	10.5MVAR			
			62 BARRA62	1	32.3	-16.0	
			66 BARRA66	1	-74.3	5.5	
68 BARRA68	0	1.003 18.3					
			65 BARRA65	1	-4.4	-12.8	
			69 BARRA69	1	12.6	4.2	1.001*
			81 BARRA81	1	-8.2	-25.0	
			116 BARRA116	1	0.0	33.6	
69 BARRA69	1	1.000 18.0	> -494.0MW		>		-55.7MVAR
			47 BARRA47	1	72.7	-14.7	
			49 BARRA49	1	57.5	-15.5	
			68 BARRA68	1	-12.6	-4.1	
			70 BARRA70	1	151.5	-16.4	
			75 BARRA75	1	154.2	-11.7	
			77 BARRA77	1	70.8	6.8	
70 BARRA70	-1	0.987 6.6	> 99.0MW	30.0MVAR	>		50.0MVAR
			24 BARRA24	1	-2.0	-3.8	
			69 BARRA69	1	-144.6	33.7	
			71 BARRA71	1	14.9	-22.9	
			74 BARRA74	1	28.3	-0.7	
			75 BARRA75	1	4.4	13.7	
71 BARRA71	0	0.994 6.2					
			70 BARRA70	1	-14.9	22.3	
			72 BARRA72	1	5.8	-6.9	
			73 BARRA73	1	9.0	-15.4	
72 BARRA72	1	1.000 5.4	> 18.0MW		>		11.5MVAR
			24 BARRA24	1	-12.2	8.9	

				71 BARRA71	1	-5.8	2.6	
73 BARRA73	1	1.000 5.9	>	9.0MW		>		14.4MVAR
				71 BARRA71	1	-9.0	14.4	
74 BARRA74	-1	0.975 4.4	>	102.0MW	40.5MVAR	>		80.0MVAR
				70 BARRA70	1	-28.0	-1.5	
				75 BARRA75	1	-74.0	52.4	
75 BARRA75	0	0.963 6.6	>	70.5MW	16.5MVAR			
				69 BARRA69	1	-144.6	28.8	
				70 BARRA70	1	-4.3	-16.8	
				74 BARRA74	1	75.1	-49.8	
				77 BARRA77	1	-54.6	15.5	
				118 BARRA118	1	57.8	5.8	
76 BARRA76	-1	0.960 4.5	>	102.0MW	54.0MVAR	>		100.0MVAR
				77 BARRA77	1	-94.3	29.7	
				118 BARRA118	1	-7.7	16.3	
77 BARRA77	-1	0.968 14.0	>	91.5MW	42.0MVAR	>		50.0MVAR
				69 BARRA69	1	-69.2	-11.6	
				75 BARRA75	1	56.8	-13.0	
				76 BARRA76	1	99.0	-17.3	
				78 BARRA78	1	60.3	42.6	
				80 BARRA80	1	-159.2	-3.2	
				80 BARRA80	2	-74.8	-6.3	
				82 BARRA82	1	-4.4	16.9	
78 BARRA78	0	0.961 13.6	>	107.0MW	39.0MVAR			
				77 BARRA77	1	-60.1	-43.0	
				79 BARRA79	1	-46.9	4.0	
79 BARRA79	0	0.962 14.4	>	58.5MW	48.0MVAR			
				78 BARRA78	1	47.0	-4.0	
				80 BARRA80	1	-105.5	-25.5	
80 BARRA80	1	1.000 18.6	>	-521.0MW	39.0MVAR	>		70.4MVAR
				77 BARRA77	1	163.8	11.7	
				77 BARRA77	2	76.6	10.4	
				79 BARRA79	1	107.5	32.6	
				81 BARRA81	1	8.2	-54.9	
				96 BARRA96	1	34.4	15.6	
				97 BARRA97	1	45.5	22.9	
				98 BARRA98	1	49.4	2.2	
				99 BARRA99	1	35.6	-9.2	
81 BARRA81	0	1.000 18.4						
				68 BARRA68	1	8.2	-56.0	
				80 BARRA80	1	-8.2	56.0	0.980*
82 BARRA82	0	0.952 14.6	>	81.0MW	40.5MVAR			
				77 BARRA77	1	4.6	-24.0	
				83 BARRA83	1	-67.3	7.3	
				96 BARRA96	1	-18.2	-5.6	
83 BARRA83	0	0.956 16.2	>	30.0MW	15.0MVAR			
				82 BARRA82	1	67.9	-8.9	
				84 BARRA84	1	-37.3	6.7	
				85 BARRA85	1	-60.6	-3.7	

94 BARRA94	0	0.966 16.5	> 45.0MW	24.0MVAR		
			92 BARRA92	1	-73.2	6.4
			93 BARRA93	1	-63.4	11.4
			95 BARRA95	1	57.6	18.2
			96 BARRA96	1	25.1	2.0
			100 BARRA100	1	8.8	-62.0
95 BARRA95	0	0.950 15.1	> 63.0MW	46.5MVAR	>	19.0MVAR
			94 BARRA94	1	-57.1	-17.5
			96 BARRA96	1	-5.9	-10.0
96 BARRA96	0	0.956 15.2	> 57.0MW	22.5MVAR		
			80 BARRA80	1	-33.9	-17.6
			82 BARRA82	1	18.3	0.9
			94 BARRA94	1	-24.9	-3.5
			95 BARRA95	1	6.0	8.8
			97 BARRA97	1	-22.4	-11.0
97 BARRA97	0	0.970 16.3	> 22.5MW	13.5MVAR		
			80 BARRA80	1	-45.0	-22.9
			96 BARRA96	1	22.5	9.4
98 BARRA98	0	0.986 15.5	> 51.0MW	12.0MVAR		
			80 BARRA80	1	-48.8	-2.3
			100 BARRA100	1	-2.2	-9.7
99 BARRA99	1	1.000 14.2	> 63.0MW		>	11.9MVAR
			80 BARRA80	1	-35.0	6.4
			100 BARRA100	1	-28.0	5.5
100 BARRA100	1	1.000 15.6	> -323.0MW	27.0MVAR	>	67.6MVAR
			92 BARRA92	1	-44.3	10.3
			94 BARRA94	1	-8.2	58.4
			98 BARRA98	1	2.2	5.1
			99 BARRA99	1	28.2	-7.0
			101 BARRA101	1	-23.2	23.7
			103 BARRA103	1	187.3	-49.1
			104 BARRA104	1	87.1	3.3
			106 BARRA106	1	93.8	-4.1
101 BARRA101	0	0.975 17.7	> 33.0MW	22.5MVAR		
			100 BARRA100	1	23.5	-25.4
			102 BARRA102	1	-56.5	2.9
102 BARRA102	0	0.987 21.5	> 7.5MW	4.5MVAR		
			92 BARRA92	1	-64.9	-2.7
			101 BARRA101	1	57.4	-1.8
103 BARRA103	1	1.000 9.5	> -25.5MW	24.0MVAR	>	100.4MVAR
			100 BARRA100	1	-181.4	63.3
			104 BARRA104	1	49.4	7.7
			105 BARRA105	1	65.8	-2.5
			110 BARRA110	1	91.7	7.9
104 BARRA104	-1	0.964 5.1	> 57.0MW	37.5MVAR		
			100 BARRA100	1	-83.7	7.0
			103 BARRA103	1	-48.2	-7.6
			105 BARRA105	1	74.9	-36.9
105 BARRA105	-1	0.971 3.2	> 46.5MW	39.0MVAR	>	20.0MVAR

				103 BARRA103	1	-63.5	5.6		
				104 BARRA104	1	-74.1	38.8		
				106 BARRA106	1	12.7	-0.9		
				107 BARRA107	1	40.6	-24.6		
				108 BARRA108	1	37.8	-19.0		
106 BARRA106	0	0.970 2.7	>	64.5MW	24.0MVAR	>			17.2MVAR
				100 BARRA100	1	-88.5	18.2		
				105 BARRA105	1	-12.7	-0.4		
				107 BARRA107	1	36.6	-24.7		
107 BARRA107	-1	0.996 -1.9	>	75.0MW	18.0MVAR	>			60.0MVAR
				105 BARRA105	1	-39.4	24.2		
				106 BARRA106	1	-35.6	23.7		
108 BARRA108	0	0.975 1.3	>	3.0MW	1.5MVAR				
				105 BARRA105	1	-37.3	18.5		
				109 BARRA109	1	34.3	-20.0		
109 BARRA109	0	0.977 0.6	>	12.0MW	4.5MVAR	>			38.0MVAR
				108 BARRA108	1	-34.2	19.8		
				110 BARRA110	1	22.2	13.7		
110 BARRA110	-1	0.960 -0.2	>	58.5MW	45.0MVAR				
				103 BARRA103	1	-88.3	3.1		
				109 BARRA109	1	-22.0	-15.0		
				111 BARRA111	1	-53.3	0.5		
				112 BARRA112	1	105.1	-28.0		
111 BARRA111	-1	0.972 2.3	>	-54.0MW					
				110 BARRA110	1	54.0	0.0		
112 BARRA112	-1	0.952 -4.8	>	102.0MW	19.5MVAR	>			50.0MVAR
				110 BARRA110	1	-102.0	30.5		
113 BARRA113	-1	0.983 -0.8	>	9.0MW					
				17 BARRA17	1	-12.2	0.6		
				32 BARRA32	1	3.2	-0.6		
114 BARRA114	0	0.965 -1.6	>	12.0MW	4.5MVAR				
				32 BARRA32	1	-14.8	-16.3		
				115 BARRA115	1	2.8	11.8		
115 BARRA115	0	0.964 -1.6	>	33.0MW	10.5MVAR				
				27 BARRA27	1	-30.2	1.6		
				114 BARRA114	1	-2.8	-12.1		
116 BARRA116	-1	1.001 18.3				>			-50.0MVAR
				68 BARRA68	1	0.0	-50.0		
117 BARRA117	0	0.974 -2.3	>	30.0MW	12.0MVAR				
				12 BARRA12	1	-30.0	-12.0		
118 BARRA118	0	0.952 4.9	>	49.5MW	22.5MVAR				
				75 BARRA75	1	-57.3	-5.2		
				76 BARRA76	1	7.8	-17.3		

TOTAIS DA AREA 1

GERACAO MW/ Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	EXPORT MW/ Mvar	IMPORT MW/ Mvar	PERDAS MW/ Mvar
154.3	0.0	-143.0	0.0	208.1	0.0	0.0	297.3
2318.7	0.0	2142.0	0.0	0.0	0.0	0.0	384.7