



Universidade Federal de Juiz de Fora

Setor de Tecnologia

Faculdade de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

# **Modelagem de Carga em Sistemas de Energia Elétrica: Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo**

Marcelo Silva Neves

Juiz de Fora, MG - Brasil

Agosto de 2008

MODELAGEM DE CARGA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: MODELO  
MATEMÁTICO E SUA VALIDAÇÃO COM TESTES DE CAMPO

Marcelo Silva Neves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D. - Orientador – UFJF

---

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D. – UFSC

---

Prof. Edimar José de Oliveira, D.Sc. – UFJF

JUIZ DE FORA, MG - BRASIL

AGOSTO DE 2008

NEVES, MARCELO SILVA

Modelagem de Carga em Sistemas de Energia Elétrica: Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo [Juiz de Fora] 2008

xiii, 71 p. 29,7 cm (UFJF, M.Eng., Engenharia Elétrica, 2008)

Dissertação – Universidade Federal de Juiz de Fora

- 1 – Modelagem de Carga
- 2 – Estimação de Estados
- 3 – Método de Pontos Interiores

Aos meus pais e irmãos.

# Agradecimentos

Ao professor José Luiz Rezende Pereira pela orientação, dedicação e incentivo, demonstrados ao longo destes anos de trabalho.

Aos amigos de mestrado Eduardo Martins Viana, Jéferson de Souza Costa e Rafael Santos Rocha pela excelente convivência, cooperação e incentivo durante a realização do curso de pós-graduação.

A todos os amigos da Faculdade de Engenharia que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao LABSPOT – Laboratório de Sistemas de Potência da Faculdade de Engenharia da UFJF, pelo suporte técnico.

Ao CNPq pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Em especial agradeço a todos os meus amigos e familiares que demonstraram compreensão e incentivo durante toda a realização do curso de pós-graduação.

Resumo da Dissertação apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica (M.Eng.)

## MODELAGEM DE CARGA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: MODELO MATEMÁTICO E SUA VALIDAÇÃO COM TESTES DE CAMPO

Marcelo Silva Neves

Agosto / 2008

Orientador: José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho é proposta uma nova metodologia para a modelagem estática de carga em Sistemas Elétricos de Potência. A ferramenta proposta visa à estimação dos parâmetros dos modelos exponencial e polinomial (ZIP) relativos às potências ativa e reativa da carga com as variações estáticas de tensão. Estes parâmetros são determinados a partir da análise de um conjunto de medições de potências realizadas sob variações forçadas e sustentadas de tensão, em um determinado ponto de interesse do sistema. A estimação dos parâmetros que compõem a carga é realizada utilizando-se o método dos mínimos quadrados ponderados de estimação estática de estados onde os pesos das medidas são considerados unitários. Adicionalmente a metodologia primal-dual de pontos interiores é utilizada para a inclusão das restrições de canalização impostas pelos modelos da carga.

Para verificar a eficácia da metodologia, são realizados estudos a partir de dados de medição obtidos de uma subestação de propriedade da CEMIG, obtendo-se os parâmetros dos modelos polinomial e exponencial.

Abstract of Dissertation presented to UFJF as a partial fulfillment of the requirements for degree of Master of Engineering (M.Eng.)

ELECTRIC POWER SYSTEMS LOAD MODELING: A MATH MODEL AND ITS  
VALIDATION WITH CASE STUDIES

Marcelo Silva Neves

August / 2008

Supervisor: José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Department: Electrical Engineering

In this work a new methodology for static load modeling in electric power systems is proposed. The proposed tool aims to make the estimation of the exponential and polynomial (ZIP) load parameters related to active and reactive power as a function of static voltage variations. Those parameters are determined from the analysis of a set of active and reactive power measurements under forced variations of voltages at a given interest point of the electric power system. The load composition parameters are determined using the minimum weighted least square static state estimation technique having unit values for the measurement weights. Additionally, the primal-dual interior point technique was used to solve the problem in order to consider the inclusion of equality and inequality constraints imposed by the load model parameters.

In order to verify the effectiveness of the proposed methodology, various sets of data measurements were obtained from a substation of the property of CEMIG and the load composition parameters were estimated for both the polynomial and exponential models.

# Sumário

Capítulo I.....	1
Introdução.....	1
I.1 Considerações Iniciais.....	1
I.2 Revisão Bibliográfica.....	2
I.2.1 Modelagem de Carga.....	2
I.2.2 Estimação de Estados.....	5
I.3 Motivação da Dissertação.....	8
I.4 Objetivo da Dissertação.....	9
I.5 Publicações Decorrentes da Dissertação.....	9
I.6 Estrutura da Dissertação.....	9
Capítulo II.....	11
Modelagem de Carga.....	11
II.1 Introdução.....	11
II.2 Métodos de Modelagem de Carga.....	12
II.3 Modelos de Carga.....	13
Capítulo III.....	16
Metodologia Proposta.....	16
III.1 Introdução.....	16
III.2 Formulação do Problema.....	17
III.2.1 Modelo ZIP.....	17
III.2.2 Modelo Exponencial.....	21
III.3 Algoritmo de Solução.....	22
III.4 Considerações Finais.....	24
Capítulo IV.....	25
Resultados.....	25
IV.1 Introdução.....	25
IV.2 Modelos de Carga da Barra 2.....	26
IV.3 Modelos de Carga da Barra 3.....	37
IV.4 Considerações Finais.....	45
Capítulo V.....	47
Conclusões e Trabalhos Futuros.....	47
V.1 Conclusões.....	47
V.2 Trabalhos Futuros.....	48
Apêndice A.....	50
Estimação de Estados.....	50
A.1 Introdução.....	50
A.2 Probabilidade Máxima.....	51

A.2.1 Função Densidade de Probabilidade Gaussiana (Normal) .....	52
A.2.2 Função de Probabilidade.....	53
A.3 Formulação do Problema de Estimação Estática de Estados .....	54
A.3.1 Modelo das Medidas .....	55
A.3.2 Cálculo do Vetor de Estados.....	57
A.4 Análise de Observabilidade .....	58
A.5 Detecção e Identificação de Erros Grosseiros .....	59
Apêndice B.....	61
Metodologia Primal-Dual de Pontos Interiores .....	61
B.1 Introdução .....	61
B.2 Método de Pontos Interiores.....	61
B.3 Formulação do Problema de FPO.....	62
B.4 Resolução do Problema.....	64
B.5 Atualização das Variáveis .....	66
B.6 Atualização do Parâmetro Barreira e do Gap .....	67
B.7 Algoritmo de Solução do MPI .....	68

# Lista de Figuras

Figura III.1 – Etapas do processo de modelagem de carga.....	23
Figura IV.1 – Diagrama simplificado da SE Juiz de Fora 2.....	25
Figura IV.2 – Variações impostas de tensão e potência ativa (Barra 2 – 13:00h). ....	27
Figura IV.3 – Comparação da curva real de potência ativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 13:00h). ....	28
Figura IV.4 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência ativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 13:00h). ....	29
Figura IV.5 – Variações impostas de tensão e potência reativa (Barra 2 – 13:00h). ....	30
Figura IV.6 – Comparação da curva real de potência reativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 13:00h). ....	31
Figura IV.7 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência reativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 13:00h). ....	32
Figura IV.8 – Variações impostas de tensão e potência ativa (Barra 2 – 17:00h). ....	33
Figura IV.9 – Comparação da curva real de potência ativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 17:00h). ....	34
Figura IV.10 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência ativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 17:00h). ....	34
Figura IV.11 – Variações impostas de tensão e potência reativa (Barra 2 – 17:00h). ....	35
Figura IV.12 – Comparação da curva real de potência reativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 17:00h). ....	36
Figura IV.13 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência reativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 17:00h). ....	36
Figura IV.14 – Variações impostas de tensão e potência ativa (Barra 3 – 13:00h). ....	37
Figura IV.15 – Comparação da curva real de potência ativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 13:00h). ....	38
Figura IV.16 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência ativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 13:00h). ....	39
Figura IV.17 – Variações impostas de tensão e potência reativa (Barra 3 – 13:00h). ....	39
Figura IV.18 – Comparação da curva real de potência reativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 13:00h). ....	40
Figura IV.19 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência reativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 13:00h). ....	41
Figura IV.20 – Variações impostas de tensão e potência ativa (Barra 3 – 17:00h). ....	41
Figura IV.21 – Comparação da curva real de potência ativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 17:00h). ....	42
Figura IV.22 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência ativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 17:00h). ....	43

Figura IV.23 – Variações impostas de tensão e potência reativa (Barra 3 – 17:00h).....	43
Figura IV.24 – Comparação da curva real de potência reativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 17:00h). .....	44
Figura IV.25 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência reativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 17:00h). .....	45
Figura A.1 – Função densidade de probabilidade Normal padrão.....	52
Figura A.2 – Etapas do processo de estimação de estados.....	55
Figura A.3 – Observabilidade em um sistema elétrico interconectado.....	59
Figura B.1 – Simplex x MPI. ....	62

# Lista de Tabelas

Tabela II.1 – Valores típicos dos parâmetros de componentes de carga – modelo exponencial. .	14
Tabela IV.1 – Modelo ZIP da carga ativa (Barra 2 – 13:00h). .....	27
Tabela IV.2 – Modelo exponencial da carga ativa (Barra 2 – 13:00h). .....	28
Tabela IV.3 – Modelo ZIP da carga reativa (Barra 2 – 13:00h). .....	30
Tabela IV.4 – Modelo exponencial da carga reativa (Barra 2 – 13:00h). .....	31
Tabela IV.5 – Modelo ZIP da carga ativa (Barra 2 – 17:00h). .....	33
Tabela IV.6 – Modelo exponencial da carga ativa (Barra 2 – 17:00h). .....	33
Tabela IV.7 – Modelo ZIP da carga reativa (Barra 2 – 17:00h). .....	35
Tabela IV.8 – Modelo exponencial da carga reativa (Barra 2 – 17:00h). .....	35
Tabela IV.9 – Modelo ZIP da carga ativa (Barra 3 – 13:00h). .....	38
Tabela IV.10 – Modelo exponencial da carga ativa (Barra 3 – 13:00h). .....	38
Tabela IV.11 – Modelo ZIP da carga reativa (Barra 3 – 13:00h). .....	40
Tabela IV.12 – Modelo exponencial da carga reativa (Barra 3 – 13:00h). .....	40
Tabela IV.13 – Modelo ZIP da carga ativa (Barra 3 – 17:00h). .....	42
Tabela IV.14 – Modelo exponencial da carga ativa (Barra 3 – 17:00h). .....	42
Tabela IV.15 – Modelo ZIP da carga reativa (Barra 3 – 17:00h). .....	44
Tabela IV.16 – Modelo exponencial da carga reativa (Barra 3 – 17:00h). .....	44
Tabela IV.17 – Parâmetros do modelo ZIP para as diferentes barras e horários. ....	46
Tabela IV.18 – Parâmetros do modelo exponencial para as diferentes barras e horários. ....	46

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

$\alpha_p, \alpha_Q$	fator de sensibilidade da potência ativa/reactiva do modelo exponencial;
$a_p, a_Q$	parcela da carga ativa/reactiva modelada como potência constante;
$b_p, b_Q$	parcela da carga ativa/reactiva modelada como corrente constante;
$c_p, c_Q$	parcela da carga ativa/reactiva modelada como impedância constante;
$x$	vetor de estados;
$z$	vetor de medidas;
$\hat{z}$	vetor dos valores estimados para as medidas;
$e$	vetor de erros das medidas;
$r$	vetor dos resíduos;
$r^N$	vetor dos resíduos normalizados;
$\Omega$	matriz de covariância dos resíduos;
$E\{.\}$	operador valor esperado;
$m$	número de medidas;
$n$	número de variáveis de estados;
$nb$	número de barras;
$h$	vetor das funções não lineares que relacionam $x$ e $z$ ;
$H$	matriz Jacobiana;
$G$	matriz de ganho;

$R$	matriz de covariância de $e$ ;
$\sigma$	desvio padrão;
COS	Centro de Operação do Sistema;
ONS	Operador Nacional do Sistema;
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition.

# Capítulo I

## Introdução

### I.1 Considerações Iniciais

A crescente dependência das sociedades modernas em relação às diversas formas de energia e em particular à energia elétrica, juntamente com o crescimento em dimensão e complexidade dos sistemas elétricos, faz surgir problemas associados à qualidade e à segurança dos serviços prestados pelas companhias de eletricidade. Estes problemas, somados às limitações de ordem financeira e à necessidade de uma utilização ótima dos recursos existentes, têm obrigado as companhias de energia elétrica a terem elevado cuidado na tomada de decisão durante as etapas de planejamento e operação dos sistemas elétricos [1].

Os sistemas de energia elétrica são projetados para atender a demanda de energia de forma contínua, respeitando padrões de qualidade (limites de tensão e frequência) e segurança, assim como restrições econômicas e ambientais [2].

Para planejar e operar um sistema de energia elétrica de maneira econômica e segura é de fundamental importância definir-se um modelo adequado para cada elemento do sistema. A correta modelagem dos componentes possibilita a operação do sistema com menores margens de erro, melhor representação das restrições de operação e melhor exploração de seus recursos.

Ao longo do tempo vários estudos e pesquisas foram realizados com o propósito de aprimorar os modelos dos componentes do sistema (linhas de transmissão/distribuição, transformadores, geradores etc.), porém desde o início a carga apresentou-se como o componente de mais difícil modelagem. Apesar de se conhecer como cada elemento da carga se comporta indivi-

dualmente, não se tem uma idéia precisa da sua composição final, devido à grande diversidade de equipamentos que a compõem de forma aleatória.

Observa-se que tarefas de análise pré e pós-operacionais tais como estudos de planejamento, análises de contingência, reconfigurações operativas de redes, análise de eventos e tantos outros que em determinado momento envolvam a avaliação do estado e tendências da rede, são claramente afetados pela questão da modelagem de suas cargas.

Assim, uma modelagem estática de carga mais realista impacta positivamente os resultados e as análises inerentes aos estudos de carregamento e estabilidade de tensão associados aos estudos de planejamento da expansão, reconfiguração de redes, contingências, diagnósticos e planejamentos operativos e tantos outros que envolvam programas de análise de redes elétricas, tornando-os igualmente mais realistas e confiáveis [3].

Duas abordagens têm sido usadas para a modelagem de carga. A primeira delas é baseada no conhecimento dos componentes individuais e o modelo é obtido através da combinação de modelos dos diferentes componentes da carga. A segunda abordagem não requer o conhecimento das características físicas da carga. Esta se baseia em medidas obtidas da resposta da carga quando a mesma é submetida a distúrbios e o modelo é estimado usando-se métodos de identificação de sistemas [4].

## **I.2 Revisão Bibliográfica**

Visando ampliar as informações e conhecimentos sobre o tema e metodologias utilizadas nesta dissertação, foram consultadas várias referências cujos principais aspectos são apresentados nos subitens a seguir.

### **I.2.1 Modelagem de Carga**

A atual estrutura do setor elétrico brasileiro impõe que a operação do sistema seja feita de forma a melhor explorar os recursos existentes ao menor preço possível. Dentro desta visão, torna-se necessário um profundo conhecimento da operação, dos ajustes e do desempenho de cada elemento do sistema [4].

A representação de cargas por injeções constantes de potência ativa e reativa nem sempre corresponde ao comportamento real do sistema. Em algumas aplicações do cálculo do fluxo de carga, como é o caso dos programas de análise de estabilidade transitória, a modelagem das car-

gas tem efeito direto sobre os resultados: a modelagem por potência constante é, em geral, mais crítica que a modelagem por impedância constante. Neste tipo de aplicação, frequentemente são observados casos estáveis classificados como instáveis, simplesmente porque não foram consideradas as variações das cargas com a magnitude das tensões [5].

Com o intuito de aprimorar a representação atual das cargas, foram desenvolvidos, em [4], equipamentos de medição específicos para colher dados do comportamento da carga, e uma ferramenta computacional que viabiliza a análise desses dados e a modelagem estática e dinâmica da carga. São utilizadas as formulações matemáticas dos modelos de carga estático polinomial (ZIP) e dinâmico australiano (LINEAR). Foram monitorados e armazenados dados de eventos ocorridos em diferentes ramais de carga de oito subestações do sistema elétrico brasileiro. Estes dados foram então divididos em dois grupos, sendo o primeiro utilizado para obter os modelos de carga e o segundo conjunto usado para verificar a resposta fornecida de cada modelo obtido. O artigo conclui ser o modelo LINEAR o que apresentou desempenho mais próximo dos dados de medição, no entanto, a utilização deste modelo ainda não é possível em alguns programas de análise de redes. É importante ressaltar que o artigo não deixa claro qual foi a ferramenta computacional desenvolvida para a obtenção dos modelos da carga, apenas apresenta as formulações básicas dos modelos ZIP e LINEAR.

A referência [6] descreve uma seqüência de ensaios, manobras operativas e simulações realizadas em subestações distribuidoras da LIGHT com o objetivo de modelar a representação da carga a ser considerada em estudos de estabilidade dinâmica. Cada um dos ensaios em subestações foi reproduzido em simulação dinâmica no programa ANATEM para a obtenção da modelagem ZIP + Motores de Indução. Para a participação dos motores de indução dentro da carga total de cada classe de consumo, foi considerado um percentual que varia entre 50% e 70% da carga total de cada subestação. O restante da carga foi modelado como impedância constante tanto para a parte ativa quanto para a parte reativa. O autor resalta também o aumento da participação dos motores de indução na classe residencial.

A referência [7] avalia o impacto de uma modelagem mais acurada para a representação dos dispositivos lentos e discretos de controle de tensão e das cargas do tipo motor de indução nos estudos de planejamento, operação e segurança de tensão. A modelagem proposta para a representação dos motores de indução inclui a implementação do modelo destas cargas nos problemas de fluxo de potência e fluxo de potência continuado. O restante da carga é representado pelo modelo ZIP convencional. O artigo mostra que se a representação incompleta dos recursos discretos de controle de tensão pode produzir resultados conservativos da margem de carregamento de um sistema, por outro lado, a não representação das cargas do tipo motor de indução

provoca um impacto contrário nesta margem, além do risco de informações distorcidas com relação à interação entre os dispositivos de controle de tensão.

No trabalho [3] são descritos alguns conceitos inerentes ao processo de modelagem de carga, tais como os conceitos de cargas estáticas e dinâmicas e suas representações. Segue também as descrições de duas metodologias comumente utilizadas, a Modelagem pelo Método da Composição de Cargas e a Modelagem pelo Método da Medição Direta.

O primeiro método parte de dados sobre o comportamento de diversos elementos de carga ligados à fonte da concessionária, chamados de componentes de carga. Para cada componente de carga é levantado seu comportamento estático retratado por uma expressão matemática do tipo polinomial ou exponencial. Assim, os componentes de carga são agregados, juntamente com os elementos de sistema (redes e equipamentos associados), e através de programas computacionais específicos são então calculados os parâmetros estáticos dos modelos de carga para alimentadores, barras ou sistemas inteiros.

O método de medição direta utiliza procedimentos de medição e análise de resultados de campo, obtidos diretamente do sistema real. O método resume-se na medição das potências ativa e reativa, mediante variações de tensão impostas ao sistema em análise. Um conjunto de dados de medição é registrado e analisado para a obtenção dos parâmetros do modelo de carga considerado. É realizada uma comparação entre os dois métodos destacando algumas vantagens e desvantagens de cada um.

O ponto mais crítico para o método de medição direta é o problema das flutuações naturais da carga, presente de forma aleatória e incontrolável. Mesmo em horários de tensão relativamente estável as variações da carga podem ser de tal ordem que comprometam a obtenção dos parâmetros da mesma. O trabalho propõe gerar uma variação expressiva na tensão de forma a garantir que o efeito na variação das potências decorre predominantemente desta grande variação de tensão, mitigando o impacto das flutuações naturais da carga.

O trabalho também apresenta e discute os modelos matemáticos do tipo exponencial e polinomial de representação da carga, que são os mais utilizados nos estudos de fluxo de potência. É apresentado um processo de conversão entre os modelos exponencial e polinomial, que segundo o autor é bastante útil nos processos de adaptação dos dados de campo aos programas de fluxo de carga. São analisados, de forma qualitativa, os impactos de diferentes modelos de carga em estudos de contingência e de estabilidade de tensão.

A referência [8] descreve as melhorias realizadas na modelagem da carga do consumidor industrial ALUMAR, implementadas nos programas ANAREDE e ANATEM, as quais são utili-

zadas para representação da carga em estudos de fluxo de potência, estabilidade, planejamento e operação. A ALUMAR é considerada um dos maiores complexos industriais de alumina e alumínio do mundo, atualmente com uma demanda de 825 MW, bem maior que a capital do Maranhão que consome aproximadamente 200 MW.

Uma das mudanças foi a representação com mais detalhes o sistema de transmissão entre a SE São Luís II e a ALUMAR, que antes era representado como barra única. Outra melhoria consistiu em modelar parte da carga da indústria, anteriormente representada por potência constante, como carga do tipo motor de indução devido à grande presença de motores deste tipo com potências elevadas.

## I.2.2 Estimação de Estados

Modernamente, a supervisão e o controle dos sistemas de energia elétrica são feitos através de programas computacionais que requerem uma grande quantidade de dados, obtidos por intermédio de vários instrumentos de medição e telecomunicação distribuídos em toda rede elétrica [2]. Um conjunto de dados é então coletado em intervalos cíclicos de tempo e remetido ao Centro de Operação do Sistema (COS). Mas o que fazer com esta enorme quantidade de dados? Como processá-los de forma adequada, rejeitando dados ruins ou substituindo aqueles perdidos e considerar de forma coerente as diversas precisões existentes dentro do mesmo conjunto de dados? A partir destas questões, surgiu a motivação para o desenvolvimento da função Estimação de Estados e por volta de 1970 Schweppe e um grupo de pesquisadores do MIT (Massachusetts Institute of Technology) apresentaram os primeiros trabalhos nesta área.

Schweppe e Wilder [9] propuseram o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) para a estimação de estados em sistemas de energia elétrica. Para resolver este problema de otimização, Schweppe escolheu o Método de Gauss-Newton, conhecido na literatura como o Método da Equação Normal, utilizando apenas dados estocásticos provenientes de telemensagens realizadas na rede.

O Método dos Mínimos Quadrados Ponderados representa a principal formulação adotada nos programas de estimação de estados em uso prático nos sistemas elétricos. A partir da ideia de Schweppe, inúmeros trabalhos foram propostos, procurando aprimorar e adequar seu método às novas necessidades dos sistemas elétricos. A incorporação das restrições de igualdade no problema original de estimação de estados foi inicialmente apresentada por Aschmoneit [10], abrindo campo para a publicação de outros trabalhos como [11] que propõe um método para eliminação das restrições de igualdade através da utilização de uma matriz aumentada.

Uma variante dos algoritmos MQP para estimação de estados, que recebeu destaque durante a década de 1970 e início da década de 1980, pode ser encontrada em [12]. O algoritmo propunha o desacoplamento rápido entre as potências ativa e reativa no processo de estimação de estados, assim como no fluxo de potência.

Paralelo ao desenvolvimento de metodologias e algoritmos para a estimação de estados propriamente dita, inúmeros trabalhos foram propostos abordando cada um dos problemas envolvidos no processo de estimação de estados. Krumpholz, Clements e Davis [13] deram uma contribuição importante para a resolução do problema de observabilidade de um sistema de energia ao formularem as condições necessárias e suficientes para a observabilidade em termos da topologia da rede. Monticelli [14] [15] introduziu os conceitos de observabilidade numérica, propondo um algoritmo para solução de problemas de observabilidade e localização de pontos de medição. O problema de detecção e análise de más medições na estimação de estados foi inicialmente abordado por Schweppe em parceria com Merrill [16] e Handschin [17] [18].

Uma abordagem diferenciada da proposta por Schweppe para a solução do problema de estimação de estados foi originalmente apresentada em [19], sendo a mesma baseada no método dos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos (VAPR). Este método apresentava um modelo matemático baseado na utilização de programação linear. Em trabalhos posteriores [20] [21], desenvolveu-se a idéia dos estimadores de estados baseados no emprego de programação linear. Estes trabalhos procuraram destacar as vantagens dos estimadores VAPR na análise e identificação de erros grosseiros e na capacidade de rejeição destes durante o processo de estimação de estados.

No passado, a grande importância dos subsistemas de produção e transmissão de energia elétrica para atendimento ao constante aumento da carga, fez com que estas redes fossem estruturadas com alto grau de interligação, elevada presença de automação em linhas de transmissão e subestações e implantação de sistemas de aquisição de dados (SCADA) em redes de transmissão. Estes fatores motivaram o surgimento de diversas ferramentas ligadas à monitoração e análise da segurança, dentre elas o Estimador de Estados.

Com o passar do tempo os estimadores de estados, inicialmente propostos para utilização em sistemas de transmissão, foram naturalmente adaptados para aplicação em sistemas de distribuição de energia elétrica. No entanto, as redes de distribuição possuem grandes dimensões, usualmente em forma radial, estão diretamente ligadas às cargas que geralmente são desequilibradas, e a diversos centros produtores de energia elétrica, em geral, não controlados pelo centro de controle da operação. Sua topologia em operação é alterada com alguma frequência, além de outras

características específicas geralmente não encontradas nos sistemas de transmissão. Desta forma, os estimadores de estados para as redes de distribuição devem levar em consideração as peculiaridades existentes nestes sistemas.

Um algoritmo para análise do fluxo de potência e estimação de estados, considerando a radialidade dos alimentadores de distribuição, é descrito em [22]. O método proposto considera a formulação monofásica para a rede, modificando o método de Newton para inclusão da radialidade.

Baran e Kelley apresentaram o desenvolvimento de um método trifásico de estimação de estados para aumentar a exatidão dos dados obtidos a partir de um procedimento de previsão de carga, que geralmente são utilizados para monitoramento em tempo real de alimentadores de distribuição [23] [24]. O método utiliza o tratamento dos mínimos quadrados ponderados, aplicado a uma formulação de análise nodal trifásica. Os elementos da matriz Jacobiana são considerados invariáveis com as iterações, em decorrência de linearizações inseridas no modelo.

Atualmente tem-se verificado o crescente número de trabalhos voltados para o desenvolvimento de algoritmos híbridos para estimação de estados em redes de distribuição. Tais algoritmos caracterizam-se por combinar aproximações tradicionais com técnicas emergentes, inserindo no modelo informações qualitativas antes desprezadas. Dentre as técnicas emergentes podemos destacar a utilização de conjuntos de natureza Fuzzy, das Redes Neurais Artificiais e dos Algoritmos Genéticos.

A utilização de algoritmos genéticos no planejamento de sistemas de medição é apresentada em [25]. A metodologia proposta se caracteriza pela obtenção de uma distribuição de pontos de medição considerando tipo, localização e número de medidores, através do tratamento do problema de otimização pela técnica de algoritmos genéticos.

Lopes [1] apresenta um Estimador de Estados Fuzzy para utilização em redes de distribuição e modelagem da rede externa em sistemas de transmissão. O Estimador de Estados Fuzzy considera a técnica de modelagem do estimador de estados baseado na soma dos valores absolutos ponderados dos resíduos (VAPR), porém em um ambiente fuzzy. A teoria dos conjuntos de natureza fuzzy permite que as informações qualitativas ou imprecisas existentes nos dados disponíveis para a estimação de estados sejam adequadamente modeladas e representadas como números imprecisos, fuzzy, definidos para uma faixa de valores em um intervalo pré-definido.

Durante algum tempo, o problema de estimação de estados foi tratado de forma estática, isto é, a dinâmica ditada pela variação gradual da carga não era considerada, uma vez que qualquer informação recebida pelo estimador era processada sem que fossem consideradas outras

informações sobre o comportamento passado do sistema. Porém, devido ao fato das cargas e gerações variarem gradualmente no tempo, o vetor de estados também varia. Este fato justifica o uso de um algoritmo de natureza dinâmica para estimar o vetor de estados, buscando assim tirar proveito de uma representação adequada da evolução do estado do sistema no tempo. Com base nesta idéia, foram introduzidos algoritmos para “rastreamento” do estado [26] [27], os quais utilizavam as estimativas do estado anterior como estimativa a priori do estado presente do sistema. Porém, os estimadores rastreadores continuavam tendo uma característica estática, pois não eram capazes de prever o estado sistema.

Então foram propostos os estimadores dinâmicos [28], em seguida denominados estimadores com capacidade de previsão (FASE – Forecasting-Aide State Estimators) [29] que, ao contrário dos estáticos e rastreadores, utilizavam o estado previsto no processo da estimação de estado atual do sistema. Este tipo de estimador possui como importante vantagem a capacidade de prever o estado um passo à frente, de grande valia para a construção de algoritmos para validação dos dados processados.

Em [2] é abordado o problema de detecção, identificação e substituição de medidas com erros grosseiros sob condições de redundância crítica através de estimadores com capacidade de previsão. Além disso, são apresentadas estratégias para a preservação dos níveis de redundância desejados e também para a geração de pseudomedidas de alta qualidade.

### **I.3 Motivação da Dissertação**

A tarefa de modelagem de cargas em um Sistema Elétrico de Potência (SEP), não é algo simples ou trivial e há muito tempo tem recebido a atenção de especialistas de todo o mundo. Todo esse interesse e dedicação ao problema decorrem do fato de que uma modelagem estática de carga mais realista impacta positivamente os resultados e as análises inerentes aos estudos de carregamento e estabilidade de tensão associados aos estudos de planejamento da expansão, reconfiguração de redes, contingências, diagnósticos e planejamentos operativos e tantos outros que envolvam programas de análise de redes elétricas, tornando-os igualmente mais realistas e confiáveis.

Apesar de toda a atenção dedicada à questão, a modelagem de carga ainda carece de aprofundamentos e de novas metodologias para melhor representar as cargas nos Sistemas Elétricos de Potência. Este fato tornou o tema promissor para pesquisa.

## I.4 Objetivo da Dissertação

O objetivo deste trabalho é a elaboração de uma nova metodologia para a determinação dos parâmetros de sensibilidade das potências ativa e reativa da carga com as variações estáticas de tensão.

Para tanto, realiza-se a aquisição de um conjunto de medições de potências ativa e reativa, em um determinado ponto de interesse do sistema, sob variações forçadas e sustentadas de tensão, visando sua posterior análise para a estimação dos parâmetros dos modelos polinomial (ZIP) e exponencial da carga. Considera-se que os erros das medidas possuem uma distribuição de probabilidade Gaussiana com parâmetros desconhecidos. A função densidade de probabilidade conjunta das medidas atingirá seu valor máximo quando os parâmetros da carga estiverem o mais próximo possível de seus valores reais. Assim, é formulado um problema de otimização para maximizar esta função utilizando as técnicas de estimação de estados e a metodologia primal-dual de pontos interiores (MPI) para a inclusão das restrições de canalização impostas pelos modelos da carga.

## I.5 Publicações Decorrentes da Dissertação

- [1] M. S. NEVES, J. L. R. PEREIRA, P. A. N. GARCIA, E. J. OLIVEIRA, “Modelagem Estática de Cargas a Partir da Estimação de Estados”, resumo aprovado no XI SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belém, PA, Março, 2009.

## I.6 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo esta dissertação contém mais quatro capítulos e dois apêndices. O Capítulo II discute a importância de uma representação mais realista da carga nos sistemas elétricos. Além disso, são apresentados dois métodos de modelagem de carga e os principais modelos estáticos de carga utilizados em programas de fluxo de potência.

O Capítulo III apresenta a metodologia proposta para a modelagem de carga. São descritas as formulações do problema para representação das cargas pelo modelo ZIP e pelo modelo exponencial. É apresentado um algoritmo simplificado para o processo de estimação dos parâmetros do modelo de carga desejado e discutida a validade dos modelos obtidos.

No Capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia proposta. Para tanto, são utilizados os dados reais de medição de tensão, potência ativa e potência reativa de duas barras da subestação Juiz de Fora 2 que atende a região central da cidade de Juiz de Fora – MG.

No Capítulo V são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para desenvolvimentos futuros.

O Apêndice A apresenta os principais aspectos da metodologia de estimação de estados baseada no método dos mínimos quadrados ponderados.

No Apêndice B são apresentados os principais aspectos da metodologia primal-dual de pontos interiores.

# Capítulo II

## Modelagem de Carga

### II.1 Introdução

A atual estrutura do setor elétrico brasileiro impõe que a operação do sistema seja feita de forma a melhor explorar os recursos existentes ao menor preço possível. Dentro desta visão, torna-se necessário um profundo conhecimento da operação, dos ajustes e do desempenho de cada elemento do sistema, tanto isoladamente quanto em conjunto, visto que as características de um elemento isolado podem se alterar diante da operação em conjunto [4].

A correta representação dos elementos de um sistema de potência sempre representou fator decisivo para a confiabilidade dos resultados de estudos estáticos. Em qualquer estudo de fluxo de potência é necessário definir-se inicialmente um modelo adequado para cada componente do sistema elétrico.

Sabe-se que o comportamento real da carga tem uma estreita relação com sua tensão terminal e indiretamente impacta as tensões e controles do sistema. Certamente diferentes tipos e modelos de carga impactam de forma diferenciada o sistema. Para uma análise qualitativa destas situações, basta considerar o comportamento da tensão do sistema diante de dois modelos de carga tipicamente utilizados: carga modelada como impedância constante e carga do tipo potência constante.

Sendo a carga do sistema modelada como impedância constante e havendo uma queda de tensão no circuito, haverá também uma diminuição da corrente nas linhas de transmissão/distribuição e uma conseqüente redução da queda de tensão nas mesmas. Esta redução atuará contrariando o distúrbio de tensão na carga. Assim, será estabelecida uma tensão de conver-

gência ou de estabilização atenuada pelo próprio comportamento da carga, que desta forma “ancora” a tensão.

Já no caso de carga do tipo potência constante, uma queda de tensão no circuito provocará um aumento de corrente nas linhas de transmissão/distribuição, já que a demanda de potência praticamente não se altera. Conseqüentemente aumentarão também as quedas de tensão nas linhas piorando ainda mais as quedas de tensão nas barras do sistema.

O modelo de carga de potência constante tem sido utilizado nos estudos de otimização de sistemas de potência dada a sua característica conservadora. Certamente se o sistema é viável para estas cargas, também será viável para qualquer outra, sendo o modelo de potência constante o pior caso. No entanto, tal situação conduz muitas vezes a resultados e análises incorretos podendo acarretar em aumento de custos de investimentos e/ou despesas com o sistema.

## II.2 Métodos de Modelagem de Carga

Ao longo do tempo vários estudos e pesquisas foram realizados com o propósito de aprimorar os modelos dos componentes do sistema, porém desde o início a carga apresentou-se como o componente de mais difícil modelagem do problema. Apesar de se conhecer como cada elemento da carga se comporta individualmente, não se tem uma idéia precisa da sua composição final, devido à grande diversidade de equipamentos que a compõe de forma aleatória [4]. Para melhor representar as cargas do sistema, duas abordagens têm sido utilizadas: o Método da Composição de Cargas e o Método da Medição Direta.

O Método da Composição de Cargas é baseado no conhecimento dos componentes de carga. Um componente de carga reúne cargas de características e respostas semelhantes diante de variações de tensão. Por exemplo, cargas de aquecimento, refrigeração etc., representam componentes de carga. Assim, cada componente de carga é expresso por equações matemáticas, geralmente um modelo polinomial ou exponencial, detalhados no próximo item.

O próximo passo é a agregação dos componentes em classes de carga que se resumem em classes de comportamento de consumo similares como, por exemplo, as classes residencial, comercial e industrial. Para cada classe e período de carga (Leve, Média e Pesada) são obtidos os parâmetros do modelo de carga desejado. Então, em cada ponto de interesse do sistema faz-se a composição das porcentagens de cada classe de carga juntamente com os demais elementos do sistema (redes e equipamentos associados) de forma a obter-se os parâmetros da carga neste ponto.

O método tem como vantagem a possibilidade de ser aplicado/adaptado aos diferentes sistemas e condições, já que dispensa levantamentos de campo. No entanto, tem a desvantagem da necessidade de atualização das características de novos componentes de carga disponíveis no mercado e toda a sua influência dentro de cada classe. Além disso, tem a necessidade de fazer e/ou manter um conjunto de dados de consumo classificados adequadamente para definir de forma correta os consumidores em suas classes.

Já o Método de Medição Direta baseia-se em medidas obtidas da resposta da carga quando a mesma é submetida a variações de tensão. O método requer medições de potência ativa e potência reativa mediante variações sustentadas de tensão impostas à carga. Tais variações são geralmente obtidas por meio de comutações em dispositivos reguladores de tensão ou chaveamento de bancos de capacitores ligados em derivação. A partir destas medições procede-se a análise das mesmas para a obtenção dos parâmetros do modelo de carga desejado.

Uma vantagem deste método é a possibilidade de obtenção das características da carga diretamente do sistema real, através de “simples” variações de tensão no mesmo e medições das potências ativa e reativa. Porém, o processo é afetado pelas flutuações naturais da carga, acarretando imprecisões nos resultados. Além disso, os dados particulares de um determinado sistema somente servirão para sistemas semelhantes e em geral cada sistema, barra ou alimentador requer seu levantamento particular.

## II.3 Modelos de Carga

Um modelo de carga é uma expressão que relaciona a potência (ativa e reativa) consumida pela carga com a tensão (magnitude e frequência) na mesma, ou seja:

$$P = g(V, f) \quad (\text{II.1})$$

$$Q = h(V, f) \quad (\text{II.2})$$

Em estudos estáticos as variações de frequência são mínimas e os modelos resumem-se em funções dependentes apenas das magnitudes das tensões. Dentro de tais estudos, os modelos polinomial (ZIP) e exponencial são os mais amplamente utilizados e serão apresentados a seguir.

O modelo exponencial pode ser expresso pelas seguintes equações:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_p} \quad (\text{II.3})$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_Q} \quad (\text{II.4})$$

onde:

$V_0$  tensão de referência;

$P_0, Q_0$  potência ativa/reactiva na tensão de referência;

$\alpha_P, \alpha_Q$  fator de sensibilidade da potência ativa/reactiva.

Podem-se observar três casos particulares para o modelo exponencial:

- $\alpha_P = \alpha_Q = 2$  carga de impedância constante (denotada por Z);
- $\alpha_P = \alpha_Q = 1$  carga de corrente constante (denotada por I);
- $\alpha_P = \alpha_Q = 0$  carga de potência constante (denotada por P).

A Tabela II.1, retirada da referência [3], mostra valores típicos de  $\alpha_P$  e  $\alpha_Q$  para alguns aparelhos e equipamentos elétricos.

Tabela II.1 – Valores típicos dos parâmetros de componentes de carga – modelo exponencial.

<b>Componente de carga</b>	<b><math>\alpha_P</math> (Potência ativa)</b>	<b><math>\alpha_Q</math> (Potência reativa)</b>
Resistência para aquecimento ambiente	2,00	0,00
Bomba do sistema de aquecimento	0,20	2,50
Bomba de ar condicionado	0,20	2,50
Ar condicionado central	0,20	2,20
Ar condicionado para quartos	0,20	2,50
Aquecedor de água	2,00	0,00
Refrigerador e freezer	0,80	2,50
Lava-louças	1,80	3,50
Máquina de lavar roupas	0,08	1,60
Máquina de secar roupas	2,00	3,30
Lâmpada incandescente	1,54	0,00
Lâmpada fluorescente convencional	2,07	3,21
Lâmpada fluorescente compacta	0,95-1,03	0,31-0,46
Pequenos motores industriais	0,10	0,60
Grandes motores industriais	0,06	0,50
Bomba d'água para irrigação	1,40	1,40

Como pode ser observado na Tabela II.1, diferentes componentes de carga exibem diferentes características de tensão. Assim, uma alternativa de representação é baseada na agregação

de componentes de carga que possuem expoentes iguais ou muito próximos. Quando estes expoentes são todos inteiros, a característica da carga torna-se um polinômio em  $V$ . Um caso especial é o modelo ZIP, o qual é formado por três componentes: impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P). As características da potência ativa e da potência reativa para o modelo ZIP são dadas, respectivamente, pelas seguintes expressões quadráticas:

$$P = P_0 \left( a_p + b_p \frac{V}{V_0} + c_p \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (\text{II.5})$$

$$Q = Q_0 \left( a_Q + b_Q \frac{V}{V_0} + c_Q \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (\text{II.6})$$

onde:

$a_p, a_Q$  parcela da carga ativa/reactiva modelada como potência constante;

$b_p, b_Q$  parcela da carga ativa/reactiva modelada como corrente constante;

$c_p, c_Q$  parcela da carga ativa/reactiva modelada como impedância constante;

$$a_p + b_p + c_p = 1;$$

$$a_Q + b_Q + c_Q = 1.$$

# Capítulo III

## Metodologia Proposta

### III.1 Introdução

Tendo em vista a importância da modelagem de carga nos estudos de planejamento e na operação dos sistemas elétricos, associada à necessidade de aprofundamentos e de novas metodologias para melhor representar as cargas nestes sistemas, este capítulo propõe uma nova metodologia para o tratamento mais adequado dos dados de medição, visando uma modelagem estática.

A análise dos dados de medição é feita utilizando-se as técnicas de estimação de estados e considerando-se que as medidas possuem uma distribuição de probabilidade Gaussiana com parâmetros desconhecidos. O método de estimação utilizado é o método dos mínimos quadrados ponderados, conforme descrito no Apêndice A. Este método busca minimizar a soma ponderada dos erros das medidas de potência ativa e de potência reativa, sujeito às restrições de igualdade e de canalização impostas pelos modelos da carga. Tais restrições são incluídas no problema utilizando-se a metodologia primal-dual de pontos interiores, descrita no Apêndice B.

Para a representação das cargas são considerados os modelos polinomial e exponencial. O método proposto possibilita modelar mais adequadamente a carga estimando não só os parâmetros do modelo desejado, mas estimando também o valor da potência ( $P_0, Q_0$ ) na tensão de referência ( $V_0$ ), obtendo assim o modelo completo da carga.

## III.2 Formulação do Problema

A metodologia proposta utiliza um conjunto de dados de medição direta das características da carga nos pontos de interesse do sistema. A partir da aquisição de medidas de tensão, potência ativa e potência reativa procede-se a análise deste conjunto de dados visando à estimação dos parâmetros do modelo de carga desejado. Para tanto, considera-se que as medidas possuem uma distribuição de probabilidade Gaussiana. A função densidade de probabilidade conjunta (f.d.p.c.) das medidas pode ser escrita em termos dos parâmetros da carga e atingirá seu valor máximo quando os parâmetros estiverem o mais próximo possível de seus valores reais.

Conseqüentemente, um problema de otimização é utilizado para maximizar esta f.d.p.c. em função dos parâmetros da carga. Assim, para a determinação dos valores ótimos dos parâmetros, aplica-se o logaritmo natural a esta f.d.p.c. de forma a simplificar o processo. Deste modo, o problema de máximo se transforma em um problema de mínimo de uma função objetivo. As restrições de igualdade e de canalização impostas pelos modelos de carga são incluídas no problema que é resolvido pela metodologia primal-dual de pontos interiores.

A seguir será detalhado o processo de estimação dos parâmetros para cada um dos modelos de carga considerados, sendo que a modelagem da carga é feita de forma desacoplada entre as suas partes ativa e reativa. Ao contrário dos métodos descritos na literatura que determinam os valores das potências  $P_0$  e  $Q_0$  através de média aritmética, a metodologia proposta estima os valores destas potências juntamente com os parâmetros da carga.

### III.2.1 Modelo ZIP

Para a potência ativa é formulado o seguinte problema de otimização não linear para a estimação dos parâmetros do modelo ZIP:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(P_i^{\text{med}} - P_i(x))^2}{\sigma_i^2} = [P^{\text{med}} - P(x)]^T R^{-1} [P^{\text{med}} - P(x)] \\
 \text{S.a} \quad & a_p + b_p + c_p = 1 \\
 & 0 \leq a_p \leq 1 \\
 & 0 \leq b_p \leq 1 \\
 & 0 \leq c_p \leq 1
 \end{aligned} \tag{III.1}$$

onde:

$$x = [a_p \quad b_p \quad c_p \quad P_0]^T \quad (\text{III.2})$$

$$P(x) = P_0 \left( a_p + b_p \frac{V}{V_0} + c_p \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (\text{III.3})$$

$J(x)$  função objetivo;

$m$  número de medidas de potência ativa;

$P_i^{med}$   $i$ -ésima medida de potência ativa;

$\sigma_i$  desvio padrão da  $i$ -ésima medida;

$R$  matriz covariância dos erros das medidas;

$a_p, b_p, c_p$  parâmetros do modelo ZIP;

$P_0$  potência ativa na tensão de referência ( $V_0$ ).

Nesta dissertação, adotou-se como técnica de solução do problema de otimização (III.1) a metodologia primal-dual de pontos interiores. O Apêndice B apresenta uma descrição detalhada deste método de solução. Assim, de acordo com esta metodologia pode-se escrever a seguinte função lagrangeana:

$$L = J(x) - \mu \sum_{i=1}^3 \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^3 \ln(su_i) - \lambda (a_p + b_p + c_p - 1) - \pi l^T (p - sl - l) - \pi u^T (p + su - u) \quad (\text{III.4})$$

onde:

$\mu$  parâmetro barreira;

$p = [a_p \quad b_p \quad c_p]^T$  parâmetros do modelo ZIP;

$l = [0 \quad 0 \quad 0]^T$  limite inferior dos parâmetros do modelo ZIP;

$u = [1 \quad 1 \quad 1]^T$  limite superior dos parâmetros do modelo ZIP.

A partir da função lagrangeana, é montado o sistema de equações (III.5) a ser resolvido pelo método de Newton-Raphson.

$$[G][\Delta x \quad \Delta \lambda]^T = [g] \quad (III.5)$$

onde:

$$G = \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{cccc|c} & & & & \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial a_p} \\ & & & & \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial b_p} \\ & & & & \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial c_p} \\ & & & & \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial P_0} \\ \hline \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial a_p} & \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial b_p} & \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial c_p} & \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial P_0} & \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda^2} \end{array} \right] \end{array} \quad (III.6)$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial a_p} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial b_p} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial c_p} = -1 \quad (III.7)$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \lambda \partial P_0} = \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda^2} = 0 \quad (III.8)$$

$$G_m = H^T R^{-1} H + \begin{array}{c} \left[ \begin{array}{ccc|c} \frac{\pi l_{a_p}}{s l_{a_p}} - \frac{\pi u_{a_p}}{s u_{a_p}} & & & \\ & \frac{\pi l_{b_p}}{s l_{b_p}} - \frac{\pi u_{b_p}}{s u_{b_p}} & & \\ & & \frac{\pi l_{c_p}}{s l_{c_p}} - \frac{\pi u_{c_p}}{s u_{c_p}} & \\ \hline & & & 0 \end{array} \right] \end{array} \quad (III.9)$$

$$g = \begin{bmatrix} g_m \\ -\frac{\partial L}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 1 - a_p - b_p - c_p \quad (III.11)$$

$$g_m = H^T R^{-1} [P^{med} - P(x)] + \begin{bmatrix} \lambda + \frac{\mu}{sl_{a_p}} - \frac{\mu}{su_{a_p}} \\ \lambda + \frac{\mu}{sl_{b_p}} - \frac{\mu}{su_{b_p}} \\ \lambda + \frac{\mu}{sl_{c_p}} - \frac{\mu}{su_{c_p}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

$H$  é a matriz Jacobiana das medidas dada por:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1(x)}{\partial a_p} & \frac{\partial P_1(x)}{\partial b_p} & \frac{\partial P_1(x)}{\partial c_p} & \frac{\partial P_1(x)}{\partial P_0} \\ \frac{\partial P_2(x)}{\partial a_p} & \frac{\partial P_2(x)}{\partial b_p} & \frac{\partial P_2(x)}{\partial c_p} & \frac{\partial P_2(x)}{\partial P_0} \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial P_m(x)}{\partial a_p} & \frac{\partial P_m(x)}{\partial b_p} & \frac{\partial P_m(x)}{\partial c_p} & \frac{\partial P_m(x)}{\partial P_0} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

$$H = \begin{bmatrix} P_0 & P_0 \frac{V_1}{V_0} & P_0 \left( \frac{V_1}{V_0} \right)^2 & a_p + b_p \frac{V_1}{V_0} + c_p \left( \frac{V_1}{V_0} \right)^2 \\ P_0 & P_0 \frac{V_2}{V_0} & P_0 \left( \frac{V_2}{V_0} \right)^2 & a_p + b_p \frac{V_2}{V_0} + c_p \left( \frac{V_2}{V_0} \right)^2 \\ \vdots & & & \\ P_0 & P_0 \frac{V_m}{V_0} & P_0 \left( \frac{V_m}{V_0} \right)^2 & a_p + b_p \frac{V_m}{V_0} + c_p \left( \frac{V_m}{V_0} \right)^2 \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

O desvio padrão  $\sigma_i$  de uma medida  $i$  é calculado para refletir a precisão esperada do correspondente medidor usado. Como a aquisição de todas as medidas é obtida com o mesmo equipamento, estas possuem valores iguais de desvio padrão. Para simplificar os cálculos, optou-se nesta dissertação por usar o valor unitário para o desvio padrão. Assim,  $\sigma_i = 1$  para todo  $i = 1 \dots m$ . Logo, a matriz de covariância dos erros das medidas é dada por:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{bmatrix}_{m \times m} \quad (III.15)$$

Resolvido o sistema de equações (III.5) parte-se para a atualização das variáveis de estado de acordo com a metodologia primal-dual de pontos interiores.

No caso da carga reativa, procede-se a mesma formulação apresentada para a carga ativa.

### III.2.2 Modelo Exponencial

Da mesma forma que foi feito para o modelo ZIP, é formulado o seguinte problema de otimização não linear para a estimação dos parâmetros do modelo exponencial:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad J(x) &= \sum_{i=1}^m \frac{(P_i^{med} - P_i(x))^2}{\sigma_i^2} = [P^{med} - P(x)]^T R^{-1} [P^{med} - P(x)] \\ \text{S.a} \quad \alpha_p &\geq 0 \end{aligned} \tag{III.16}$$

onde:

$$P_i(x) = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_p} \tag{III.17}$$

$\alpha_p$  parâmetro do modelo exponencial para a potência ativa.

A função lagrangeana é dada por:

$$L = J(x) - \mu \ln(sl) \tag{III.18}$$

A partir da função lagrangeana, é montado o sistema de equações (III.19), a ser resolvido pelo método de Newton-Raphson.

$$[G][\Delta\alpha_p \quad \Delta P_0]^T = [g] \tag{III.19}$$

onde:

$$G = H^T R^{-1} H + \begin{bmatrix} \frac{\pi l_{\alpha_p}}{sl_{\alpha_p}} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{III.20}$$

$$g = H^T R^{-1} [P^{med} - P(x)] + \begin{bmatrix} \frac{\mu}{sl_{\alpha_p}} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{III.21}$$

A matriz Jacobiana ( $H$ ) é dada por:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1(x)}{\partial \alpha_p} & \frac{\partial P_1(x)}{\partial P_0} \\ \frac{\partial P_2(x)}{\partial \alpha_p} & \frac{\partial P_2(x)}{\partial P_0} \\ \vdots & \\ \frac{\partial P_m(x)}{\partial \alpha_p} & \frac{\partial P_m(x)}{\partial P_0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

$$H = \begin{bmatrix} P_0 \left( \frac{V_1}{V_0} \right)^{\alpha_p} \ln \left( \frac{V_1}{V_0} \right)^{\alpha_p} & \left( \frac{V_1}{V_0} \right)^{\alpha_p} \\ P_0 \left( \frac{V_2}{V_0} \right)^{\alpha_p} \ln \left( \frac{V_2}{V_0} \right)^{\alpha_p} & \left( \frac{V_2}{V_0} \right)^{\alpha_p} \\ \vdots & \\ P_0 \left( \frac{V_m}{V_0} \right)^{\alpha_p} \ln \left( \frac{V_m}{V_0} \right)^{\alpha_p} & \left( \frac{V_m}{V_0} \right)^{\alpha_p} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Assim como no modelo ZIP, a matriz de covariância dos erros das medidas ( $R$ ) é dada pela equação (III.15).

Resolvido o sistema de equações (III.19) parte-se para a atualização das variáveis de estado de acordo com a metodologia primal-dual de pontos interiores.

No caso da carga reativa, procede-se a mesma formulação apresentada para a carga ativa

### III.3 Algoritmo de Solução

A modelagem da carga é feita de forma desacoplada entre as suas partes ativa e reativa. Portanto, inicialmente modela-se a parcela ativa da carga conforme descrito a seguir. Posteriormente parte-se para o tratamento da carga reativa do mesmo modo que é feito para a carga ativa. A Figura III.1 ilustra as etapas que envolvem o processo de modelagem de carga.

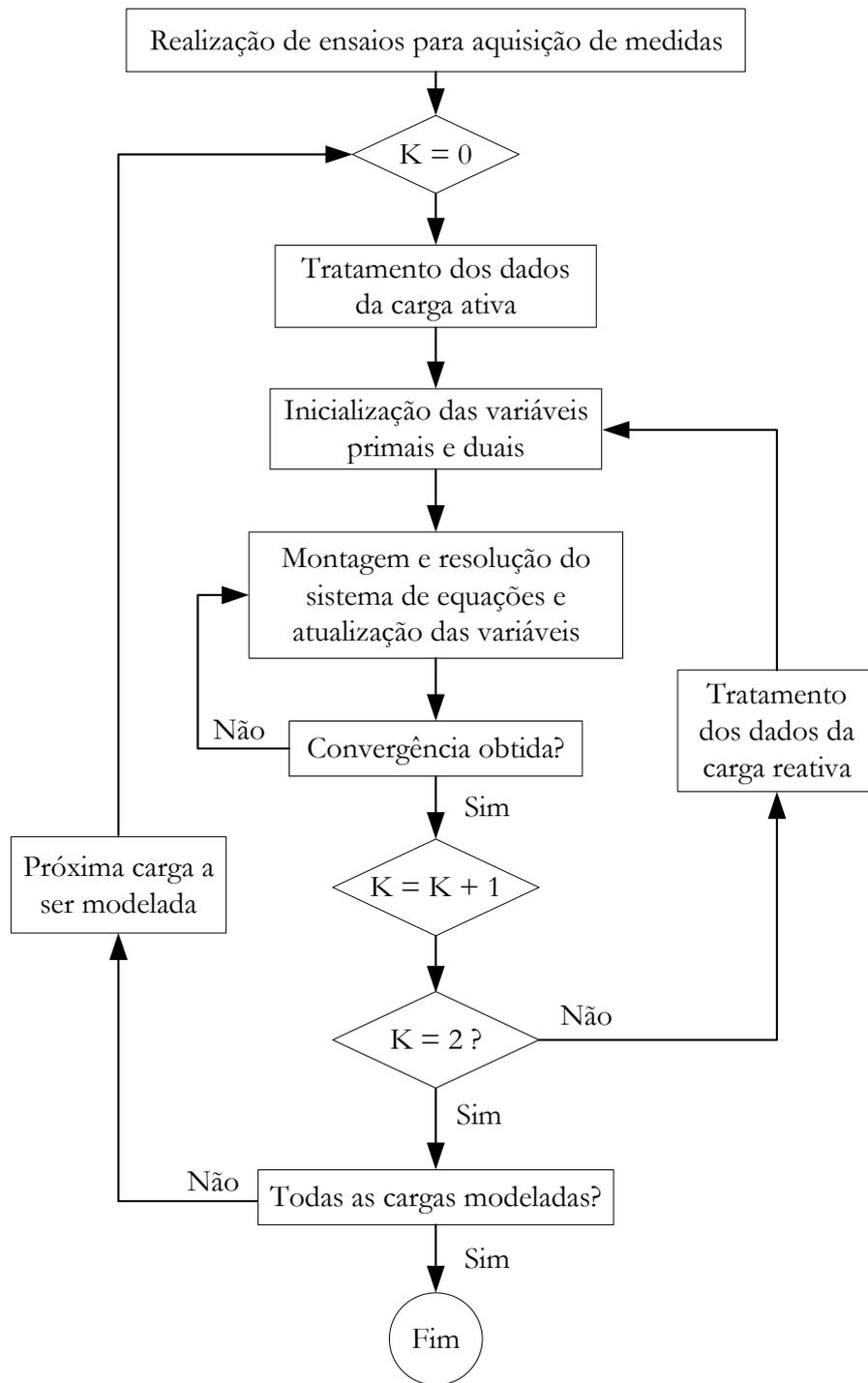


Figura III.1 – Etapas do processo de modelagem de carga.

### III.4 Considerações Finais

O método proposto requer a aquisição de um conjunto de medições de tensão, potência ativa e potência reativa em pontos de interesse da rede (barra, alimentador etc.) para posterior análise e determinação do modelo da carga. Contudo, normalmente o processo fica prejudicado pelas flutuações naturais da carga, presentes de forma aleatória e incontrolável. Mesmo em horários com carga e tensão relativamente estáveis, os pequenos montantes de carga que se agregam ou desagregam a cada instante podem atingir valores consideráveis, acarretando incertezas nos resultados almejados. Assim, para minimizar esta influência negativa das variações naturais da carga, adotou-se o método proposto em [3].

Em [3] é proposta uma aplicação programada de variação de tensão através de comutadores de tensão (OLTC – On Load Tap Changer), gerando patamares de potência ativa e potência reativa, de tal forma e amplitude que as flutuações naturais da carga e seus conseqüentes impactos negativos nos parâmetros sejam satisfatoriamente mitigados. Para garantir que o efeito na variação das potências decorre predominantemente da variação de tensão, imposta ao sistema, adotou-se uma variação total de tensão, entre os patamares, da ordem de 6% a 10%.

Outro ponto importante a ser considerado é a variação da carga ao longo do dia, entre os dias de semana e fim de semana ou mesmo entre as estações do ano. No decorrer do dia é comum verificar que a carga varia desde um patamar conhecido por Carga Leve, passando pelos intervalos de Carga Média até o pequeno período da Carga Pesada, quando a carga assume seu maior valor ou atinge sua Ponta como é comumente conhecido. Assim, para uma melhor representação da carga devem-se levar em consideração as características particulares de cada sistema de forma a escolher adequadamente um conjunto de horários representativos da carga. Em cada faixa horária considerada devem ser realizados os ensaios para aquisição de medidas e subsequente análise das mesmas obtendo-se o modelo vigente naquele momento.

Os parâmetros obtidos para um determinado sistema somente servirão para sistemas semelhantes. Cada sistema, barra ou alimentador requer seu levantamento particular para estimação dos parâmetros da carga.



## IV.2 Modelos de Carga da Barra 2

O processo de aquisição de dados para modelagem das cargas das barras 2 e 3 foi realizado no dia 03 de Março de 2008 (Domingo) por volta dos horários de 13:00h e 17:00h, através de variação de tensão imposta pelos transformadores T2 e T3, respectivamente, e medição de tensão, potência ativa e potência reativa em tais barras. Para uma validação da metodologia proposta, foram criados vários patamares de carga, dentro de um intervalo de no máximo uma hora, para cada barra e cada horário considerado. A criação de vários patamares teve por objetivo a estimação de três modelos ZIP para a carga em cada um dos horários. Para a estimação de um modelo de carga precisa-se de dados (tensão e potências ativa e reativa) de dois patamares. Logo, estima-se um modelo ZIP utilizando-se os dois patamares iniciais, um segundo modelo ZIP com os patamares intermediários e um terceiro modelo ZIP com os dois últimos patamares de carga. Como a aquisição de dados é feita em um “pequeno” intervalo tempo e considerando-se que não há uma grande variação da carga durante este intervalo, espera-se que os três modelos ZIP estimados sejam semelhantes, não havendo grande variação entre seus respectivos parâmetros. O mesmo é feito para o modelo exponencial.

A Figura IV.2 mostra as curvas de tensão e potência ativa na barra 2 (horário das 13:00h), sendo que as medições foram registradas a cada um segundo. A escala horizontal exibe o horário de cada medição. A escala vertical à esquerda mostra os valores de tensão e a da direita exibe os valores de potência ativa. Pode-se observar que existe uma descontinuidade nas curvas da Figura IV.2. Esta descontinuidade deve-se à falta de medidas no intervalo que vai das 13:03h às 13:39h, provavelmente por falha no sistema de aquisição de dados. Tal descontinuidade ocorre em algumas outras curvas, mostradas neste capítulo, mas não afetam de forma alguma o processo de modelagem das cargas.

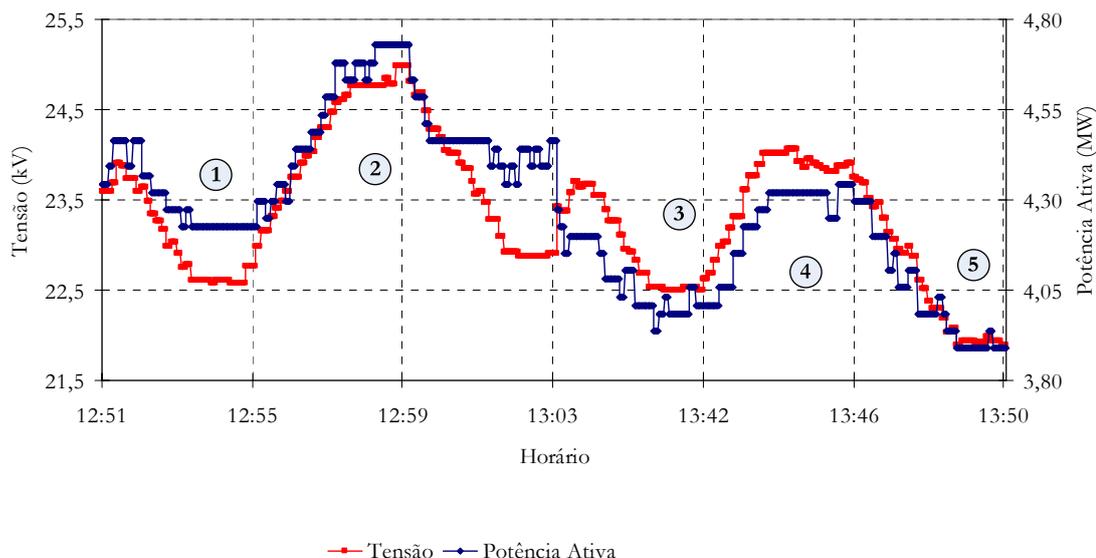


Figura IV.2 – Variações impostas de tensão e potência ativa (Barra 2 – 13:00h).

A Tabela IV.1 mostra os parâmetros de três modelos ZIP para a carga ativa da barra 2 estimados a partir das curvas da Figura IV.2. A primeira e a segunda coluna da Tabela IV.1 mostram os dois patamares de carga (identificados/numerados na Figura IV.2) utilizados para a determinação de cada modelo ZIP. Em cada patamar são selecionados 10 pares de medidas de tensão e potência ativa, totalizando 20 pares de medidas para estimação de cada modelo ZIP. Considerando-se que a carga não tem uma grande variação durante o período de realização dos ensaios, espera-se que os três modelos ZIP obtidos sejam semelhantes. Desta forma, adotou-se como modelo final da carga a média dos três modelos estimados, como mostra a última linha da Tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Modelo ZIP da carga ativa (Barra 2 – 13:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Ativa			
1º Patamar	2º Patamar	$a_p$ (%)	$b_p$ (%)	$c_p$ (%)	$P_0$ (MW)
1	2	37	22	41	4,32
3	4	30	18	52	4,11
4	5	33	19	48	4,13
Média		33	20	47	4,19

Para esta mesma barra, foram efetuados os mesmos procedimentos para a modelagem da carga ativa utilizando-se agora o modelo exponencial. A Tabela IV.2, traz os resultados destas simulações. Da mesma forma que foi feito para o modelo ZIP, foi considerada a média dos três modelos obtidos, como um modelo exponencial final.

Tabela IV.2 – Modelo exponencial da carga ativa (Barra 2 – 13:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Ativa	
1º Patamar	2º Patamar	$\alpha_p$	$P_0$ (MW)
1	2	1,48	4,39
3	4	1,30	4,14
4	5	1,43	4,12
Média		1,40	4,22

Visando comparar a curva real de potência ativa com os modelos obtidos (ZIP e exponencial), foram plotadas as curvas da Figura IV.3 e da Figura IV.4, mostradas a seguir. A Figura IV.3 exibe a curva real da carga ativa (valores medidos; curva vermelha) e as curvas dos modelos ZIP (curva azul) e exponencial (curva verde). A Figura IV.4 apresenta gráfico de dispersão destas curvas.

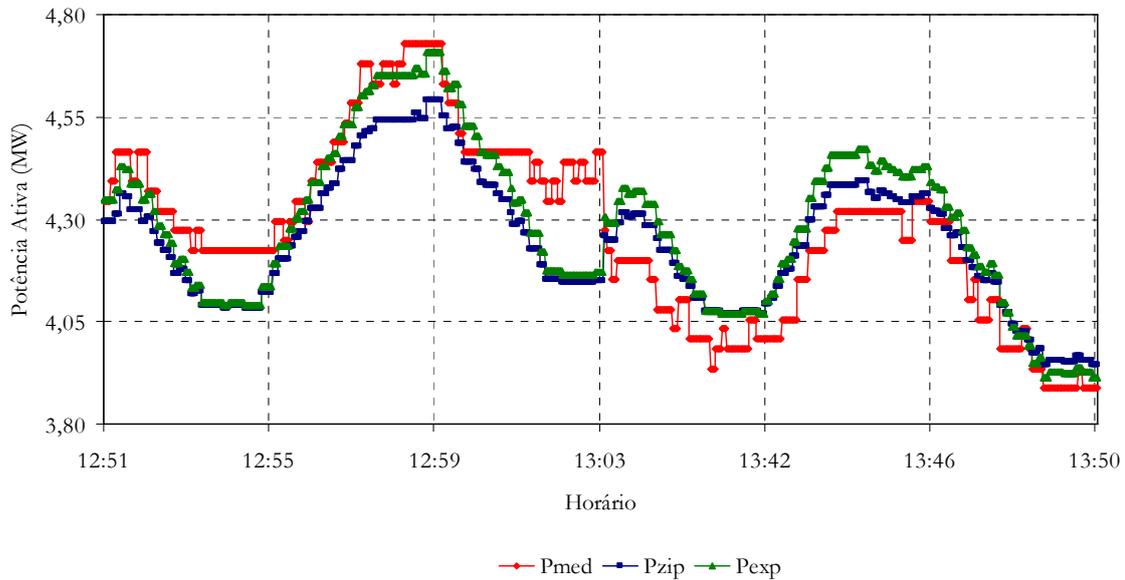


Figura IV.3 – Comparação da curva real de potência ativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 13:00h).

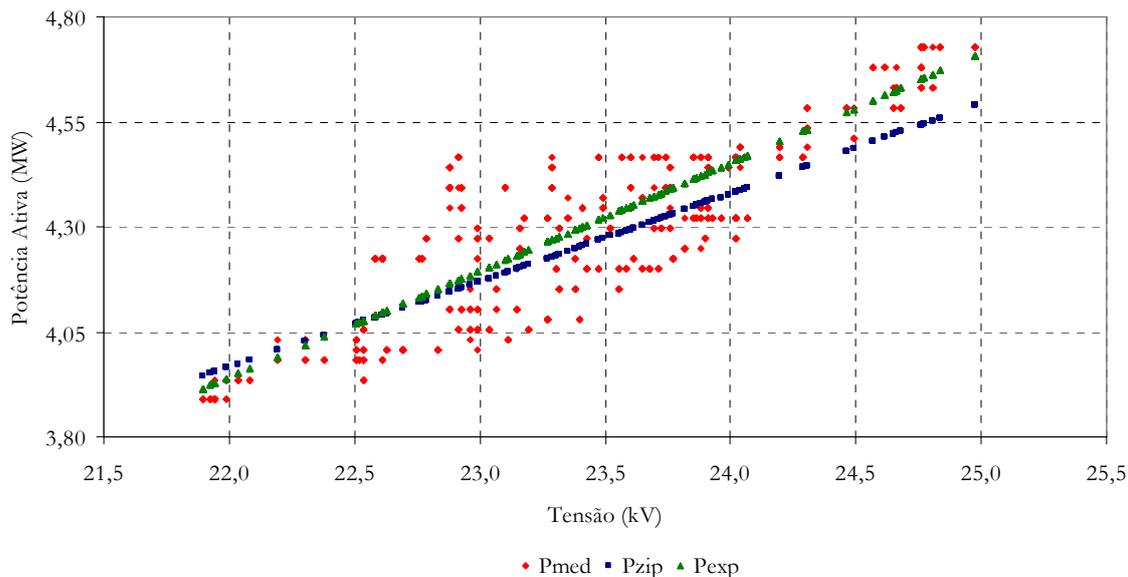


Figura IV.4 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência ativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 13:00h).

Como pode ser observado na Figura IV.3 e na Figura IV.4, ambos os modelos (ZIP e exponencial) representaram a carga ativa de forma satisfatória. Tanto a curva do modelo ZIP como a curva do modelo exponencial encontram-se próximas da curva de carga real.

Para modelar a carga reativa foram efetuados os mesmos procedimentos, assim como foi feito para a carga ativa. A Figura IV.5 mostra as curvas de tensão e potência reativa na barra 2 (horário das 13:00h), sendo que as medições foram registradas a cada um segundo. A escala horizontal exibe o horário da medição. A escala vertical à esquerda mostra os valores de tensão e a da direita exibe os valores de potência reativa.

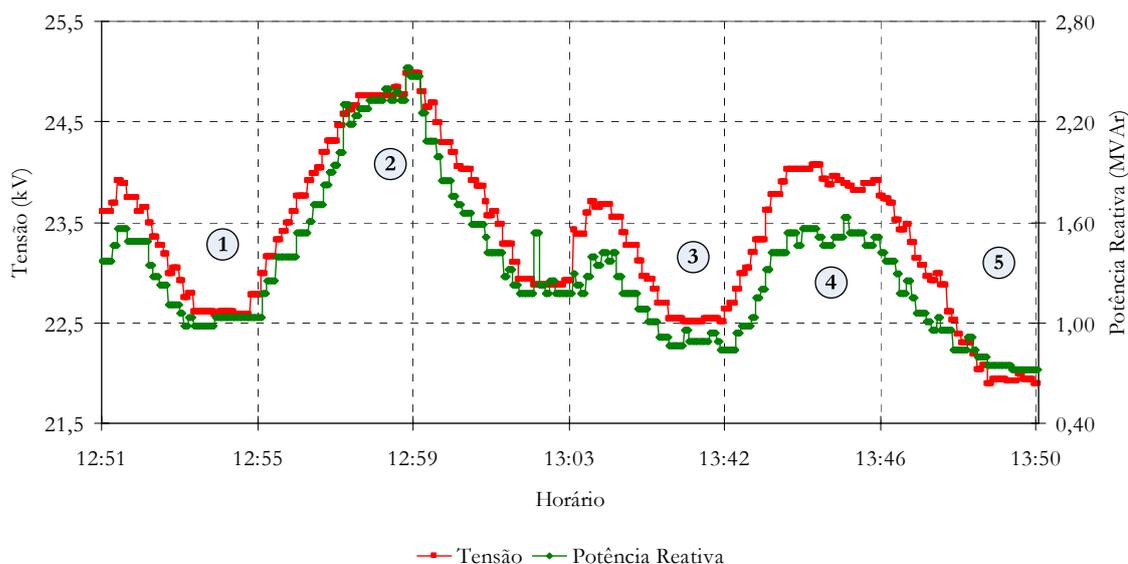


Figura IV.5 – Variações impostas de tensão e potência reativa (Barra 2 – 13:00h).

A Tabela IV.3 mostra os parâmetros de três modelos ZIP para a carga reativa da barra 2 estimados a partir das curvas da Figura IV.5. A primeira e a segunda coluna da Tabela IV.3 mostram os dois patamares de carga (identificados/numerados na Figura IV.5) utilizados para a determinação de cada modelo ZIP. Em cada patamar são selecionados 10 pares de medidas de tensão e potência reativa, totalizando 20 pares de medidas para estimação de cada modelo ZIP. Considerando que a carga não tem uma grande variação durante o período de realização dos ensaios, espera-se que os três modelos ZIP obtidos sejam semelhantes. Desta forma, optou-se por utilizar apenas um modelo de carga reativa, para o horário das 13:00h, como sendo a média dos três modelos estimados, assim como mostrado da última linha da Tabela IV.3.

Tabela IV.3 – Modelo ZIP da carga reativa (Barra 2 – 13:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Reativa			
1º Patamar	2º Patamar	$a_Q$ (%)	$b_Q$ (%)	$c_Q$ (%)	$Q_0$ (MVar)
1	2	0	0	100	1,64
3	4	0	0	100	1,22
4	5	0	0	100	1,19
Média		0	0	100	1,35

Como pode ser observado na Figura IV.5, a carga reativa sofre grandes alterações quando são impostas as variações de tensão na barra. Esta grande variação da carga reativa certamente levaria a um modelo 100% impedância constante dentro do modelo ZIP, como é o caso dos modelos obtidos (Tabela IV.3). No entanto, dentro do modelo ZIP a maior variação da carga está limitada ao quadrado da tensão (modelo impedância constante). Como todos os três modelos ZIP obtidos foram modelos impedância constante, esta carga poderia ser mais bem representada

por outro modelo, como por exemplo, o modelo exponencial. Deste modo, foram efetuados os mesmos procedimentos para a modelagem da carga reativa utilizando-se agora o modelo exponencial. A Tabela IV.4 traz os resultados destas simulações. Neste caso também optou-se por utilizar apenas um modelo exponencial para a carga reativa (horários das 13:00h), como sendo a média dos três modelos estimados, assim como mostrado na última linha da Tabela IV.4

Tabela IV.4 – Modelo exponencial da carga reativa (Barra 2 – 13:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Reativa	
1º Patamar	2º Patamar	$\alpha_Q$	$Q_0$ (MVar)
1	2	14,07	1,07
3	4	12,96	1,07
4	5	11,62	1,14
Média		12,88	1,09

No caso do modelo ZIP obteve-se um modelo de carga 100% impedância constante (proporcional a  $V^2$ ), bem diferente do modelo exponencial onde a carga reativa é proporcional a  $V^{12,88}$ . Para comparar estes dois modelos entre si e também com a curva real da carga reativa, foram plotadas as curvas da Figura IV.6, mostrada a seguir.

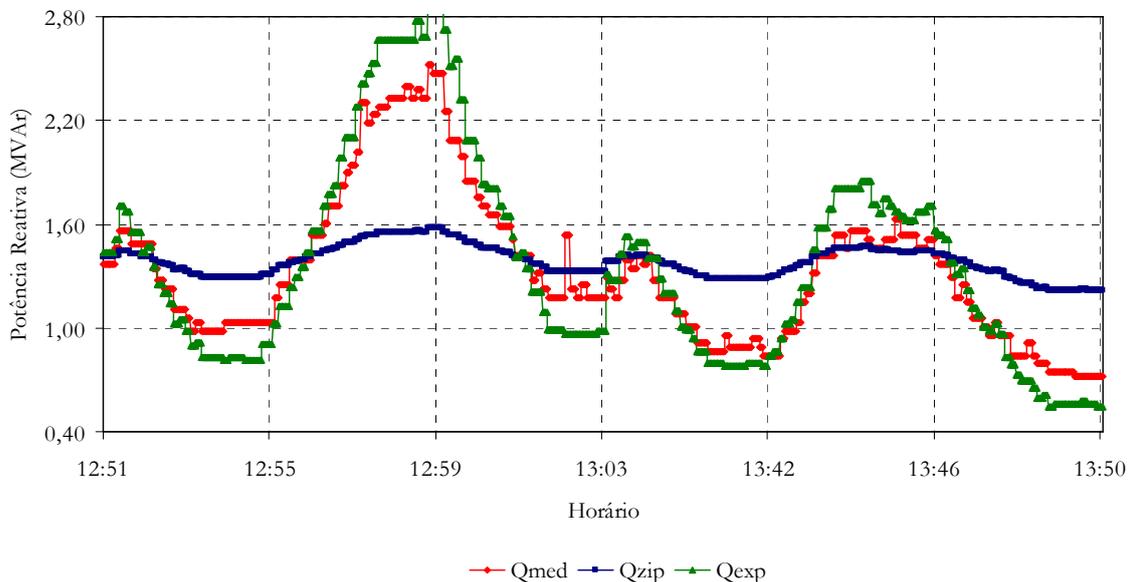


Figura IV.6 – Comparação da curva real de potência reativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 13:00h).

Pelas curvas da Figura IV.6 pode-se observar que o modelo ZIP não é capaz de representar satisfatoriamente a carga reativa desta barra, ao contrário do modelo exponencial que segue relativamente bem a curva real da carga reativa. Isto não implica que o modelo ZIP nunca possa ser utilizado para representar a carga reativa de um sistema, mas em certos casos onde existam

grandes variações de potência reativa (como é o caso deste sistema) o modelo exponencial é mais adequado para a representação da mesma. Estes resultados mostram que os estudos de fluxo de potência onde é utilizado o modelo ZIP ou o modelo de potência constante (“pior caso”) levarão a análises incorretas podendo acarretar em aumento de custos de investimentos e/ou despesas com o sistema.

A Figura IV.7 mostra o gráfico de dispersão da potência reativa medida (curva vermelha) e dos modelos ZIP (curva azul) e exponencial (curva verde). Este gráfico mostra que o modelo ZIP só é capaz de representar a carga reativa para pequenas variações de tensão. Já o modelo exponencial consegue representar a carga, de forma satisfatória, para todo o intervalo de tensão dos ensaios.

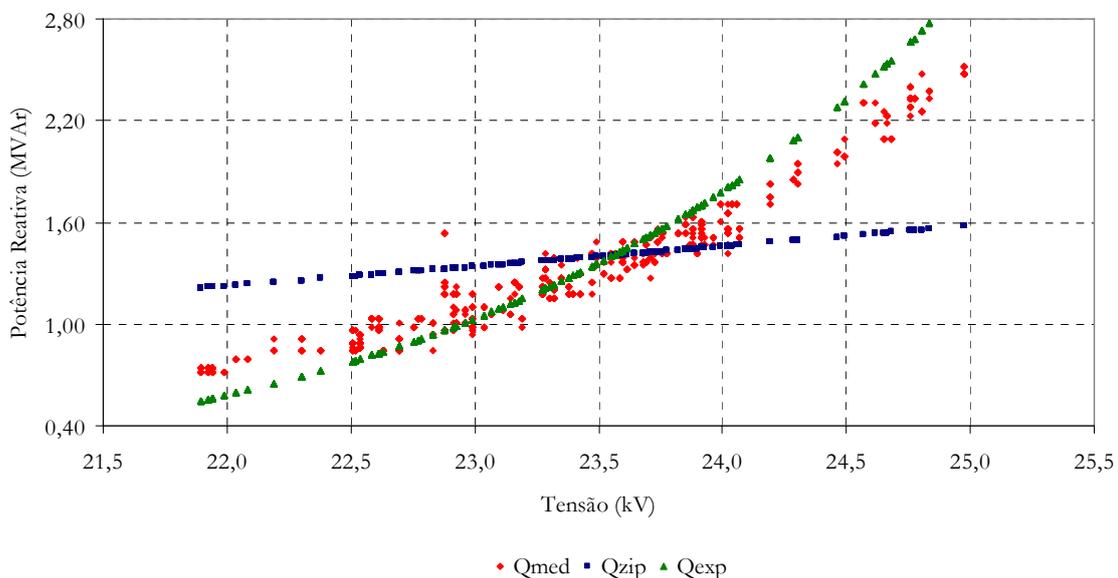


Figura IV.7 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência reativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 13:00h).

Para esta mesma barra foram realizados ensaios para aquisição de dados (tensão e potências ativa e reativa) e modelagem da carga no mesmo dia e por volta das 17:00h. Como os dois horários dos ensaios (13:00h e 17:00h) são horários de carga média espera-se que os modelos de carga sejam semelhantes. A Figura IV.8 mostra as curvas de tensão e potência ativa na barra 2 para o horário das 17:00h. Neste caso não há descontinuidade nas curvas de carga.

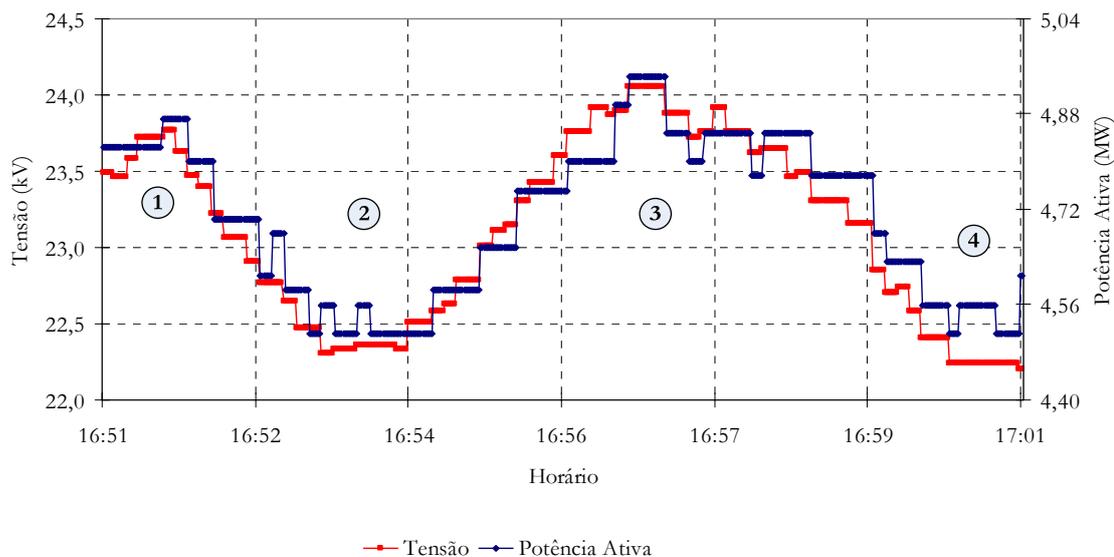


Figura IV.8 – Variações impostas de tensão e potência ativa (Barra 2 – 17:00h).

A Tabela IV.5 mostra os parâmetros de três modelos ZIP para a carga ativa da barra 2 (horário das 17:00h) estimados a partir das curvas da Figura IV.8.

Tabela IV.5 – Modelo ZIP da carga ativa (Barra 2 – 17:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Ativa			
1º Patamar	2º Patamar	$a_p$ (%)	$b_p$ (%)	$c_p$ (%)	$P_0$ (MW)
1	2	31	19	50	4,70
2	3	30	20	50	4,71
3	4	38	21	41	4,74
Média		33	20	47	4,72

Do mesmo modo, a Tabela IV.6 mostra os parâmetros de três modelos exponenciais para a carga ativa da barra 2 (horário das 17:00h) estimados a partir das curvas da Figura IV.8.

Tabela IV.6 – Modelo exponencial da carga ativa (Barra 2 – 17:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Ativa	
1º Patamar	2º Patamar	$\alpha_p$	$P_0$ (MW)
1	2	1,29	4,68
2	3	1,33	4,72
3	4	1,46	4,75
Média		1,36	4,72

Para comparar os modelos obtidos (ZIP e exponencial) entre si e também com a curva real da carga ativa, foram traçadas as curvas da Figura IV.9 e o gráfico de dispersão da Figura IV.10, mostrados a seguir.

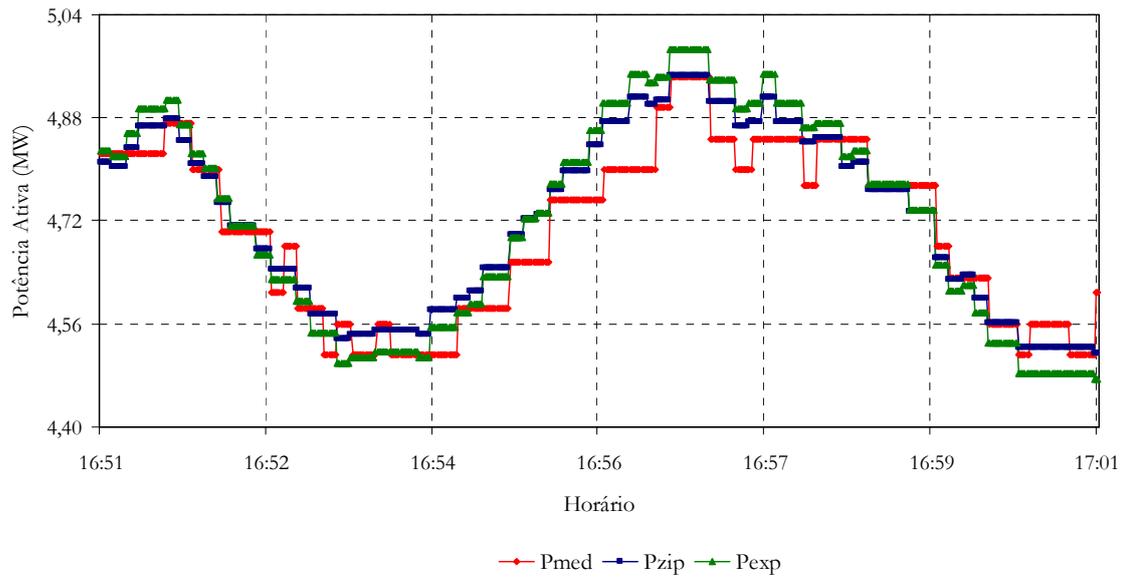


Figura IV.9 – Comparação da curva real de potência ativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 17:00h).

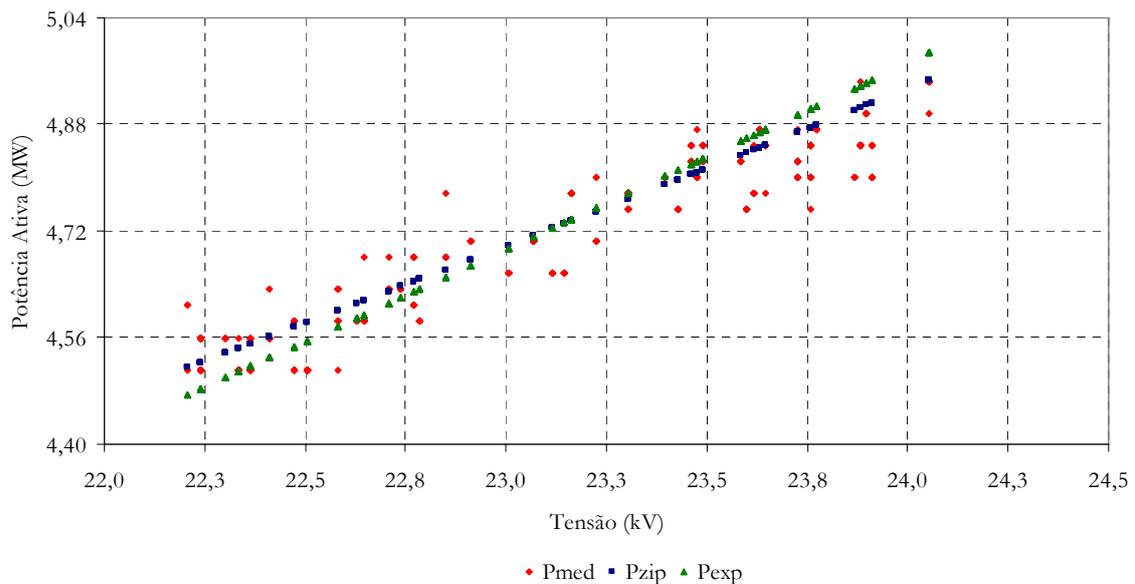


Figura IV.10 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência ativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 17:00h).

A seguir são apresentadas as curvas de tensão e potência reativa (Figura IV.11) na barra 2 para o horário das 17:00h.

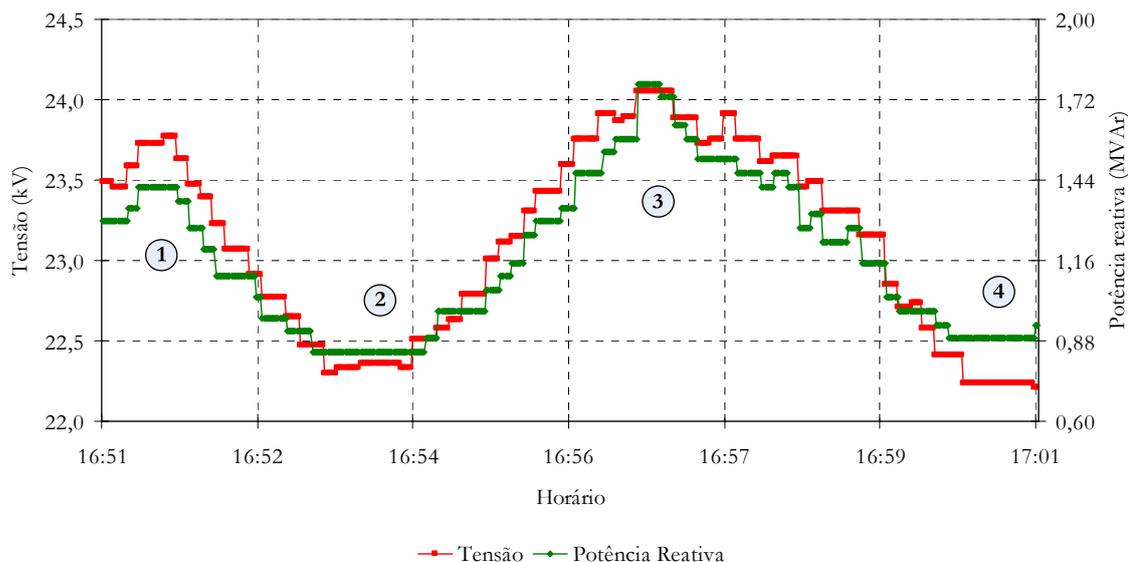


Figura IV.11 – Variações impostas de tensão e potência reativa (Barra 2 – 17:00h).

A Tabela IV.7 mostra os parâmetros de três modelos ZIP para a carga reativa da barra 2 (horário das 17:00h) estimados a partir das curvas da Figura IV.11.

Tabela IV.7 – Modelo ZIP da carga reativa (Barra 2 – 17:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Reativa			
1º Patamar	2º Patamar	$a_Q$ (%)	$b_Q$ (%)	$c_Q$ (%)	$Q_0$ (MVar)
1	2	0	0	100	1,15
2	3	0	0	100	1,32
3	4	0	0	100	1,35
Média		0	0	100	1,27

Do mesmo modo, a Tabela IV.8 mostra os parâmetros de três modelos exponenciais para a carga reativa da barra 2 (horário das 17:00h) estimados a partir das curvas da Figura IV.11.

Tabela IV.8 – Modelo exponencial da carga reativa (Barra 2 – 17:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Reativa	
1º Patamar	2º Patamar	$\alpha_Q$	$Q_0$ (MVar)
1	2	12,64	1,12
2	3	15,20	1,15
3	4	13,18	1,22
Média		13,67	1,16

Para comparar os modelos obtidos entre si e também com a curva real da carga reativa, foram traçadas as curvas da Figura IV.12 e o gráfico de dispersão da Figura IV.13, mostrados a seguir.

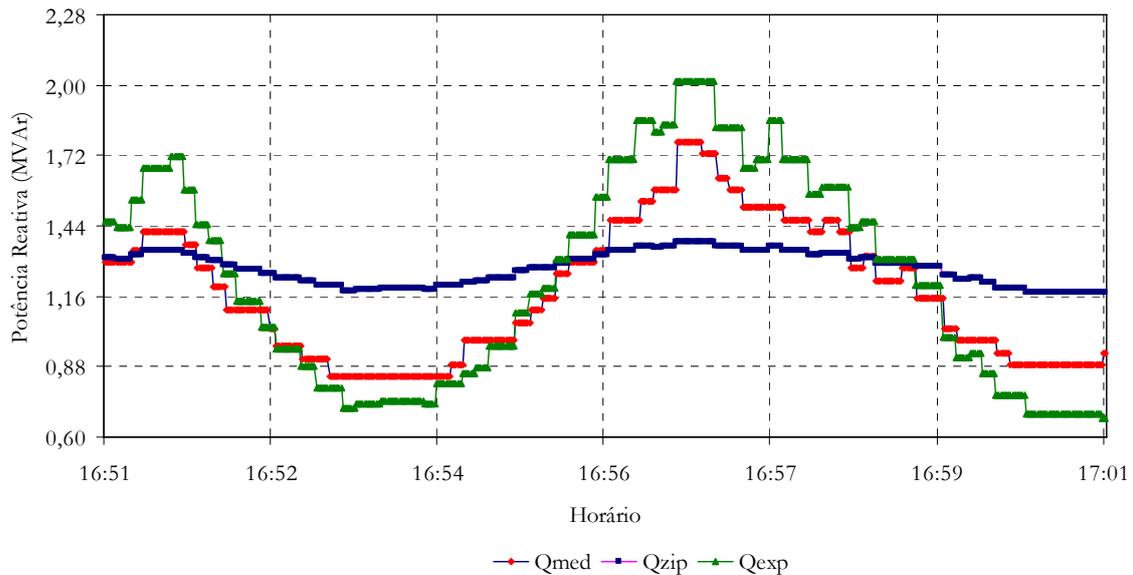


Figura IV.12 – Comparação da curva real de potência reativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 17:00h).

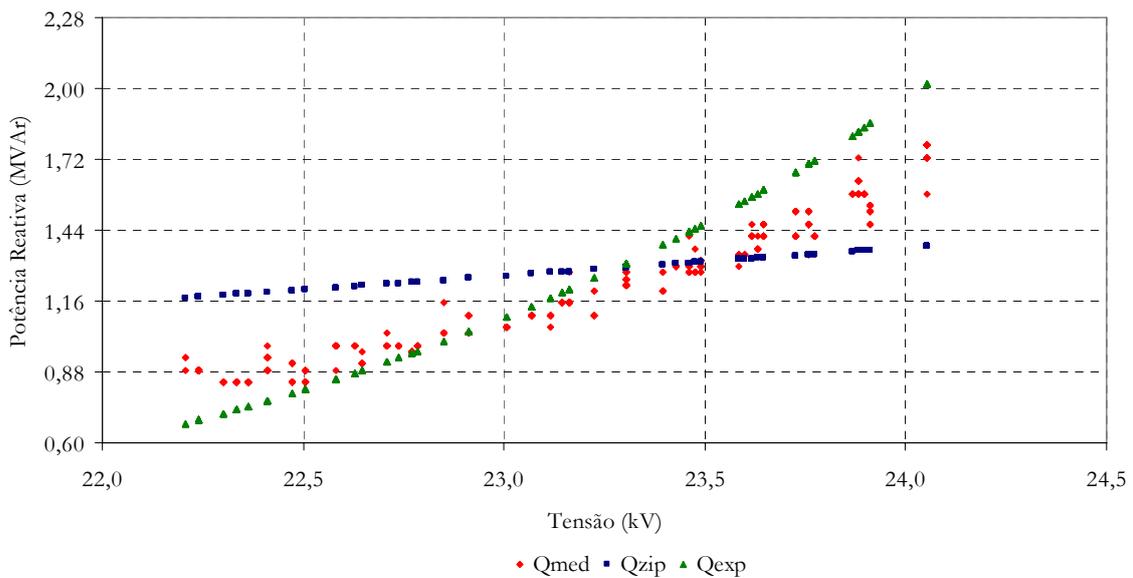


Figura IV.13 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência reativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 2 – 17:00h).

Neste caso o modelo ZIP não foi capaz de representar bem a carga reativa, ficando a mesma mais bem representada pelo modelo exponencial. Já a potência ativa foi bem representada por ambos os modelos. Como era esperado, tanto para a carga ativa como para a carga reativa, foram obtidos modelos bastante semelhantes em ambos os horários dos ensaios (13:00h e 17:00h – horários de carga média), como pode ser observado nas tabelas e nos gráficos de dispersão, demonstrando a consistência do método proposto.

### IV.3 Modelos de Carga da Barra 3

Outra forma de analisar a validade dos resultados obtidos foi feita com a modelagem da carga da barra 3, também por volta dos horários de 13:00h e 17:00h. Como as barras 2 e 3 possuem as mesmas características de carga mista com predominância de classe residencial e os horários de realização dos ensaios são horários de carga média, espera-se que os modelos obtidos para ambas as barras e horários sejam semelhantes.

A Figura IV.14 mostra as curvas de tensão e potência ativa na barra 3 (horário das 13:00h), sendo que as medições foram registradas a cada um segundo. Neste caso também há uma pequena descontinuidade nas curvas de carga. Esta descontinuidade deve-se à falta de medições no intervalo que vai das 13:39h às 13:51h. Tal descontinuidade ocorre nas próximas curvas mostradas neste capítulo, mas não afetam de forma alguma a modelagem das cargas.

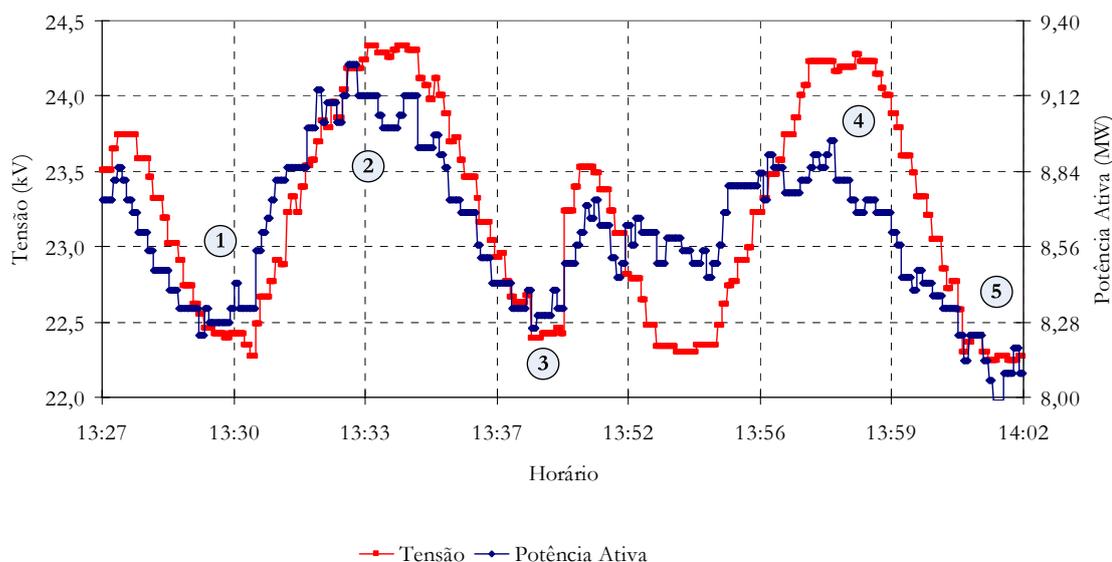


Figura IV.14 – Variações impostas de tensão e potência ativa (Barra 3 – 13:00h).

A Tabela IV.9 mostra os parâmetros de três modelos ZIP para a carga ativa da barra 3 estimados a partir das curvas da Figura IV.14. Os procedimentos utilizados para a modelagem da carga da barra 3 são exatamente os mesmos utilizados para modelar a carga da barra 2.

Tabela IV.9 – Modelo ZIP da carga ativa (Barra 3 – 13:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Ativa			
1º Patamar	2º Patamar	$a_p$ (%)	$b_p$ (%)	$c_p$ (%)	$P_0$ (MW)
1	2	33	19	48	8,58
2	3	34	20	46	8,59
4	5	31	19	50	8,40
Média		33	19	48	8,52

Os parâmetros do modelo exponencial são apresentados na Tabela IV.10, mostrada a seguir.

Tabela IV.10 – Modelo exponencial da carga ativa (Barra 3 – 13:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Ativa	
1º Patamar	2º Patamar	$\alpha_p$	$P_0$ (MW)
1	2	1,40	8,65
2	3	1,42	8,66
4	5	1,41	8,46
Média		1,41	8,59

A seguir são apresentadas as curvas dos modelos ZIP e exponencial e a curva real da carga ativa, plotadas em um mesmo gráfico (Figura IV.15).

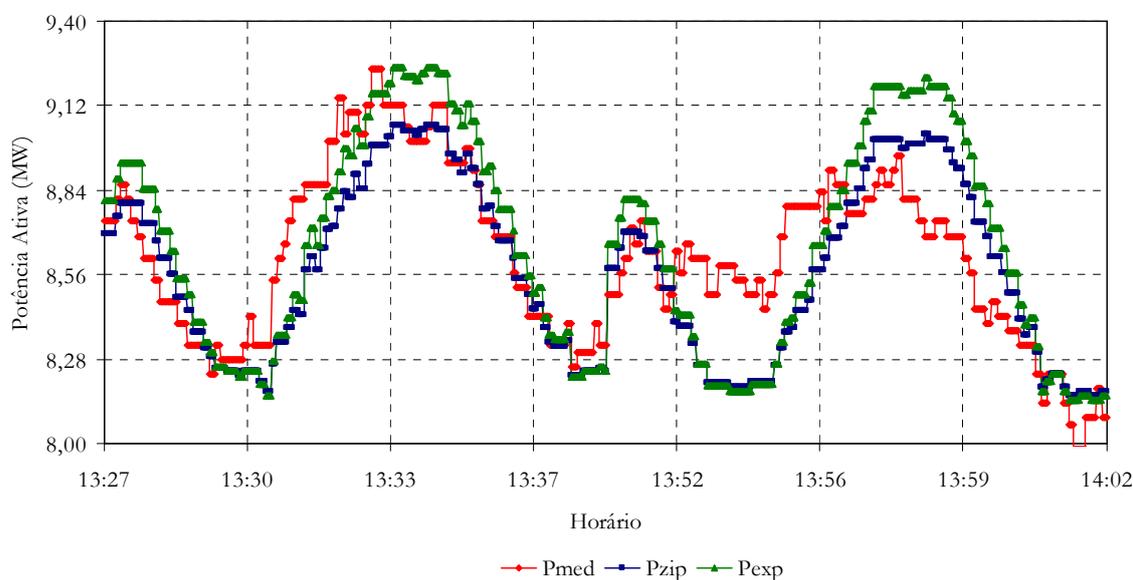


Figura IV.15 – Comparação da curva real de potência ativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 13:00h).

O gráfico de dispersão é mostrado na Figura IV.16.

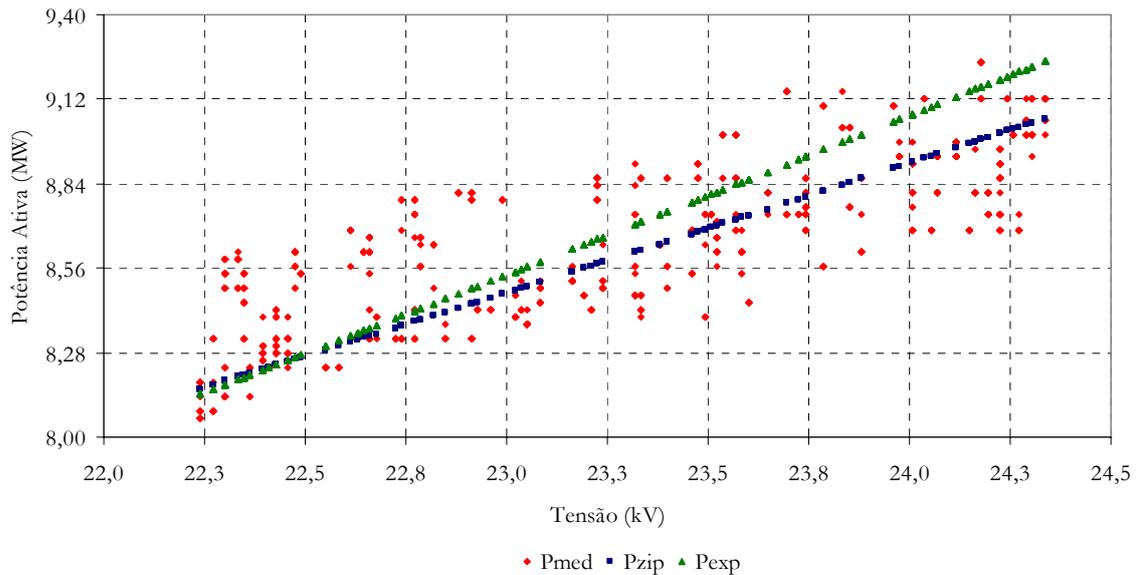


Figura IV.16 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência ativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 13:00h).

A Figura IV.17 mostra as curvas de tensão e de potência reativa na barra 3 (horário das 13:00h).

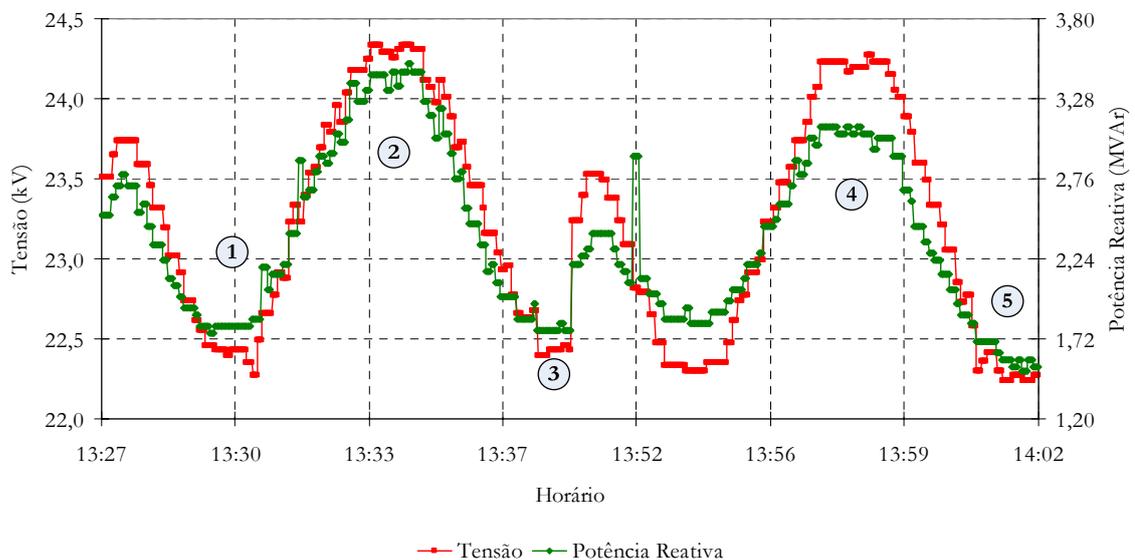


Figura IV.17 – Variações impostas de tensão e potência reativa (Barra 3 – 13:00h).

A Tabela IV.11 mostra os parâmetros de três modelos ZIP para a carga reativa na barra 3 estimados a partir das curvas da Figura IV.17.

Tabela IV.11 – Modelo ZIP da carga reativa (Barra 3 – 13:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Reativa			
1º Patamar	2º Patamar	$a_Q$ (%)	$b_Q$ (%)	$c_Q$ (%)	$Q_0$ (MVar)
1	2	0	0	100	2,60
2	3	0	0	100	2,59
4	5	0	0	100	2,36
Média		0	0	100	2,52

Do mesmo modo, a Tabela IV.12 mostra os parâmetros de três modelos exponenciais para a carga reativa da barra 3.

Tabela IV.12 – Modelo exponencial da carga reativa (Barra 3 – 13:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Reativa	
1º Patamar	2º Patamar	$\alpha_Q$	$Q_0$ (MVar)
1	2	11,71	2,15
2	3	11,84	2,14
4	5	11,58	2,05
Média		11,71	2,11

A Figura IV.18, a seguir, mostra uma comparação entre a curva real de carga reativa e as curvas dos modelos ZIP e exponencial e a Figura IV.19 apresenta o gráfico de dispersão destas curvas.

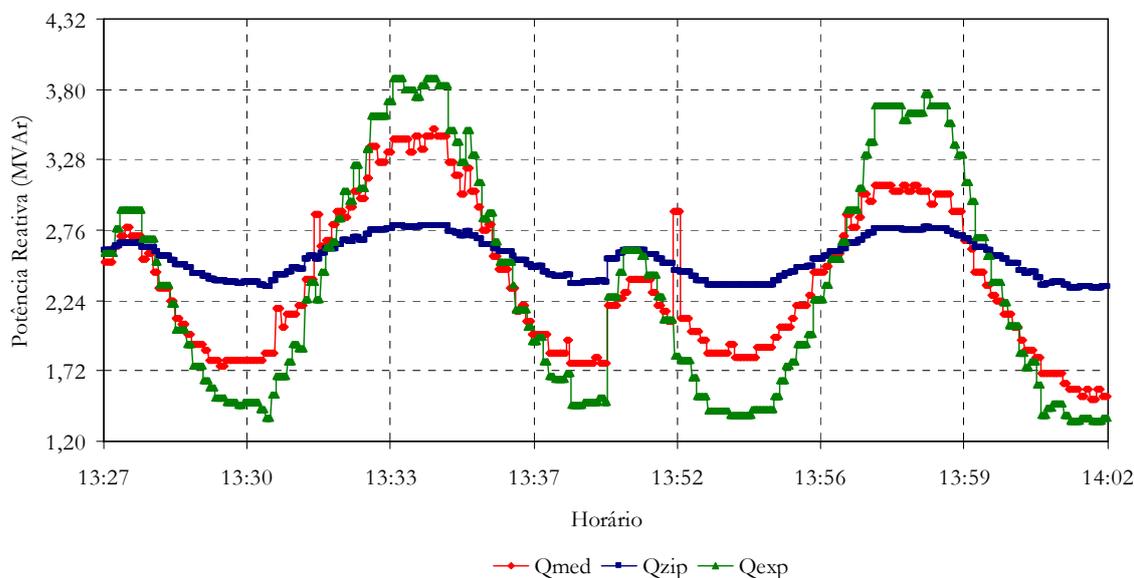


Figura IV.18 – Comparação da curva real de potência reativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 13:00h).

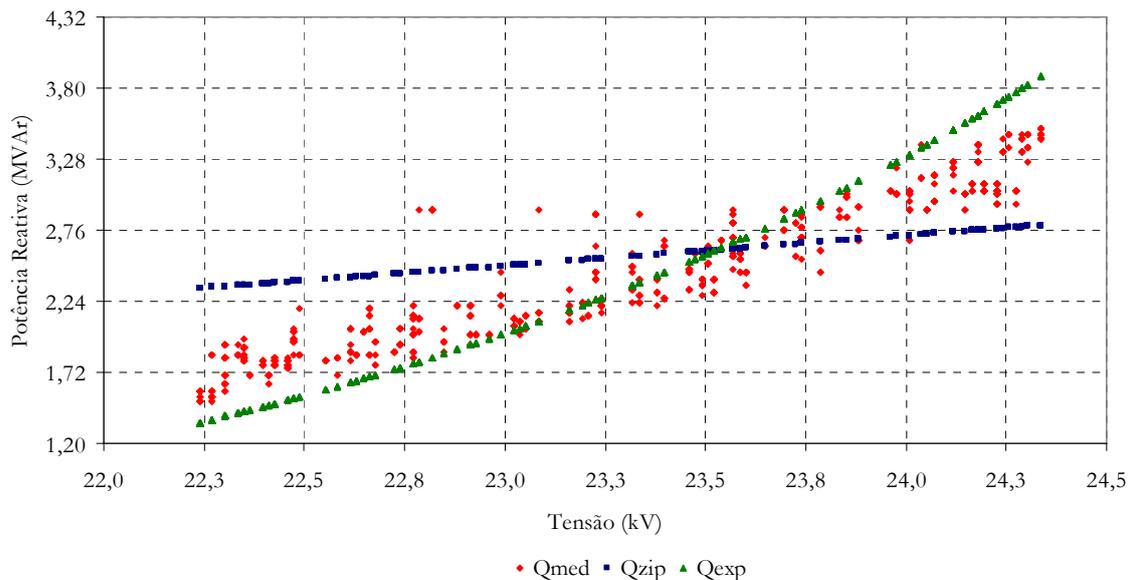


Figura IV.19 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência reativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 13:00h).

As curvas de tensão e potência ativa na barra 3 (horário das 17:00h) são mostradas na Figura IV.20, a seguir:

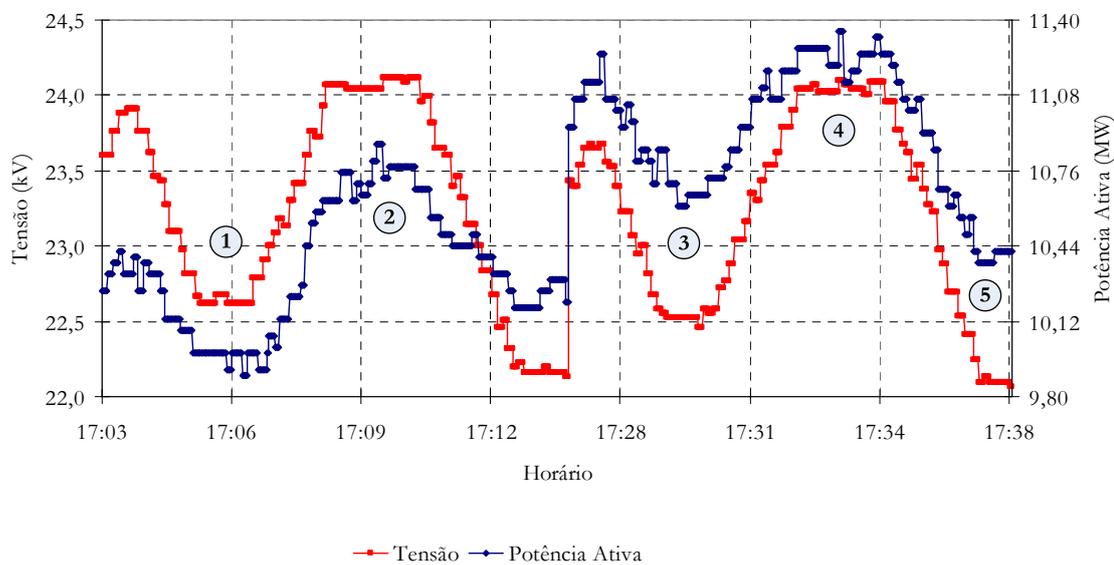


Figura IV.20 – Variações impostas de tensão e potência ativa (Barra 3 – 17:00h).

A Tabela IV.13 apresenta os parâmetros de três modelos ZIP, estimados a partir das curvas da Figura IV.20, assim como a média destes parâmetros.

Tabela IV.13 – Modelo ZIP da carga ativa (Barra 3 – 17:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Ativa			
1º Patamar	2º Patamar	$a_p$ (%)	$b_p$ (%)	$c_p$ (%)	$P_0$ (MW)
1	2	30	17	53	10,22
3	4	45	24	31	10,89
4	5	39	21	40	10,83
Média		38	21	41	10,65

Para o modelo exponencial são apresentados os parâmetros do mesmo na Tabela IV.14, a seguir.

Tabela IV.14 – Modelo exponencial da carga ativa (Barra 3 – 17:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Ativa	
1º Patamar	2º Patamar	$\alpha_p$	$P_0$ (MW)
1	2	1,29	10,32
3	4	1,40	10,94
4	5	1,50	10,84
Média		1,40	10,70

A Figura IV.21, a seguir, mostra uma comparação entre a curva real da carga ativa e as curvas dos modelos ZIP e exponencial e a Figura IV.22 apresenta o gráfico de dispersão destas curvas.

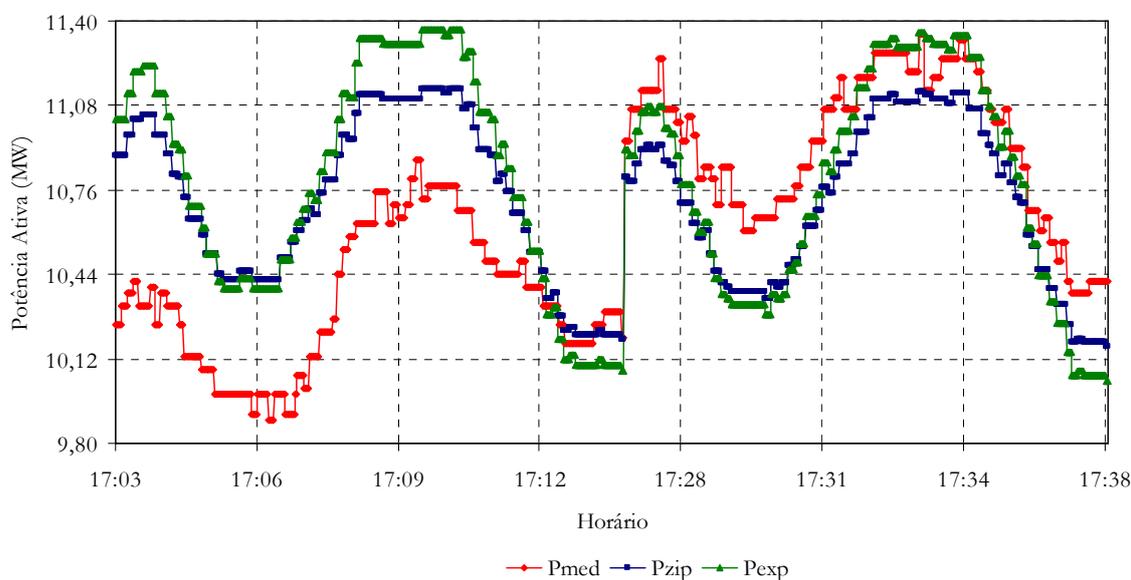


Figura IV.21 – Comparação da curva real de potência ativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 17:00h).

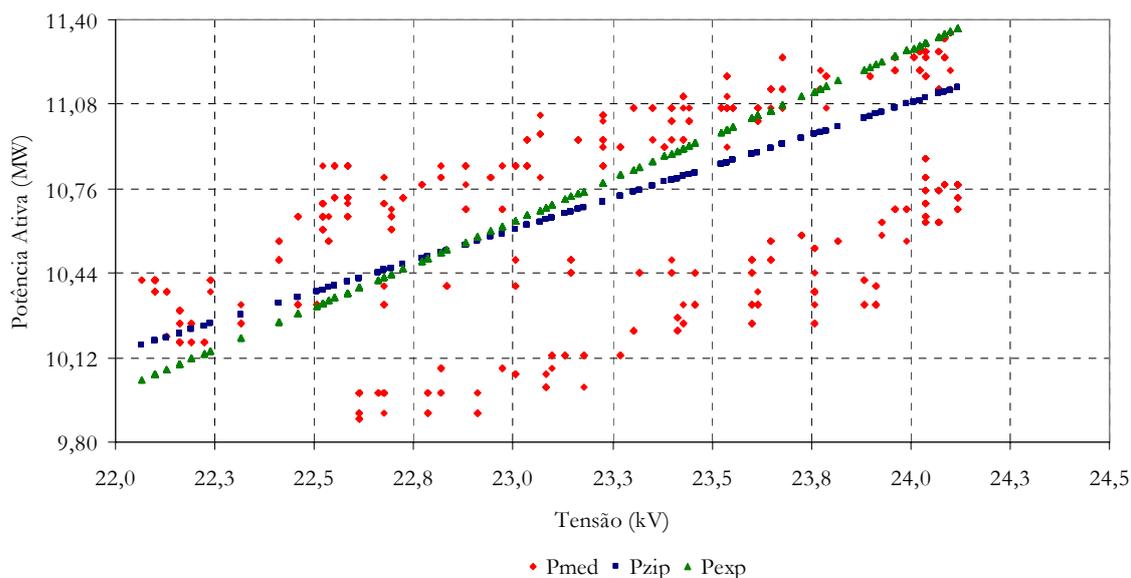


Figura IV.22 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência ativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 17:00h).

Como pode ser observado no gráfico de dispersão da Figura IV.22, há uma flutuação de carga ativa. Para os mesmos valores de tensão existem valores muito distintos de potência ativa (existem duas tendências para a curva de potência ativa), o que leva a modelos um pouco diferentes, como pode ser observado na Tabela IV.13 e na Tabela IV.14. Apesar disso, a média dos parâmetros destes modelos encontra-se bem próxima dos modelos da barra 2 e dos modelos da barra 3 às 13:00h, como era esperado.

A Figura IV.23 mostra as curvas de tensão e potência reativa na barra 3 às 17:00h.

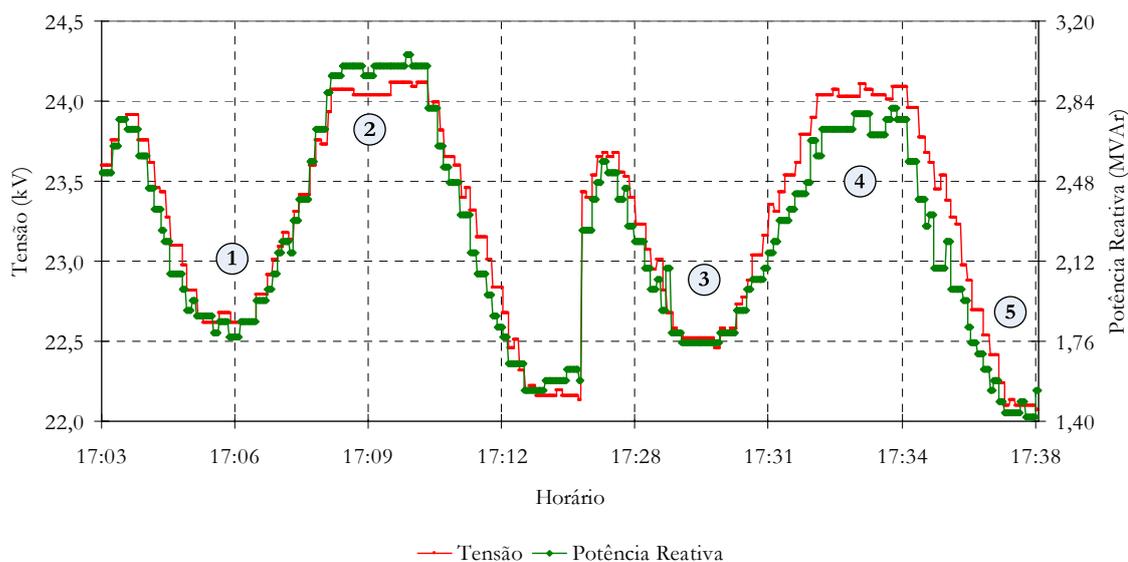


Figura IV.23 – Variações impostas de tensão e potência reativa (Barra 3 – 17:00h).

A Tabela IV.15 apresenta os parâmetros dos três modelos ZIP para a carga reativa da barra 3 estimados a partir da Figura IV.23.

Tabela IV.15 – Modelo ZIP da carga reativa (Barra 3 – 17:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Reativa			
1º Patamar	2º Patamar	$a_Q$ (%)	$b_Q$ (%)	$c_Q$ (%)	$Q_0$ (MVar)
1	2	0	0	100	2,39
3	4	0	0	100	2,22
4	5	0	0	100	2,12
Média		0	0	100	2,24

Da mesma forma, a Tabela IV.16 mostra os parâmetros do modelo exponencial.

Tabela IV.16 – Modelo exponencial da carga reativa (Barra 3 – 17:00h).

Patamares Utilizados		Parâmetros da Carga Reativa	
1º Patamar	2º Patamar	$\alpha_Q$	$Q_0$ (MVar)
1	2	11,99	2,05
3	4	9,67	2,02
4	5	11,01	1,98
Média		10,89	2,02

A seguir é apresentada uma comparação entre a curva real da carga reativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Figura IV.24) e o gráfico de dispersão destas curvas (Figura IV.25).

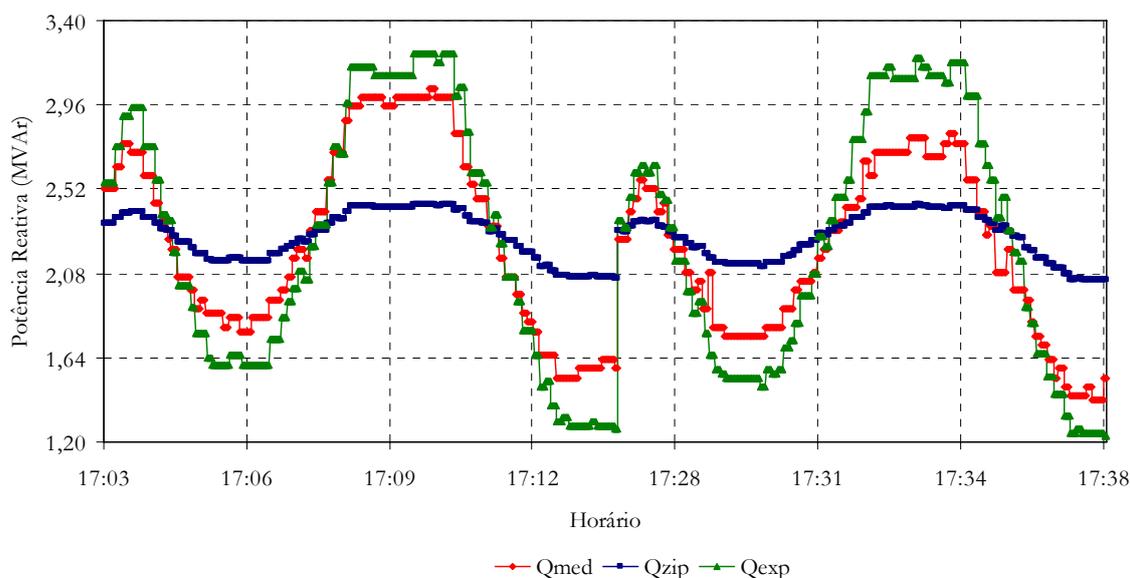


Figura IV.24 – Comparação da curva real de potência reativa com as curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 17:00h).

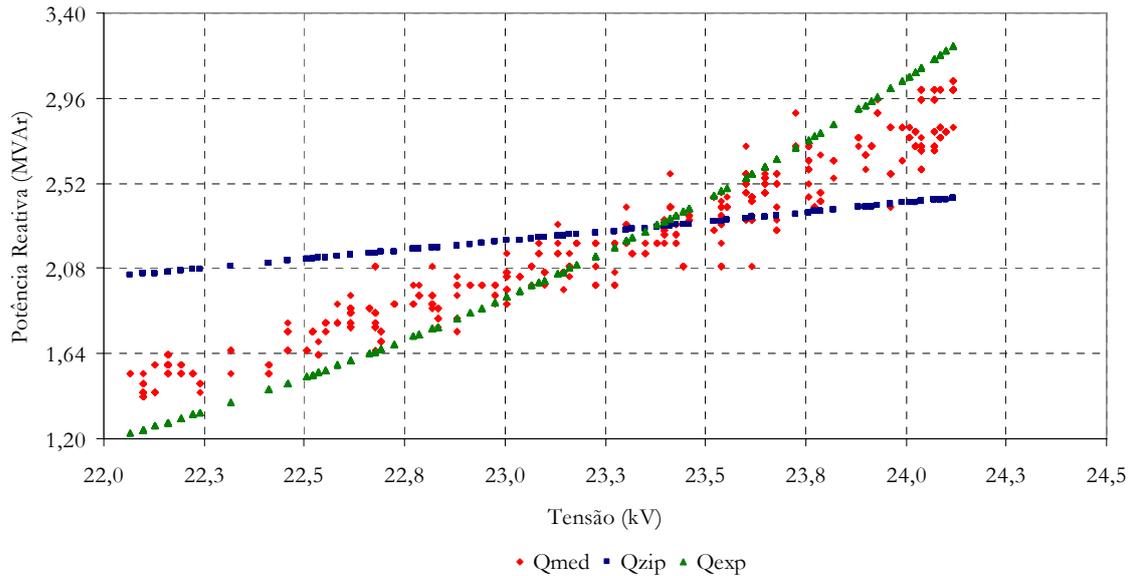


Figura IV.25 – Gráfico de dispersão. Curva real de potência reativa e curvas dos modelos ZIP e exponencial (Barra 3 – 17:00h).

## IV.4 Considerações Finais

Para a validação da metodologia proposta, foram realizados três testes:

- Estimação de três modelos ZIP e três modelos exponenciais para a mesma carga dentro de um intervalo de no máximo uma hora. Como a variação da carga é pequena durante este intervalo, os modelos devem ser semelhantes;
- Determinação dos modelos de carga, para a mesma barra, em dois horários de carga média. Sendo a aquisição de dados feita em horários de carga média, esperam-se modelos de carga parecidos;
- Modelagem da carga de duas barras com as mesmas características de carga e em mesmo dia e horário. Neste caso os modelos também devem ser semelhantes.

Como pôde ser observado durante a apresentação dos resultados, em cada intervalo de medição foram estimados três modelos ZIP semelhantes e três modelos exponenciais também semelhantes, com exceção da carga ativa da barra 3 – 17:00h. Este último caso se deve às grandes flutuações de potência ativa durante o período de realização dos ensaios. Para os mesmos valores de tensão existem valores muito distintos de potência ativa, o que leva a modelos diferentes.

A Tabela IV.17 e a Tabela IV.18 mostram, respectivamente, os parâmetros dos modelos ZIP e exponencial para as diferentes barras e horários.

Tabela IV.17 – Parâmetros do modelo ZIP para as diferentes barras e horários.

Barra	Horário	$a_p$ (%)	$b_p$ (%)	$c_p$ (%)	$a_Q$ (%)	$b_Q$ (%)	$c_Q$ (%)
2	13:00h	33	20	47	0	0	100
	17:00h	33	20	47	0	0	100
3	13:00h	33	19	48	0	0	100
	17:00h	38	21	41	0	0	100

Tabela IV.18 – Parâmetros do modelo exponencial para as diferentes barras e horários.

Barra	Horário	$\alpha_p$	$\alpha_Q$
2	13:00h	1,40	12,88
	17:00h	1,36	13,67
3	13:00h	1,41	11,71
	17:00h	1,40	10,89

Como mostram as tabelas acima, tanto para o modelo ZIP como para o modelo exponencial, foram obtidos modelos de carga muito semelhantes para os dois horários de carga média onde foram realizados os ensaios, assim como para ambas as barras que possuem as mesmas características de carga, evidenciando a validade da metodologia proposta. Além disso, as curvas dos modelos ZIP e exponencial encontram-se bem próximas às curvas reais de carga. Vale ressaltar que no caso da carga reativa o modelo ZIP não foi capaz de representá-la satisfatoriamente, no entanto esta carga foi bem representada pelo modelo exponencial, sendo que a curva deste modelo encontra-se muito próxima da curva real de carga reativa para todos os casos estudados.

# Capítulo V

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### V.1 Conclusões

Esta dissertação apresentou uma nova proposta para o tratamento dos dados de medições realizadas em pontos de interesse da rede elétrica visando uma modelagem estática das cargas do sistema. Para a representação das cargas foram escolhidos dois modelos amplamente utilizados em programas de fluxo de potência, o modelo polinomial (ZIP) e o modelo exponencial.

Apesar da carga variar ao longo do dia, entre os períodos de carga leve, carga média e carga pesada, em determinados intervalos de tempo esta variação não é tão expressiva. Deste modo, foram estimados três modelos ZIP e três modelos exponenciais para a carga do sistema em um intervalo de tempo onde não há grande variação da carga. Como a carga não varia muito durante o período de realização das medições, esperava-se que os três modelos ZIP fossem semelhantes, assim como os três modelos exponenciais. Tal fato foi confirmado em todos os casos estudados, com exceção de um dos casos onde ocorrem fortes flutuações da carga, como pode ser confirmado no gráfico de dispersão. Para os mesmos valores de tensão foram registrados valores muito distintos de potência ativa medida, indicando que houve uma entrada/saída de carga durante o período de testes. Em casos como este, aconselha-se a repetição dos ensaios para aquisição de um novo conjunto de dados. Como foram estimados três modelos ZIP para cada carga e como não há grandes variações entre os parâmetros destes modelos, decidiu-se representar a carga por um único modelo ZIP, sendo seus parâmetros iguais às médias dos parâmetros dos três modelos ZIP estimados. O mesmo foi feito para o modelo exponencial.

Outros dois métodos utilizados para validar os resultados obtidos foram a modelagem de carga de uma mesma barra em dois horários de carga média e a modelagem de carga de duas barras de características semelhantes, em um mesmo dia e horário. Também nestes casos foram obtidos modelos semelhantes, como era esperado, demonstrando a eficácia da metodologia proposta.

No caso da potência reativa foi verificada uma grande diferença entre a curva do modelo ZIP e a curva real de carga. Contudo, isto se deve ao fato da carga reativa deste sistema sofrer variações muito grandes quando são impostas as variações de tensão e o modelo ZIP ser capaz de representar cargas com variações máximas proporcionais ao quadrado da tensão (modelo impedância constante). No entanto, a carga reativa deste sistema ficou bem representada pelo modelo exponencial, para o qual foram encontradas curvas muito próximas das curvas reais de carga reativa.

Para uma boa modelagem de carga é necessário escolher adequadamente um conjunto de horários representativos da carga, nos quais serão realizados os ensaios para aquisição de medidas. Durante cada intervalo de medição não devem ocorrer grandes entradas/saídas de carga, o que pode ser bem visualizado em um gráfico de dispersão. Para os mesmos valores de tensão não deve haver valores muito distintos de potência. Caso sejam verificadas variações muito grandes de carga, deve-se retomar o processo de aquisição de dados ou reavaliar o período de representação da carga. As interferências negativas das flutuações naturais de carga (pequenas entradas/saídas de carga) podem ser mitigadas através da criação dos patamares impondo variações sustentadas de tensão. Quanto maior a diferença de tensão entre os patamares, menor será a interferência das flutuações da carga.

## V.2 Trabalhos Futuros

Seguindo a linha de pesquisa desenvolvida nesta dissertação e tendo em vista os resultados obtidos, ficam algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudos de casos em mais classes de consumidores como, por exemplo, as classes industrial e comercial, não abordadas neste trabalho;
- Determinação dos modelos estáticos e dinâmicos de carga com a agregação dos modelos de motores de indução;
- Determinação de modelos polinomiais de ordem superior ao modelo ZIP;

- Realização de medições com maiores variações de tensão, dentro dos limites permitidos pela ANEEL.

# Apêndice A

## Estimação de Estados

### A.1 Introdução

O processo de estimação de estados é atualmente considerado como um elemento fundamental dos modernos centros de controle dos sistemas de energia elétrica. Pode-se definir o Estimador de Estados como um programa de cálculo, executado em tempo real, cujo objetivo é fornecer uma base de dados completa, coerente e confiável, que descreva o estado elétrico do sistema naquele momento e compense uma possível presença de erros grosseiros nos dados (valores de medições e status da rede) ou mesmo a ausência de dados. Para satisfazer este objetivo, o estimador processa um conjunto redundante de medidas obtidas por aparelhos de medição e outras informações recolhidas da rede num dado instante, como topologia da rede e estados de chaves e disjuntores, aplicando um modelo matemático de cálculo para a obtenção da estimativa do respectivo vetor de estados do sistema (vetor dos ângulos de fase e módulos das tensões nos diferentes barramentos do sistema) [1].

As informações repassadas ao estimador de estados podem ser caracterizadas pela configuração vigente da rede, medidas de fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão/distribuição, injeções de potência ativa e reativa nas barras, módulo das tensões nas barras, magnitudes de correntes em linhas, dentre outras. Medições simultâneas em diferentes partes do sistema são praticamente impossíveis, conseqüentemente, certo intervalo de tempo entre medições é comumente tolerado. Esta tolerância é justificada pela variação lenta das condições operacionais dos sistemas de potência em condições normais.

O processo de estimação de estados revela-se complexo, uma vez que muitas fontes de erros ou imprecisões podem estar presentes nas informações repassadas ao estimador de estados, tais como erros inerentes ao processo de medição, erros na configuração da rede, medições realizadas durante fenômenos transitórios, etc. O estimador de estados atua como um filtro para suavizar erros estatisticamente pequenos, inerentes à medição, bem como, suprir erros grosseiros eventuais, causados por funcionamento inadequado do sistema de aquisição de dados.

Atualmente, a estimação de estados pode ser dividida em duas metodologias. A estimação de estados estática constitui a metodologia mais amplamente estudada, considerando o vetor de estados invariante no tempo, desprezando assim a evolução temporal do estado e informações sobre o comportamento do sistema em instantes anteriores. A estimação dinâmica consiste em estabelecer um modelo dinâmico para descrever o comportamento do estado do sistema. O filtro de Kalman tem sido a técnica mais utilizada para tal finalidade. Neste apêndice será tratada apenas a estimação de estados estática.

## **A.2 Probabilidade Máxima**

O objetivo da estimação de estados é determinar o estado mais provável do sistema baseado em medições realizadas no mesmo. Isto pode ser conseguido através da estimação da probabilidade máxima, um método amplamente utilizado em estatística. Considera-se que os erros das medidas possuem uma distribuição de probabilidade conhecida com parâmetros desconhecidos. A função densidade de probabilidade conjunta de todas as medidas pode ser escrita em termos destes parâmetros desconhecidos e atingirá seu valor máximo quando os parâmetros chegarem o mais próximo possível dos valores reais [30].

Conseqüentemente, um problema de otimização pode ser utilizado para maximizar esta função de probabilidade em função dos parâmetros desconhecidos. A solução dará a estimativa da máxima probabilidade para os parâmetros de interesse. Geralmente considera-se que os erros das medidas possuem uma distribuição Gaussiana, sendo os parâmetros desta distribuição a média ( $\eta$ ) e variância ( $\sigma^2$ ).

## A.2.1 Função Densidade de Probabilidade Gaussiana (Normal)

A função densidade de probabilidade Gaussiana (Normal) para uma variável aleatória  $z$  é definida como:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left\{\frac{z-\eta}{\sigma}\right\}^2} \quad (\text{A.1})$$

onde:

- $z$             variável aleatória;
- $\eta$             média ou valor esperado de  $z$  ;
- $\sigma$           desvio padrão de  $z$  .

A forma da função  $f(z)$  dependerá dos valores da média e do desvio padrão. A Figura A.1 mostra uma função densidade de probabilidade Gaussiana padrão, a qual possui média zero e desvio padrão igual a um.

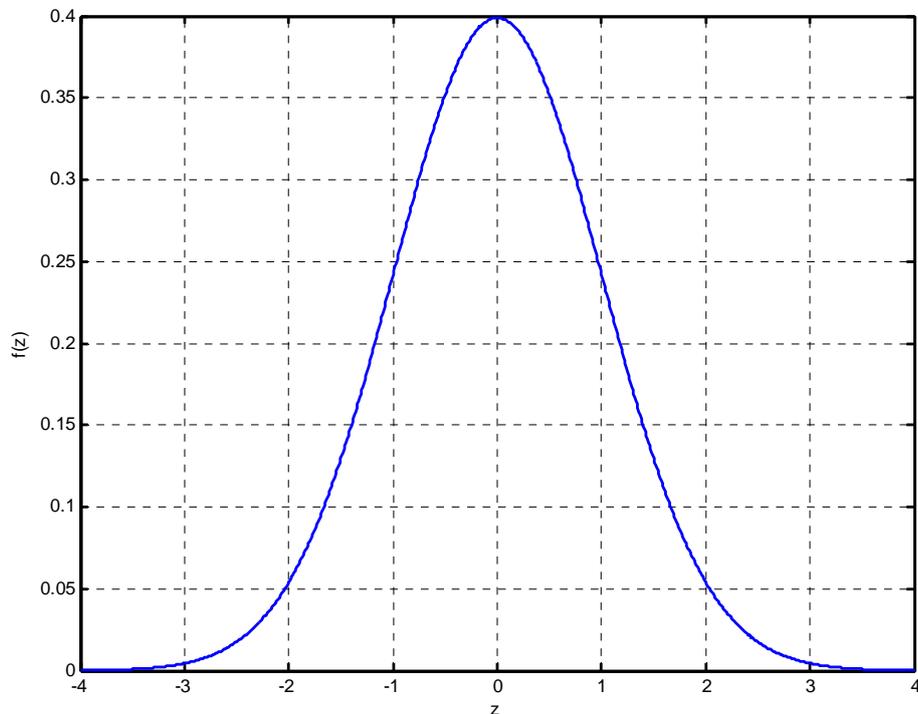


Figura A.1 – Função densidade de probabilidade Normal padrão.

## A.2.2 Função de Probabilidade

Considere a função densidade de probabilidade conjunta representada pela probabilidade de  $m$  medidas independentes, cada uma com a mesma função densidade de probabilidade (f.d.p.) Gaussiana. A f.d.p. conjunta pode ser simplesmente expressa pelo produto das f.d.p.'s de cada medida, assumindo serem as medidas independentes entre si. Assim:

$$f_m(z) = f(z_1)f(z_2)\cdots f(z_m) \quad (\text{A.2})$$

onde:

$z_i$              $i$ -ésima medida;

$z^T$              $[z_1, z_2, \dots, z_m]$ .

A função  $f_m(z)$  é chamada de função de probabilidade de  $z$ . O objetivo da estimação da probabilidade máxima é maximizar esta função de probabilidade por variação dos parâmetros da função de densidade, normalmente a média ( $\eta$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ). Para determinar os valores ótimos dos parâmetros, geralmente aplica-se o logaritmo natural à função  $f_m(z)$ , de forma a simplificar o processo. A função modificada é chamada de função de probabilidade logarítmica ( $\Gamma$ ) e é dada por:

$$\begin{aligned} \Gamma = \ln f_m(z) &= \sum_{i=1}^m \ln f(z_i) \\ &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left( \frac{z_i - \eta_i}{\sigma_i} \right)^2 - \frac{m}{2} \ln 2\pi - \sum_{i=1}^m \ln \sigma_i \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

A estimação da probabilidade irá maximizar a função acima para um conjunto de medidas  $[z_1, z_2, \dots, z_m]$ . Isto pode ser resolvido pela solução do seguinte problema:

$$\begin{aligned} \max \quad & \ln f_m(z) \\ \text{ou} \quad & \\ \min \quad & \sum_{i=1}^m \left( \frac{z_i - \eta_i}{\sigma_i} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Onde  $\eta_i$  é o valor esperado  $E(z_i)$  da medida  $z_i$  podendo ser expresso como  $h_i(x)$ , uma função não linear que relaciona o vetor de estados  $x$  à medida  $i$ .

## **A.3 Formulação do Problema de Estimação Estática de Estados**

A estimação de estados realiza duas tarefas básicas: filtragem dos ruídos de medição e avaliação da consistência dos dados adquiridos. Além das funções citadas, a estimação de estados realiza também a análise de observabilidade e a determinação da configuração da rede elétrica [31].

A Figura A.2 ilustra as etapas que envolvem o processo de estimação de estados em Sistemas Elétricos de Potência. A etapa inicial abrange a obtenção dos valores das medidas e a determinação do modelo da rede. A rede é modelada através da sua matriz de admitâncias. Um algoritmo denominado configurador de rede é responsável pela determinação da conectividade da rede a partir de informações topológicas. A seguir, realiza-se a análise de observabilidade, que determina se existem medidas suficientes em número e localização, de forma a tornar a estimação de estados possível, considerando a rede como um todo. Se o sistema for considerado observável, a estimação de estados pode prosseguir; caso contrário, pseudomedidas devem ser adicionadas ao conjunto de medidas de entrada.

A etapa seguinte é a estimação propriamente dita dos ângulos e magnitudes das tensões nas barras. A partir destas grandezas, todas as outras grandezas do sistema podem ser determinadas. Em seguida, é realizada a detecção de dados de entrada contaminados através da análise dos resíduos da estimação. Se não for detectada a presença de medidas espúrias, o processo de estimação chega ao fim; caso contrário, a próxima etapa é a identificação das medidas contaminadas, que podem ser eliminadas ou substituídas por pseudomedidas a serem utilizadas como dados de entrada no reinício do processo de estimação de estados [2].

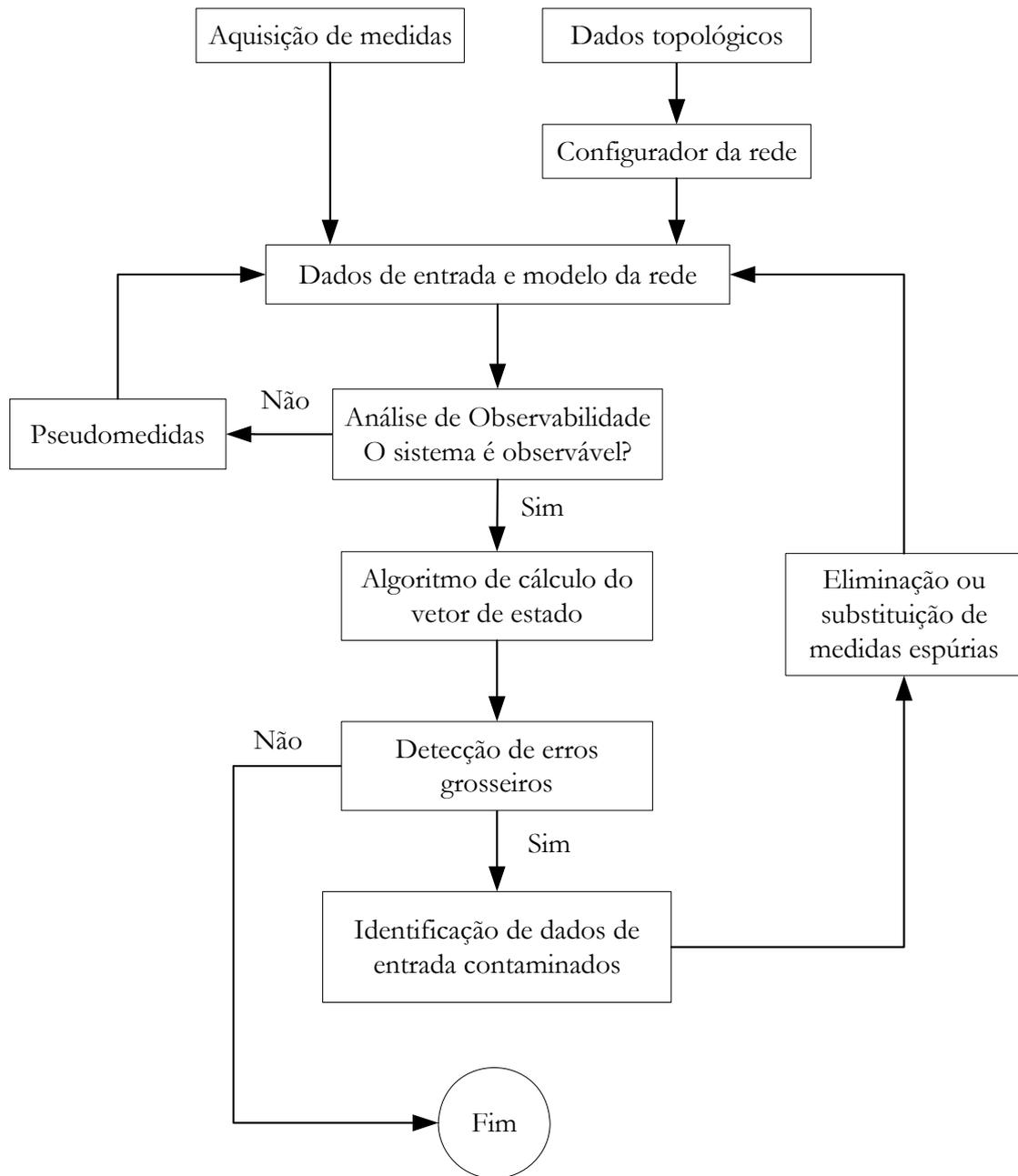


Figura A.2 – Etapas do processo de estimação de estados.

### A.3.1 Modelo das Medidas

Para a determinação do vetor de estados do sistema (ângulos de fase e módulos das tensões nas barras), o estimador de estados processa um conjunto redundante de medidas que geralmente são:

- Injeções de potência ativa e reativa em barras;
- Fluxos de potência ativa e reativa em linhas;
- Módulos das intensidades de correntes em circuitos;

- Módulos das tensões nos barramentos.

Estas medidas podem ser expressas em função das variáveis de estado do sistema em coordenadas polares ou retangulares. Usando coordenadas polares em um sistema contendo  $nb$  barras, o vetor de estados terá dimensão ( $n = 2nb - 1$ ), sendo  $nb$  módulos das tensões e  $(nb - 1)$  ângulos, já que uma das barras é usada como referência do sistema, sendo seu ângulo de fase conhecido. Considerando a barra 1 como referência, o vetor de estados  $x$  de um sistema contendo  $nb$  barras terá a seguinte forma:

$$x^T = [\theta_2 \theta_3 \cdots \theta_{nb} V_1 V_2 \cdots V_{nb}] \quad (\text{A.5})$$

Considere um sistema com  $n$  estados e  $m$  medidas. De forma geral, o conjunto de medidas deste sistema pode ser modelado como:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \cdots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \cdots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \cdots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

ou:

$$z = h(x) + e \quad (\text{A.7})$$

onde:

- $z$  vetor das medidas com dimensão ( $m \times 1$ );
- $x$  vetor de estados, com dimensão ( $n \times 1$ ), formado pelos ângulos de fase e módulos das tensões nas barras;
- $h_i(x)$  função não-linear que relaciona a medida  $i$  ao vetor de estados do sistema;
- $e$  vetor de erros das medidas com dimensão ( $m \times 1$ ). Pode ser interpretado como uma variável aleatória com distribuição normal, valor esperado zero e matriz de covariância  $R$  diagonal e dada por:  $R = E\{e e^T\}$ ;
- $R$   $R = \text{diag}(\sigma_i^2)$ , sendo  $E\{\cdot\}$  o operador valor esperado e  $\sigma^2$  a variância da  $i$ -ésima medida.

### A.3.2 Cálculo do Vetor de Estados

O Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), proposto por Schweppe em 1970, representa a formulação mais amplamente utilizada na literatura e nos programas de estimação de estados em uso prático nos sistemas elétricos. O Estimador MQP irá minimizar a seguinte função objetivo:

$$\begin{aligned} J(x) &= \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} \\ &= [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

No ponto de mínimo da função, a condição de otimalidade deverá ser satisfeita. Isto pode ser expresso em forma compacta como na equação (A.9).

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (\text{A.9})$$

onde:  $H(x) = \left[ \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right]$

Expandindo a função não-linear  $g(x)$  em série de Taylor e resolvendo por Gauss-Newton, tem-se:

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1} \cdot g(x^k) \quad (\text{A.10})$$

onde:

$k$  índice da iteração;

$x^k$  vetor de solução da iteração  $k$ ;

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot H(x^k);$$

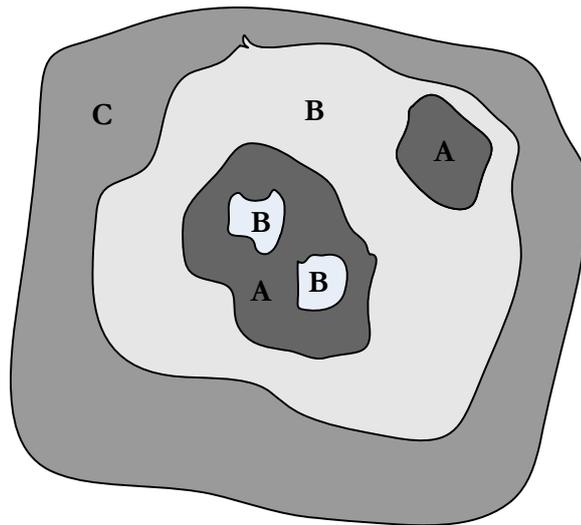
$$g(x^k) = -H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x^k)].$$

## **A.4 Análise de Observabilidade**

O estimador de estados processa um conjunto de medidas de forma a obter uma estimativa do estado do sistema. Dada a topologia da rede, um conjunto de medidas e suas respectivas distribuições geográficas, a análise de observabilidade irá determinar se tais informações são suficientes o bastante para a realização da estimação do estado do sistema. Se o conjunto de medidas é suficiente para a realização da estimação de estados, a rede é dita observável. Usualmente, um sistema é designado para ser observável para várias condições de operação, entretanto este pode-se tornar não observável devido às ocorrências de modificações não antecipadas na topologia da rede ou devido às falhas em equipamentos de medição e telecomunicação.

Se um sistema for considerado não observável como um todo, o mesmo poderá apresentar subsistemas ou ilhas observáveis, isto é, aquelas cujos estados ainda são estimados com as medidas disponíveis [32]. Neste caso, cada ilha terá sua própria referência angular independente das demais. A análise de observabilidade da rede detecta tais casos e identifica todas as ilhas observáveis existentes antes da execução do estimador de estados.

A Figura A.3 mostra uma parte de um sistema elétrico interconectado, onde são delimitadas as áreas observáveis e não observáveis do sistema. Em geral, a área de controle relativa a um determinado COS é observável para várias condições de operação, embora este não seja sempre o caso devido a ocorrências não previstas. A estimação de estados pode ser realizada nas partes não observáveis através da adição de pseudomedidas baseadas em informações qualitativas obtidas, por exemplo, em estudos de previsão de carga ou a partir do caso base. Pseudomedidas são valores definidos para certas medidas com o objetivo de tornar ou restaurar a observabilidade das partes não observáveis.



- A – Parte observável da rede de interesse;
- B – Parte não observável da rede de interesse;
- C – Resto do sistema interconectado.

Figura A.3 – Observabilidade em um sistema elétrico interconectado.

Para que o sistema seja observável é necessário que a matriz de ganho  $G$  seja não singular. Como a matriz  $R$  é não singular, isto implica que a matriz Jacobiana  $H$  deve ter posto completo, ou seja, posto igual a  $n$ . Assim, é possível estabelecer uma relação entre análise de observabilidade e a matriz Jacobiana  $H$  e chegar-se à definição de observabilidade algébrica [13]:

“Um sistema de potência é definido como algebricamente observável, com respeito a um conjunto de medidas, se a matriz  $H$  tiver posto igual a  $n$ ”.

## A.5 Detecção e Identificação de Erros Grosseiros

Uma das funções essenciais do estimador de estados é avaliar a qualidade dos resultados obtidos no processo de cálculo do vetor de estados do sistema. Para tanto, realiza-se a análise dos resíduos (diferença entre valor medido e o valor estimado) com o objetivo de detectar a presença de erros estatisticamente elevados (erros grosseiros) nas medidas e, se possível, identificar e eliminar ou substituir tais medidas espúrias.

A detecção e o tratamento de erros grosseiros dependem do método utilizado no processo de estimação de estados. No caso do estimador MQP, o método mais amplamente utilizado para validação dos resultados é o Teste do Maior Resíduo Normalizado.

O vetor de resíduos ( $r$ ) das medidas é definido como a diferença entre o valor medido e o correspondente valor estimado, dado por:

$$r = z - \hat{z} \quad (\text{A.11})$$

ou:

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (\text{A.12})$$

onde:

$\hat{z} = h(\hat{x})$  vetor das estimativas das medidas;

$\hat{x}$  estado estimado.

Assim como o vetor de incertezas ( $e$ ), o vetor de resíduos ( $r$ ) também pode ser interpretado como uma variável aleatória com distribuição normal, valor esperado zero e matriz de covariância  $\Omega$ , dada por:

$$\Omega = R - HG^{-1}H^T \quad (\text{A.13})$$

Na presença de apenas um erro grosseiro, a medida errônea é aquela que apresenta o maior resíduo normalizado [18]. Isto justifica a utilização do teste de resíduos normalizados como um método de detecção e identificação de erros grosseiros.

O resíduo normalizado ( $r_i^N$ ) para uma medida  $i$  é definido como:

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad (\text{A.14})$$

Calculado o vetor de resíduos normalizados ( $r^N$ ), o mesmo é submetido ao seguinte teste de validação:

$$|r_i^N| > \gamma \quad (\text{A.15})$$

onde  $\gamma$  é o limite de detecção de um falso alarme. Resíduos normalizados que violam o limite estabelecido indicam a presença de erros grosseiros.

Após a detecção da presença de erros grosseiros no conjunto de medidas realiza-se a identificação das medidas portadoras de erros, que em seguida podem ser eliminadas ou substituídas por pseudomedidas. Elimina-se então a medida correspondente ao maior resíduo normalizado e em seguida realiza-se nova estimação de estados com o vetor de medidas reduzido/modificado. Em seguida, repete-se todo o processo de detecção e eliminação de erros grosseiros, eliminando-se a medida que apresenta o maior resíduo normalizado e assim sucessivamente até que o teste  $r^N$  seja negativo.

# Apêndice B

## Metodologia Primal-Dual de Pontos Interiores

### B.1 Introdução

Este apêndice descreve os aspectos computacionais da metodologia primal-dual de pontos interiores [33] [34] [35] na resolução de problemas de fluxo de potência ótimo (FPO). A motivação desta aplicação deve-se ao bom desempenho mostrado pelos métodos de pontos interiores em programação linear de grande porte, assim como em programação quadrática e convexa. O algoritmo implementado resolve o sistema de equações resultante da formulação primal-dual pelo método de Newton-Raphson com critérios específicos de convergência e ajuste do parâmetro barreira.

### B.2 Método de Pontos Interiores

Na década de 80, Karmarkar [36] publicou um algoritmo de “Métodos Projetados” para a resolução de problemas de programação linear. O algoritmo desenvolvido por Karmarkar é significativamente diferente do tradicional método SIMPLEX de George Dantzig. Enquanto o SIMPLEX resolve um problema de programação linear começando em um ponto extremo ao longo da região de solução e salta para um outro ponto extremo melhor e pára, finalmente, em um ponto extremo ótimo, o método de Karmarkar raramente visita pontos extremos antes que um ponto ótimo seja alcançado. Assim, o algoritmo de Karmarkar encontra soluções viáveis no

interior da região de solução, evitando desta forma a complexidade exponencial derivada dos vértices de solução [37]. Devido ao procedimento de busca da solução proposto por Karmarkar, este método foi chamado de “Método de Pontos Interiores” (MPI).

A Figura B.1 mostra como os dois métodos aproximam-se da solução ótima ( $x_{ot}$ ). Neste exemplo, o algoritmo de MPI requer aproximadamente o mesmo número de iterações que o método SIMPLEX.

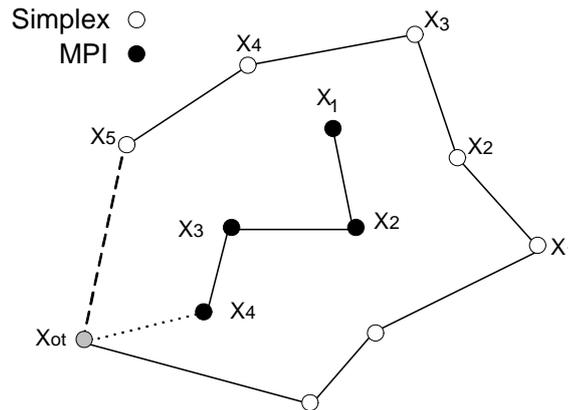


Figura B.1 – Simplex x MPI.

Existe hoje uma experiência acumulada que permite dizer que o método de pontos interiores é competitivo ao SIMPLEX em uma grande quantidade de problemas práticos de programação linear, principalmente em relação a problemas de grande porte. Desta forma, a abordagem do MPI tem atraído a atenção de inúmeros pesquisadores de diversas áreas.

### B.3 Formulação do Problema de FPO

Um problema de FPO pode ser formulado genericamente como:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & f(x) \\
 \text{s.a} \quad & \\
 & h(x) = 0 \quad (\lambda) \\
 & l \leq x \leq u \quad (\pi)
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

onde:

$f(x)$  função objetivo;

$h(x)$  restrições referentes às equações de balanço de potência e as restrições funcionais;

$l, u$  limites inferiores e superiores sobre as variáveis de controle, variáveis de estado e folgas associadas às restrições de canalização.

Com a inclusão de variáveis de folga nas restrições de canalização, o sistema (B.1) resulta no equivalente a:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & f(x) \\
 \text{s.a} \quad & \\
 & h(x) = 0 \quad (\lambda) \\
 & x - sl = l \quad (\pi_l) \\
 & x + su = u \quad (\pi_u) \\
 & sl, su \geq 0
 \end{aligned} \tag{B.2}$$

Pode ser observado que as restrições de desigualdade que aparecem são do tipo (" $\geq 0$ "), ou seja, as restrições de desigualdade originais foram transformadas em variáveis não negativas, sendo tratadas através de penalização interna. Desta forma, este tipo de restrição pode ser incluído ao problema através de uma função penalidade conhecida como barreira logarítmica ( $-\sum \ln(s)$ ). Com a inclusão da função barreira logarítmica, o problema original é transformado em uma seqüência de problemas parametrizados pelo parâmetro barreira ( $\mu$ ). Assim, o problema primal (B.2) é escrito como:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & f(x) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(su_i) \\
 \text{s.a} \quad & \\
 & h(x) = 0 \quad (\lambda) \\
 & x - sl = l \quad (\pi_l) \\
 & x + su = u \quad (\pi_u)
 \end{aligned} \tag{B.3}$$

onde:

$n$  número de variáveis que possuem restrições de canalização.

Observe que para cada valor do parâmetro barreira, tem-se um novo problema de otimização. Resolver (B.3) é equivalente a achar um ponto no interior da região de solução. O conjunto de pontos obtidos para cada valor de  $\mu$  define a trajetória de convergência no interior da região viável em relação às restrições de canalização.

A condição de otimalidade do problema original (B.2) será alcançada quando  $\mu = 0$ . Por este motivo, durante o processo iterativo, deve ser imposto um decréscimo do parâmetro barreira ( $\mu_{k+1} < \mu_k$ ) de tal forma que:

$$\mu_k \rightarrow 0 \text{ quando } k \rightarrow +\infty$$

Assim, quando  $\mu = 0$ , a função objetivo do problema (B.3) torna-se a função objetivo do problema que se deseja resolver, ou seja, torna-se o problema. (B.1). Os processos adotados para o decréscimo do parâmetro barreira dão origem a varias metodologias de pontos interiores. Nesta dissertação, será abordada a metodologia primal-dual de pontos interiores.

Com o objetivo de transformar um determinado problema de otimização sujeito a apenas restrições de igualdade (B.3) em um problema de otimização sem restrições, utiliza-se a função lagrangeana. Esta função é originada através de uma combinação linear entre as restrições do problema (B.3), onde os coeficientes desta combinação são os multiplicadores de Lagrange ( $\lambda, \pi_l$  e  $\pi_u$ ). Assim, a função lagrangeana referente ao problema (B.3) pode ser escrita como:

$$L = f(x) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(sl_i) - \mu \sum_{i=1}^n \ln(su_i) - \lambda^T \cdot h(x) - \pi_l^T \cdot (x - sl - l) - \pi_u^T \cdot (x + su - u) \quad (\text{B.4})$$

## B.4 Resolução do Problema

Para atingir a otimalidade do problema (B.4) deve-se derivar a equação lagrangeana em relação as suas variáveis (primais e duais) e igualar a zero. Fazendo isto tem-se:

$$(\nabla L_x) \quad \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x) - \pi_l^T - \pi_u^T = 0 \quad (\text{B.5})$$

$$(\nabla L_\lambda) \quad h(x) = 0 \quad (\text{B.6})$$

$$(\nabla L_{\pi_l}) \quad x - sl - l = 0 \quad (\text{B.7})$$

$$(\nabla L_{\pi_u}) \quad x + su - u = 0 \quad (\text{B.8})$$

$$(\nabla L_{sl}) \quad \mu e = S_l \pi_l \quad (\text{B.9})$$

$$(\nabla L_{su}) \quad \mu e = -S_u \pi_u \quad (\text{B.10})$$

$S_l$  e  $S_u$  matrizes diagonais cujos elementos diagonais são as componentes dos vetores  $sl$  e  $su$  respectivamente e  $e^T = [1, \dots, 1]$ .

Estas seis equações vetoriais determinam a otimalidade do problema (B.3). Observe que os critérios do sinal de  $\pi_l$  e  $\pi_u$  são deduzidos de (B.9) e (B.10), dada a positividade de  $S_l, S_u, \mu$ . Aplicando-se o método de Newton-Raphson ao sistema de equações (B.5) a (B.10) para a determinação de  $\Delta x, \Delta s_l, \Delta s_u, \Delta \lambda, \Delta \pi_l$  e  $\Delta \pi_u$  tem-se:

$$(\nabla^2 f(x) - \lambda \nabla^2 h(x)) \Delta x - \nabla h(x) \Delta \lambda - \Delta \pi_l - \Delta \pi_u = -t \quad (\text{B.11})$$

$$\nabla^T h(x) \Delta x = -h(x) \quad (\text{B.12})$$

$$\Delta x - \Delta s_l = -(x - s_l - l) \quad (\text{B.13})$$

$$\Delta x + \Delta s_u = -(x + s_u - u) \quad (\text{B.14})$$

$$-\Pi_l \Delta s_l - S_l \Delta \pi_l = -(\mu e - S_l \pi_l) \quad (\text{B.15})$$

$$\Pi_u \Delta s_u - S_u \Delta \pi_u = -(\mu e + S_u \pi_u) \quad (\text{B.16})$$

onde:

$\Pi_l$  e  $\Pi_u$  matrizes diagonais cujos elementos diagonais são as componentes dos vetores  $\pi_l$  e  $\pi_u$  respectivamente e,  $t = \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x) - \pi_l - \pi_u$ .

Considerando em (B.13) e (B.14) que os pontos são viáveis, isto é, que as variáveis estejam dentro da região de solução, tem-se que:

$$\Delta s_l - \Delta x = 0 \quad (\text{B.17})$$

$$\Delta s_u + \Delta x = 0 \quad (\text{B.18})$$

Substituindo as equações acima em (B.15) e (B.16), obtém-se:

$$\Delta \pi_l = +S_l^{-1}(\mu e - S_l \pi_l - \Pi_l \Delta x) \quad (\text{B.19})$$

$$\Delta \pi_u = -S_u^{-1}(\mu e - S_u \pi_u - \Pi_u \Delta x) \quad (\text{B.20})$$

Substituindo as equações (B.9) e (B.10) nas equações (B.19) e (B.20) respectivamente, tem-se:

$$\Delta \pi_l = +S_l^{-1}(-\Pi_l \Delta x) \quad (\text{B.21})$$

$$\Delta \pi_u = S_u^{-1}(\Pi_u \Delta x) \quad (\text{B.22})$$

Com estas substituições, as incógnitas do problema são  $\Delta x$  e  $\Delta \lambda$ . Substituindo as expressões de  $\Delta \pi_l$  e  $\Delta \pi_u$  em (B.11), tem-se:

$$(\nabla^2 f(x) - \lambda^T \nabla^2 h(x)) \Delta \pi_l + S_l^{-1} \Pi_l - S_u^{-1} \Pi_u \Delta x - \nabla h(x) \Delta \lambda = Z \quad (\text{B.23})$$

com:

$$Z = -(\nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x)) + \mu(S_l^{-1} e - S_u^{-1} e) \quad (\text{B.24})$$

Desta forma, o sistema a ser resolvido, dado pelas equações (B.24) e (B.12), é equivalente a:

$$\begin{bmatrix} H & -J^T \\ -J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \\ h(x) \end{bmatrix} \quad (\text{B.25})$$

com:

$$H = \nabla^2 f(x) - \lambda^T \nabla^2 h(x) + S_l^{-1} \Pi_l - S_u^{-1} \Pi_u \quad (\text{B.26})$$

$$J = \nabla h(x) \quad (\text{B.27})$$

Uma vez calculados  $\Delta x$  e  $\Delta \lambda$ , os vetores  $\Delta s_l$  e  $\Delta s_u$  são obtidos a partir de (B.17) e (B.18) e os vetores  $\Delta \pi_l$  e  $\Delta \pi_u$  são obtidos a partir de (B.21) e (B.22). Observe que  $H$  e  $Z$  representam a Hessiana e o Jacobiano da função lagrangeana associada ao problema somente com restrições de igualdade e mais um termo contendo informações correspondentes ao termo barreira sendo:  $(S_l^{-1} \Pi_l - S_u^{-1} \Pi_u)$  em  $H$  e  $\mu(S_l^{-1} e - S_u^{-1} e)$  em  $Z$ .

## B.5 Atualização das Variáveis

Diferentemente do fluxo de potência convencional, os incrementos obtidos pela resolução do sistema (B.25) não são incrementados diretamente em suas respectivas variáveis. Assim, é calculado um passo de otimização ( $\alpha_p$ ) para as variáveis primais e um passo ( $\alpha_d$ ) para as variáveis duais, dados pelas expressões:

$$\alpha_p = \min \left[ \min_{\Delta s < 0} \frac{s_l}{|\Delta s_l|}, \min_{\Delta s < 0} \frac{s_u}{|\Delta s_u|}, 1 \right] \quad (\text{B.28})$$

$$\alpha_d = \min \left[ \min_{\Delta \pi < 0} \frac{\pi_l}{|\Delta \pi_l|}, \min_{\Delta \pi < 0} \frac{\pi_u}{|\Delta \pi_u|}, 1 \right] \quad (\text{B.29})$$

Estes passos têm por objetivo não deixar que nenhuma variável, primal ou dual, tenha um valor de incremento ( $\Delta$ ) que a faça violar suas restrições de canalização. Assim, calculados os passos de otimização, atualiza-se as variáveis primais e duais do problema, determinando o próximo ponto da trajetória, onde é utilizado um fator de redução ( $\sigma$ ) de passo para evitar singularidades na barreira logarítmica, o valor utilizado na prática para este fator é de 0,99995.

Depois de resolvido o sistema (B.25), utiliza-se as expressões (B.17) e (B.18) para determinar os  $\Delta s$  e através de (B.21) e (B.22), obtém-se os  $\Delta \pi$ . Então, os novos valores de  $x, s, \lambda$  e  $\pi$  podem ser calculados por:

$$x^{k+1} = x^k + \sigma \alpha_p \Delta x \quad (\text{B.30})$$

$$s^{k+1} = s^k + \sigma \alpha_p \Delta s \quad (\text{B.31})$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \sigma \alpha_d \Delta \lambda \quad (\text{B.32})$$

$$\pi^{k+1} = \pi^k + \sigma \alpha_p \Delta \pi \quad (\text{B.33})$$

## B.6 Atualização do Parâmetro Barreira e do Gap

Para o processo de otimização convergir para uma resposta correta o parâmetro  $\mu$  que multiplica a função barreira logarítmica deve tender a zero no decorrer das iterações, logo ele deve ser atualizado a cada iteração segundo as equações abaixo:

$$gap = \sum sl \cdot \pi_l - \sum su \cdot \pi_u \quad (\text{B.34})$$

$$\mu = \beta \cdot \frac{gap}{2n} \dots (0 < \beta < 1) \quad (\text{B.35})$$

O valor do *gap* é um parâmetro de “distância” das variáveis em relação à solução ótima do problema. Assim, o valor da *gap* vai decrescendo durante o processo e é mínimo quando a solução ótima é alcançada.

O parâmetro  $\beta$  tem como objetivo modificar a direção de busca e com isto, reduzir o número de iteração do FPO. O valor ótimo de  $\beta$  depende do sistema considerado e das condições iniciais do problema. Assim, nesta dissertação optou-se pela utilização de um valor fixo  $\beta = 0,1$ , uma vez que este valor é muito utilizado na prática [38].

## B.7 Algoritmo de Solução do MPI

O algoritmo de solução resultante dos passos descritos anteriormente pode ser resumido como:

1. Inicialização das variáveis primais e duais.
2. Montagem da função lagrangeana (B.4).
3. Cálculo dos termos da matriz Hessiana (B.26) e (B.27) e dos termos do vetor independente (B.6) e (B.24).
4. Resolução do sistema de equações (B.25).
5. Cálculo do passo primal (B.28) e dual (B.29).
6. Atualização das variáveis do problema (B.30) a (B.33).
7. Cálculo do *gap* (B.34) e atualização do parâmetro barreira (B.35).
8. Teste de otimalidade:

Se  $(\mu \leq 5 \cdot 10^{-4}, \text{gap} \leq 5 \cdot 10^{-4}, \Delta p \leq 1MW, \Delta q \leq 1MW)$  PARE

Senão VOLTE ao passo 2.

onde:

$\Delta p$       resíduo do balanço de potência ativa em cada barra do sistema;

$\Delta q$       resíduo do balanço de potência reativa em cada barra do sistema.

Se o valor do *gap* se torna maior que um valor máximo ( $1 \times 10^8$ ), o processo iterativo deve ser interrompido, indicando que o problema é provavelmente inviável ou mal condicionado.

# Referências Bibliográficas

- [1] T. T. LOPES, “Estimador de Estado Fuzzy”, Tese de Doutorado, COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- [2] R. S. G. MATOS, “Processamento de Erros Grosseiros na Estimação de Estado de Sistemas de Potência em Condições Críticas de Redundância”, Dissertação de Mestrado, UFF/CAA, Niterói, 2000.
- [3] M. B. AMARAL, “Modelagem Estática de Carga por Meio de Medição Direta: Proposição de um Metodologia Sistematizada, seus Impactos e Benefícios”, M.Sc., UFJF, Juiz de Fora, MG, Setembro de 2004.
- [4] P. GOMES, A. P. GUARINI, M. M. P. SOUZA, A. G. MASSAUD, C. FERREIRA, J. M. E. VICENTE, P. P. C. MENDES, A. M. C. RIBEIRO, “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos”, XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Outubro de 2007.
- [5] A. MONTICELLI, “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”, 1ª ed. São Paulo, SP, Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.
- [6] C. E. V. PONTES, H. O. HENRIQUES, J. C. O. AIRES, W. B. M. CORRÉA, “Definição da Modelagem da Carga da LIGHT e seu Impacto na Análise de Grandes Perturbações”, XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Outubro de 2007.
- [7] L. C. A. FERREIRA, R. M. HENRIQUES, J. A. P. FILHO, N. MARTINS, D. M. FALCÃO, “Influência da Representação de Motores de Indução e de Dispositivos de Controle Automáticos e Discretos em Estudos de Segurança de Tensão”, IX Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Maio de 2004.

- [8] G. S. S. JUNIOR, V. L. PAUCAR, V. R. OLIVEIRA, “Modelo da Carga do Consumidor Industrial ALUMAR para Estudos de Estabilidade no Domínio do Tempo”, XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Outubro de 2007.
- [9] F. C. SCHWEPPE, J. WILDER, “Power System Static State Estimation – Part I: Exact Model”, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-89, pp. 120-135, January 1970.
- [10] F. C. ASCHMONEIT, N. M. PETERSON, A. C. ADRIAN, “State Estimation with Equality Constraints”, Proceedings of PICA, pp. 427-436, 1977.
- [11] F. L. ALVARADO, W. F. TINNEY, “State Estimation using Augmented Blocked Matrices”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, No. 3 pp. 911-921, August 1990.
- [12] A. GARCIA, A. MONTICELLI, P. ABREU, “Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing”, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-98, no. 05, pp. 1645-1651, Setember/October 1979.
- [13] G. R. KRUMPHOLZ, K. A. CLEMENTS, P. W. DAVIS, “Power System Observability: A Pratical Algorithm Using Network Topology”, IEEE Trans. On PAS, vol. PAS-99, No. 4, p 1534-1542, Jul./Ago., 1980.
- [14] A. MONTICELLI, F. F. WU, “Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement”, Transactions on PAS, vol. PAS-104, no. 5, pp. 1035-1041, May 1985.
- [15] A. MONTICELLI, F. F. WU, “Network Observability: Theory”, Transactions on PAS, vol. PAS-104, no. 5, pp.1042-1048, May 1985.
- [16] H. M. MERRIL, F. C. SCHWEPPE, “Bad Data Suppression in Power System State Estimation”, IEEE Transaction on PAS, vol. 90, pp. 2718-2725, November/December 1971.
- [17] F. C. SCHWEPPE, E. J. HANDSCHIN, “Static State Estimation in Electric Power Systems”, Proceedings IEEE, vol. 62, pp. 972-982, July 1974.
- [18] HANDSCHIN, E., SCHWEPPE, F. C., KOHLAS, J., FIECHTER, A., “Bad Data Analysis for Power System State Estimation”, IEEE Trans. On PAS, vol PAS-94, N° 2, p. 329-337, Mar./Abr. 1975.

- [19] D. M. FALCÃO, P. A. COOPER, A. BRAMELLER, “Power System State Estimation and Bad Data Processing”, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-101, no. 2, pp. 325-333, 1982.
- [20] D. M. FALCÃO, “An Efficient Power System Tracking State Estimator Using Linear Programming”, Proceeding of the IFCA Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems”, Rio de Janeiro, pp. 65-70, 1985.
- [21] D. M. FALCÃO, S. M. ASSIS, “Linear Programming State Estimation: Error Analysis and Gross Error Identification”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, pp. 809-815, August 1988.
- [22] F. ZHANG, C. S. CHENG, “A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 1, pp. 389-397, February 1997.
- [23] M. E. BARAN, A. W. KELLEY, “State Estimation for Real-Time Monitoring of Distribution Systems” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1601-1609, August 1994.
- [24] M. E. BARAN, A. W. KELLEY, “A Branch-Current-Based State Estimation Method for Distribution Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 483-491, February 1995.
- [25] Y. M. PARK, Y. H. MOON, J. B. CHOO, T. W. KWON, “Design of Reliable Measurement System for State Estimation”, IEEE transactions on Power Systems, vol. 3, no. 3, pp. 830-836, August 1988.
- [26] D. M. FALCÃO, P. A. COOPER, A. BRAMELLER, “Power System Tracking Static State Estimation and Bad Data Processing”, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-101, p. 325-333, Fev. 1982.
- [27] A. M. LEITE DA SILVA, M. B. DO COUTTO FILHO, J. M. C. CANTERA, “Tracking, Dynamic and Hybrid Power System State Estimators”, 9<sup>th</sup> PSCC Proc., p. 538-539, Portugal, Set. 1987.
- [28] A. M. LEITE DA SILVA, M. B. DO COUTTO FILHO, J. M. C. CANTERA, “An Efficient Dynamic State Estimation Algorithm Including Bad Data Processing”, IEEE Trans. on PAS, vol. PWRS-2, p. 1050-1058, Nov. 1987.

- [29] M. B. DO COUTO FILHO, J.D. GLOVER, A. M. LEITE DA SILVA, “State Estimators with Forecasting capability”, 11<sup>th</sup> PSCC Proc., vol. 2, p. 689-695, França, Ago. 1993.
- [30] A. ABUR, A. G. EXPÓSITO, “Power System State Estimation”, Marcel Dekker Inc., New York, 2004.
- [31] A. BOSE, K. A. CLEMENTS, “Real-time Modeling of Power Networks”, Proc. of IEEE, vol. 75, p. 1607-1622, Dez. 1987.
- [32] K. A. CLEMENTS, B. F. WOLLENBERG, “An Algorithm for Observability Determination in Power System State Estimation”, IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, California, Artigo A-75 447-3, 1975.
- [33] M. J. LATORRE, “Aplicação do Método de Pontos Interiores Primal-Dual para a Resolução do Problema de Fluxo de Potência Ótimo”, Dissertação de Mestrado, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.
- [34] S. GRANVILLE, “Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Method”, IEEE/PES, N°93, February 1993.
- [35] S. GRANVILLE, M. C. A. LIMA, “Application of Decomposition Techniques to Var Planning: Methodological & Computational Aspects”, IEEE/PES, N°94, February 1994.
- [36] N. KARMAKAR, “New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming”, Combinatorica, Vol.4, pp.373-395, 1984.
- [37] V. KLEE, G. MINTY, “How Good is the Simplex Algorithm?”, In: Sisha, editor, Inequalities III, Academia Press, New York, NY, 1972.
- [38] E. D. CASTRONUOVO, “Aplicação do Método de Pontos Interiores no Fluxo de Potência Ótimo Não Linear com Utilização de Processamento de Alto Desempenho”, Tese de Doutorado - UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2001.