TESE
986

LA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas Utilizando Redes Neurais Plásticas

CLAUDIO FERREIRA

NOVEMBRO, 1998

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ELETROTÉCNICA

TESE DE DOUTORADO

MODELAGEM DINÂMICA DE CARGAS ELÉTRICAS UTILIZANDO REDES NEURAIS PLÁSTICAS

ALUNO: CLÁUDIO FERREIRA

ORIENTADORES: GERMANO LAMBERT-TORRES
ALEXANDRE PINTO ALVES DA SILVA

NOVEMBRO/1998

Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TESE DE DOUTORADO

A Comissão Examinadora nomeada pela Portaria nº 293 de 19/11/1998, cumpridas todas as etapas da Sessão de Defesa de Tese previstas no Regulamento do Curso de Doutorado em Engenharia Elétrica, se posiciona favoravelmente à "Aprovação" da Tese de Doutorado intitulada: **"Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas Utilizando Redes Neurais Plásticas"** e emite instrução para que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, tome as providências necessárias junto ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico), para a expedição do título de **Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica**, na Área de Concentração de **Sistemas Elétricos de Potência**, desde que atendidas as demais exigências regimentais, a **Cláudio Ferreira.**

Itajubá, 20 de novembro de 1998.

Prof. André Luiz Morelato França
UNICAMP -1º Examinador

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira
UFRJ - 2º Examinador

Prof. Antonio Carlos Zambroni de Souza
EFEI - 3º Examinador

Prof. José Wanderley Marangon Lima
EFEI - 4º Examinador

Prof. Alexandre Pinto Alves da Silva
EFEI - 5º Examinador - Orientador

Prof. Germano Lambert Torres
EFEI - 6º Examinador - Orientador

Ministério da Educação e do Desporto

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TESE DE DOUTORADO

Título da Tese: **"Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas Utilizando Redes Neurais Plásticas"**

Autor: **Cláudio Ferreira**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	
5º	A	
6º	A	

Resultado : Aprovado

Observações: José Augusto Baita Segundo

- Presidente

Itajubá, 20 de novembro de 1998.

Prof. André Luiz Morelato França
UNICAMP -1º Examinador

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira
UFRJ - 2º Examinador

Prof. Antonio Carlos Zambroni de Souza
EFEI - 3º Examinador

Prof. José Wanderley Marangon Lima
EFEI - 4º Examinador

Prof. Alexandre Pinto Alves da Silva
EFEI - 5º Examinador - Orientador

Prof. Germano Lambert Torres
EFEI - 6º Examinador - Orientador

" Vai, pois, come com alegria o teu pão e bebe gostosamente o teu vinho, pois Deus já de antemão se agrada das tuas obras. Em todo tempo sejam alvas as tuas vestes, e jamais falte o óleo sobre a tua cabeça.

Goza a vida com a mulher que amas, todos os dias de tua vida fugaz, os quais Deus te deu debaixo do sol; porque esta é a tua porção nesta vida, pelo trabalho com que te cansaste debaixo do sol.

Alegra-te, jovem, na tua juventude e recreie-se o teu coração nos dias da tua mocidade. Anda pelos caminhos que satisfazem ao teu coração e agradam aos teus olhos. Saiba, porém, que de todas essas coisa Deus te pedirá conta."

Trecho da Bíblia - Cântico dos Cânticos

DEDICO ESTE TRABALHO À MINHA ESPOSA MARIA DO CARMO E AOS MEUS FILHOS TIAGO, ANA CAROLINA E PEDRO COMO PROVA DE AMOR, RESPEITO E ADMIRAÇÃO QUE SINTO POR ELES.

AGRADECIMENTOS

- À Escola Federal de Engenharia de Itajubá, através do Departamento de Engenharia Elétrica por possibilitar este trabalho;

- Aos Dr. Germano Lambert-Torres e Dr. Alexandre Pinto Alves da Silva, pela segurança, sabedoria, compreensão e paciência, com que me souberam orientar neste trabalho;

- Aos colegas do GESis, que sempre me apoiaram, incentivaram e ajudaram na preparação deste trabalho;

- A todos aqueles, que direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho chegasse ao seu final;

- Ao nosso Pai Celestial por mais esta oportunidade de ampliar meus conhecimentos.

RESUMO

Modelos dinâmicos de carga mais exatos aumentam a precisão dos cálculos do controle e do limite de estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência. Métodos de identificação de sistemas podem ser aplicados para estimar modelos de carga baseados em medidas. As duas classes principais nos métodos de identificação de sistemas são os paramétricos e não paramétricos. Até agora somente tem sido usado, em modelagem de carga, os métodos paramétricos. Neste trabalho, o desempenho de um modelo não paramétrico de carga baseado em uma nova rede neural (Rede Funcional Polinomial (RFP)) é comparada com um modelo linear e com o modelo popular ZIP. O impacto de diferentes agrupamentos de composição de carga também é investigado. Uma comparação entre as respostas obtidas pelos diferentes modelos de carga para um comportamento caótico da mesma é apresentada e algumas conclusões importantes são obtidas. Os motores de indução normalmente constituem a grande maioria das cargas industriais, o que mostra a importância de um modelo específico para este tipo de carga. Também é apresentado um modelo dinâmico de motor de indução agregado com uma carga estática ZIP, sendo o modelo do motor de indução desenvolvido com um maior ou menor detalhamento. Os resultados obtidos com este modelo serão comparados com os modelos já apresentados acima. Barramentos de uma subestação industrial importante em 138 kV do Sistema Elétrico Brasileiro foi modelado.

ABSTRACT

Accurate dynamic load models allow more precise calculations of power system controls and stability limits. System identification methods can be applied to estimate load models based on measurements. Parametric and nonparametric are the two main classes in system identification methods. The parametric approach has been the only one used for load modeling so far. In this tesis, the performance of a nonparametric load model based on a new constructive artificial neural network (Functional Polynomial Network (FPN)) is compared with a linear model and with the popular ZIP model. The impact of clustering different load compositions is also investigated. A comparison among the models performance for load chaotic behavior is presented, and some important conclusions are addressed. Induction motors represent the great majority of industrial loads, which shows the importance of this specific type of load. This tesis presents a load model that aggregates a dynamic load model of an induction motor with a static load. Different induction motor models are tried. The results achieved with this model is compared with the models mentioned. Substation buses (138 kV) from the Brazilian system feeding important industrial consumers have been modeled.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO 1

I.1 - O PROBLEMA DA REPRESENTAÇÃO DE CARGA ... 1

I.2 - PROPOSTA DE TRABALHO E CONTRIBUIÇÃO 5

I.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO 6

CAPÍTULO II - ESTADO-DA-ARTE 7

II.1 - MODELOS ESTÁTICOS 7

II. 2 - MODELOS DINÂMICOS 20

CAPÍTULO III - FATORES SIGNIFICATIVOS NOS MODELOS DE CARGA ELÉTRICA 33

III.1 - INTRODUÇÃO 33

III.2 - AGRUPAMENTO DA CARGA 33

III.3 - MODELO DE CARGA E COMPORTAMENTO CAÓTICO 36

III.4 - APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AGRUPAMENTO DE CARGA PROPOSTO AOS DADOS DE CARGA

COLETADOS 39

III.5 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TRAJETÓRIA DA CARGA ELÉTRICA UTILIZANDO A FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO DA MESMA .. 42

CAPÍTULO IV - MODELO DINÂMICO DE CARGA BASEADO EM REDE POLINOMIAL FUNCIONAL 44

IV.1 - INTRODUÇÃO 44

IV.2 - REDE FUNCIONAL 45

IV.3 - REDE POLINOMIAL 47

IV.4 - REDE POLINOMIAL FUNCIONAL 51

IV.5 - MODELO REDE POLINOMIAL FUNCIONAL (RPF) 52

IV.6 - TESTES COM O MODELO RPF 54

IV.6.1 - Potência Ativa 54

IV.6.2 - Potência Reativa 63

CAPÍTULO V - MODELO DINÂMICO DE CARGA RPF E SUA COMPARAÇÃO COM OS MODELOS ZIP E LINEAR 73

V.1 - INTRODUÇÃO 73

V.2 - DESENVOLVIMENTO DOS TESTES 73

V.2.1 - Modelo ZIP 73

V.2.2 - Modelo LINEAR 74

V.3 - TESTES REALIZADOS 75

V.3.1 - Primeiro Teste - Potência Ativa 75

V.3.2 - Segundo Teste - Potência Ativa 77

V.3.3 - Terceiro Teste - Potência Ativa 80

V.3.4 - Quarto Teste - Potência Reativa 82

V.3.5 - Quinto Teste - Potência Reativa 85

V.4 - CONCLUSÕES 87

CAPÍTULO VI - COMPARAÇÃO DO MODELO RPF COM O MODELO DINÂMICO DE CARGA MIT AGREGADO COM O MODELO ZIP 89

VI.1 - INTRODUÇÃO 89

VI.2 - MOTOR DE INDUÇÃO 89

VI.3 - INFLUÊNCIA DA TENSÃO E DA FREQÜÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO NA POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA PELO MOTOR DE INDUÇÃO 95

VI.4 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO NA POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA 97

VI.5 - MODELO AGREGADO MITZIP (MIT + ZIP) 101

VI.5.1 - Modelo MITZIP com comportamento transitório do motor de indução de primeira ordem 103

VI.5.2 - Modelo MITZIP com comportamento transitório do motor de indução de terceira ordem 105

VI.5.3 - Modelo MITZIP com comportamento transitório do motor de indução de quinta ordem 105

VI.6 - DESEMPENHO DO MODELO MITZIP 106

VI.6.1 - Comparação entre os modelos de carga MITZIP representados somente por um motor de indução . 106

VI.6.2 - Comparação entre os modelos de carga representados somente por um motor de indução, por um motor de indução agregado a uma carga de impedância constante e por um motor de indução agregado a cargas de impedância-corrente-potência constantes 110

VI.7 - COMPARAÇÃO DO MODELO AGREGADO MITZIP COM O MODELO REDE POLINOMIAL FUNCIONAL (RPF) 112

VI.8 - CONCLUSÕES 116

CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E LINHAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 118

VII.1 - CONCLUSÕES 118

VII.2 -LINHAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS . 120

CAPÍTULO VIII - BIBLIOGRAFIA 122

APÊNDICE I - MODELOS DE CARGA ZIP E LINEAR 130

AI.1 - INTRODUÇÃO 130

AI.2 - MODELO DE CARGA ZIP 130

AI.3 - MODELO DE CARGA LINEAR 132

AI.4 - OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE CARGA ZIP E LINEAR 134

APÊNDICE II - MODELOS EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO DO MOTOR DE INDUÇÃO 143

AII.1 - INTRODUÇÃO 143

AII.2 - MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO EM REGIME PERMANENTE 148

AII.3 - MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO 151

AII.3.1 - Modelo Transitório de Quinta Ordem 151

AII.3.2 - Modelo Transitório de Terceira Ordem 152

AII.3.3 - Modelo Transitório de Primeira Ordem 156

AII.4 - MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO DE GAIOLA DUPLA EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO 156

APÊNDICE III - RECOZIMENTO SIMULADO 160

AIII.1 - INTRODUÇÃO 160

AIII.2 - RECOZIMENTO SIMULADO 160

APÊNDICE IV - ARTIGO APRESENTADO NO IEEE PES WINTER MEETING 165

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura I.1 - Modelo estático de carga 8

Figura II.2 - Caso clássico de sistemas de potência interligados 20

Figura II.3 - Circuito equivalente do motor de indução 22

Figura II.4 - Modelo agregado de motor de indução 24

Figura III.1 - Aplicação do algoritmo para um padrão que pertencerá a um grupo existente 36

Figura III.2 - Aplicação do algoritmo para um padrão que criará um novo grupo 37

Figura III.3 - Funções de autocorrelação 39

Figura III.4 - Arquivo de dados do distúrbio obtido pelo sistema de aquisição de dados 40

Figura III.5 - Arquivo de dados do distúrbio após redução do mesmo 41

Figura III.6 - Curvas de potência ativa e respectivas curvas de autocorrelação 43

Figura III.7 - Curvas de potência reativa e respectivas curvas de autocorrelação 43

Figura IV.1 - Ilustração esquemática da rede funcional 45

Figura IV.2 - Modelo de expansão funcional 46

Figura IV.3 - Modelo de produtos 47

Figura IV.4 - Rede polinomial 47

Figura IV.5 - Modelo de neurônio usado pela rede polinomial onde $y = A + Bx_i + Cx_j + Dx_i^2 + Ex_j^2 + Fx_ix_j$ 48

Figura IV.6 - Comportamento do erro mínimo com o crescimento do número de camadas na rede para o conjunto de teste 50

Figura IV.7 - Rede Polinomial Funcional (RPF) 52

Figura IV.8 - Erro mínimo por camadas de neurônios 55

Figura IV.9 - Tempo gasto (Pentium 166 MHz) na construção das camadas da RPF 55

Figura IV.10 - Tempo gasto (Pentium 166 MHz) e número de neurônios criados na primeira camada da RPF 56

Figura IV.11 - RPF criada para o exemplo de potência ativa 56

Figura IV.12 - Erro médio para os distúrbios utilizados como teste 58

Figura IV.13 - Tensão para o primeiro distúrbio de validação 58

Figura IV.14 - Freqüência para o primeiro distúrbio de validação 59

Figura IV.15 - Potência medida e calculada para o primeiro distúrbio de validação 59

Figura IV.16 - Erro percentual para o primeiro distúrbio de validação 60

Figura IV.17 - Tensão para o segundo distúrbio de validação 60

Figura IV.18 - Freqüência para o segundo distúrbio de validação 61

Figura IV.19 - Potência medida e calculada para o segundo distúrbio de validação 61

Figura IV.20 - Erro percentual para o segundo distúrbio de validação 62

Figura IV.21 - Tensão para o terceiro distúrbio de validação 62

Figura IV.22 - Freqüência para o terceiro distúrbio de validação 62

Figura IV.23 - Potência medida e calculada para o terceiro distúrbio de validação 63

Figura IV.24 - Erro percentual para o terceiro distúrbio de validação 63

Figura IV.25 - Erro mínimo por camadas de neurônios 64

Figura IV.26 - Tempo gasto (Pentium 166 MHz) na construção das camadas da RPF 64

Figura IV.27 - Tempo gasto (Pentium 166 MHz) na construção de cada camada da RPF (1373/402 padrões) 65

Figura IV.28 - Erro médio para os distúrbios utilizados como teste 66

Figura IV.29 - RPF criada para o exemplo de potência reativa 66

Figura IV.30 - Tensão para o primeiro distúrbio de validação 68

Figura IV.31 - Freqüência para o primeiro distúrbio de validação 68

Figura IV.32 - Potência medida e calculada para o primeiro distúrbio de validação 69

Figura IV.33 - Erro percentual para o primeiro distúrbio de validação 69

Figura IV.34 - Tensão para o segundo distúrbio de validação 70

Figura IV.35 - Freqüência para o segundo distúrbio de validação 70

Figura IV.36 - Potência medida e calculada para o segundo distúrbio de validação 71

Figura IV.37 - Erro percentual para o segundo distúrbio de validação 71

Figura IV.38 - Erro médio para os distúrbios de validação 72

Figura V.1 - Tensão para o primeiro distúrbio 75

Figura V.2 - Freqüência para o primeiro distúrbio 76

Figura V.3 - Resposta dos modelos para o primeiro distúrbio 76

Figura V.4 - Erro percentual dos modelos para o primeiro distúrbio (entre parênteses o erro percentual médio) 77

Figura V.5 - Função de autocorrelação para o primeiro distúrbio 77

Figura V.6 - Tensão para o segundo distúrbio 78

Figura V.7 - Freqüência para o segundo distúrbio 78

Figura V.8 - Resposta dos modelos para o segundo distúrbio 79

Figura V.9 - Erro percentual dos modelos para o segundo distúrbio (entre parênteses o erro percentual médio) 79

Figura V.10 - Função de autocorrelação para o segundo distúrbio 80

Figura V.11 - Tensão para o terceiro distúrbio 80

Figura V.12 - Freqüência para o terceiro distúrbio 81

Figura V.13 - Resposta dos modelos para o terceiro distúrbio 81

Figura V.14 - Erro percentual dos modelos para o terceiro distúrbio (entre parênteses o erro percentual médio) 82

Figura V.15 - Função de autocorrelação para o terceiro distúrbio 82

Figura V.16 - Tensão para o quarto distúrbio 83

Figura V.17 - Freqüência para o quarto distúrbio 83

Figura V.18 - Resposta dos modelos para o quarto distúrbio 84

Figura V.19 - Erro percentual dos modelos para o quarto distúrbio (entre parênteses o erro percentual médio) 84

Figura V.20 - Função de autocorrelação para o quarto distúrbio 85

Figura V.21 - Tensão para o quinto distúrbio 85

Figura V.22 - Resposta dos modelos para o quinto distúrbio 86

Figura V.23 - Erro percentual dos modelos para o quinto distúrbio (entre parênteses o erro percentual médio) 86

Figura V.24 - Função de autocorrelação para o quinto distúrbio 87

Figura VI.1 - Curva do torque elétrico em função do escorregamento para vários valores de tensão de alimentação 91

Figura VI.2 - Curva da potência elétrica interna em função do escorregamento 91

Figura VI.3 - Curva da potência ativa do motor em função do escorregamento 92

Figura VI.4 - Curva da potência reativa do motor em função do escorregamento 93

Figura VI.5 - Módulo da corrente no motor em função do escorregamento 93

Figura VI.6 - Partes real e imaginária da corrente no motor em função do escorregamento 94

Figura VI.7 - Curva do torque eletromagnético em função do escorregamento para vários valores da freqüência de alimentação 95

Figura VI.8 - Curva do torque elétrico em função da velocidade do rotor para vários valores da tensão e freqüência de alimentação 95

Figura VI.9 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da freqüência do barramento de alimentação 96

Figura VI.10 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da tensão do barramento de alimentação 97

Figura VI.11 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em

função da resistência do estator 98

Figura VI.12 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da reatância do estator 98

Figura VI.13 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da reatância de magnetização 99

Figura VI.14 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da resistência do rotor 100

Figura VI.15 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da reatância do rotor 100

Figura VI.16 - Modelo agregado MITZIP 102

Figura VI.17 - Tensão para o distúrbio usado como teste 107

Figura VI.18 - Freqüência para o distúrbio usado como teste 108

Figura VI.19 - Potência ativa para o distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio) 108

Figura VI.20 - Potência reativa para o distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio) 108

Figura VI.21 - Escorregamento do modelo MITZIP para o distúrbio analisado .. 109

Figura VI.22 - Tensão interna do modelo MITZIP para o distúrbio analisado 109

Figura VI.23 - Fluxo concatenado do modelo MITZIP para o distúrbio analisado 109

Figura VI.24 - Potência ativa para o distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio) 112

Figura VI.25 - Potência reativa para o distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio) 112

Figura VI.26 - Potência ativa para o primeiro distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio) 113

Figura VI.27 - Potência ativa para o segundo distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio) 114

Figura VI.28 - Potência ativa para o terceiro distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio) 114

Figura VI.29 - Potência reativa para o quarto distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio) 115

Figura VI.30 - Potência reativa para o quinto distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio) 116

Figura AI.1 - Corrente em função da tensão para cargas de potência, corrente e impedância constantes 130

Figura AII.1 - Desenhos simbólicos ilustrativos de um motor de indução trifásico 143

Figura AII.2 - Desenho simbólico ilustrando a transformação de Park 145

Figura AII.3 - Circuito elétrico equivalente do motor de indução de gaiola simples 149

Figura AII.4 - Circuito elétrico equivalente do motor de indução de gaiola simples com rotor curto-circuitado 149

Figura AII.5 - Circuito elétrico transitório simplificado do motor de indução 154

Figura AII.6 - Circuito elétrico equivalente do motor de indução de gaiola dupla 157

Figura AII.7 - Circuito elétrico equivalente do motor de indução de gaiola simples representando o motor de indução de gaiola dupla 157

Figura AIII.1 - Caixa preta com bola rolando 161

ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela V.1 - Erro da resposta dos modelos para o primeiro distúrbio 76

Tabela V.2 - Erro da resposta dos modelos para o segundo distúrbio 79

Tabela V.3 - Erro da resposta dos modelos para o terceiro distúrbio 81

Tabela V.4 - Erro da resposta dos modelos para o quarto distúrbio 83

Tabela V.5 - Erro da resposta dos modelos para o quinto distúrbio 86

Tabela VI.1 - Parâmetros do modelo de carga MITZIP 107

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O pesquisador que não souber o que está procurando não compreenderá o que encontrar.

Claude Bernard
1813-1878

I.1 - O PROBLEMA DA REPRESENTAÇÃO DE CARGA

Para realizar um estudo qualquer em um Sistema Elétrico de Potência (SEP) deve-se inicialmente definir qual o modelo de cada componente da rede adequado ao estudo desejado. A representação desses componentes é fundamental, visto que a precisão dos resultados obtidos é função desta escolha.

Independente do estudo a ser realizado, a literatura tem mostrado que é de fundamental importância a modelagem dos componentes do SEP. Conseqüentemente, modelos precisos de linhas de transmissão, transformadores, geradores, reguladores e compensadores têm sido propostos. Contudo, o mesmo não tem acontecido com a carga, pois sua natureza aleatória torna a composição da mesma de representação muito difícil.

Em geral, o termo "carga" refere-se a qualquer equipamento ou conjunto de equipamentos que retira energia do sistema elétrico. Na prática, a carga pode variar desde uma simples lâmpada até um motor de grande potência.

No SEP o termo "carga" pode ter vários significados [IEEE, 1993]:

- um dispositivo, conectado ao SEP, que consome potência;
- a potência total (ativa e/ou reativa) consumida por todos os dispositivos conectados a um SEP, denominada carga do sistema;
- parte do sistema que não está explicitamente representada, ou seja, um conjunto de dispositivos que não estão individualmente modelados, tratados como se fosse um único dispositivo consumidor de potência conectado a um barramento no modelo do sistema, denominado "carga do barramento". Este contexto de carga é o mais utilizado nos estudos de SEP;
- a potência de saída de um gerador ou de uma usina, denominada carga do gerador ou da usina.

Nos estudos feitos nos SEP, a prática comum é representar a carga concentrada no barramento, como se fosse um único dispositivo consumidor de potência. Este dispositivo usualmente pode incluir, além dos dispositivos individuais de carga, alimentadores de subtransmissão e distribuição, transformadores elevadores-abaixadores e de distribuição, reguladores de tensão, equipamentos de compensação reativa, etc. A partir deste ponto ao se referir ao termo carga subentende-se que se trata desta definição.

Denomina-se "modelo de carga" à representação matemática da relação entre a tensão do barramento, em termos de módulo e freqüência e a potência ativa e reativa que flui para a carga existente no barramento.

O problema da modelagem da carga é complicado devido aos seus componentes serem das mais variadas categorias, como por exemplo, motores, compressores, fornos, iluminação, aquecimento, refrigeração, equipamentos eletrônicos, etc, sendo que cada um desses dispositivos apresenta uma certa característica.

Do ponto de vista elétrico, os dispositivos acima podem ainda variar em tamanho, simetria (monofásica, trifásica), permanência em funcionamento (em relação ao tempo, freqüência, tensão), ciclo de funcionamento (regular, aleatório), etc.

A carga pode ainda pertencer a várias classes: industriais, residenciais, públicas, agrícolas, etc. Cada classe agrupa cargas que têm composição e característica similares.

A exata composição da carga é difícil de ser estimada. Sua composição varia continuamente de acordo com os consumidores quando os mesmos utilizam seus equipamentos e máquinas. A composição da carga pode variar ainda de acordo com a hora do dia, o dia da semana, as estações do ano, as condições climáticas, o estado da economia e muitos outros fatores.

Logo, um modelo preciso para a carga elétrica é difícil de ser obtido devido a vários fatores, tais como:

- grande número de diferentes componentes na carga;
- variação na composição da carga durante o dia, a semana, as estações, o clima e ao longo do tempo;
- falta de informações precisas da composição da carga;
- caráter aleatório da carga;
- dificuldade de se obter com os consumidores quais são os seus equipamentos;
- falta de conhecimento das características de muitos componentes da carga.

Apesar do comportamento individual das cargas ser imprevisível e inteiramente aleatório, o comportamento das classes de cargas é estatisticamente previsível, fornecendo subsídios valiosos para a análise do sistema, através da obtenção de cargas típicas de cada classe de consumidores. A utilização de uma carga típica é muito utilizada nos estudos do SEP.

Estas cargas típicas apresentam certas regras que as caracterizam:

- embora as cargas sejam variáveis com o tempo, tais variações são lentas e de maneira previsível com o tempo. De minuto a minuto tem-se uma carga quase constante. Pode-se definir níveis de carga, como por exemplo, cargas pesadas, médias e leves;

- devido à grande parcela das cargas serem compostas por motores elétricos industriais (os quais são indutivos), a carga típica sempre consome potência reativa.

- a carga típica é sempre simétrica. No caso de grandes equipamentos essa simetria é automática, visto que os mesmos são projetados para funcionamento trifásico equilibrado. No caso de pequenos equipamentos monofásicos, a simetria é resultante da distribuição intencional dos equipamentos entre as fases e dos efeitos estatísticos de funcionamento dos mesmos.

Os modelos de carga são tradicionalmente classificados em duas grandes categorias:

– Modelos Estáticos de Carga

O modelo estático de carga expressa a potência ativa e reativa em qualquer instante do tempo como uma função algébrica do módulo e da freqüência da tensão do barramento no mesmo instante de tempo. Os componentes de potência ativa e reativa são considerados separadamente.

– Modelos Dinâmicos de Carga

O modelo dinâmico de carga expressa a potência ativa e reativa em qualquer instante do tempo como uma função do módulo e da freqüência da tensão do barramento em instantes anteriores e no mesmo instante de tempo. Pode-se utilizar de informações passadas da própria carga. Usa-se equações diferenciais ou variações (diferenças entre dois instantes de tempo) das grandezas (tensão, freqüência, potência) em um ou vários instantes de tempo para representar tais modelos.

No Capítulo II será feito uma análise do estado-da-arte a respeito da modelagem da carga elétrica onde serão analisados mais profundamente cada uma dessas representações.

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 componentes da carga [IEEE, 1995]. A segunda abordagem não requer o conhecimento das características físicas da carga. É baseada em medidas obtidas da resposta da carga quando a mesma é submetida a distúrbios e o modelo é estimado usando métodos de identificação de sistemas [Dovan, 1987].

A abordagem baseada na composição da carga tem a desvantagem de necessitar de informações que geralmente não estão disponíveis, tal como a composição média da carga para cada um dos barramentos de interesse. A segunda abordagem não necessita desta informação já que a carga pode ser assumida como uma "caixa preta". Entretanto, necessitam ser coletados uma quantidade significativa de dados relacionados a testes programados e a distúrbios naturais que afetam o sistema e a carga.

É difícil quantificar a importância de uma melhor representação da carga elétrica para o SEP. A partir de inúmeros estudos apresentados na literatura, esta afirmação tem-se tornado evidente.

Até alguns anos atrás não era dada muita ênfase à obtenção de um melhor modelo para representação da carga elétrica, sendo utilizado sempre modelos típicos para a mesma (por exemplo, por classe de consumidores, por região geográfica, etc). Isto era devido, em grande parte, ao fato dos SEP apresentarem uma grande "folga" entre geração-consumo e uma melhor representação da carga pouco influenciava nos resultados esperados do sistema. Também como existiam vastos recursos financeiros para aplicação no SEP não se tornava importante analisar os ganhos técnicos e econômicos que se obteriam no sistema através da utilização de um melhor modelo de carga.

Com o passar do tempo e com o aumento do consumo, os SEP começaram a ficar mais carregados, exigindo maiores investimentos para sua expansão e operação, a fim de manter a qualidade do serviço. Com a escassez de recursos para aplicação no setor elétrico, qualquer aumento de potência transmitida e qualquer economia que se possa obter no SEP tornou-se importante. Neste ponto é claro que uma melhor representação da carga elétrica caminha nesta direção.

Os benefícios de uma melhor representação da carga recai em duas categorias [IEEE, 1993]:

- Se a representação atual produz resultados excessivamente pessimistas:

  . em estudos de planejamento, uma melhor modelagem da carga evita ou adia despesas com modificações no sistema e adição de equipamentos;

  . em estudos de operação, uma melhor modelagem da carga aumenta o limite de potência, com conseqüentes benefícios econômicos.

- Se a representação atual produz resultados excessivamente otimistas:

. em estudos de planejamento, uma melhor modelagem da carga pode evitar que o sistema venha a operar no futuro inadequadamente o que resulta em limites operativos caros;

. em estudos de operação, uma melhor modelagem da carga pode levar a prevenção de emergências no sistema resultantes de um excessivo limite otimista de operação.

Um resultado prático que mostra a importância de uma melhor representação da carga é relatado em [IEEE, 1993] onde é citado que o colapso ocorrido no sistema de Tóquio em 1987 foi em parte devido a terem sido subestimadas as características da potência reativa consumida pelas cargas de ar condicionado do sistema.

I. 2 - PROPOSTA DE TRABALHO E CONTRIBUIÇÃO

Considerando as falhas das abordagens para a modelagem de carga relatadas no item anterior e ao fato de que a aquisição (e processamento) de dados do sistema estão se tornando cada vez mais baratas, a abordagem de identificação de sistema é mais compatível com a tecnologia corrente. Esta abordagem utiliza-se do monitoramento em tempo real da carga e pode produzir modelos "on-line".

As duas classes principais dos métodos de identificação de sistemas são os paramétricos [Alves da Silva, 1995.1] e não-paramétricos [Tenório, 1990]. Nos métodos não-paramétricos a estrutura do modelo é formada durante o treinamento bem como a obtenção de seus parâmetros. Já os métodos paramétricos assumem o conhecimento da estrutura do modelo com parâmetros desconhecidos. A maioria das contribuições, até o momento, utilizam métodos nesta classe para modelagem de carga. Seu desempenho depende de uma boa escolha da ordem do modelo, a qual geralmente requer conhecimento prévio das características da carga.

Nos últimos anos, as Redes Neurais Artificiais (RNA) têm sido usadas para a obtenção de um modelo dinâmico de carga elétrica devido a certas características das mesmas como mapeamento não-linear arbitrariamente complexo e capacidade de generalização [Ku, 1994; Nguyen, 1993; Ren-mu, 1993]. Os perceptrons multicamadas treinados com a técnica de retro-propagação de erros têm sido empregados. Entretanto, possuem várias deficiências como dificuldade de obtenção de parâmetros de treinamento, convergência lenta, falhas de treinamento devido a mínimos locais, arquitetura pré-especificada (modelo paramétrico).

A mais poderosa propriedade das redes neurais é a sua capacidade de mapeamento não-linear, acarretando com isso uma melhor estimativa do modelo da carga. Isto significa que as redes neurais podem captar interações não-lineares complexas entre variáveis, e com isso melhorar a precisão e a robustez do modelo, o que não é conseguido com outros métodos. Como a rede neural pode ser treinada com dados em tempo real, seria apreciável que ela tivesse uma rápida capacidade de adaptação para aproximar o comportamento da carga a todo momento.

A proposta do trabalho de tese é de se utilizar uma Rede Polinomial Funcional (RPF) [Alves da Silva, 1995.2, 1995.3] para a obtenção de um modelo dinâmico não paramétrico de carga elétrica através de medidas.

Serão feitas comparações do modelo de carga desenvolvido com um modelo LINEAR [Dovan, 1987] e com o modelo tradicional ZIP (impedância constante, corrente constante e potência constante). Será também desenvolvido um modelo dinâmico de carga (motor de indução) para efeito de comparação de resultados.

O comportamento caótico da carga também é analisado, juntamente com o impacto de diferentes tipos de agrupamentos da carga.

A contribuição deste trabalho se concentra em:

- utilização de redes neurais plásticas, as redes polinomiais funcionais (RPF), para a obtenção de modelos dinâmicos de carga elétrica [Alves da Silva, 1997, Ferreira, 1996.1, 1996.2].

- agrupamento da carga em grupos que apresentam comportamento similares de modo a estimar diferentes modelos de carga, mais robustos, para um determinado barramento do SEP.

- análise do comportamento caótico da carga de modo a estabelecer uma relação entre os modelos de carga e o seu comportamento.

I.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em vários capítulos. O capítulo II apresenta o estado-da-arte dos modelos de carga estáticos e dinâmicos existentes. O capítulo III descreve a técnica de agrupamento de carga e introduz a função de autocorrelação usada para identificar o comportamento da carga. O capítulo IV apresenta o modelo de carga proposto baseado em RPF e alguns testes com este modelo com dados de um SEP real. O capítulo V mostra os resultados dos testes da RPF em comparação com os modelos tradicionais existentes. O capítulo VI apresenta o desenvolvimento de um modelo dinâmico agregado carga estática e motor de indução usado para comparação com o modelo RPF. Finalmente, o capítulo VII apresenta as conclusões deste trabalho e sugere algumas linhas para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO II

ESTADO-DA-ARTE

O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.

Isaac Newton
1643-1727

II.1 - MODELOS ESTÁTICOS

Como já comentado, historicamente os modelos de carga são classificados em duas grandes categorias:

- Modelos Estáticos

- Modelos Dinâmicos

Os modelos estáticos de carga têm sido os modelos tradicionalmente utilizados em simulações de SEP.

Nestes modelos a potência ativa e reativa da carga são expressas separadamente por um polinômio ou uma outra função algébrica qualquer, como, por exemplo, uma função exponencial da tensão e da freqüência do barramento.

Os modelos estáticos são usados principalmente para componentes estáticos de carga (por exemplo, cargas resistivas e de iluminação) e como uma aproximação para os seus componentes dinâmicos (por exemplo, as cargas cujo acionamento seja feito por motores).

Um modelo de carga bastante utilizado é representado a seguir:

$$P = P_0 (\bar{V})^{n_p}$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^{n_q}$$

onde:

- $\bar{V} = \frac{V}{V_0}$;

- P_0, Q_0 e V_0 representam as condições iniciais de potência ativa, reativa e tensão, respectivamente;

– n_p e n_q são os parâmetros do modelo.

Quando os coeficientes n_p e n_q da equação acima são iguais a 2 a potência varia diretamente com o quadrado da magnitude da tensão e o modelo representa uma carga de impedância constante. Quando estes coeficientes são iguais a 1 a potência varia diretamente com a magnitude da tensão e o modelo representa uma carga de corrente constante. Quando estes coeficientes são iguais a zero a potência não varia com a tensão e o modelo representa uma carga de potência constante. A figura II.1 ilustra estes três modelos de carga. Para cargas compostas, os valores dos coeficientes acima dependem das características da carga quando são agregados os componentes da mesma.

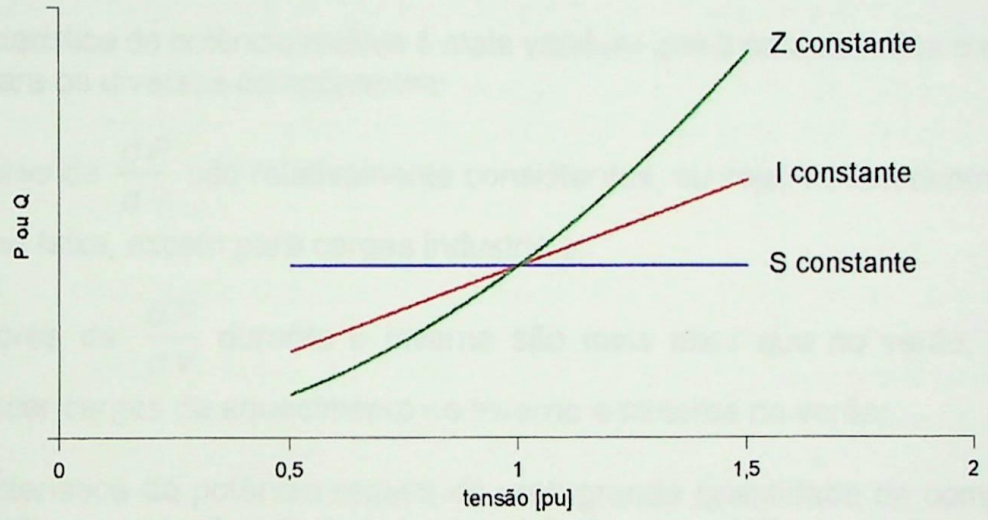


Figura II.1 - Modelo estático de carga

Os coeficientes n_p e n_q são próximos do valor da inclinação da curva de P e Q, ou seja, $\frac{dP}{dV}$ e $\frac{dQ}{dV}$, no ponto inicial de operação ($V = V_0$).

Concordia [Concordia, 1982] mostra dados disponíveis na literatura da dependência da carga com a tensão. São apresentadas características de vários componentes e também de várias cargas compostas, obtidas de outras fontes que são citadas no artigo.

No artigo, é citado que é muito difícil conseguir uma exata composição da carga devido a vários fatores já citados anteriormente (estilo de vida dos consumidores, as estações do ano, as condições climáticas, o estado da economia, etc). Além disso, os autores afirmam que é difícil obter dados e medidas do comportamento da carga quando submetidos a perturbações que causem variações de tensão acima de 10%, sendo que normalmente a faixa de interesse de variação de tensão nas simulações é muito maior (apesar de dependerem da natureza do distúrbio). Também é citada a dificuldade de se obter medidas de distúrbios na carga relativos a variações significativas da freqüência.

O artigo sugere que é comum converter a carga para impedância constante quando a tensão cai abaixo de um valor crítico (por exemplo 40%), principalmente para evitar problemas computacionais. Isto leva a obter-se nas simulações resultados conservativos.

Algumas observações ainda são feitas pelos autores:

- a característica da carga tem efeito significativo na estabilidade do sistema;
- a característica de potência ativa tende a ser do tipo potência constante ($n_p = 0$) e a característica da potência reativa tende a ser do tipo impedância constante ($n_q = 2$), para a maioria das cargas composta de motores não muito carregados;
- a característica da potência reativa é mais variável que a característica da potência ativa para os diversos componentes;
- os valores de $\frac{dP}{dV}$ são relativamente consistentes, ou seja, variam dentro de uma pequena faixa, exceto para cargas industriais;
- os valores de $\frac{dP}{dV}$ durante o inverno são mais altos que no verão, devido a prevalecer cargas de aquecimento no inverno e motores no verão;
- a característica da potência reativa de uma grande quantidade de componentes apresenta uma relação não linear com a tensão, o que dificulta a obtenção desta característica;
- os valores de $\frac{dQ}{dV}$ são mais sensíveis ao fator de potência.

Ribeiro [Ribeiro, 1982] apresenta um método matemático para se obter os coeficientes n_p e n_q de cargas compostas baseadas nos valores de $\frac{dP}{dV}$ e $\frac{dQ}{dV}$ das cargas individuais e na participação das mesmas na carga agregada. São apresentados valores obtidos de n_p e n_q para cargas industriais, comerciais e residenciais, com base em dados coletados na Rochester Gas & Electric Corporation. Os resultados são comparados também com modelos obtidos através de testes de campo.

Kao [Kao, 1994], em um artigo onde compara os resultados de diversos modelos de carga em um simulação dinâmica, apresenta valores típicos de n_p e n_q para várias subestações do sistema elétrico da Taiwan Power Company. Os valores foram obtidos pela composição das parcelas da carga residencial, comercial e industrial utilizando os respectivos coeficientes para cada um desses tipos de carga. São apresentados valores para os períodos do dia e da noite e para o inverno e o verão.

Vaahedi [Vaahedi, 1987] apresenta valores de n_p e n_q para cargas residenciais,

comerciais e industriais, levando em conta os efeitos do inverno, do verão, do dia e da noite. Estes dados foram obtidos de testes no sistema da Ontario Hydro. Uma grande pesquisa para classificar a carga também foi feita envolvendo regiões geográficas (seis ao todo) e tipos de consumidores (residencial, agrícola, industrial, mineração, vários tipos de comércio, etc), permitindo obter um modelo agregado da carga.

Kundur [Kundur, 1993] indica que o coeficiente n_p varia normalmente entre 0,5 e 1,8 e o coeficiente n_q entre 1,5 e 6. Esta referência cita ainda que na falta de informações é comum representar a potência ativa da carga como corrente constante ($n_p = 1$) e a potência reativa como impedância constante ($n_q = 2$).

Também a IEEE Task Force [IEEE, 1993] afirma que na falta de informações da composição da carga deve-se representar a potência ativa da mesma como corrente constante e a potência reativa como impedância constante. A representação da potência ativa por corrente constante representa uma mistura de carga resistiva com motores (mais próximo de potência constante). Se a carga é mais resistiva a mesma tende para impedância constante enquanto se a carga for mais motora a mesma tende para potência constante.

A mesma conclusão acima a respeito da falta de informações da carga é obtida por Araújo [Araújo, 1974]. Em seu trabalho, o autor propõe que os motores de indução, que constituem a maior parcela da carga industrial, tenham suas potências reativas representadas como potência constante, corrente constante ou impedância constante, caso estejam a plena carga, a 60% ou a 30% de carga, respectivamente. Já a potência ativa é bem representada por potência constante para variações de tensão.

Araújo ainda conclui que a compensação shunt nos sistemas tende a deslocar a potência reativa da situação de impedância constante para corrente constante.

Um modelo estático que tem sido amplamente usado para representar a dependência da carga com a tensão é o modelo polinomial, expresso pelas equações abaixo:

$$P(\bar{V}) = P_0 (a + b\bar{V} + c\bar{V}^2)$$

$$Q(\bar{V}) = Q_0 (d + e\bar{V} + f\bar{V}^2)$$

O modelo polinomial acima é comumente denominado modelo ZIP, visto que o mesmo representa a carga através de suas parcelas de impedância constante (Z_C), corrente constante (I_C) e potência constante (P_C).

Na equação acima tem-se:

- $\bar{V} = \frac{V}{V_0}$. Alguns autores [Valgas, 1994] utilizam o desvio de tensão $\Delta V = V(k+1) - V(k)$, onde k é o instante de tempo;

- P_0, Q_0 e V_0 representam as condições iniciais de potência ativa, reativa e tensão,

respectivamente. No caso de um componente específico pode ser a potência e a tensão nominais. Para representar a carga de um barramento, os valores acima são normalmente as condições iniciais operativas do sistema em estudo;

- os coeficientes *a* e *d* especificam as parcelas em pu da potência ativa e reativa da carga que comportam-se como potência constante;

- os coeficientes *b* e *e* especificam as parcelas em pu da potência ativa e reativa da carga que comportam-se como corrente constante; e

- os coeficientes *c* e *f* especificam as parcelas em pu da potência ativa e reativa da carga que comportam-se como impedância constante.

O modelo ZIP é o modelo clássico de representação de cargas, mas também não apresenta uma grande precisão para a maioria das cargas existentes no Sistema Elétrico. Entretanto, muitos dos programas empregados pelas concessionárias de Energia Elétrica utilizam este tipo de representação.

Os coeficientes acima, que determinam a curva de ajuste da potência com a tensão, podem ser determinados de várias formas. De um modo geral, pode-se ajustar mais de uma curva ao conjunto de dados existente.

O GCOI através de grupos de estudo [GTEE, 1989] recomenda que na falta de dados mais elaborados, sejam utilizados, para a parte ativa da carga elétrica, modelos consistindo de uma parcela de potência constante e uma de impedância constante. Os valores destas parcelas variam de acordo com o estado do país (Brasil) e estão entre 40 a 70% para a parcela de potência constante e, conseqüentemente, 60 a 30% para a impedância constante. Já a potência reativa recomenda-se representá-la por impedância constante.

Kao [Kao, 1994] apresenta também coeficientes típicos *a*, *b*, *c*, *d*, *e* e *f* para várias subestações do sistema elétrico da Taiwan Power Company. Os valores foram obtidos pela composição das parcelas da carga residencial, comercial e industrial utilizando os respectivos coeficientes para cada um desses tipos de carga.

Vaahedi [Vaahedi, 1987] em seu artigo obtém os coeficientes *a*, *b*, *c*, *d*, *e* e *f* através de expansão em série de Taylor do modelo agregado exponencial obtido em testes.

Kent [Kent, 1969] recomenda utilizar 50% de potência constante e 50% de impedância constante para representação da carga na falta de dados mais precisos. No artigo ainda é apresentada a composição da carga baseado na classe da mesma (residencial-comercial, industrial e agrícola) e nas estações do ano (inverno e verão), com valores variando de 34 a 68% de potência constante e de 66 a 32% de impedância constante respectivamente, resultados estes obtidos através de testes. Com dados da venda de energia em uma concessionária de energia elétrica servindo como exemplo é fornecido uma metodologia para estimar a representação individual da carga de uma dada subestação. Esta estimativa baseia-se nos dados obtidos de venda de energia

elétrica para correspondentes classes de consumidores.

Kimbark e Peterson na discussão do artigo acima sugerem a utilização da expressão $P = P_0 (\overline{V})^{n_p}$ como mais realista para representação de todas as cargas (exceto das cargas de potência constante) quando ocorrem tensões baixas no sistema. Peterson inclusive obtém resultados mais expressivos com este tipo de representação para o exemplo apresentado no artigo.

É consenso geral de todos os artigos analisados que a modelagem da carga através do modelo potência constante é a representação mais severa do ponto de vista da estabilidade do sistema enquanto a representação das cargas por impedância constante leva a oscilações menores e mais rapidamente amortecidas no sistema.

Observa-se ainda que o modelo estático não apresenta precisão na representação da resposta da potência da carga quando a tensão está na faixa de 0 a 0,5 pu, sendo válido somente em uma faixa limitada de tensão [Kent, 1969; Meyer, 1982; Concordia, 1982; Taylor, 1994].

Roelofs [Roelofs, 1989] analisa vários modelos de carga (potência constante, corrente constante, impedância constante, composição de modelos, etc) e conclui que o modelo potência constante leva a resultados mais pessimistas, ou seja, tempos críticos de eliminação de faltas menores, níveis seguros de potência transferida menores e grandes desvios de tensão e freqüência no caso de perda de geração. Ele recomenda, no caso de estudos específicos, se não existirem dados disponíveis que indiquem a natureza da carga, utilizar o modelo da carga como impedância constante.

Kao [Kao, 1994] verificou que, para defeitos monofásicos a simulação com modelos de carga exponencial ou ZIP , os resultados são consistentes com os valores medidos em campo durante a falta, mas não refletem o comportamento dinâmico após a eliminação da mesma.

A influência da freqüência nas características da carga é usualmente representada pela multiplicação dos modelos anteriores por um fator do tipo:

$$1 + k \Delta f$$

onde:

- $\Delta f = f - f_0$;
- f é a freqüência do barramento;
- f_0 é a freqüência inicial [Kundur, 1993] ou a nominal [IEEE, 1993];
- k é o parâmetro de sensibilidade da freqüência.

Logo:

$$P = P_0 (\bar{V})^{n_p} (1 + k_p \Delta f)$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^{n_q} (1 + k_q \Delta f)$$

ou

$$P(\bar{V}) = P_0 (a + b\bar{V} + c\bar{V}^2)(1 + k_p \Delta f)$$

$$Q(\bar{V}) = Q_0 (d + e\bar{V} + f\bar{V}^2)(1 + k_q \Delta f)$$

onde k_p e k_q são os parâmetros de sensibilidade da freqüência para a potência ativa e reativa, respectivamente.

A potência ativa da carga decresce com a diminuição da freqüência, apresentando então um valor de k_p ($\frac{dP}{df}$) positivo, enquanto a potência reativa apresenta um valor de k_q ($\frac{dQ}{df}$) negativo, ou seja, aumenta com a diminuição da freqüência [Concordia, 1982; Taylor, 1994].

A referência [Concordia, 1982] relata que para variações significativas de freqüência foram observados valores de $\frac{dQ}{df}$ relativamente pequenos (até mesmo negativos) ou relativamente grandes. Também é relatado que foram observadas em algumas situações, um aumento acentuado na potência reativa quando a freqüência estava diminuindo e a tensão aumentando, indicando saturação magnética de transformadores.

Kundur [Kundur, 1993] indica um valor entre 0 e 3,0 para k_p e entre -2,0 e 0 para k_q.

A IEEE Task Force [IEEE, 1993] apresenta uma série de valores para n_p, n_q, k_p e k_q, para várias classes de carga, regiões geográficas (EUA), estações do ano, etc.

Ribeiro [Ribeiro, 1982] apresenta valores de k_p e k_q, para os períodos de inverno e de verão obtido com dados de carga da Rochester Gas & Electric.

Araújo [Araújo, 1974] conclui que o valor de $\frac{dP}{df}$ para carga total da subestação deve ser superior a 1,0, sendo próximo a este valor quando a carga de motores for pequena e próximo ou superior a 2 quando a carga for composta de uma grande parcela de motores. Conclui ainda que o efeito da variação da carga com a freqüência ocasiona sempre amortecimento positivo nas oscilações das máquinas.

Kent [Kent, 1969] indica ser boa norma considerar uma variação linear de 1% na potência ativa da carga para cada 1% de variação na freqüência.

Quan [Quan, 1975] faz considerações sobre os diversos tipos de cargas encontradas no SEP (iluminação, aquecimento, conversores, fornos, etc) fornecendo valores de $\frac{dP}{dV}$, $\frac{dP}{df}$, $\frac{dQ}{dV}$ e $\frac{dQ}{df}$ para essas cargas. É apresentado um modelo, denominado modelo composto de carga, no qual é feito a composição dos vários tipos e classes de cargas, representado pela equação a seguir:

$$P = P_0 (\bar{V})^A (\bar{f})^B$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^C (\bar{f})^D$$

onde os expoentes A, B, C e D são obtidos através da composição relativa dos parâmetros característicos $\frac{dP}{dV}$, $\frac{dP}{df}$, $\frac{dQ}{dV}$ e $\frac{dQ}{df}$ de cada uma das cargas individuais que compõe a carga total.

Abordagem semelhante é feita por Berg [Berg, 1973] obtendo um modelo composto onde é levado em conta o efeito dos elementos da rede de distribuição nos parâmetros característicos da carga.

Modelo semelhante é derivado por Ohyama [Ohyama, 1985] com dados obtidos através da monitoração contínua da carga. Os autores analisam também a influência das horas do dia e dos meses do ano nos parâmetros da carga. Nas análises não é levada em conta a variação de freqüência sobre a carga.

Frantz [Frantz, 1984], com base em testes de campo, reforça o modelo desenvolvido por [Quan, 1975] ao concluir que a característica estática da carga depende da composição da mesma e das características de cada componente. Para a parcela reativa da carga suas características dependem ainda dos capacitores e transformadores de distribuição, o que confirma também o modelo de [Berg, 1973].

Ihara [Ihara, 1981] com base em resultados de testes feitos na subestação de Bismarck 230 kV (área de Dakota do Norte) conclui que a característica estática da carga é praticamente linear na tensão para a parte ativa da mesma e não linear para a parte reativa.

Todos os autores acima concordam que devido a considerações feitas ao se obter o modelo, o mesmo é válido para pequenas variações de tensão e freqüência.

O EPRI em seu programa computacional LOADSYN (LOAD Model SYNthesis) permite ao usuário preparar modelos de carga para estudos de fluxo de potência e estabilidade. O LOADSYN converte os dados das classes de carga, composição e característica nos parâmetros normalmente utilizados nos programas de fluxo de potência e de estabilidade transitória.

O LOADSYN utiliza o seguinte modelo estático de carga [IEEE, 1993; Taylor, 1994;

Price, 1988]:

$$P = P_0 \left[P_{a1} (\bar{V})^{KPV1} (1 + KPF1\,\Delta f) + (1.0 - P_{a1})(\bar{V})^{KPV2} \right]$$

$$Q = P_0 \left[Q_{a1} (\bar{V})^{KQV1} (1 + KQF1\,\Delta f) + \left(\frac{Q_0}{P_0} - Q_{a1}\right)(\bar{V})^{KQV2} (1.0 + KQF2\,\Delta f) \right]$$

onde:

- $\bar{V} = \frac{V}{V_0}$;
- $\Delta f = f - f_0$;
- V é a tensão do barramento;
- f é a freqüência do barramento;
- f_0 é a freqüência nominal;
- P_0, Q_0 e V_0 representam as condições iniciais.

A potência ativa (P) é representada por dois termos, um dependente da freqüência e o outro não. A dependência com a tensão é exponencial. O primeiro termo da expressão de P agrega todos os componentes das cargas que são dependentes da freqüência, como por exemplo, os motores e as lâmpadas fluorescentes, enquanto o segundo termo agrega os componentes não dependentes da freqüência, por exemplo, os aparelhos resistivos.

Os parâmetros da expressão da potência ativa acima são definidos por:

- P_{a1} é a parcela da potência ativa que é dependente da freqüência;
- *KPV1* é o expoente da tensão para a parte da carga ativa que é dependente da freqüência;
- *KPV2* é o expoente da tensão para a parte da carga ativa que não é dependente da freqüência;
- *KPF1* é o parâmetro de sensibilidade da freqüência para a potência ativa.

A potência reativa (Q) da expressão acima também tem duas parcelas, ambas dependentes da freqüência e definidas diferentemente da expressão de P. A dependência com a tensão é exponencial. O primeiro termo inclui a potência reativa consumida por todos os componentes da carga. O segundo termo representa, em uma primeira aproximação, o efeito das perdas reativas e da compensação shunt do sistema

de subtransmissão e distribuição entre o barramento onde a carga está sendo representada e o ponto onde as diversas cargas estão conectadas.

O primeiro termo é construído usando os fatores de potência dos componentes individuais da carga. Já o segundo termo é baseado na diferença entre este valor e a potência reativa inicial existente no barramento (valor especificado, por exemplo, no fluxo de potência). Isto faz com que haja uma coincidência do valor obtido na expressão acima da potência reativa na tensão inicial (V_0) com o valor da potência reativa inicial (Q_0) (especificada).

Os parâmetros da expressão da potência reativa acima são definidos por:

- Q_{a1} é o coeficiente da potência reativa dado pela relação entre a carga reativa inicial sem compensação e a potência ativa inicial (P_0);

- *KQV1* é o expoente da tensão para a parte da carga reativa que não é compensada;

- *KQV2* é o expoente da tensão para o termo da carga reativa compensada;

- *KQF1* é o parâmetro de sensibilidade da freqüência para a parte da carga reativa que não é compensada;

- *KQF2* é o parâmetro de sensibilidade da freqüência para a compensação reativa.

Observe que a potência reativa Q foi normalizada em termos da potência ativa P_0 ao invés da potência reativa Q_0. Segundo os autores do programa LOADSYN, isto foi feito para evitar um valor nulo de potência reativa quando a adição da carga com as perdas reativas são canceladas pela compensação shunt. Utilizando P_0 pode-se obter o valor da carga reativa quando a tensão V varia, independentemente se a potência reativa inicial é nula.

A normalização acima dificulta a utilização direta dos parâmetros do modelo da carga reativa em programas de fluxo de potência e estabilidade transitória. Os autores relatam que o programa LOADSYN apresenta um módulo que converte os modelos obtidos para modelos tradicionalmente utilizados nos programas computacionais de fluxo de potência e estabilidade. O modelo resultante [Taylor, 1994] é uma combinação de impedância constante, corrente constante e potência constante, ou seja, o modelo estático polinomial já descrito anteriormente.

O programa LOADSYN requer que o usuário especifique o percentual de cada classe de carga (residencial, comercial, industrial, etc) para cada barramento ou área a ser modelada. O usuário pode entrar também com os dados de composição de cada classe (estações do ano, período do dia, etc) ou então usar a base de valores padrão do programa. Todos estes parâmetros muitas vezes não estão disponíveis ou são de difícil obtenção.

O modelo de carga estático usado pelo EPRI em seu programa computacional ETMSP

(Extended Transient Mid-term Stability Program) [IEEE, 1993; Kundur, 1993] é uma composição do modelo estático ZIP com um modelo exponencial dependente da freqüência:

$$P = P_0 \left[P_{ZIP} + P(V,f) \right]$$

$$Q = Q_0 \left[Q_{ZIP} + Q(V,f) \right]$$

onde:

$$P_{ZIP} = p_1 \overline{V}^2 + p_2 \overline{V} + p_3$$

$$Q_{ZIP} = q_1 \overline{V}^2 + q_2 \overline{V} + q_3$$

e:

$$P(V,f) = p_4 \overline{V}^{a1} \left[1 + KPF1 \Delta f \right] + p_5 \overline{V}^{a2} \left[1 + KPF2 \Delta f \right]$$

$$Q(V,f) = q_4 \overline{V}^{b1} \left[1 + KQF1 \Delta f \right] + q_5 \overline{V}^{b2} \left[1 + KQF2 \Delta f \right]$$

sendo:

- $\overline{V} = \frac{V}{V_0}$;
- $\Delta f = f - f_0$;
- V é a tensão do barramento;
- f é a freqüência do barramento;
- f_0 é a freqüência nominal;
- P_0, Q_0 e V_0 representam as condições iniciais;
- *KPF1*, *KPF2*, *KQF1* e *KQF2* são os parâmetros de sensibilidade da freqüência para a potência ativa e reativa;
- a1, *a2*, *b1* e *b2* são os expoentes da tensão para a potência ativa e reativa da carga;
- os parâmetros p_1, p_2, p_3, p_4 e p_5 para a potência ativa e q_1, q_2, q_3, q_4 e q_5 para a potência reativa satisfazem a seguinte condição:

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1$$

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 1$$

McGee e Shackshaft na discussão do artigo [Frantz, 1984] apresenta, para estudos de fluxo de potência, o seguinte modelo estático de carga, baseado em dados coletados em campo:

:

$$P = P_s V^2 + P_m V^0$$

$$Q = Q_s V^2 + Q_{sat} V^n + Q_m V^{-2}$$

onde P_s e Q_s são as cargas estáticas ativa e reativa incluindo as perdas na transmissão, P_m a potência ativa das cargas tipo motores, Q_m as perdas reativas nesses motores e Q_{sat} a saturação equivalente dos transformadores e motores. O valor empírico *n* é considerado como 7 [Haque, 1996].

Lee [Lee, 1987], em um artigo onde compara vários modelos de carga para estudos de estabilidade, apresenta um modelo composto polinomial:

$$P = P_0 (r_0 + r_1 \Delta V + r_2 \Delta V^2 + r_3 \Delta V^3 + r_4 \Delta V^4 + r_5 \Delta f + r_6 \Delta V \Delta f)$$

$$Q = P_0 (s_0 + s_1 \Delta V + s_2 \Delta V^2 + s_3 \Delta V^3 + s_4 \Delta V^4 + s_5 \Delta f + s_6 \Delta V \Delta f)$$

No artigo é fornecido também os coeficientes para nove tipos diferentes de cargas que podem ser compostas obtendo um modelo agregado.

Adler [Adler, 1970], com dados coletados de regime permanente de testes feitos no Edison Electric Institute, obteve expressões para a potência ativa e reativa de cargas tipo ar condicionado (pequenas unidades), lâmpadas fluorescentes e motores de indução (150 HP).

Venikov [Venikov, 1977] apresenta uma análise das características estáticas de diversos tipos de cargas elétricas, como iluminação, motores de indução, motores síncronos e cargas de retificação (retificadores e inversores). É apresentado também, através de curvas, a característica estática aproximada de cargas compostas com análise dos vários elementos influentes. É afirmado que para pequenas variações na tensão e na freqüência de alimentação das cargas, a variação na potência ativa e reativa pode ser dado pelas expressões apresentadas a seguir:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f$$

onde $\frac{\partial P}{\partial V}$, $\frac{\partial P}{\partial f}$, $\frac{\partial Q}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial f}$ representam os coeficientes de regulação, os quais caracterizam as variações na potência ativa e reativa da carga relacionadas com as variações de tensão e de freqüência. Os coeficientes de regulação da tensão expressos em pu são usualmente de 0,3 a 0,75 para a potência ativa e de 1,5 a 3,5 para a potência reativa. Já os coeficientes de regulação da freqüência, também expressos em pu, são usualmente de 1,5 a 3,0 para a potência ativa e de 1 a 5 ou 6 para a potência reativa. Todos estes valores foram obtidos das curvas apresentadas

através da linearização em torno de um ponto de operação.

Berg [Berg, 1972] utiliza resultados de testes envolvendo perdas súbitas de geração em um sistema de potência isolado do sudoeste da Noruega para obter parâmetros de modelos estáticos de diversos tipos de cargas. A perda de geração foi de 3 a 27% do total do sistema, o que acarreta grandes quedas de tensão e excursão da freqüência no sistema. O modelo geral utilizado foi o mesmo apresentado acima e foi assumido uma dependência da carga com a tensão e com a freqüência de forma exponencial. São fornecidos parâmetros característicos para cargas comerciais, residenciais, de fábrica de alumínio e de fornos elétricos. Uma análise desses parâmetros também é feita.

Ihara [Ihara, 1994] analisa as características de cargas residenciais (6,6 kV) com dados coletados na Kansai Electric Power Company. Para afundamentos de tensão durante faltas balanceadas e desbalanceadas foi verificado que o impacto na potência ativa não é significante, já a potência reativa consumida durante as faltas desbalanceadas é maior do que a consumida durante as faltas balanceadas. A variação da potência ativa em função da tensão (resposta estática) com o tempo de falta é pequeno se comparado com a variação da potência reativa. Os autores concluem que as respostas estáticas *P(V)* e *Q(V)* até 5 ciclos após o início da falta são boas representações para as características da carga durante afundamentos de tensão. Para degraus de tensão de ±2%, *Q(V)* varia com o tempo mais do que *P(V)* porém, mas após 30 ciclos de ocorrência da variação de tensão, *Q(V)*, atinge um padrão de regime. Neste caso, as respostas estáticas da carga *P(V)* e *Q(V)* podem ser determinadas com dados carga x tensão após cerca de 30 ciclos de ocorrências destas variações.

Capasso [Capasso, 1994] também analisa cargas residenciais e apresenta um processo de síntese com análises estatísticas através de funções de probabilidade (para introduzir a relação existente entre a demanda de consumidores residenciais e o comportamento típico doméstico) para obter um modelo de carga residencial. Na análise são utilizados dados da carga elétrica residencial italiana.

Iliceto [Iliceto, 1972] conclui, de testes realizados na rede em 154 kV da Turquia, que cargas compostas residenciais podem ser representadas por suas características estáticas em forma polinomial, tomando o cuidado de modificá-las adequadamente quando ocorrem grandes afundamentos de tensão no sistema. Já para as cargas industriais, que apresentam grandes motores e para as cargas eletroquímicas, a representação por qualquer característica estática é inevitavelmente distante da realidade.

Como já observado, todos os modelos estáticos apresentados não são realistas para tensões baixas e podem acarretar problemas computacionais. Tais problemas podem ocorrer principalmente com a representação da carga por potência constante, visto que com a diminuição de tensão, comum na maioria dos distúrbios, ocorrerá um aumento de corrente requerida pelas mesmas, provocando novas quedas de tensão, seguidos de novos aumentos de corrente e assim sucessivamente. Os modelos utilizados nos

programas computacionais é normal, quando a tensão cai abaixo de um certo valor, as parcelas da carga que são representadas por potência e corrente constantes serem automaticamente convertidas para impedância constante. Nos modelos de carga dinâmicos, este problema não ocorre já que nesta representação a carga não é função somente da tensão e freqüência no próprio instante de tempo, mas utiliza-se informações passadas dessas grandezas e da própria carga, limitando com isso, por exemplo, o impacto direto de uma queda de tensão.

II. 2 - MODELOS DINÂMICOS

Para ilustrar a importância da representação dinâmica da carga, seja o caso clássico da situação de dois sistemas elétricos interligados por várias linhas de transmissão, onde o sistema 1 está fornecendo potência para o sistema 2, como ilustra a figura II.2.

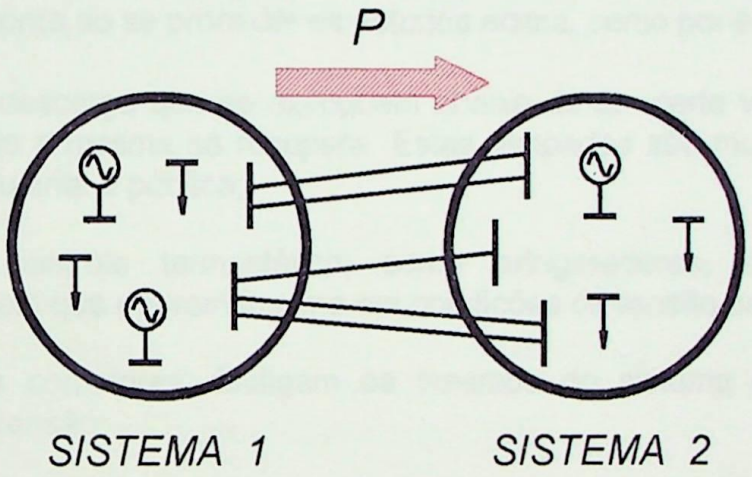


Figura II.2 - Caso clássico de sistemas de potência interligados

Suponha a ocorrência de um defeito qualquer que tire de serviço uma ou mais das linhas de transmissão que interliga os dois sistemas. Com isso ocorrerá um aumento da impedância entre os dois sistemas e, em conseqüência, o sistema 1 avança mais seu ângulo de fase em relação ao sistema 2, com os geradores do sistema 1 tendendo a se acelerarem e os do sistema 2 a se retardarem. Como conseqüência do defeito, normalmente ocorre queda de tensão no sistema. Se a carga do sistema 1 for do tipo impedância constante, a potência consumida pela mesma irá diminuir com a queda de tensão. Com isso a potência de aceleração dos geradores deste sistema será maior, agravando o problema nesta área que já tinha a tendência a se acelerar. Caso a carga seja do tipo potência constante, a mesma não variará com a tensão não agravando o problema. Quanto ao sistema 2, se a carga for do tipo impedância constante, a diminuição da mesma com a queda de tensão aumenta a potência acelerante dos respectivos geradores o que será benéfico para este sistema, que tem a tendência de se desacelerar. Caso a carga seja do tipo potência constante a situação será agravada, pois apesar da mesma não variar, não alterando portanto a potência acelerante dos geradores, diminuirá mais a tensão do sistema em função do aumento de corrente requeridos pelas cargas.

Pode-se então observar que a representação da carga tem efeito substancial no resultado. É difícil selecionar um modelo estático que garanta ser conservativo para todas as partes do sistema e para os mais variados distúrbios [IEEE, 1993; Araújo, 1974].

Nas situações onde é necessário levar em conta a dinâmica dos componentes da carga, como por exemplo, nos estudos de estabilidade de tensão, ilhamentos de sistemas, oscilações entre áreas, estabilidade de longo termo, rejeição de carga, ressonância sub-síncrona, auto-excitação, etc, o modelo estático não deve ser utilizado. Também nos estudos de sistemas industriais ou em sistemas onde a concentração de motores é elevada é necessário utilizar modelos de carga onde se leva em conta a dinâmica da mesma. A referência [IEEE, 1993] relata situações de estabilidade de tensão onde a representação estática da carga não é adequada.

Os próprios componentes da carga apresentam características dinâmicas que devem ser levadas em conta ao se proceder os estudos acima, como por exemplo:

- lâmpadas de descarga que se extinguem abaixo de um certo valor de tensão e religam quando a mesma se recupera. Estas lâmpadas são muito utilizadas em iluminação industrial e pública;

- cargas com controle termostático, como refrigeradores, ar-condicionados, aquecedores, etc que operam mesmo em condições de tensão baixa;

- motores cujos contatores desligam os mesmos do sistema durante faltas e oscilações de tensão;

- operação de réles de proteção, como por exemplo, réles térmicos e de sobrecorrente;

- resposta de LTC's em transformadores de distribuição, reguladores de tensão, bancos de capacitores controlados, etc, os quais levam um certo tempo para atuar.

O comportamento dinâmico da carga tem um considerável efeito na estabilidade do sistema. Maurício [Maurício, 1972] conclui, para o sistema por ele estudado, que a representação por impedância constante de certas cargas tem um efeito no limite de estabilidade acima de 30% e que os motores de indução, em muitos casos, podem reduzir a estabilidade. Meyer [Meyer, 1982] relata estudos que demonstram que o modelo de carga varia o limite de estabilidade em mais de 50%. O Power System Engineering Committee apresenta em [PSEC, 1972] o efeito de diferentes modelos dinâmicos de carga nos resultados dos estudos de estabilidade.

Iliceto [Iliceto, 1972] conclui com base em testes realizados em campo e em laboratório que o modelo estático de carga não é adequado para situações onde ocorre grandes quedas de tensão no sistema, devendo ser utilizados modelos com base em equações diferenciais ou como função do tempo (modelo dinâmico).

O modelo dinâmico de carga expressa a potência ativa e reativa em qualquer instante

do tempo como uma função do módulo e da freqüência da tensão do barramento em instantes anteriores e no mesmo instante de tempo. Pode-se utilizar de informações passadas da própria carga tanto em termos da potência ativa quanto da potência reativa.

Um modelo básico de tratamento dinâmico da carga é o seguinte [Berger, 1972, Venikov 1977]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial f} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta f \end{bmatrix}$$

onde ΔP e ΔQ representam as variações da potência ativa e reativa da carga, respectivamente, em função das variações na tensão e na freqüência, ΔV e Δf. Os coeficientes de regulação $\frac{\partial P}{\partial V}$, $\frac{\partial P}{\partial f}$, $\frac{\partial Q}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial f}$ não são mais constantes como no modelo estático de carga. Venikov [Venikov, 1977] apresenta uma análise desses coeficientes para vários tipos de cargas.

Como já comentado, os motores de indução normalmente constituem a grande maioria das cargas industriais. Por isso uma tentativa de representar dinamicamente a carga elétrica é através da modelagem da mesma como um motor de indução equivalente onde a dinâmica da carga é representada através das equações dinâmicas do motor de indução [Brereton, 1957]. Esta representação apresenta a facilidade de ser incorporada nos programas computacionais existentes.

Devido à importância e a quantidade de motores de indução encontrados nos sistema elétricos, uma grande quantidade de artigos é encontrada na literatura apresentando as mais variadas técnicas para agregação dos mesmos em uma unidade equivalente, donde pode-se citar: [Abdel Hakin, 1976; Rahim, 1987; Taleb, 1994; Franklin, 1994; 1997; Len, 1994], entre outros. Nozari [Nozari, 1987] analisa os vários métodos para agregar motores de indução e apresenta também um método para tal finalidade.

No programa LOADSYN [Price, 1988], as cargas com características dinâmicas (motores) são agregadas em um modelo simples de motor de indução, como indicado na figura II.3.

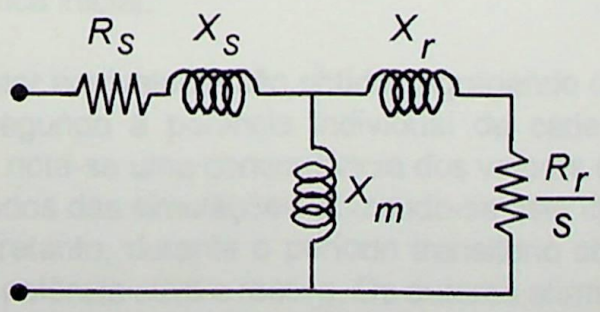


Figura II.3 - Circuito equivalente do motor de indução

onde:

R_s - resistência do estator;

X_s - reatância de dispersão do estator;

X_m - reatância mútua estator/rotor (magnetização);

R_r - resistência do rotor (referida ao estator);

X_r - reatância de dispersão do rotor (referida ao estator);

s - escorregamento = $\dfrac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$

ω_s - velocidade angular do campo magnético do estator (velocidade síncrona);

ω_r - velocidade angular elétrica do rotor.

A dinâmica do motor de indução é representada na equação:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H}\left[T_M(\omega_r) - T_E(s) \right]$$

onde:

H - constante de inércia do motor;

T_E - torque elétrico do motor, função do escorregamento s:

T_M - torque mecânico do motor dado como uma função polinomial da velocidade do rotor:

$$T_M = T_{M_0}\left(A\,\omega_r^2 + B\,\omega_r + C \right)$$

sendo A, B e C as parcelas da carga mecânica proporcional ao quadrado da velocidade, à velocidade e termo independente da velocidade, respectivamente. T_{M_0} é a carga mecânica inicial.

Os parâmetros do motor equivalente são obtidos agregando os parâmetros de cada motor, ponderados segundo a potência individual de cada unidade. Nos testes dinâmicos realizados, nota-se uma concordância dos valores obtidos entre os testes de campo e os resultados das simulações utilizando-se este tipo de modelo, durante e após o defeito. Entretanto, durante o período transitório observa-se uma grande diferença nos picos da potência ativa e reativa. Os autores afirmam que esta diferença deve-se à modelagem de outros elementos do sistema.

A referência [Vaahedi, 1988] aplica o programa LOADSYN para obter modelos dinâmicos de carga para estudos de estabilidade sobre as mais diversas condições operativas.

Lee [Lee, 1987] também utiliza o modelo do motor de indução para comparar os vários tipos de modelos de carga em estudos de estabilidade.

Kao [Kao, 1995] compara o desempenho de modelos de motor de indução (um único motor e um modelo com dois motores) em simulações de faltas trifásicas e oscilações de baixa freqüência com dados medidos em campo para estes eventos no sistema elétrico da Taiwan Power Company. Ele conclui que os modelos dinâmicos aumentam a precisão das simulações, mas que um modelo composto (dinâmico + estático) apresenta os melhores resultados.

Um modelo semelhante ao mostrado acima é derivado por Sabir [Sabir, 1982] representando a carga como a combinação de um motor de indução e uma carga estática (RC). A figura II.4 ilustra o modelo utilizado.

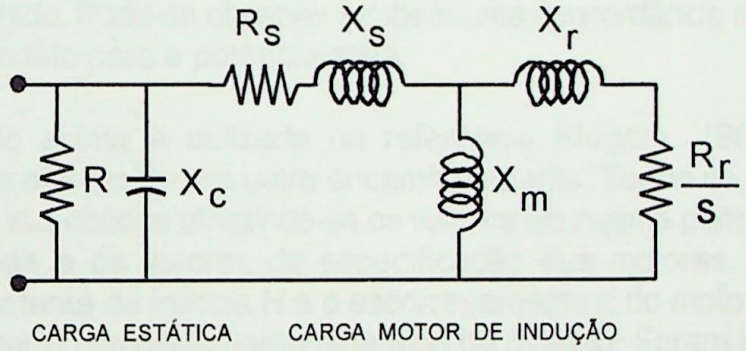


Figura II.4 - Modelo agregado de motor de indução

onde os parâmetros R_s, X_s, X_m, R_r, X_r e s já foram definidos anteriormente e R e X_C correspondem a carga estática representada no barramento.

A dinâmica do motor de indução é representada na equação:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H}\left[T_E - T_L \right] .$$

onde T_E corresponde ao torque elétrico do motor e T_L o torque mecânico da carga dado por:

$$T_L = K(1 - s)^{\eta}$$

sendo η o expoente da carga. Pode-se observar que a representação da carga mecânica neste modelo é menos abrangente que no modelo do LOADSYN [Price, 1988].

Os parâmetros do modelo acima são divididos em dois conjuntos. O primeiro,

denominado de parâmetros independentes (R_s, X_s, X_m, R_r, X_r, H, η e K), é estimado utilizando o método dos mínimos quadrados, usando como dados as respostas (tensão e potência ativa e reativa) de transitórios que ocorreram no sistema elétrico real obtidas através da monitoração do sistema com microcomputadores. O segundo, denominado de parâmetros dependentes (R, X_C e s), é obtido utilizando os parâmetros independentes de modo a satisfazer o ponto de operação do modelo em regime permanente.

É afirmado no artigo que o sucesso do método depende da habilidade de obter os parâmetros do modelo através das informações colhidas de transitórios observados sob as mais variadas condições de operação do sistema. Também é relatado a dificuldade de obter alguns dos parâmetros do modelo, em especial o parâmetro η.

São apresentados resultados para a modelagem de duas fábricas de papel, uma grande (30 MW) e uma pequena (10 MW), sendo a carga das mesmas compostas de motores de indução e de motores síncronos nos quais estão conectados uma variedade de cargas mecânicas. Os resultados apresentados mostram que as respostas observadas da carga do sistema podem ser adequadamente representadas pelo modelo escolhido. Pode-se observar também uma concordância maior dos valores de campo e do modelo para a potência ativa.

O mesmo modelo acima é utilizado na referência [Rogers, 1984] mas com os parâmetros obtidos através de um outro encaminhamento. Todos os parâmetros, com exceção de H e s, são obtidos utilizando-se os valores em regime permanente da carga a ser representada e os valores de especificação dos motores. Os dois últimos parâmetros, a constante de inércia H e o escorregamento s do motor, são escolhidos de modo a otimizar o comportamento dinâmico do modelo. Foram feitas simulações do modelo desenvolvido com o Sistema de 39 barras do IEEE (New England) para curtos-circuitos trifásicos. O modelo mostrou-se eficiente para estas perturbações.

Uma abordagem semelhante é feita na referência [Wong, 1985] onde são agregados todos os motores de indução e todas as cargas estáticas em um único motor de indução e em uma única carga estática equivalentes.

Lem [Lem, 1994] apresenta comparações entre medidas feitas em laboratório com simulações utilizando o modelo agregado acima [Rogers, 1984], para variações impostas de tensão no sistema. Nas simulações foram utilizados modelos de terceira (somente transitórios do rotor) e quinta ordem (transitórios do rotor e estator) para o motor de indução. O modelo de quinta ordem apresentou um melhor comportamento nas respostas transitórias. O modelo de terceira ordem pode ser usado para prognosticar variações grosseiras, mas quando o número de motores aumenta, a necessidade de se representar os transitórios do estator torna-se mais significante.

Wang [Wang, 1994] apresenta o mesmo modelo composto acima mas com os parâmetros dependentes da freqüência. No teste apresentado no artigo, como a variação da freqüência foi pequena, os erros dos modelos, considerando ou não a influência da freqüência nos parâmetros, foram semelhantes. É afirmado a necessidade

de avaliar o desempenho do modelo para grandes variações de tensão, freqüência e corrente.

Kao [Kao, 1994] utiliza também um modelo composto carga estática mais motor de indução em suas comparações de simulações de vários modelos de cargas com testes de campo. Neste caso, a carga estática não se resume mais a somente uma impedância constante, mas ao modelo polinomial ZIP. Com os resultados de medidas em campo em um sistema de 161 kV da Taiwan Power Company, para defeitos monofásicos e trifásicos, este modelo composto apresentou o melhor desempenho em comparação com os modelos estáticos utilizados.

Chiang [Chiang, 1997] desenvolve, utilizando medidas obtidas em campo, um modelo composto ZIP mais motor de indução. O modelo utilizado para o motor de indução é o de terceira ordem, que é dito ser suficiente para representar o comportamento do mesmo. Os parâmetros do modelo são estimados através de um algoritmo baseado no método do gradiente conjugado. O modelo foi testado com medidas feitas durante um falta monofásica que ocorreu no sistema de 161/69 kV da Taiwan Power Company. Os resultados mostraram que o modelo composto desenvolvido pode representar com precisão os comportamentos estático e dinâmicos da carga.

Na representação da carga como um motor de indução a característica dinâmica da mesma é introduzida pela utilização da equação de torque do motor e nas equações diferenciais do estator e rotor. Pode-se observar que através de uma redução pura e simples do circuito elétrico equivalente do motor chega-se ao modelo estático de carga (impedância constante).

Meyer [Meyer, 1982] propõe um modelo de carga na forma de variável de estado:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

onde x é o vetor de estado, u o vetor de entrada e y o vetor de saída.

O vetor de entrada u pode ser escolhido como a tensão (na forma polar ou retangular) e a freqüência da carga. O vetor de estado x é de ordem 2 porque esta é a mínima ordem para se levar em conta a dinâmica produzida pela equação de balanço do motor de indução. O vetor de saída y pode ser escolhido como as potências ativa e reativa ou as componentes (real e imaginária) da corrente da carga. Os autores escolheram, como vetor de entrada do modelo, a variação da tensão da carga em coordenadas retangulares e, como vetor de saída, a variação da corrente na mesma, por facilidade de implementação computacional nos programas de estabilidade transitória.

Os parâmetros do modelo acima podem ser obtidos por vários processos de identificação utilizando medidas da resposta da carga para distúrbios nas variáveis de entrada. Foi escolhido pelos autores o método dos mínimos quadrados para determinar estes parâmetros.

Por falta de dados, não foi feito nenhum teste do modelo proposto com valores reais obtidos de medidas de distúrbios nos SEP. Foi utilizada a resposta do modelo do motor de indução para variações na tensão terminal do mesmo como dados de entrada para o processo de identificação dos parâmetros do modelo proposto. Nesta situação, pode-se observar pelas curvas mostradas no artigo que o modelo proposto apresenta uma boa concordância com as respostas do modelo do motor de indução. Da mesma maneira, a corrente em uma barra de carga de um pequeno SEP, obtida da simulação de defeitos no mesmo, serviu como dados de entrada/saída para obtenção dos parâmetros do modelo. Utilizando-se estes parâmetros, foram feitos vários estudos de estabilidade no sistema e os resultados, segundo os autores, mostraram que o modelo de carga sugerido pode modelar adequadamente a dinâmica da carga.

Modelo semelhante é utilizado por [Karlsson, 1994; Milanović, 1995; Hiskens, 1995]:

$$T_p \dot{x}_p = P_s(V) - P_d$$

$$x_p = P_d - P_t(V)$$

As funções $P_t(V)$ e $P_s(V)$ definem a resposta inicial e o valor final da potência consumida. Estas funções podem ser definidas como:

$$P_s(V) = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_{ps}}$$

$$P_t(V) = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_{pt}}$$

onde V_0 e P_0 correspondem a tensão nominal e a potência ativa consumida pela carga e n_{ps} e n_{pt} são os expoentes de tensão em regime e transitório. A constante de tempo T_p descreve a taxa de recuperação da potência ativa da carga. Para a potência reativa expressões semelhantes podem ser definidas, com os respectivos índices (Q_0, n_{qs}, n_{qt} e T_q).

Karlsson [Karlsson, 1994] apresenta valores estimados para os parâmetros acima baseados em medidas feitas em duas subestações do sistema elétrico do sul da Suécia, para diferentes meses do ano e para diferentes períodos do dia. Hiskens [Hiskens, 1995] apresenta as faixas normais destes parâmetros:

$$0 \leq n_{ps} \leq 3$$

$$0 \leq n_{qs} \leq 7$$

$$1.5 \leq n_{pt} \leq 2.5$$

$$4 \leq n_{qt} \leq 7$$

As constantes de tempo T_p e T_q dependem do tipo de carga a ser modelada. Para cargas industriais, agrícolas e de ar condicionado, as quais consistem predominantemente de motores de indução, T_p e T_q estão na faixa de 0,02 até poucos segundos, dependendo da proporção dos motores de indução na carga composta total. Para indústrias tipo fundição de alumínio ou sistemas auxiliares de usinas de força, as constantes de tempo estão na faixa de 0,1 a 0,5 s. Para "tap-changers" (comutadores de tap) e outros dispositivos de controle, as constantes de tempo estão na faixa de minutos e, para cargas de aquecimento, na faixa de horas.

Nos dois últimos artigos citados são feitos análises deste modelo com variação nos seus parâmetros e sua influência no amortecimento do sistema.

Borghetti [Borghetti, 1997] utiliza o modelo acima, que foi denominado de GNLD (Generic Non-Linear Dynamic Load Model), e o modelo agregado carga estática exponencial mais motor de indução de primeira e terceira ordens em estudos de estabilidade de tensão, num sistema elétrico do sudoeste da Inglaterra. Das conclusões do artigo pode-se observar que o desempenho do GNLD não foi o esperado, recomendando-se um refinamento no modelo quando da representação da dinâmica de cargas que apresentam altas porcentagens de motores de indução.

Srinivasan [Srinivasan, 1979] afirma que existe uma realimentação entre os valores da potência P e Q de saída da carga e os valores de entrada (V e f) da mesma, ou seja, que variações na carga (P e Q) causam subseqüente variações na tensão e na freqüência, ao invés de somente variações na tensão e na freqüência provocarem variações na carga. Esta realimentação, segundo os autores, se não levada em conta, pode acarretar valores incorretos na resposta do modelo da carga.

Baseado nesta afirmativa é proposto um modelo dinâmico de carga no qual é considerado a realimentação entre as potências ativa e reativa (carga) e a tensão e a freqüência (excitação):

$$\frac{\Delta P}{P}(t) = b_1 \frac{\Delta P}{P}(t-1) + a_{12} \frac{\Delta Q}{Q}(t) + a_{13} \frac{\Delta V}{V}(t) + a_{14} \frac{\Delta f}{f}(t) + \omega_1$$

$$\frac{\Delta Q}{Q}(t) = b_2 \frac{\Delta Q}{Q}(t-1) + a_{21} \frac{\Delta P}{P}(t) + a_{23} \frac{\Delta V}{V}(t) + a_{24} \frac{\Delta f}{f}(t) + \omega_2$$

$$\frac{\Delta V}{V}(t) = b_3 \frac{\Delta V}{V}(t-1) + a_{31} \frac{\Delta P}{P}(t) + a_{32} \frac{\Delta Q}{Q}(t) + a_{34} \frac{\Delta f}{f}(t) + \omega_3$$

$$\frac{\Delta f}{f}(t) = b_4 \frac{\Delta f}{f}(t-1) + a_{41} \frac{\Delta P}{P}(t) + a_{42} \frac{\Delta Q}{Q}(t) + a_{43} \frac{\Delta V}{V}(t) + \omega_4$$

onde t e $(t-1)$ se referem a dois sucessivos instantes de tempo. Neste modelo o fator tempo também é uma variável utilizada para se obter o valor das potências ativa e reativa da carga.

Os parâmetros b_1, ... , a_{43} são os parâmetros do modelo a serem determinados e ω_1, ..., ω_4 correspondem ao erro do modelo.

A expressão acima pode ser reescrita como:

$$[x(t)] = [A][x(t-1)] + [\omega(t)]$$

que corresponde a um modelo auto-regressivo de primeira ordem.

Os 16 parâmetros do modelo, correspondentes a matriz *A*, são estimados a partir de amostras coletadas de valores de *P*, *Q*, *V* e *f*.

É apresentado no artigo os coeficientes obtidos para uma subestação da Hydro-Québec em 120 kV, onde foram utilizados 1024 padrões de medidas em intervalos de 1.080 ms (cerca de 1 s total). Não foi apresentado nenhuma simulação com o modelo desenvolvido para mostrar sua validade.

Os autores afirmam que o modelo obtido é basicamente utilizado para pequenas variações em torno do ponto de operação, atingindo cerca de 10% de variação de tensão, e que deve ser validado para valores acima deste limite.

Apesar da implantação deste modelo em programas digitais não ser tão direta como no caso do modelo motor de indução, a simplicidade da expressão resultante do modelo torna esta tarefa extremamente fácil. Esta simplicidade se traduz também na possibilidade de se utilizar o modelo em estudos "on-line".

Uma outra vantagem deste modelo, além de sua simplicidade é a não necessidade de se conhecer, de forma explícita, os componentes da carga.

A obtenção dos parâmetros do modelo depende de medidas de *P*, *Q*, *V* e *f* realizadas diretamente no ponto onde se deseja representar a carga. A precisão do modelo obtido depende da precisão dessas variáveis aquisitadas e da quantidade de medidas realizadas. Pode-se notar na expressão do modelo de carga acima, uma dependência entre as potências no mesmo intervalo de tempo.

Em outro artigo, Srinivasan [Srinivasan, 1981] apresenta um sistema de monitoração para a carga o qual permite obter os dados necessários a estimação dos parâmetros do modelo.

Dovan [Dovan, 1987] no desenvolvimento de seu modelo de carga leva em conta que a mesma não é função somente da tensão e da freqüência, mas também de outros fatores externos, como por exemplo, temperatura, localização, horas do dia, estações do ano, etc. Estes fatores externos tornam variáveis as características das cargas e, conseqüentemente, a estrutura do modelo da carga também deve ser variável. O modelo apresentado pelos autores além de apresentar variações em seus parâmetros permite modificar sua estrutura. Para que isto ocorra, deve-se incluir, paralelamente à estimativa dos parâmetros, uma monitoração do desempenho do modelo de modo

que sua estrutura possa ser apropriadamente modificada.

O modelo de carga apresenta a seguinte estrutura básica:

$$p_k = \sum_{i=1}^{n_p} a_i\, p_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} b_i\, v_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_f} c_i\, f_{k-i} + \varepsilon_k$$

onde p_k representa as respostas da carga, v_k e f_k representam os sinais de entrada observados da tensão e freqüência, respectivamente, e ε_k representa o erro de modelagem. Os coeficientes da regressão em p, v e f são representados por a_i, b_i e c_i, respectivamente, enquanto n_p, n_v e n_f determinam as correspondentes ordens de regressão.

Pode-se observar que o número total de parâmetros a serem estimados é de:

$$n = n_p + n_v + n_f + 2$$

Os parâmetros acima são estimados utilizando o método dos mínimos quadrados, para uma série de N observações. A função custo que avalia o desempenho do modelo foi definida como:

$$J = \frac{N}{N - n} \sum_{i=1}^{N} [p(k) - \hat{p}(k)]^2$$

onde $\hat{p}(k)$ é a saída do modelo utilizando os parâmetros estimados acima. Note que o fator $\frac{N}{N - n}$ favorece os modelos de baixa ordem. Entre modelos com desempenho similar, deve-se selecionar o de menor ordem, pois este geralmente terá melhor capacidade de generalização.

O procedimento para selecionar a estrutura do modelo é levar em consideração algumas estruturas previamente selecionadas em função do tipo de carga, das estações do ano e da hora do dia. Tais estruturas são determinadas "off-line" e progressivamente atualizadas à medida que novas informações são recebidas. Através da função custo, o erro do modelo é avaliado, e caso o mesmo seja elevado, uma nova estrutura é escolhida entre as previamente selecionadas.

São ainda apresentadas neste artigo algumas estruturas para os modelos de carga em função do seu tipo e das estações do ano.

Pode-se observar que a ordem do modelo proposto, ao contrário do modelo anterior [Srinivasan, 1979], não está limitado em primeira ordem. Esta ordem variável possibilita uma melhor representação da carga em alguns casos. A maior dificuldade, que cabe ao usuário, reside em definir qual a ordem do sistema que melhor se adapta a representação dinâmica da carga.

Baseados nos testes feitos os autores afirmam que os modelos propostos são válidos

para pequenas distúrbios que possam ocorrer no sistema, ou seja, para variações de tensão da ordem de 10% e de freqüência de 0,1%.

Da mesma maneira que para o modelo anterior [Srinivasan, 1979], em [Valgas, 1994] são apresentados resultados obtidos para uma subestação industrial da CEMIG em 138 kV. Foram observados erros médios da ordem de 1,0% para a potência ativa e de 2,5% para a potência reativa, sendo o erro máximo da ordem de 5,0% e 25,3% respectivamente.

Segundo [Valgas, 1994], usualmente este modelo [Dovan, 1987] apresenta um desempenho melhor que modelo anterior [Srinivasan, 1979] e que ambos apresentam um desempenho bem melhor do que o modelo estático ZIP.

Alguma das características dinâmicas da carga residencial são relatadas em [Ihara, 1994] no qual é apresentado uma metodologia para a obtenção das mesmas.

Finalmente, modelos de cargas especiais, como carga de retificação, são apresentados em [Iliceto, 1972; Delfino, 1992] e de motores DC industriais em [Delfino, 1992].

Ku [Ku, 1994] utiliza Redes Neurais Artificiais (RNA) como um substituto para os modelos convencionais dinâmicos de carga apresentados acima. A idéia é utilizar a capacidade rápida de computação das redes neurais para aproximar o comportamento da carga a todo instante de tempo, evitando as dificuldades de armazenamento e atualização dos dados de carga. É utilizado uma RNA com alimentação em um só sentido ("feedforward network"), com uma camada escondida e função sigmoidal de ativação dos neurônios sendo treinada com a técnica de retro-propagação de erros. Foram utilizados como dados de entrada da rede a tensão em dois instantes sucessivos de tempo t e $(t - 1)$ e a potência no instante $(t - 1)$.

A RNA foi treinada com dados reais de distúrbios coletados na Taiwan Power Company em várias subestações de 345 kV. Com o modelo treinado foram feitos testes e apresentado os resultados, que reproduzem a dinâmica da carga com precisão. É afirmado que pode-se treinar a RNA com dados cobrindo uma determinada faixa de operação e usar o modelo treinado para estimar a resposta de carga para outros distúrbios.

Deve-se lembrar que o modelo acima apresenta algumas deficiências já relatadas anteriormente, como dificuldade de obtenção de parâmetros de treinamento, convergência lenta e arquitetura pré-especificada (modelo paramétrico).

Hiyama [Hiyama, 1997] também usa RNA para modelar a carga. São propostos três modelos de rede cuja diferença está somente no número de entradas da mesma. É usada uma RNA com três camadas, incluindo as de entrada e saída, portanto com somente uma camada intermediária. A função de ativação dos neurônios é a função sigmoidal. A RNA é treinada com a técnica de retro-propagação de erros. Os sinais de entrada são amostras de tensão na barra da carga e os sinais de saída são as potências ativa ou reativa estimadas. Cada modelo, além da tensão no tempo t, usa a

tensão em instantes de tempo anteriores (o primeiro modelo usa a tensão em *(t -1)*, o segundo em *(t - 1)* e *(t - 2)*, e o terceiro as anteriores mais a tensão em *(t - 3)*). Existe também realimentação na entrada da rede da potência calculada nos instantes anteriores (idêntico ao que se faz com a tensão) de acordo com o modelo.

Os dados para treinamento e teste dos modelos propostos foram obtidos de monitoração da tensão e da corrente em várias subestações (área residencial e de indústrias de pequeno porte) da Kyushu Electric Power System. Os resultados apresentados reproduzem a dinâmica da carga com precisão. É afirmado no artigo que estudos adicionais são necessários para investigar os efeitos das estações do ano, do local de coleta, do tempo do dia, do dia da semana, das condições climáticas, nos resultados estimados pela RNA. Também é afirmado que a possibilidade de se obter um modelo que possa ser usado para diferentes situações (outros distúrbios, como relatado acima) depende da coleta de um grande número de dados durante perturbações no sistema.

Cabe lembrar que este modelo também apresenta as mesmas deficiências do modelo de RNA apresentado em [Ku, 1994].

Bostanci [Bostanci, 1997] apresenta uma metodologia para identificar cargas elétricas dinâmicas usando RNA. Para comprovar o método, é desenvolvido no artigo um modelo de RNA para um motor de indução de terceira ordem. O número de entradas e o número de camadas intermediarias da rede é determinada por experimentação de diferentes estruturas de RNA, sendo a mesma treinada com a técnica de retro-propagação de erros. Deve-se lembrar que este modelo de RNA é um modelo paramétrico apesar de ser alterado o número de camadas e a quantidade de entradas na rede.

A melhor RNA obtida para o motor de indução apresenta somente uma camada intermediária, além das camadas de entrada e de saída. A camada de entrada é composta de 10 neurônios, o que corresponde a 10 sinais de entrada, enquanto a camada de saída apresenta 2 neurônios, correspondendo as potência ativa e reativa consumidas pelo motor de indução. Os sinais de entrada além da tensão atual são compostos pela potência ativa, reativa e tensão em três instantes anteriores de tempo.

Diversos valores de tensão foram aplicados ao motor de indução (modelo matemático) para obter-se a potência consumida destinada ao treinamento da RNA. O modelo obtido foi testado com um sinal de tensão diferente do aplicado no treinamento. Este sinal foi aplicado à rede e ao motor de indução e os resultados apresentados no artigo. Nota-se um bom desempenho do modelo de rede obtido. É citado no artigo como desenvolvimento futuro um modelo neural onde o sinal de entrada será função da tensão e da freqüência da carga.

CAPÍTULO III

FATORES SIGNIFICATIVOS NOS MODELOS DE CARGA ELÉTRICA

Muitas pessoas são bastante educadas para não falar com a boca cheia, porém não se preocupam em faze-lo com a cabeça oca.

Orson Welles
1915-1985

III.1 - INTRODUÇÃO

Como já amplamente comentado, a composição exata da carga elétrica é difícil de se conseguir, devido a vários fatores relacionados aos seus componentes (motores, compressores, fornos, iluminação, aquecimento, refrigeração, equipamentos eletrônicos, etc), a sua classe (industriais, residenciais, públicas, agrícolas, etc), aos tipos de dispositivos componentes (tamanho, simetria, permanência em funcionamento, ciclo de funcionamento, etc) e a outros fatores (estilo de vida dos consumidores, estações do ano, condições climáticas, estado da economia, etc).

Por isso um modelo único de carga elétrica que possa representar um determinado barramento além de ser impossível de se obter apresentará baixa precisão quando de sua utilização. A idéia é se obter mais de um modelo de carga para cada barramento e se utilizar um ou outro modelo quando algumas grandezas corresponderem aquelas utilizadas quando de sua obtenção.

Neste capítulo serão analisados dois fatores que permitirão aumentar a robustez de um modelo que são:

- agrupamento da carga
- tratamento do comportamento caótico da carga elétrica

III.2 - AGRUPAMENTO DA CARGA

A carga elétrica apresenta diferentes composições através do tempo. Portanto, para aumentar o desempenho do modelo de carga é recomendável estimar mais do que um modelo para cada barramento de carga. A idéia é separar os sinais de entrada e saída que apresentam comportamentos similares, provavelmente associados com as mesmas composições de carga, de tal modo a diminuir a extensão da não linearidade que deveria ser representado caso um único modelo de carga fosse representado. Este

agrupamento classifica os dados de entrada em grupos similares de carga histórica, possibilitando produzir um modelo mais robusto.

Uma RNA tipo ART (Adaptive Resonance Theory) [Carpenter, 1987; Pao, 1989] pode ser utilizada para a tarefa de agrupamento. Ela pode ser empregada porque não é necessário pré-especificar o número de grupos. Um modelo de carga para cada grupo é criado após a divisão da série de distúrbios relacionados com o barramento de interesse.

Os distúrbios de tensão e/ou freqüência e as respectivas variações de carga podem ser representadas por pontos em um espaço multi-dimensional. Por exemplo:

$$\underline{x} = (P(k), P(k-1), P(k-2), \ldots , f(k),$$

$$f(k-1), f(k-2), \ldots , V(k), V(k-1), V(k-2), \ldots)$$

Processos para encontrar grupos de pontos similares são conhecidos como mecanismos de aprendizado não supervisionados. No aprendizado não supervisionado o processo classificatório não depende de nenhuma informação a priori. Tais processos tentam identificar protótipos ou exemplares que podem servir como os melhores representantes de cada grupo. O protótipo pode ser apenas um ponto definido para a medida do distúrbio ou o centro geométrico de um grupo.

Os algoritmos derivados para a tarefa de agrupamento são baseados em alguma medida de similaridade (métrica). A medida de similaridade é usualmente dada em forma numérica para indicar o grau de semelhança ou de associação natural entre os padrões de um grupo, entre um padrão e um grupo de padrões ou entre grupos de padrões. É esperado que o grau de semelhança entre os padrões pertencentes ao mesmo grupo seja elevado. Muitas funções diferentes têm sido sugeridas como medidas de similaridade, sendo as mais comuns as descritas a seguir:

- distância difusa (fuzzy);
- distância Euclidiana;
- distância de Mahalanobis;
- coeficiente de Tanimoto;
- etc.

O agrupamento pode ser feito conhecendo-se ou não o número de grupos antecipadamente. Quando o número de grupos é desconhecido, como é o caso da carga elétrica, tenta-se obter uma estimativa do número e da localização dos grupos, o que consiste naturalmente no agrupamento dos padrões. Existem vários processos desenvolvidos para esta tarefa podendo-se citar o algoritmo de Batchelor e Wilkins, a classificação do vizinho mais próximo e construção de grupo de amostras adaptativos baseados em métodos heurísticos.

A métrica usada neste trabalho é baseada na distância Euclidiana, ou seja, o algoritmo utilizado neste tese irá construir os grupos usando esta medida. O protótipo do primeiro grupo é escolhido arbitrariamente (um exemplar qualquer). Uma vez que o protótipo está escolhido, tenta-se agrupar os demais exemplares a este grupo se a distância do exemplar ao protótipo for menor que um parâmetro de vigilância previamente escolhido. Se não for forme um novo grupo e então reavalie todos os exemplares para ver se eles não mudam de grupo. Quando o exemplar é alocado em um determinado grupo deve-se reavaliar o protótipo do mesmo para aproximá-lo das amostras deste grupo. O algoritmo está descrito passo a passo a seguir:

Passo 1
No início do processo de treinamento não existem unidades ativadas na camada de saída.

a) Escolha o parâmetro de vigilância ρ. Este parâmetro influi diretamente no número de grupos que serão criados.

b) Escolha o primeiro padrão de entrada como o protótipo do primeiro grupo.

Passo 2
Execute as iterações até que nenhum dos exemplares de treinamento cause qualquer variação no conjunto de protótipos.

a) escolha um exemplar de treinamento $\underline{x}^i$ em ordem cíclica.

b) ache o protótipo P_j que apresente a menor distância d do exemplar de treinamento $\underline{x}^i$.

c) teste se o protótipo P_j é similar ao exemplar $\underline{x}^i$:

se $d < \rho$ então:

– o exemplar $\underline{x}^i$ pertence ao grupo representado pelo protótipo P_j.

– modifique P_j para que este se aproxime do exemplar $\underline{x}^i$. O protótipo P_j pode ser escolhido de duas maneiras:

– através de um exemplar do grupo (j) que melhor represente o grupo.

- através da obtenção de um exemplar "virtual" que se situa no centro geométrico do grupo (j).

caso contrário:

- o exemplar $\underline{x}^i$ não pertence a qualquer grupo existente.

- crie um novo grupo e o protótipo deste grupo será o exemplar de treinamento $\underline{x}^i$.

d) retorne ao Passo 2.

Este algoritmo é simples, eficiente e requer um mínimo de computação, principalmente em termos de memória pois as amostras são processadas sequencialmente sem necessidade de serem armazenadas. Pode-se observar que a ordem de processamento dos padrões influi nos protótipos e no número de grupos criados. As figuras III.1 e III.2 ilustram a aplicação do algoritmo descrito acima. Para efeitos de visualização foram considerados os padrões representados em um espaço bidimensional.

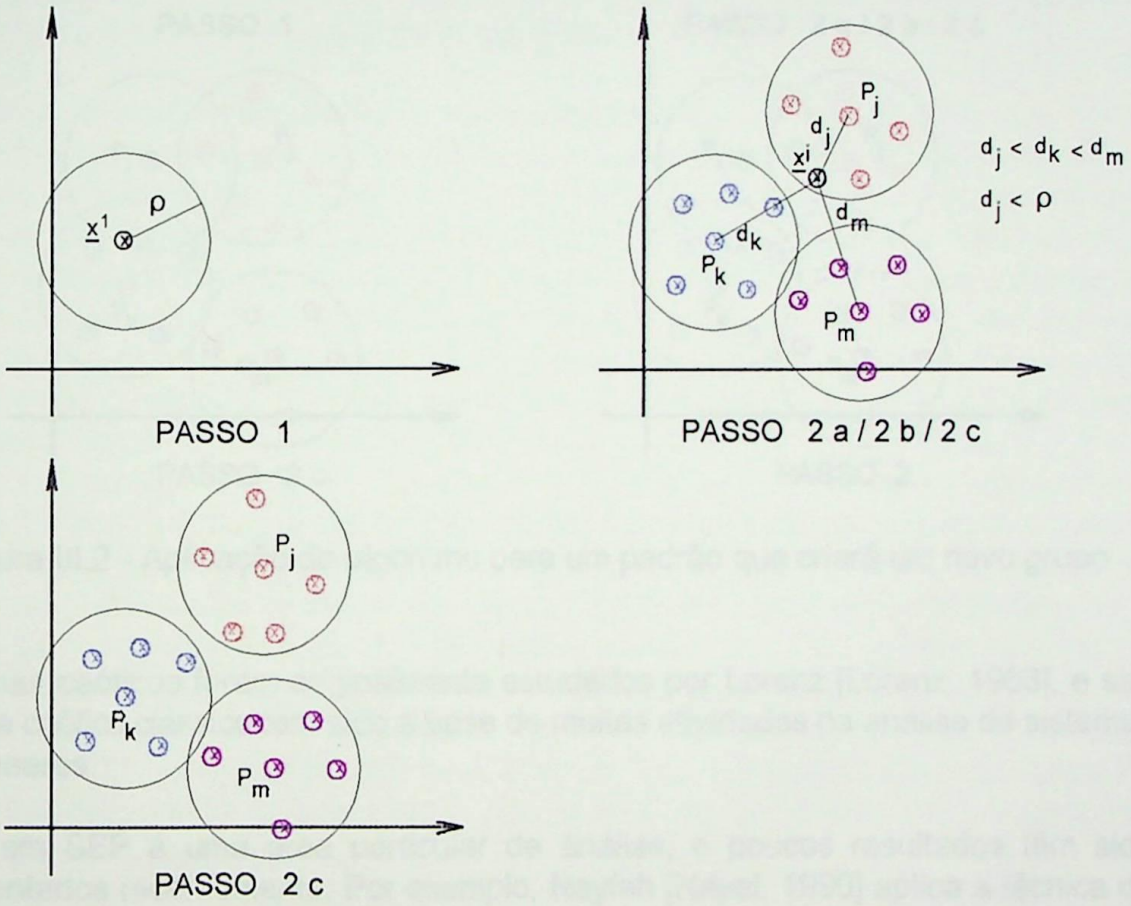


Figura III.1 - Aplicação do algoritmo para um padrão que pertencerá a um grupo existente

III.3 - MODELO DE CARGA E COMPORTAMENTO CAÓTICO

Nos últimos 15 anos o estudo de fenômenos não lineares que ocorrem na natureza teve grande desenvolvimento e com isso, físicos, químicos, biólogos, astrônomos, economistas, etc, criaram um novo enfoque para tratar a complexidade da natureza. Surgiu então uma nova ciência, denominada caos, permitindo que se veja ordem e padrão onde antes só se tinha observado a aleatoriedade, a irregularidade, a imprevisibilidade, ou seja, onde só se via o caótico [Gleick, 1990].

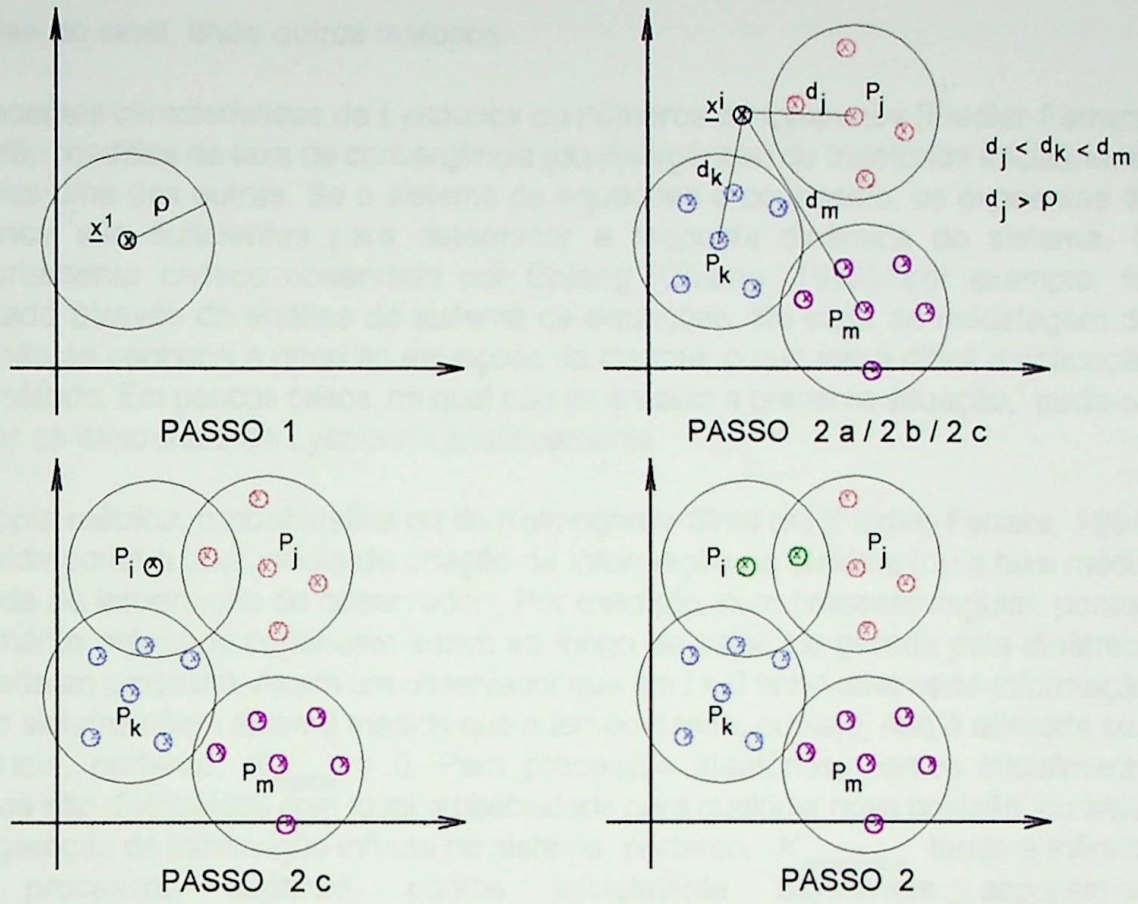


Figura III.2 - Aplicação do algoritmo para um padrão que criará um novo grupo

Sistemas caóticos foram originalmente estudados por Lorenz [Lorenz, 1963], e seu sistema caótico clássico tem sido a base de muitas atividades na análise de sistemas não lineares.

Caos em SEP é uma área particular de análise, e poucos resultados têm sido apresentados recentemente. Por exemplo, Nayfeh [Nayef, 1990] aplica a técnica de perturbação para analisar o caos em Sistemas de Potência, enquanto Chiang [Chiang, 1993] calcula os expoentes de Lyapunov associados a um sistema de duas barras.

As características dos modelos de carga existentes permitem obter resultados de acordo com a precisão requerida. Por exemplo, Cañizares [Cañizares, 1995] mostra que o modelo clássico ZIP de carga é suficiente para a análise do fenômeno do colapso de tensão. Este modelo de carga, entretanto, pode não produzir resultados precisos se a carga apresentar um comportamento caótico.

A idéia então é separar os sinais de entrada e saída da carga elétrica que apresentam comportamentos caóticos e não-caóticos de modo a tentar associar um modelo a cada um desses comportamentos.

Para analisar o comportamento caótico da trajetória da carga elétrica pode ser utilizado os expoentes característicos de Lyapunov, a entropia de Kolmogorov-Sinai,

a análise do sinal, entre outros métodos.

Os expoentes característicos de Lyapunov ou números de Lyapunov [Fiedler-Ferrara, 1994] são medidas da taxa de convergência (ou divergência) de trajetórias inicialmente próximas uma das outras. Se o sistema de equações é conhecido, os expoentes de Lyapunov são suficientes para determinar a resposta dinâmica do sistema. O comportamento caótico observado por Chiang [Chiang, 1993], por exemplo, foi detectado através da análise do sistema de equações. No caso da modelagem de carga não se conhece a priori as equações da mesma, o que torna difícil a aplicação deste método. Em poucos casos, na qual não se encaixa a presente situação, pode-se calcular os expoentes de Lyapunov analiticamente.

A entropia métrica, probabilística ou de Kolmogorov-Sinai (K) [Fiedler-Ferrara, 1994] é definida como a taxa média de criação de informação no sistema (ou a taxa média de perda de informação do observador). Por exemplo, num processo regular, pontos inicialmente próximos continuam assim ao longo da trajetória gerada pela dinâmica associada ao processo. Assim um observador que em $t = 0$ tinha uma certa informação sobre o sistema não a altera à medida que o tempo passa, ou seja, não é alterada sua ignorância, portanto, $K_{regular} = 0$. Para processos aleatórios, pontos inicialmente próximos são distribuídos com igual probabilidade para qualquer nova posição, ou seja, existe geração de informação infinita no sistema, portanto, $K_{estocástico}$ tende a infinito. Para processos caóticos, pontos inicialmente adjacentes separam-se exponencialmente à medida que o tempo passa. Com isso a informação do observador diminui, ou seja, sua ignorância aumenta. Neste caso $K_{caótico}$ é positivo e diferente de zero. Apesar dos pontos se separarem exponencialmente, os mesmos não tendem para infinito, pois o processo caótico é fechado no estado de fase, ou seja, quando se expande numa direção se retrai em outra. Logo, a existência de K positivo e finito é a condição suficiente para a existência de caos. De qualquer modo, a aplicação deste método é difícil, pois a obtenção de K envolve o conhecimento dos expoentes de Lyapunov que, como já comentado, não é fácil de ser obtido para o caso da modelagem da carga elétrica.

A análise caótica através da medida do sinal é descrito por Bergé [1984] através de dois métodos: função de autocorrelação e espectro de potência.

A função de autocorrelação Φ_m do sinal $x(t) = \{x_j\}$ é um bom indicador e será usado neste trabalho.

A função de autocorrelação é definida por:

$$\Phi_m = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_j \, x_{j+m}$$

onde $\Phi_m = \Phi_m(t) = \Phi(m \Delta t)$. Esta função representa a média do produto do sinal $x(t)$ nos instantes t e $t + m\Delta t$ e mostra a dependência do sinal no instante t em relação aos seus valores anteriores. Neste trabalho, o sinal $x(t)$ é dado pelos valores medidos de potências ativa e reativa.

O espectro de potência, definido como a transformada de Fourier da função de autocorrelação, também pode ser usado para os mesmos propósitos.

A função de autocorrelação acima pode ser usada para medir um sinal irregular da seguinte forma:

- se seu valor for diferente de zero quando $t \rightarrow \infty$, $x(t)$ é periódico ou quase-periódico, isto é, não caótico, já que um sinal no instante t é fortemente correlacionado com um sinal no instante $t + T$, onde T é o período de análise.

- se $\Phi_m \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$, isto é, a dependência do sinal em relação aos seus valores anteriores desaparece quando o tempo aumenta, o sistema é caótico. Uma função de autocorrelação fortemente amortecida caracteriza um comportamento caótico.

A figura III.3 resume os possíveis casos identificados pela função de autocorrelação.

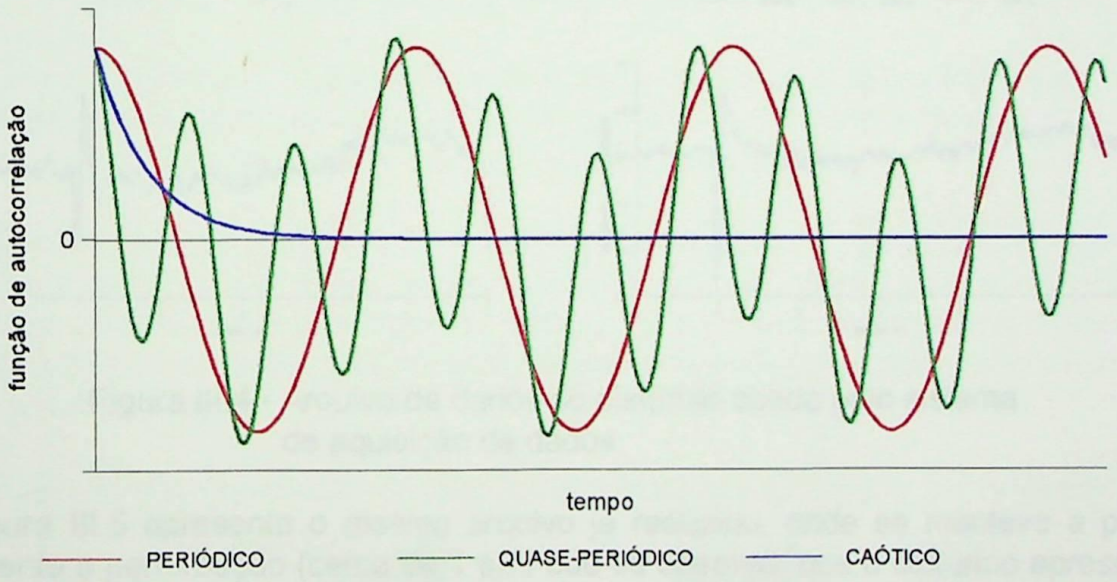


Figura III.3 - Funções de autocorrelação

III.4 - APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AGRUPAMENTO DE CARGA PROPOSTO AOS DADOS DE CARGA COLETADOS

Os dados utilizados a seguir e que serão também usados na obtenção dos modelos de carga foram coletados de um barramento de uma subestação em 138 kV do Sistema Elétrico Brasileiro a qual alimenta importantes consumidores industriais (siderurgia, mineração e química).

O sistema de aquisição de dados utilizado registra os valores de hora, tensão,

freqüência e potência ativa e reativa nas situações de pré e pós-distúrbios, armazenando os mesmos em arquivos. O período de aquisição dos dados é de 8,3 ms. Estes arquivos de dados são posteriormente manipulados para retirar dos mesmos diversos pontos anteriores e posteriores aos distúrbios que foram registrados (para que se tenha somente os distúrbios), de modo que os dados sejam referentes a dinâmica da carga.

A figura III.4 ilustra um dos arquivos como obtido pelo sistema de aquisição de dados (6 s de registro do distúrbio). A tensão é registrada nas três fases.

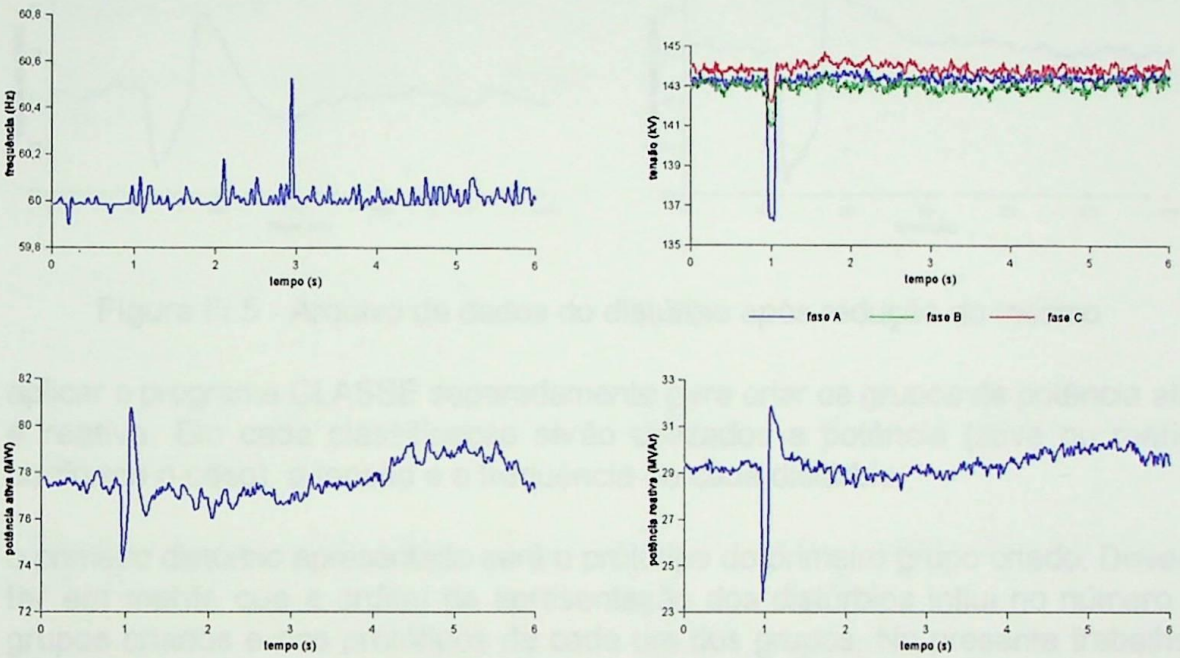


Figura III.4 - Arquivo de dados do distúrbio obtido pelo sistema de aquisição de dados

A figura III.5 apresenta o mesmo arquivo já reduzido, onde se manteve a parte referente a perturbação (cerca de 1 s). Pode-se observar que o distúrbio apresenta uma oscilação de tensão e uma de freqüência. A oscilação de tensão foi acompanhada por oscilações de potência ativa e reativa. Já a oscilação de freqüência não acarretou oscilações de potência. A tensão correspondente é a média dos valores das três fases.

Através do sistema de aquisição de dados foram obtidos 58 registros de distúrbios. Após a análise dos mesmos foram eliminados todos aqueles que apresentavam oscilações de tensão menores que 2,5% entre seu valor máximo e mínimo durante a perturbação. Também foram eliminados todos os arquivos que não correspondiam propriamente a uma perturbação no sistema mas, por exemplo, a uma entrada ou saída de carga ou a um degrau de tensão no barramento. Após esta análise restaram 35 arquivos que serão utilizados para os estudos desenvolvidos neste trabalho.

Para aplicação do algoritmo de agrupamento de padrões em classes de comportamento similares, apresentado no item III.2, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C, denominados CLASSE. Deve-se observar o seguinte:

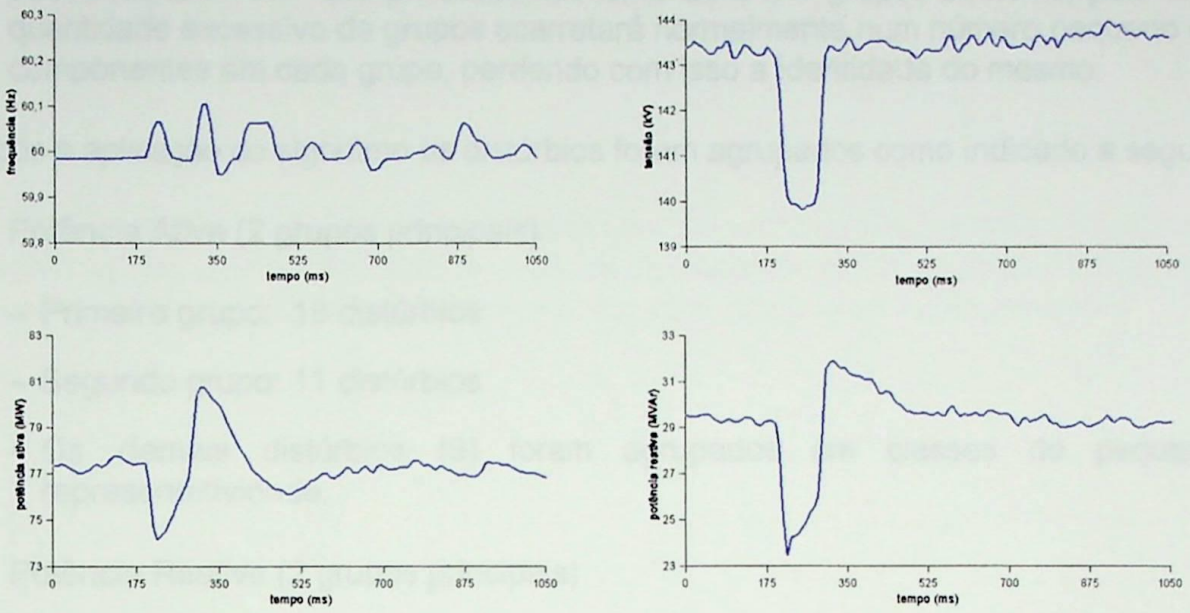


Figura III.5 - Arquivo de dados do distúrbio após redução do mesmo

- aplicar o programa CLASSE separadamente para criar os grupos de potência ativa e reativa. Em cada classificação serão utilizados a potência (ativa ou reativa, conforme o caso), a tensão e a freqüência de cada distúrbio.

- o primeiro distúrbio apresentado será o protótipo do primeiro grupo criado. Deve-se ter em mente que a ordem de apresentação dos distúrbios influi no número de grupos criados e nos protótipos de cada um dos grupos. No presente trabalho a ordem de apresentação dos distúrbios não influenciou significativamente no número de grupos criados.

- a distância euclidiana entre o distúrbio *i* e o protótipo de um grupo é dada por:

$$d_i = \sum_{k=1}^{n_{padrões}} (x_k^i - x_k^{protótipo})^2$$

- como os arquivos de dados contendo os valores de *P*, *Q*, *V* e *f* para cada um dos distúrbios são grandezas de dimensões diferentes, freqüência (em torno de 60 Hz), tensão (em torno de 138 kV), potência (milhares de kW e kVAr) as mesmas serão normalizadas:

$$x_{normalizado} = \frac{x_{não\ normalizado} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

De cada distúrbio foram selecionados $n_{padrões}$= 50 (em torno de 420 ms) para representar o mesmo.

- o parâmetro de vigilância ρ determinará o número de grupos resultante. Quanto menor o parâmetro de vigilância mais grupos serão criados e vice-versa. Foi

escolhido um valor que produzirá em torno de 3 a 4 grupos somente, pois uma quantidade excessiva de grupos acarretará normalmente num número pequeno de componentes em cada grupo, perdendo com isso a identidade do mesmo.

Após a aplicação do algoritmo os distúrbios foram agrupados como indicado a seguir:

- Potência Ativa (2 grupos principais)
  - Primeiro grupo: 18 distúrbios
  - Segundo grupo: 11 distúrbios
  - Os demais distúrbios (6) foram agrupados em classes de pequena representatividade.
- Potência Reativa (2 grupos principais)
  - Primeiro grupo: 13 distúrbios
  - Segundo grupo: 16 distúrbios
  - Os demais distúrbios (6) foram agrupados em classes de pequena representatividade.

Os grupos criados acima serão utilizados posteriormente quando da obtenção dos modelos de carga.

III.5 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TRAJETÓRIA DA CARGA ELÉTRICA UTILIZANDO A FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO DA MESMA

Com o arquivo de dados de cada um dos distúrbios selecionados no item anterior (29 arquivos resultantes do agrupamento aplicado) pode-se obter a função de autocorrelação para a potência ativa e reativa, de cada um desses distúrbios, e com isso determinar o comportamento das trajetórias dessas potências de acordo com o desenvolvimento feito no item III.3.

Os resultados obtidos foram:

- Potência Ativa
  - Caótico: 7 distúrbios
  - Não Caótico: 22 distúrbios.

- Potência Reativa
  - Caótico: 4 distúrbios
  - Não Caótico: 25 distúrbios.

As figuras III.6 e III.7 ilustram dois distúrbios de potência ativa e dois de potência reativa no qual o comportamento da trajetória da mesma resultou caótica e não caótica respectivamente. São apresentadas também suas funções de autocorrelação.

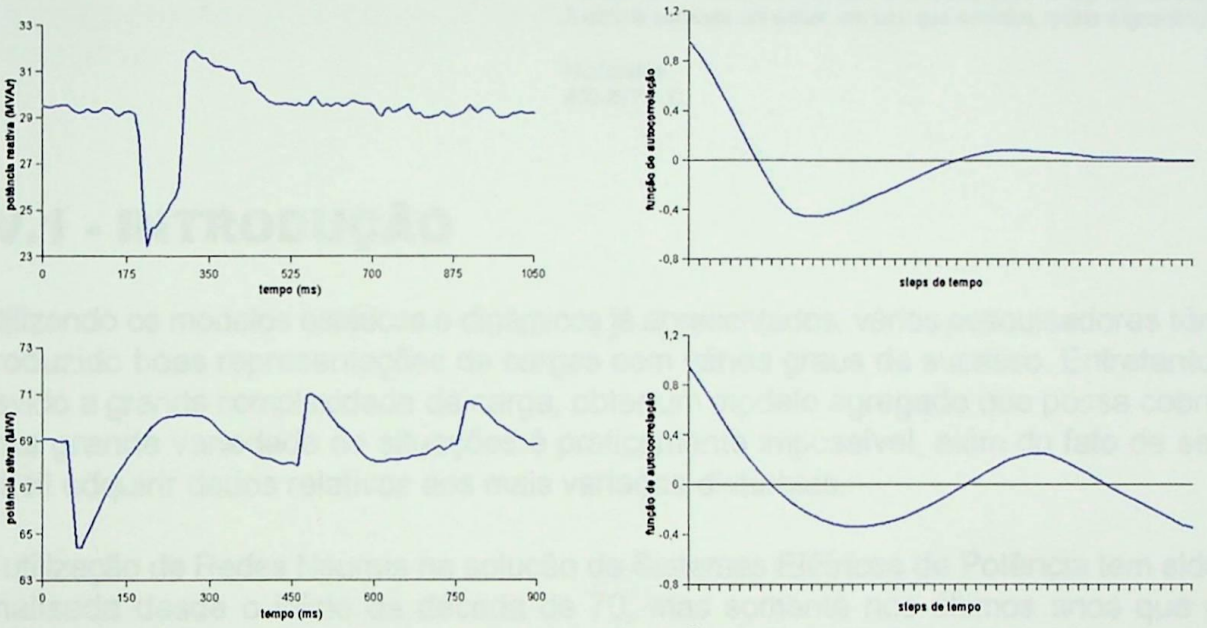


Figura III.6 - Curvas de potência ativa e respectivas curvas de autocorrelação

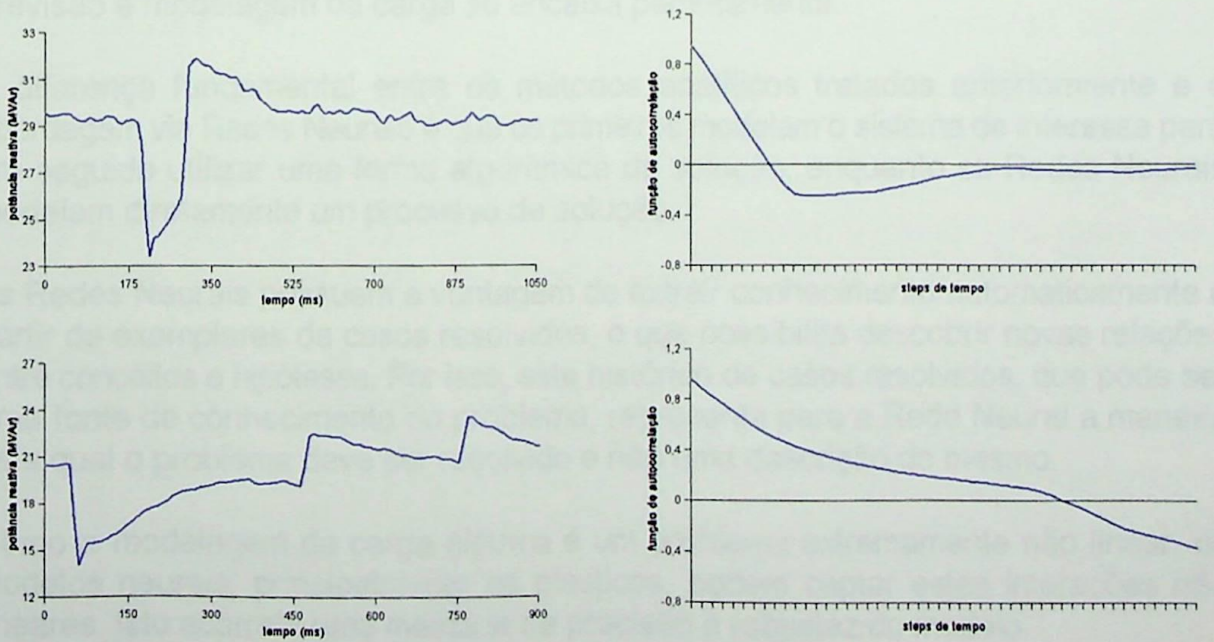


Figura III.7 - Curvas de potência reativa e respectivas curvas de autocorrelação

CAPÍTULO IV

MODELO DINÂMICO DE CARGA BASEADO EM REDE POLINOMIAL FUNCIONAL

Há verdadeiramente duas coisas diferentes: saber e crer que se sabe.
A ciência consiste em saber; em crer que se sabe, reside a ignorância.

Hipócrates
460-377 A.C.

IV.1 - INTRODUÇÃO

Utilizando os modelos estáticos e dinâmicos já apresentados, vários pesquisadores têm produzido boas representações de cargas com vários graus de sucesso. Entretanto, devido a grande complexidade da carga, obter um modelo agregado que possa cobrir uma grande variedade de situações é praticamente impossível, além do fato de ser difícil adquirir dados relativos aos mais variados distúrbios.

A utilização de Redes Neurais na solução de Sistemas Elétricos de Potência tem sido analisada desde o início da década de 70, mas somente nos últimos anos que o interesse nestas redes tomou um grande impulso. As Redes Neurais têm sido propostas para a solução de problemas que não podem ser tratados apropriadamente por métodos analíticos ou por sistemas especialistas. Neste conceito o problema de previsão e modelagem de carga se encaixa perfeitamente.

A diferença fundamental entre os métodos analíticos tratados anteriormente e a abordagem via Redes Neurais é que os primeiros modelam o sistema de interesse para em seguida utilizar uma forma algorítmica de solução, enquanto as Redes Neurais modelam diretamente um processo de solução.

As Redes Neurais possuem a vantagem de extrair conhecimento automaticamente a partir de exemplares de casos resolvidos, o que possibilita descobrir novas relações entre conceitos e hipóteses. Por isso, este histórico de casos resolvidos, que pode ser uma fonte de conhecimento do problema, representa para a Rede Neural a maneira pela qual o problema deve ser resolvido e não uma descrição do mesmo.

Como a modelagem da carga elétrica é um problema extremamente não linear, os modelos neurais, principalmente os plásticos, podem captar estas interações não lineares. Isto acarreta uma melhoria na precisão e robustez do modelo.

IV.2 - REDE FUNCIONAL

O conceito de rede funcional ("functional-link net") [Pao, 1989] é atuar em um elemento do padrão de entrada (ou no próprio padrão) através de uma série de funções linearmente independentes, escolhendo estas funções tendo o elemento (ou o padrão) como argumento. Nenhuma nova informação será inserida no processo, apenas a representação dos padrões de entrada será aumentada.

A figura IV.1 ilustra esquematicamente a rede funcional, onde a ativação do nó *(k)* oferece a possibilidade que os processos $f_1(y_k)$, . . . , $f_i(y_k)$, . . . , $f_n(y_k)$ possam ser ativados.

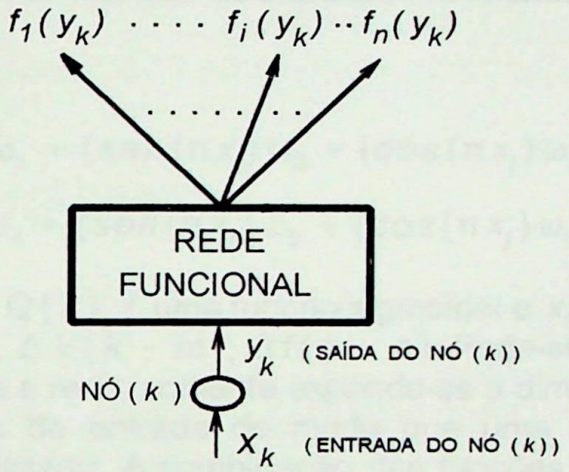


Figura IV.1 - Ilustração esquemática da rede funcional

Existem dois modelos de rede funcional, que são o modelo de expansão funcional ("functional expansion model") e o modelo de produtos ("outer product model" ou "tensor model"), podendo existir ainda a combinação dos dois. A grande vantagem deste tipo de rede é a obtenção de uma arquitetura simplificada, pois a mesma se baseia no conceito de funções ortogonais, combinação de produtos das entradas e rede perceptron com duas camadas (sem camadas internas). Para o seu processo de treinamento pode ser utilizada a regra delta padrão ao invés da regra delta generalizada, aumentando com isso a velocidade de convergência significativamente.

O modelo de expansão funcional simplesmente expande o número de entradas da rede utilizando-se de funções de base ortonormais (base normalizada de funções ortogonais), como, por exemplo, as funções seno e cosseno. Neste modelo a rede funcional atua em cada nó isoladamente. Podem ser utilizadas funções idênticas ou diferentes para cada nó no padrão de entrada. A Figura IV.2 exemplifica um modelo deste tipo onde somente o uso de $sen(\pi x)$ e $cos(\pi x)$ foram necessários, mas dependendo do problema pode ser necessário dimensões maiores, como por exemplo, $sen(2\pi x)$, $cos(2\pi x)$, $sen(3\pi x)$, $cos(3\pi x)$, etc.

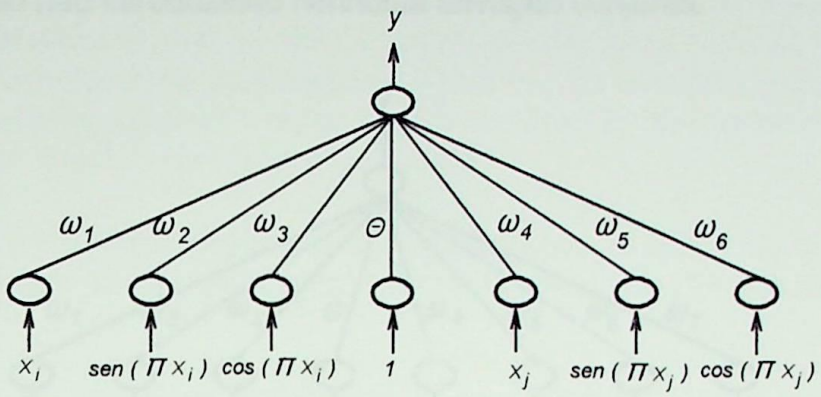


Figura IV.2 - Modelo de expansão funcional

Nesta figura tem-se:

$$y = f\left((x_i)\,\omega_1 + (sen(\pi x_i)\,\omega_2 + (cos(\pi x_i)\,\omega_3 + (x_j)\,\omega_4 + (sen(\pi x_j)\,\omega_5 + (cos(\pi x_j)\,\omega_6 + \theta \right)$$

representando $\Delta P(k)$ ou $\Delta Q(k)$, f uma função sigmoidal e x_i e x_j representando $\Delta P(k-\ell)$ ou $\Delta Q(k-\ell)$, $\Delta V(k-m)$, $\Delta f(k-n)$. Pode-se notar que nenhuma informação nova é adicionada a rede, somente expande-se a dimensão do espaço de representação dos padrões de entrada de modo que uma rede sem camadas intermediárias possa ser utilizada. A combinação das funções ortogonais é obtida através de tentativa e erro, a fim de produzir o mapeamento desejado.

O modelo de produtos também chamado de modelo tensor é um caso especial do modelo de expansão funcional. Ele simplesmente usa uma combinação dos padrões de entrada para produzir o mapeamento desejado. Cada elemento do padrão de entrada combina com os demais componentes do mesmo (inclusive ele próprio e aqueles expandidos) para produzir uma nova variável que é o produto das mesmas, ou seja:

$$\{x_i\} \Rightarrow \{x_i, x_i x_j\}_{j \geq i} \Rightarrow \{x_i, x_i x_j, x_i x_j x_k\}_{k \geq j \geq i} \Rightarrow \ldots$$

A dimensão dessa expansão também é obtida através de tentativa e erro. Na Figura IV.3, um exemplo de rede funcional utilizando este modelo é mostrada.

Pode-se observar que para 3 componentes no padrão de entrada resultaram 8 componentes após aplicação do modelo de produtos. Com 4 componentes na entrada se obtém 15 componentes na saída, com 5 obtém-se 26, com 10 obtém-se 156, etc. crescendo rapidamente o espaço de representação dos padrões de entrada.

O modelo de produtos introduz termos de alta ordem no espaço de representação aumentado dos padrões, sendo que alguns desses termos representam ativações

conjuntas. Já o modelo de expansão funcional somente amplia a dimensão do espaço de representação não introduzindo nenhuma ativação conjunta.

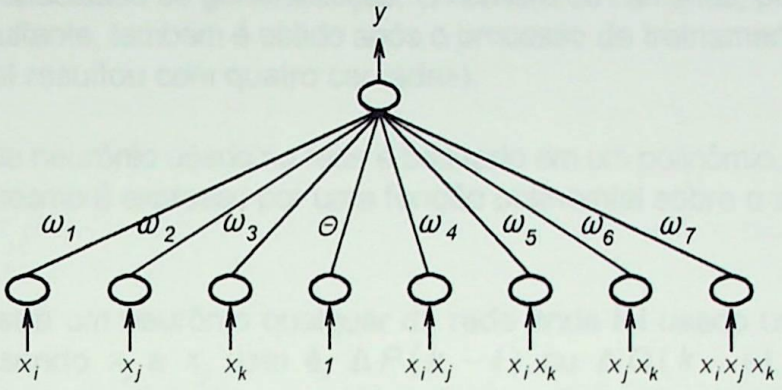


Figura IV.3 - Modelo de produtos

IV.3 - REDE POLINOMIAL

Como já comentado, a natureza aleatória da carga elétrica torna a sua composição de representação muito difícil. A composição exata da carga é difícil de ser estimada dependendo de vários fatores. Por isso torna-se uma tarefa árdua estabelecer um modelo onde já se conhece a priori a estrutura do mesmo. Neste caso, um modelo cuja estrutura seja formada durante o processo de treinamento, bem como a obtenção de seus parâmetros mostra ser mais adequado. O conceito de rede polinomial caminha nesta direção.

A estrutura da rede polinomial é formada ao longo do treinamento (modelo não paramétrico), partindo da camada de entrada. A função de ativação do neurônio é baseado em um polinômio elementar de ordem qualquer. A Figura IV.4 ilustra uma rede polinomial constando de 7 entradas onde foram selecionadas apenas 5 das entradas (as entradas x_2 e x_6 não foram utilizadas).

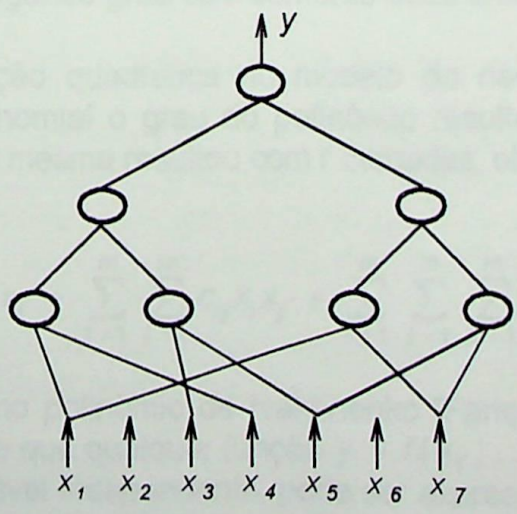


Figura IV.4 - Rede polinomial

Como já comentado esta capacidade de seleção automática é útil na aplicação da rede quando a estrutura da carga não é conhecida. Como o algoritmo de treinamento seleciona as entradas utilizadas na rede, é evitado o superdimensionamento da mesma e perda de sua capacidade de generalização. O número de camadas, portanto a ordem do polinômio resultante, também é obtido após o processo de treinamento (no exemplo a rede polinomial resultou com quatro camadas).

O modelo de cada neurônio usado na rede é baseado em um polinômio, o que significa que a saída do mesmo é expresso por uma função polinomial sobre o seu conjunto de entradas.

A figura IV.5 ilustra um neurônio qualquer da rede onde foi usado um polinômio do segundo grau, sendo x_i e x_j (isto é, $\Delta P(k-\ell)$ ou $\Delta Q(k-\ell)$, $\Delta V(k-m)$, $\Delta f(k-n)$ para a camada zero e as saídas dos neurônios da camada anterior para as demais camadas) as entradas, A, B, C, D, E e F os coeficientes do polinômio, que equivalem aos pesos, e y ($\Delta P(k)$ ou $\Delta Q(k)$) a saída do neurônio.

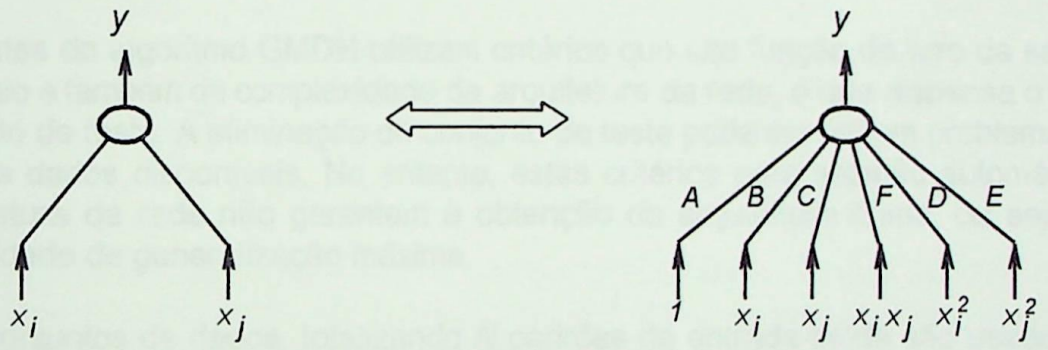


Figura IV.5 - Modelo de neurônio usado pela rede polinomial
onde $y = A + Bx_i + Cx_j + Dx_i^2 + Ex_j^2 + Fx_i x_j$

Podem ser utilizados no modelo do neurônio outros polinômios, com graus mais elevados, que podem representar funções não lineares mais complexas. Do mesmo modo pode-se ter mais entradas no neurônio do que as duas ilustradas acima. Mas devido ao grande crescimento do número de termos no neurônio, normalmente são usados polinômios de segundo grau com somente duas entradas.

Sendo usada uma função quadrática no modelo do neurônio, a cada camada construída da rede polinomial o grau do polinômio resultante é dobrado. Após o treinamento da rede, se a mesma resultou com r camadas, obtém-se um polinômio de grau 2r da forma:

$$y = a + \sum_{i=1}^{m} b_i x_i + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m} c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} d_{ijk} x_i x_j x_k + \ldots$$

o qual é conhecido como polinômio de Ivakhnenko [Farlow, 1984]. O teorema de Kolmogorov-Gabor mostra que qualquer função $y = f(x_1, \ldots, x_i, \ldots, x_m)$ contínua, onde x_i é a i-ésima variável independente, pode ser expressa pelo polinômio acima.

Para o ajuste dos coeficientes dos polinômios, pode ser utilizado o algoritmo de treinamento chamado Método de Grupo para Manipulação de Dados, ou GMDH ("Group Method of Data Handling"), desenvolvido por Ivakhnenko em 1968 [Farlow, 1984]. Este é o método utilizado neste trabalho.

Outros métodos para o ajuste dos coeficientes dos polinômios podem ser utilizados, como por exemplo, métodos de busca estocástica, como recozimento simulado e algoritmo genético [Kargupta, 1991; Tenorio, 1990].

O GMDH é um modelo plástico de Rede Neural não-realimentada de camadas justapostas, onde as camadas da rede são criadas, uma por vez, a partir da camada de entrada, por uma regra de aprendizagem heurística.

O algoritmo GMDH utiliza dois conjuntos de dados para treinar a rede polinomial, sendo um conjunto usado para o ajuste dos parâmetros dos neurônios (denominado conjunto de treinamento) e o outro para avaliar quais neurônios devem permanecer na rede e quais devem ser descartados (denominado conjunto de teste).

Variantes do algoritmo GMDH utilizam critérios que são função do erro da saída do neurônio e também da complexidade da arquitetura da rede, o que dispensa o uso do conjunto de teste. A eliminação do conjunto de teste pode ser útil em problemas com poucos dados disponíveis. No entanto, estes critérios para seleção automática da arquitetura da rede não garantem a obtenção da arquitetura ótima, ou seja, com capacidade de generalização máxima.

Dois conjuntos de dados, totalizando N padrões de entrada-saída são usados para treinamento (N_t padrões) e teste ($N - N_t$ padrões).

O processo de treinamento começa fixando a camada zero correspondente as M_0 entradas (x_i). A primeira camada é construída, considerando todas as combinações possíveis de duas dessas M_0 entradas, através da obtenção dos seis coeficientes de cada neurônio. Estes coeficientes são obtidos avaliando o mínimo erro médio quadrático sobre o conjunto de treinamento, onde a saída para cada neurônio é a saída desejada para a própria rede. O número de neurônios criados nesta camada é de $\begin{pmatrix} M_0 \\ 2 \end{pmatrix}$. Avaliando o erro médio quadrático sobre o conjunto de teste pode-se então selecionar os N_1 melhores neurônios para permanecer na camada criada, descartando os demais neurônios. O valor de N_1 é escolhido arbitrariamente, sem qualquer regra. (por exemplo, pode ser baseado na capacidade de memória do computador utilizado). Cabe observar que um neurônio descartado numa determinada camada poderia resultar em um neurônio promissor em uma camada posterior. Todo o procedimento é repetido para a construção das demais camadas da rede, sendo a entrada da camada $(p + 1)$ a saída da camada (p).

Normalmente o comportamento do erro mínimo ($r_{min}^{(p)}$) em cada camada (mínimo erro entre todos os neurônios sobre o conjunto de teste) será decrescente com o aumento

do número de camadas, até atingir um valor mínimo, na camada *(r)* a partir do qual tenderá a aumentar conforme ilustra a figura IV.6. Neste caso o processo de treinamento da rede deve terminar e a camada *(r)* é escolhida como a última da rede. A saída da rede é dada pelo neurônio i^* da camada *(r)* para o qual o seu erro é igual a $r_{min}^{(r)}$.

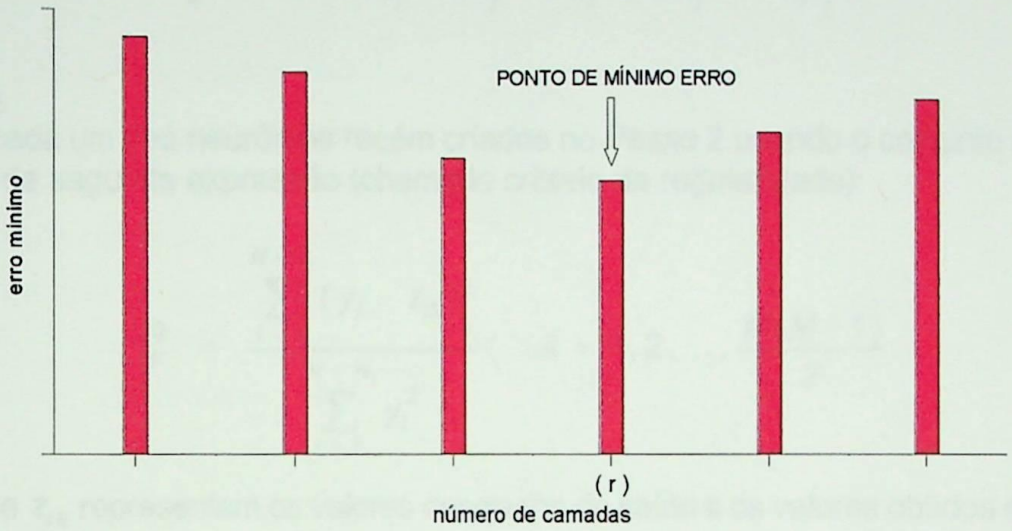


Figura IV.6 - Comportamento do erro mínimo com o crescimento do número de camadas na rede para o conjunto de teste

Finalmente são eliminados da estrutura da rede todos os neurônios que não são antecessores diretos do neurônio resultante da última camada da rede. O aspecto da rede final fica como o da rede já apresentada na figura IV.4.

O algoritmo GMDH será descrito a seguir, onde é assumido que o polinômio elementar seja de segunda ordem:

Passo 1

Fazer as combinações duas a duas de todas as *M* entradas (correspondentes a camada corrente), utilizando apenas o conjunto de treinamento, a fim de formar o seguinte sistema de equações lineares:

$$y_1 = A + Bx_{1i} + Cx_{1j} + Dx_{1i}^2 + Ex_{1j}^2 + Fx_{1i}x_{1j}$$

$$y_2 = A + Bx_{2i} + Cx_{2j} + Dx_{2i}^2 + Ex_{2j}^2 + Fx_{2i}x_{2j}$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$y_{N_t} = A + Bx_{N_t i} + Cx_{N_t j} + Dx_{N_t i}^2 + Ex_{N_t j}^2 + Fx_{N_t i}x_{N_t j}$$

Com isso tem-se $\frac{M(M-1)}{2}$ novos neurônios na nova camada da rede.

Passo 2

Estimar os coeficientes (pesos) *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, e *F* resolvendo o sistema acima (no senso dos mínimos quadrados). Então, o neurônio de saída é representado pela seguinte equação:

$$y = \hat{A} + \hat{B}x_i + \hat{C}x_j + \hat{D}x_i^2 + \hat{E}x_j^2 + \hat{F}x_ix_j$$

Passo 3

Avaliar cada um dos neurônios recém criados no Passo 2 usando o conjunto de teste através da seguinte expressão (chamado critério da regularidade):

$$r_K^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N-N_t} (y_i - z_{ik})^2}{\sum_{i=1}^{N-N_t} y_i^2}; \quad k = 1, 2, \ldots, \frac{M(M-1)}{2}$$

onde y_i e z_{ik} representam os valores desejados de saída e os valores obtidos em cada um dos $\frac{M(M-1)}{2}$ neurônios, respectivamente.

Passo 4

Ordenar os valores r_k^2. Comparar o valor mínimo com o valor r_k^2 mínimo da camada anterior:

- se o erro atual é maior que o erro anterior o processo está terminado, ou seja, o final do algoritmo é atingido. Neste caso deve-se utilizar os resultados gerados até a camada anterior.

- caso contrário, ou seja, se o erro atual é menor que o erro anterior, salvar os melhores neurônios e retornar ao Passo 1.

Deve-se lembrar que ao se criar uma nova camada, a ordem do modelo polinomial é dobrada nas variáveis de entrada x_i e x_j.

IV.4 - REDE POLINOMIAL FUNCIONAL

A dificuldade da rede funcional reside no fato de que a transformação não linear necessária (escolha das funções ortogonais) só pode ser encontrada por tentativa e erro. A rede polinomial é um modelo não-paramétrico de RNA, ou seja, não necessita de uma arquitetura pré-especificada. Entretanto, não é fácil estabelecer a ordem da função de ativação (polinômio elementar), sendo que a função quadrática dos polinômios não é adequada para resolver todos os problemas. Deve ser lembrado que a ordem do polinômio elementar afeta o desempenho da RNA [Alves da Silva, 1996].

Redes polinomiais podem apresentar um excessivo comportamento oscilatório.

A combinação desses dois conceitos produz um modelo poderoso de RNA, devido à capacidade do GMDH de seleção automática das variáveis de entrada e à expansão não linear do espaço das entradas, efetuada pelas redes funcionais. A figura IV.7 mostra este modelo de RNA.

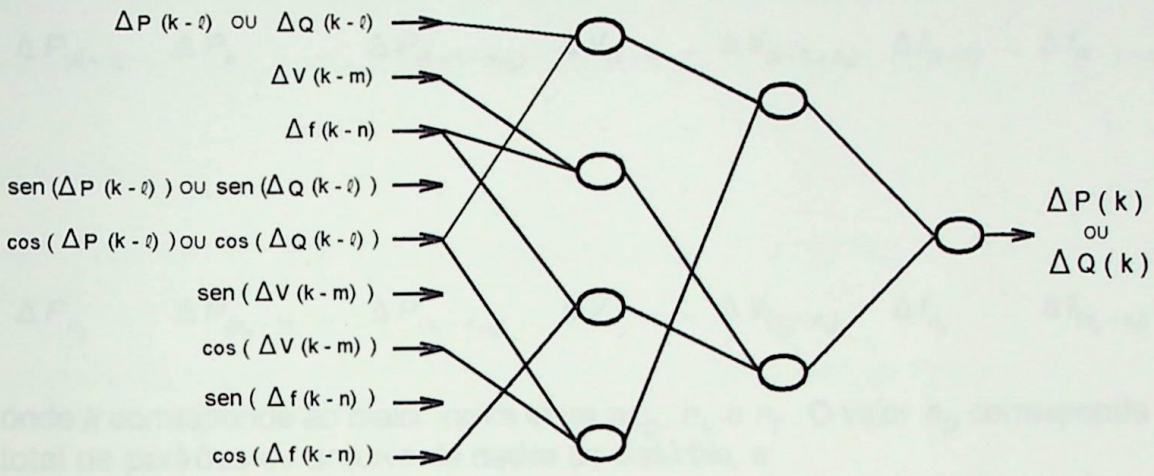


Figura IV.7 - Rede Polinomial Funcional (RPF)

As vantagens da rede proposta são:

- a arquitetura da rede é automaticamente definida pelo processo de treinamento (modelo não-paramétrico);
- não há parâmetro de aprendizagem para ser ajustado;
- não existem problemas de mínimos locais; e,
- convergência rápida.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

IV.5 - MODELO REDE POLINOMIAL FUNCIONAL (RPF)

O algoritmo para obter o modelo de carga baseado na rede polinomial funcional (RPF) está descrito a seguir:

Passo 1

- Escolher a ordem do modelo não-linear auto-regressivo exógeno (NARX) para a potência (ativa ou reativa) n_{PQ}, para a tensão n_V e para a freqüência n_f.
- Selecionar os arquivos de dados de distúrbios para treinamento e teste, constituído de medidas de potência (*P* ou *Q*), de tensão (*V*) e de freqüência (*f*).

- Com cada um dos arquivos de dados de distúrbios que serão utilizados para treinamento ou para teste, montar um arquivo com a seguinte estrutura:

saída	*entrada*								
P (*ou* Q)	P (*ou* Q)			V			f		
ΔP_k	$\Delta P_{(k-1)}$	...	$\Delta P_{(k-n_{PQ})}$	ΔV_k	...	$\Delta V_{(k-n_V)}$	Δf_k	...	$\Delta f_{(k-n_f)}$
$\Delta P_{(k+1)}$	ΔP_k	...	$\Delta P_{(k+1-n_{PQ})}$	$\Delta V_{(k+1)}$	...	$\Delta V_{(k+1-n_V)}$	$\Delta f_{(k+1)}$	...	$\Delta f_{(k+1-n_f)}$
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
ΔP_{n_p}	$\Delta P_{(n_p-1)}$	...	$\Delta P_{(n_p-n_{PQ})}$	ΔV_{n_p}	...	$\Delta V_{(n_p-n_V)}$	Δf_{n_p}	...	$\Delta f_{(n_p-n_f)}$

onde k corresponde ao maior índice entre n_{PQ}, n_V e n_f. O valor n_D corresponde ao total de padrões do arquivo de dados de distúrbio, e:

$$\Delta P_j = P_j - P_{j-1}$$

$$\Delta V_j = V_j - V_{j-1}$$

$$\Delta f_j = f_j - f_{j-1} \quad , \quad j = k, k+1, \ldots, n_D$$

Cada arquivo conterá $(n_D - k)$ padrões.

- Agrupar todos os arquivos acima em um único arquivo, denominado arquivo de treino, que será utilizado para treinamento e teste. O arquivo resultará com $(n_{PQ} + n_V + n_f + 2)$ colunas correspondente aos dados de entrada para a RPF e uma coluna correspondente aos dados de saída esperada da RPF. O número de padrões deste arquivo será dado pela soma dos padrões dos arquivos de treinamento e de teste.

- Normalizar por colunas o arquivo de treino entre os limites [-1,+1].

- Completar o arquivo de treino aplicando a função $cos(\pi x)$ a todos os valores das colunas correspondentes aos dados de entrada. Com isso o número de entradas da RPF será duplicado. Foi escolhido a função $cos(\pi x)$ para a expansão funcional por ser a mesma uma função contínua decrescente, completando dessa maneira a forma da não-linearidade produzida pelo polinômio de segundo grau. O sinal de entrada foi multiplicado por π para abranger o período da função cosseno ($\pm \pi$)

Passo 2

Aplicar o algoritmo GMDH já descrito no item anterior.

Passo 3

Após obtida a RPF correspondente ao treinamento realizado imprimir em um arquivo de saída:

- identificação das variáveis de entrada da RPF
- os coeficientes do polinômio de Ivakhnenko correspondente a RPF
- os casos testes com os valores medidos, obtidos e erros (opcional)

Observações

- no presente trabalho foram armazenados os 80 melhores neurônios de cada camada.
- no presente trabalho foi definido um limite de 7000 padrões para treinamento da RPF devido a limitação de memória do computador.

IV.6 - TESTES COM O MODELO RPF

Para os testes do modelo RPF foram modelados os barramentos da subestação em 138 kV, já apresentada neste trabalho, que são compostas de cargas predominantemente industriais.

IV.6.1 - Potência Ativa

Para os testes com a potência ativa foi utilizado o primeiro grupo de potência ativa, que é composto de 16 distúrbios, sendo escolhidos 12 para treinamento, 3 para teste (no treinamento) e 3 para validação (aplicação do modelo obtido).

O arquivo de treino, composto dos distúrbios de treinamento e teste, resultou com 1070 padrões sendo 837 para treinamento e 233 para teste.

Realizado o treinamento da RPF observou-se os seguintes erros mínimos para as camadas de neurônios apresentadas na figura IV.8.

Pode-se observar que os erros mínimos se encontram muito próximos uns dos outros, sendo escolhida como a melhor RPF aquela correspondente a uma rede com três camadas.

O tempo de processamento computacional gasto para obtenção das camadas da RPF (Pentium 166 MHz) está indicado na figura IV.9.

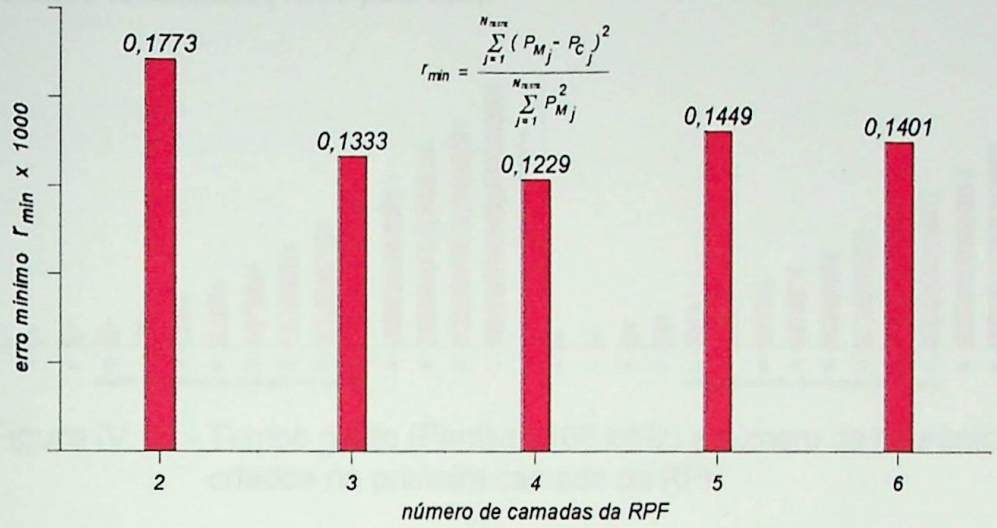


Figura IV.8 - Erro mínimo por camadas de neurônios

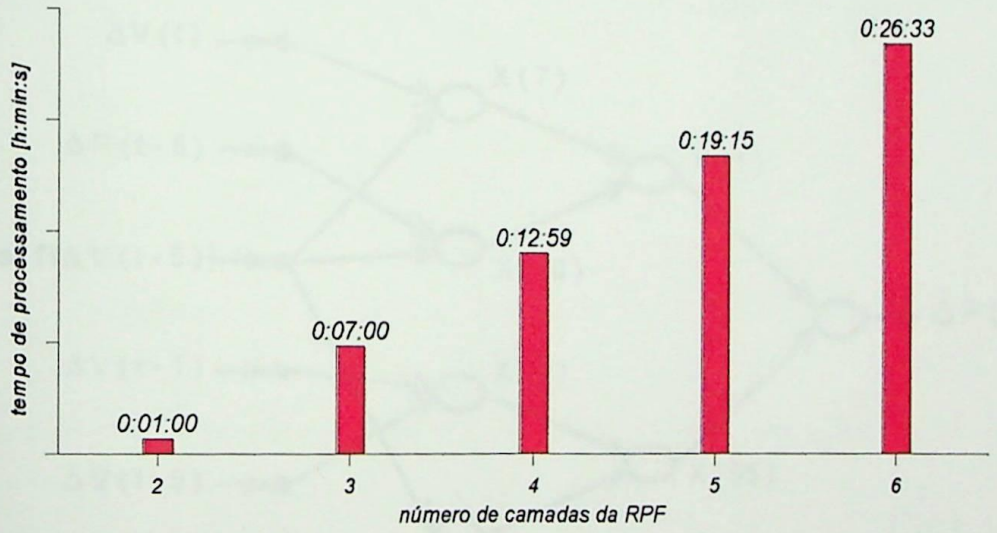


Figura IV.9 - Tempo gasto (Pentium 166 MHz) na construção das camadas da RPF

Pode-se notar que a partir da terceira camada de neurônios o tempo computacional gasto para a construção de cada nova camada aumenta relativamente muito pouco. O tempo deveria crescer exponencialmente, visto que o número de neurônios criados em cada camada é de $\binom{n_n}{2}$ onde n_n é o número de neurônios da camada anterior à camada a ser criada. No presente caso são armazenados sempre os 80 melhores neurônios em cada camada. Logo, o tempo de criação de cada nova camada é dado por uma parcela praticamente constante (criação dos neurônios) acrescido do tempo gasto para realimentar as variáveis de entrada dos neurônios desde a primeira camada, que logicamente cresce a medida que cresce o número de camadas da rede polinomial.

A fim de ilustrar o tempo gasto e o número de neurônios criados em cada camada, a figura IV.10 apresenta estes valores para a criação da primeira camada do exemplo de

potência ativa analisado (1070 padrões).

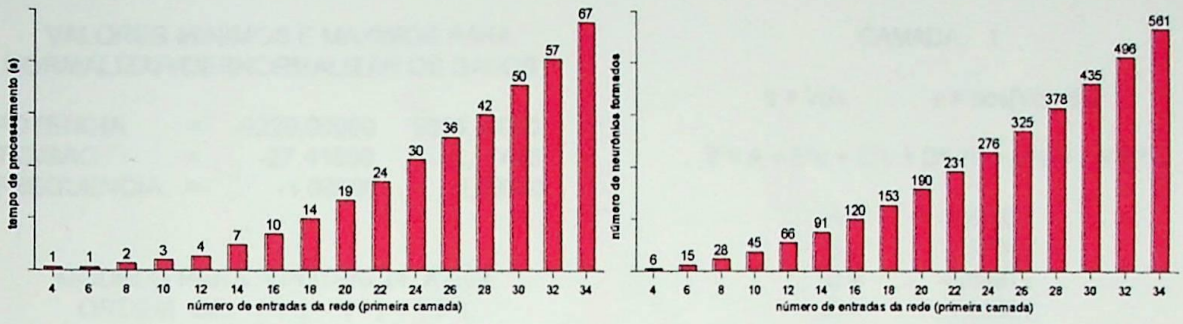


Figura IV.10 - Tempo gasto (Pentium 166 MHz) e número de neurônios criados na primeira camada da RPF

Como já comentado acima foi escolhido a RPF com quatro camadas que apresenta o menor erro. A RPF correspondente está apresentada na figura IV.11.

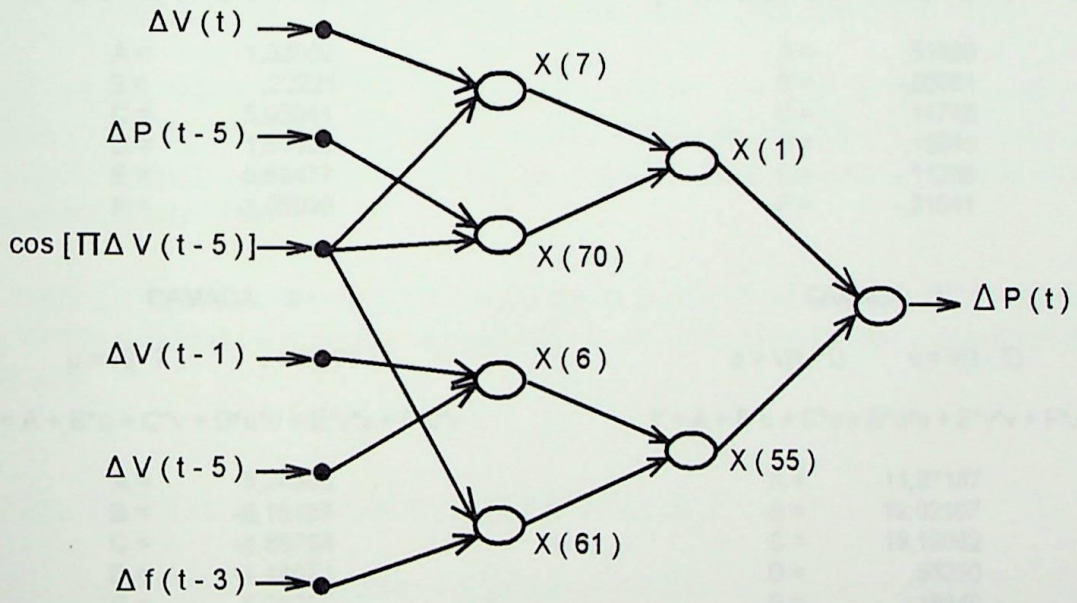


Figura IV.11 - RPF criada para o exemplo de potência ativa

O polinômio de Ivakhnenko correspondente a RPF acima está apresentado a seguir. Para cada neurônio da RPF estão indicados os pesos e as respectivas entradas, os quais permitem obter o valor do sinal de saída do mesmo.

POLINOMIO DE IVAKHNENKO

VALORES MINIMOS E MAXIMOS PARA NORMALIZAR/DESNORMALIZAR OS DADOS

POTENCIA	=	-9229,00000	9313,00000
TENSAO	=	-27,41800	18,11430
FREQUENCIA	=	-1,08800	1,02600

MODELO PARA A POTENCIA ATIVA
ORDEM DE: (V) - (f) - (P)
5 5 5

CAMADA: 3

u = X(1) v = X(55)

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	-1,32562
B =	,22221
C =	5,92041
D =	1,61430
E =	-5,53477
F =	-1,06059

CAMADA: 2

u = X(7) v = X(70)

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	3,24686
B =	-8,15187
C =	-4,86754
D =	-1,48471
E =	-5,21205
F =	21,76276

CAMADA: 2

u = X(6) v = X(61)

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	2,11517
B =	-1,57022
C =	-6,73924
D =	-3,33389
E =	1,21640
F =	12,28559

CAMADA: 1

u = V(t) v = cos[V(t - 5)]

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	-1,61824
B =	2,97244
C =	-5,64812
D =	1,01021
E =	-,02621
F =	9,58166

CAMADA: 1

u = P(t - 5) v = cos[V(t - 5)]

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	,51386
B =	-,00061
C =	,14746
D =	,15943
E =	-,11208
F =	-,01041

CAMADA: 1

u = V(t - 1) v = V(t - 5)

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	-11,07187
B =	19,02167
C =	19,19082
D =	,56250
E =	-.18840
F =	-31,92687

CAMADA: 1

u = f(t - 3) v = cos[V(t - 5)]

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	,58970
B =	-,29327
C =	,34989
D =	,34107
E =	-,05780
F =	-,51549

Os distúrbios utilizados como teste apresentaram os erros médios ilustrados na figura IV.12.

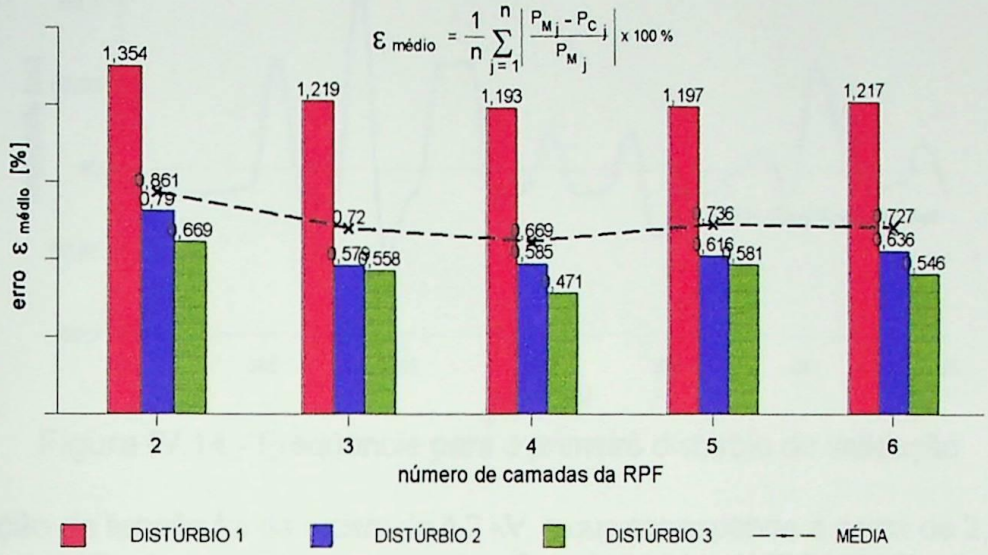


Figura IV.12 - Erro médio para os distúrbios utilizados como teste

A RPF apresentada na figura IV.11, para o primeiro grupo de potência ativa foi aplicada nos três distúrbios reservados para validação, ou seja, em distúrbios que foram classificados no mesmo grupo do modelo obtido e não utilizados nem no treinamento e nem nos testes.

Para cada um dos distúrbios de validação serão apresentados a tensão, a freqüência e a potência medidas e a potência calculada pela RPF, assim como o respectivo erro percentual.

Primeiro Distúrbio de Validação (Potência Ativa)

A tensão e a freqüência medidas estão apresentadas nas figuras IV.13 e IV.14.

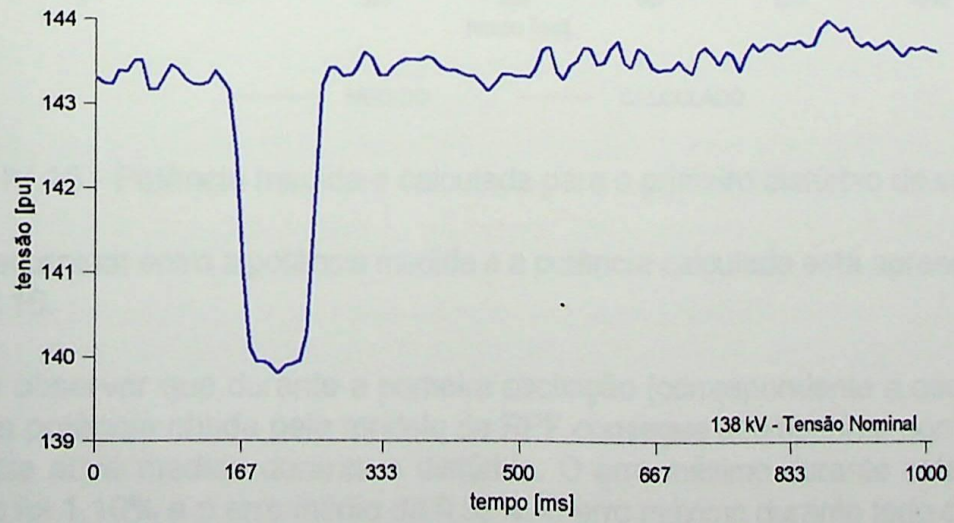


Figura IV.13 - Tensão para o primeiro distúrbio de validação

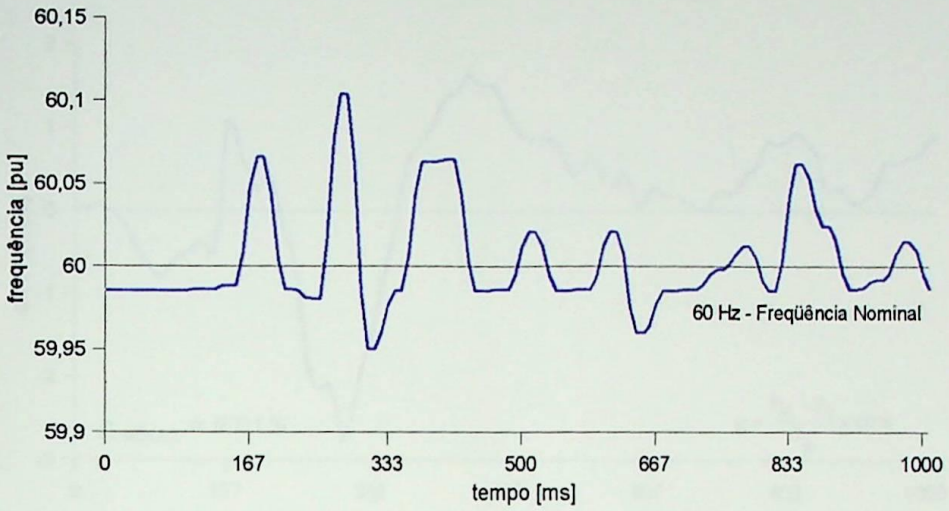


Figura IV.14 - Freqüência para o primeiro distúrbio de validação

A oscilação de tensão foi da ordem de 4,2 kV, o que corresponde a cerca de 2,9% com relação a tensão de regime, ou seja, da tensão pré-distúrbio (143,3 kV). O valor mínimo atingido pela tensão foi de 139,8 kV. A oscilação de freqüência resultou em torno de 0,2% do valor de regime, atingindo o máximo de 60,104 Hz e um mínimo de 59,976 Hz.

A figura IV.15 apresenta os valores da potência ativa medida durante o distúrbio e a calculada pela RPF.

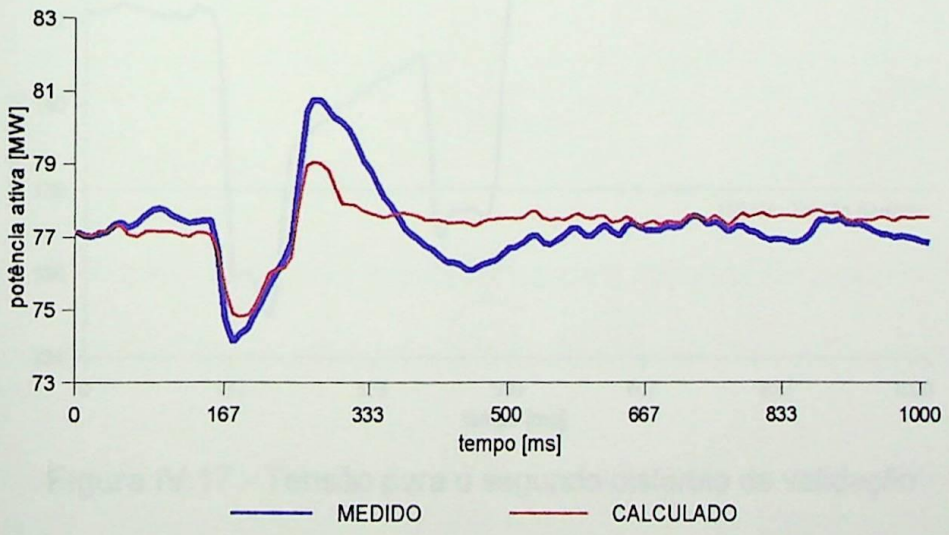


Figura IV.15 - Potência medida e calculada para o primeiro distúrbio de validação

O erro percentual entre a potência medida e a potência calculada está apresentada na figura IV.16.

Pode-se observar que durante a primeira oscilação (correspondente a oscilação de tensão) a potência obtida pelo modelo da RPF consegue acompanhar com precisão a potência ativa medida durante o distúrbio. O erro máximo durante esta primeira oscilação foi 1,10% e o erro médio de 0,52%. O erro máximo durante todo o distúrbio foi de 2,79% e o erro médio de 0,711%.

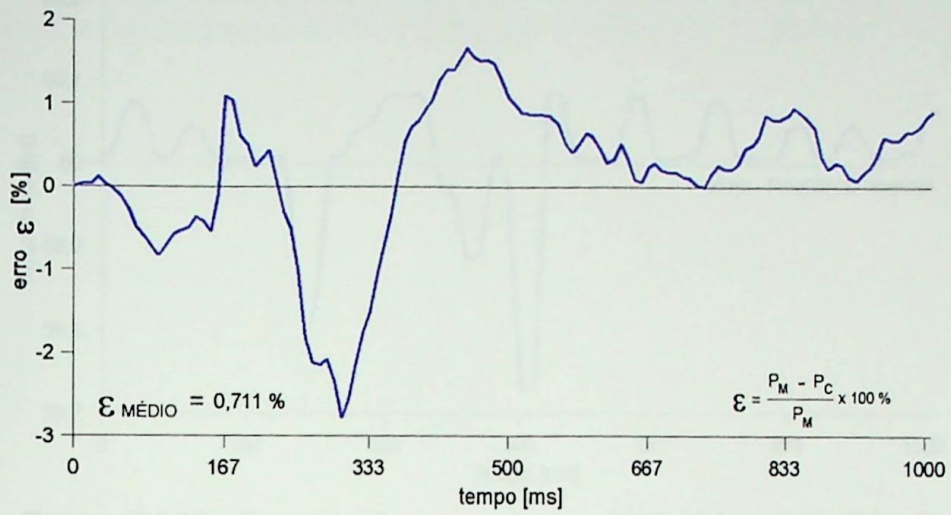


Figura IV.16 - Erro percentual para o primeiro distúrbio de validação

Segundo Distúrbio de Validação (Potência Ativa)

A tensão e a freqüência medidas estão apresentadas nas figuras IV.17 e IV.18.

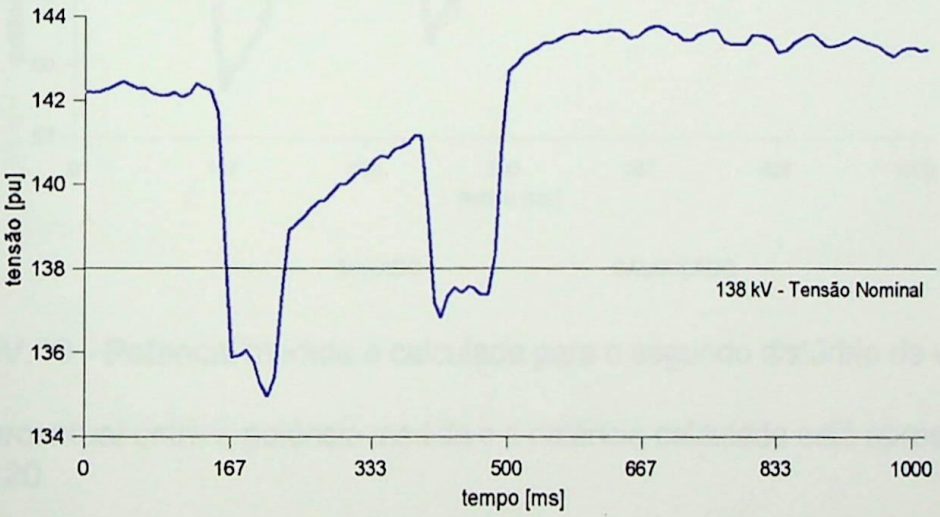


Figura IV.17 - Tensão para o segundo distúrbio de validação

Neste distúrbio ocorreram duas oscilações de tensão. A primeira da ordem de 6,8 kV, cerca de 4,8% da tensão pré-distúrbio (142,2 kV). O valor mínimo atingido pela tensão foi de 134,9 kV. A segunda oscilação foi menor, da ordem de 4,3 kV (3,0%), atingindo cerca de 136,8 kV. Durante todo o distúrbio a variação de tensão (máxima-mínima) foi de aproximadamente 6,2%. A oscilação de freqüência resultou em torno de 0,6% do valor de regime, atingindo o máximo de 60,085 Hz e um mínimo de 59,727 Hz.

A figura IV.19 apresenta os valores da potência ativa medida durante o distúrbio e a calculada pela RPF.

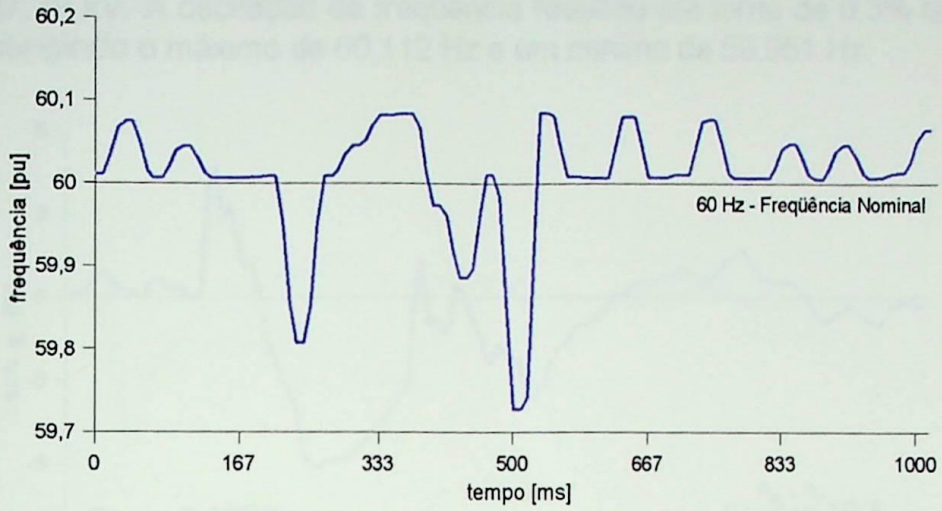


Figura IV.18 - Freqüência para o segundo distúrbio de validação

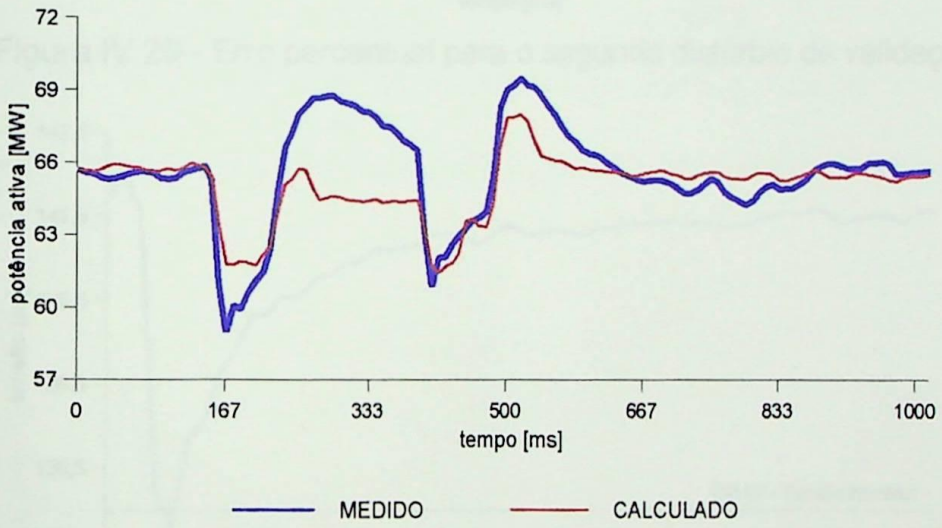


Figura IV.19 - Potência medida e calculada para o segundo distúrbio de validação

O erro percentual entre a potência medida e a potência calculada está apresentada na figura IV.20.

Pode-se observar que o pior desempenho da RPF ocorre no intervalo entre a primeira e segunda oscilação de potência. Durante a primeira oscilação o erro máximo foi de 4,72% e o erro médio de 2,10%. Até o final da segunda oscilação o erro médio aumentou para 2,99%, com um erro máximo de 6,16%. Durante o resto do distúrbio o erro torna a diminuir resultando em 1,59% em todo o distúrbio.

Terceiro Distúrbio de Validação (Potência Ativa)

A tensão e a freqüência medidas estão apresentadas nas figura IV.21 e IV.22. A oscilação de tensão foi da ordem de 4,0 kV, o que corresponde a 2,8% com relação a tensão pré-distúrbio (141,74 kV). O distúrbio foi na realidade uma queda súbita de tensão com o sistema se recuperando em seguida. O valor mínimo atingido pela tensão

foi de 137,79 kV. A oscilação de freqüência resultou em torno de 0,3% do valor de regime, atingindo o máximo de 60,112 Hz e um mínimo de 59,951 Hz.

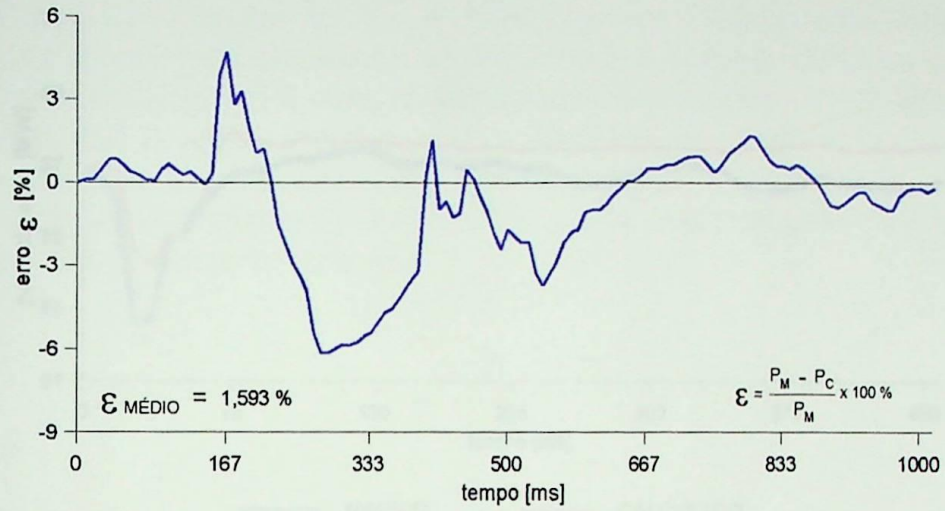


Figura IV.20 - Erro percentual para o segundo distúrbio de validação

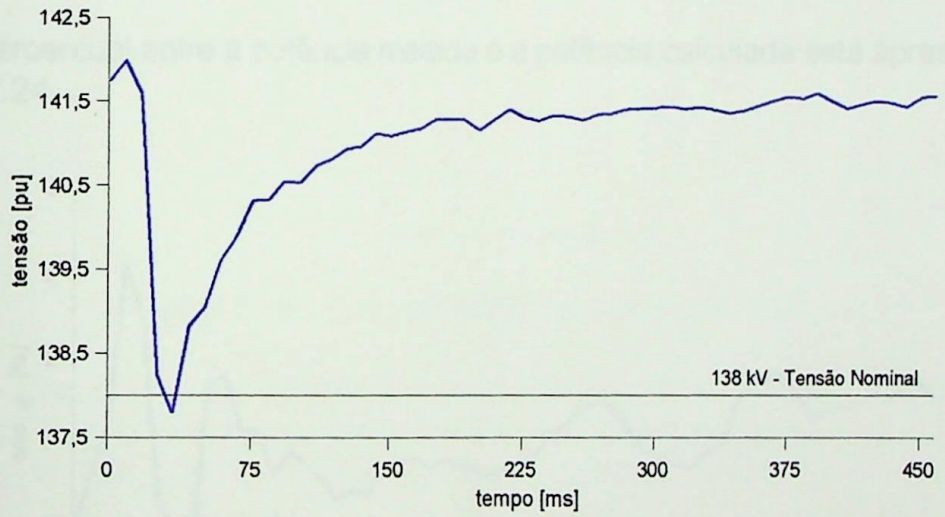


Figura IV.21 - Tensão para o terceiro distúrbio de validação

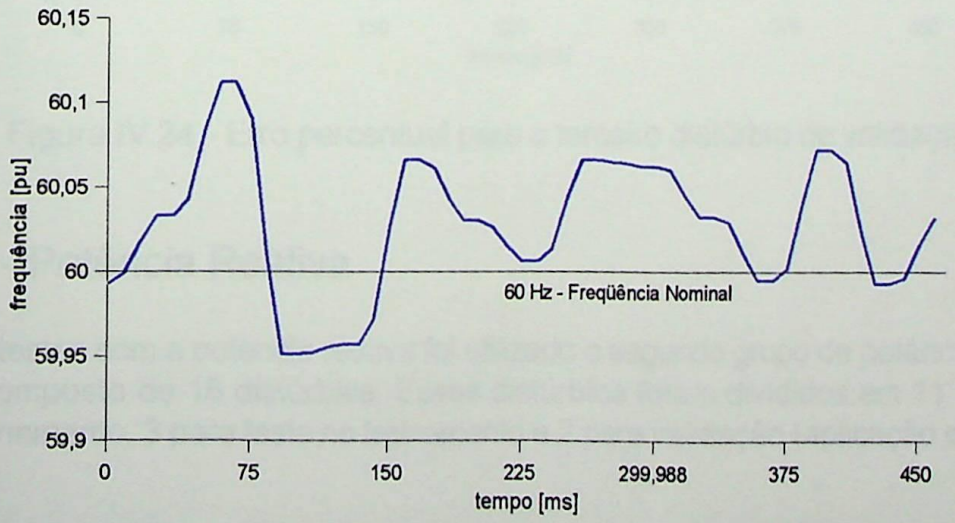


Figura IV.22 - Freqüência para o terceiro distúrbio de validação

A figura IV.23 apresenta os valores da potência ativa medida durante o distúrbio e a calculada pela RPF.

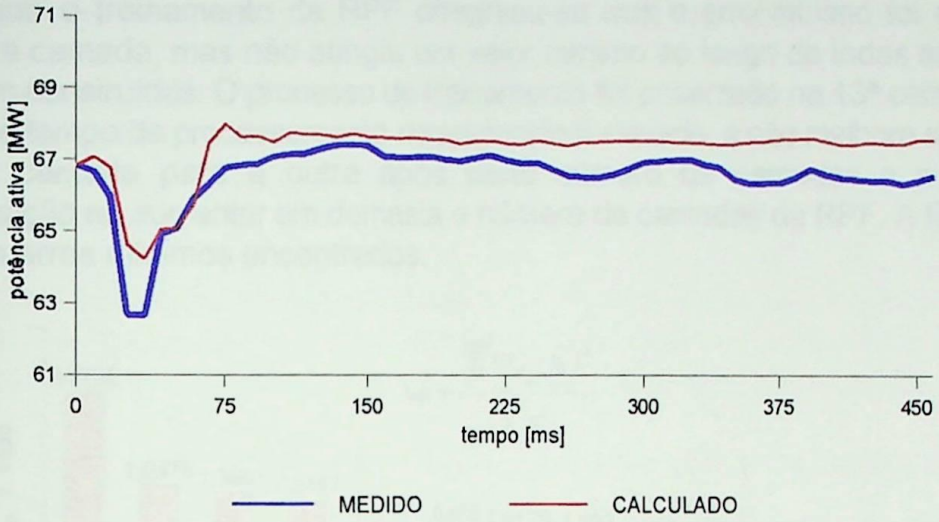


Figura IV.23 - Potência medida e calculada para o terceiro distúrbio de validação

O erro percentual entre a potência medida e a potência calculada está apresentada na figura IV.24.

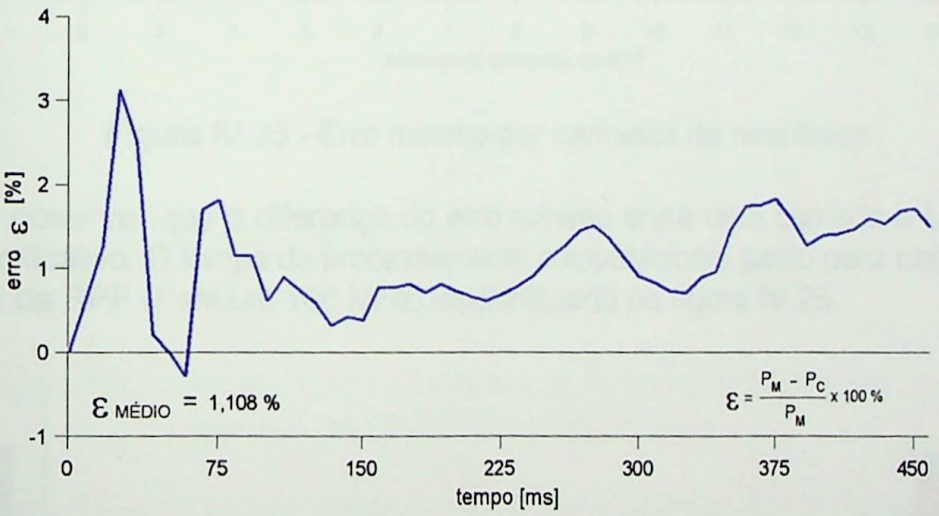


Figura IV.24 - Erro percentual para o terceiro distúrbio de validação

IV.6.2 - Potência Reativa

Para os testes com a potência reativa foi utilizado o segundo grupo de potência reativa, que é composto de 16 distúrbios. Esses distúrbios foram divididos em 11 distúrbios para treinamento, 3 para teste no treinamento e 2 para validação (aplicação do modelo obtido).

O arquivo de treino, composto dos distúrbios de treinamento e teste, resultou com 1775

padrões sendo 1373 (77%) para treinamento e 402 (23%) para teste, numa relação de 1 padrão de teste para cada 3 padrões de treinamento (1/3).

Ao realizar o treinamento da RPF observou-se que o erro mínimo foi diminuindo camada a camada, mas não atingiu um valor mínimo ao longo de todas as camadas que foram construídas. O processo de treinamento foi encerrado na 13ª camada tendo em vista o tempo de processamento computacional elevado, a não melhora significativa de uma camada para a outra após certo número de camadas e a perda de generalização ao aumentar em demasia o número de camadas da RPF. A figura IV.25 ilustra os erros mínimos encontrados.

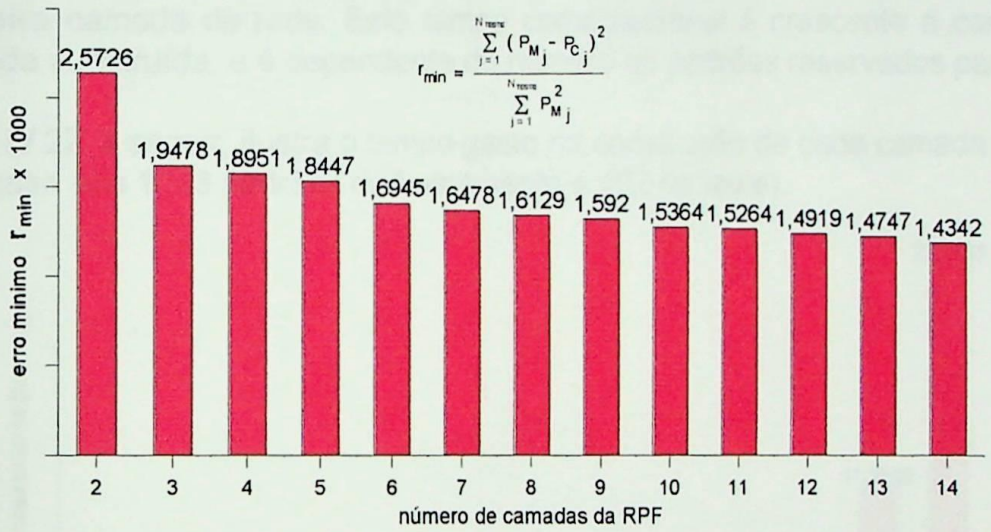


Figura IV.25 - Erro mínimo por camadas de neurônios

Pode-se observar que a diferença do erro mínimo entre uma camada e outra não é muito significativo. O tempo de processamento computacional gasto para obtenção das camadas da RPF (Pentium 166 MHz) está indicado na figura IV.26.

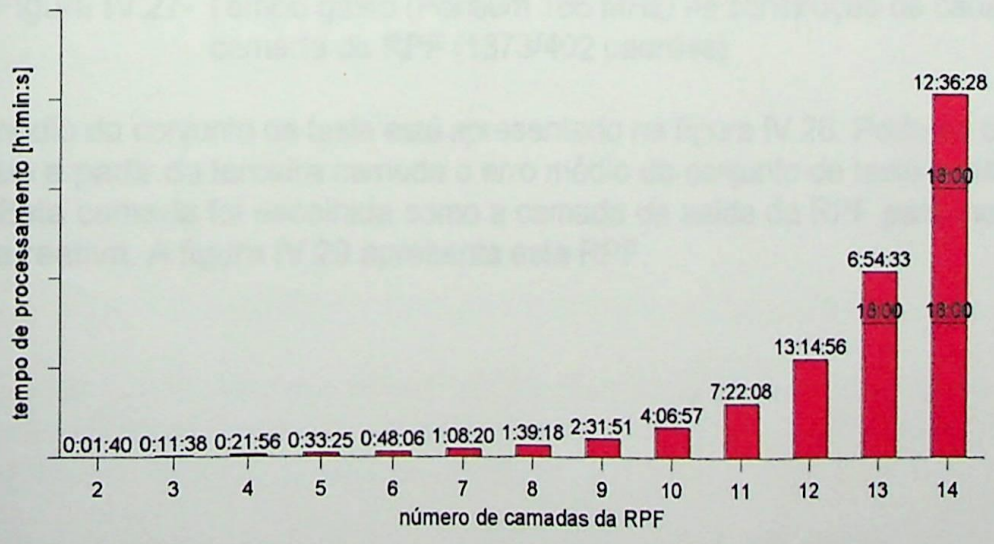


Figura IV.26 - Tempo gasto (Pentium 166 MHz) na construção das camadas da RPF

Pode-se observar ainda que a partir da sexta camada o tempo de obtenção da RPF é muito elevado chegando a cerca de mais de 48 horas para obtenção de uma rede com 14 camadas (logicamente dependente do número de padrões). Como já comentado o tempo gasto na construção de cada camada da RPF é composto de duas parcelas:

- uma de criação dos novos neurônios, como são armazenados os 80 melhores neurônios da cama anterior são criados 3160 neurônios na camada corrente. Este tempo é praticamente constante em cada camada e depende do número de padrões de treinamento;

- outra de realimentação destes 3160 neurônios desde a camada corrente até a primeira camada da rede. Este tempo computacional é crescente a cada nova camada construída, e é dependente do número de padrões reservados para teste.

A figura IV.27, a seguir, ilustra o tempo gasto na construção de cada camada da RPF (neste caso são 1373 padrões de treinamento e 402 de teste).

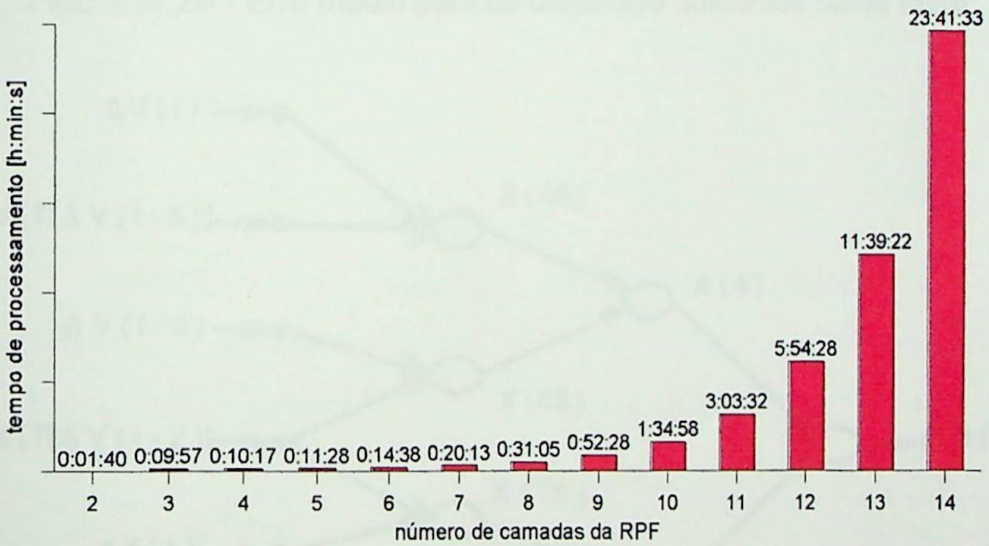


Figura IV.27- Tempo gasto (Pentium 166 MHz) na construção de cada camada da RPF (1373/402 padrões)

O erro médio do conjunto de teste está apresentado na figura IV.28. Pode-se observar ainda que a partir da terceira camada o erro médio do conjunto de teste variou muito pouco. Esta camada foi escolhida como a camada de saída da RPF para modelo da potência reativa. A figura IV.29 apresenta esta RPF.

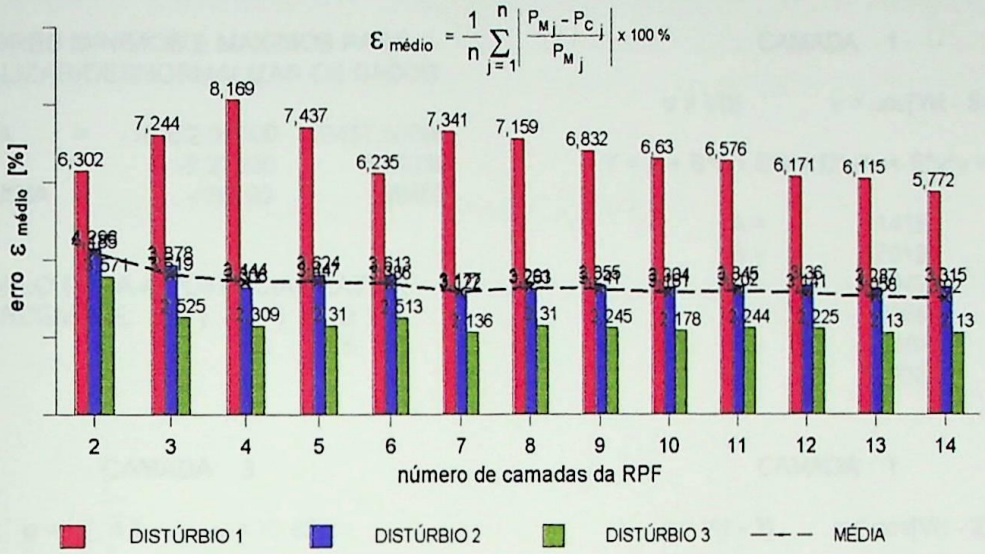


Figura IV.28 - Erro médio para os distúrbios utilizados como teste

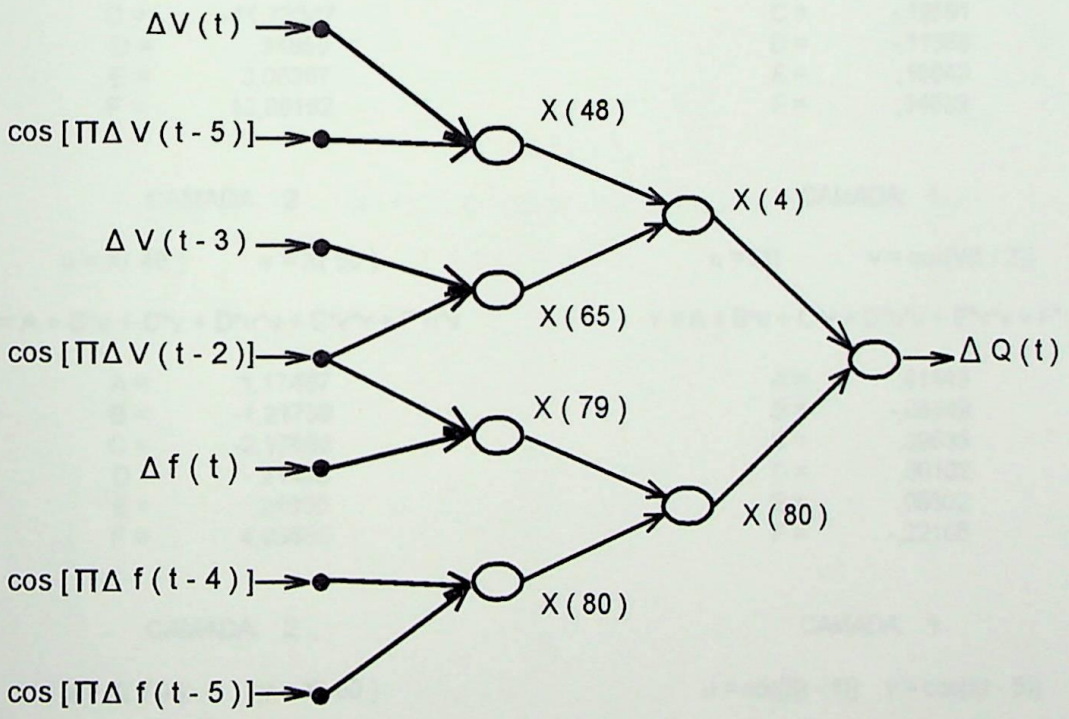


Figura IV.29 - RPF criada para o exemplo de potência reativa

Pode-se notar que as entradas da RPF são funções somente da tensão e da freqüência do barramento o qual modela, o que significa que a saída da rede não sofre influência (realimentação) da potência reativa do mesmo.

O polinômio de Ivakhnenko correspondente a RPF acima está apresentado a seguir.

POLINOMIO DE IVAKHNENKO

VALORES MINIMOS E MAXIMOS PARA NORMALIZAR/DESNORMALIZAR OS DADOS

POTENCIA	=	-15352,00000	10437,00000
TENSAO	=	-9,27830	5,66230
FREQUENCIA	=	-.56700	.59400

MODELO PARA A POTENCIA REATIVA
ORDEM DE: (V) - (f) - (Q)
5 5 5

CAMADA: 3

u = X(4) v = X(80)

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	5,82746
B =	-6,41244
C =	-11,73347
D =	-,34858
E =	3,08357
F =	12,98192

CAMADA: 2

u = X(48) v = X(65)

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	1,17467
B =	-1,21759
C =	-2,17688
D =	-,21486
E =	,24600
F =	4,03565

CAMADA: 2

u = X(79) v = X(80)

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	110,52376
B =	-148,10019
C =	-224,05640
D =	-6,13587
E =	57,85320
F =	263,24160

CAMADA: 1

u = V(t) v = cos[V(t - 5)]

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	,11418
B =	,87019
C =	-,06042
D =	-,12368
E =	-,00894
F =	,13908

CAMADA: 1

u = V(t - 3) v = cos[V(t - 2)]

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	,53941
B =	,13579
C =	-,19591
D =	-,11358
E =	,16043
F =	,34633

CAMADA: 1

u = f(t) v = cos[V(t - 2)]

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	,61448
B =	-,06449
C =	,09635
D =	,00102
E =	,05302
F =	-,22106

CAMADA: 1

u = cos[f(t - 4)] v = cos[f(t - 5)]

Y = A + B*u + C*v + D*u*u + E*v*v + F*u*v

A =	.59590
B =	-.00448
C =	.00122
D =	.00282
E =	.00016
F =	-.00992

A RPF do modelo da potência reativa obtida para o segundo grupo de potência reativa foi aplicada nos dois distúrbios reservados para validação (do mesmo grupo). Para cada um dos distúrbios de validação serão apresentados a tensão, a freqüência e a potência medidas e a potência calculada pela RPF, e o respectivo erro percentual.

Primeiro Distúrbio de Validação (Potência Reativa)

A tensão e a freqüência medidas estão apresentadas nas figuras IV.30 e IV.31.

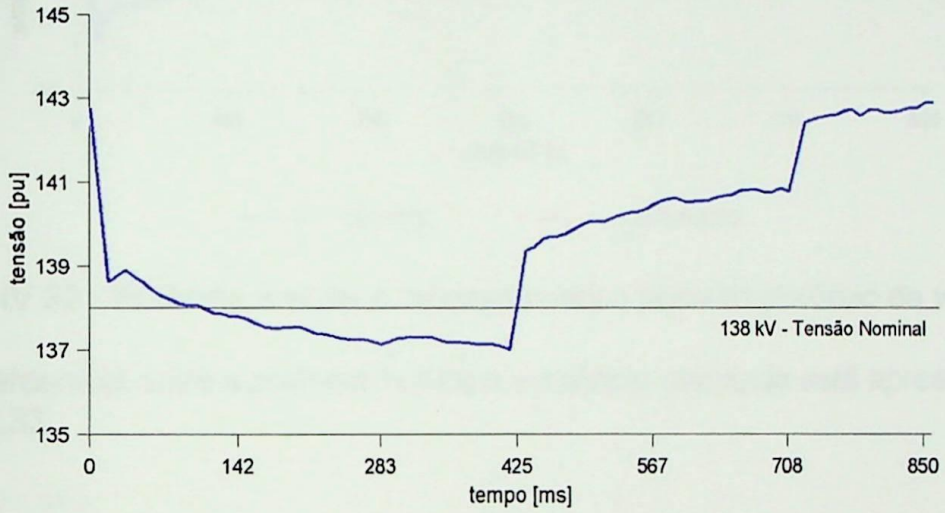


Figura IV.30 - Tensão para o primeiro distúrbio de validação

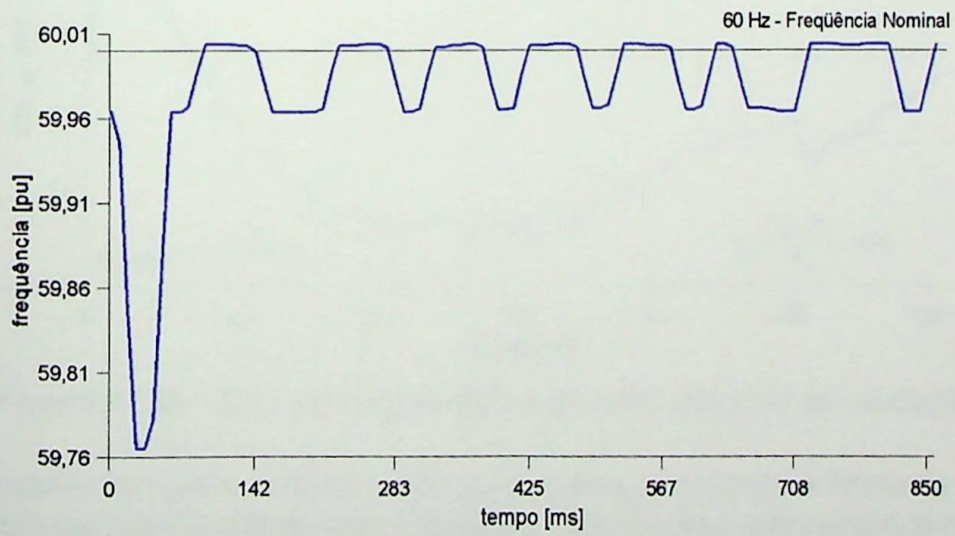


Figura IV.31 - Freqüência para o primeiro distúrbio de validação

A oscilação máxima de tensão foi da ordem de 5,7 kV, o que corresponde a uma queda de cerca de 4,0 % com relação a tensão de regime (142,8 kV). A tensão decai durante cerca de 410 ms atingindo um mínimo de 137 kV tendendo depois a retornar aos valores pré-defeito. A oscilação de freqüência correspondeu a um pico momentâneo de cerca de 0,1 % do valor de regime, atingindo o mínimo de 59,765 Hz.

A figura IV.32 apresenta os valores da potência reativa medida durante o distúrbio e a calculada pela RPF.

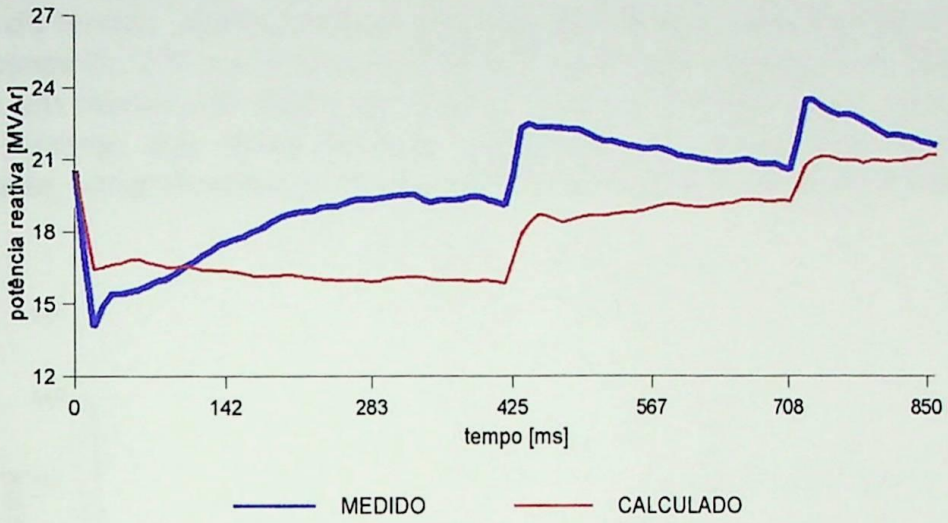


Figura IV.32 - Potência medida e calculada para o primeiro distúrbio de validação

O erro percentual entre a potência medida e a potência calculada está apresentada na figura IV.33.

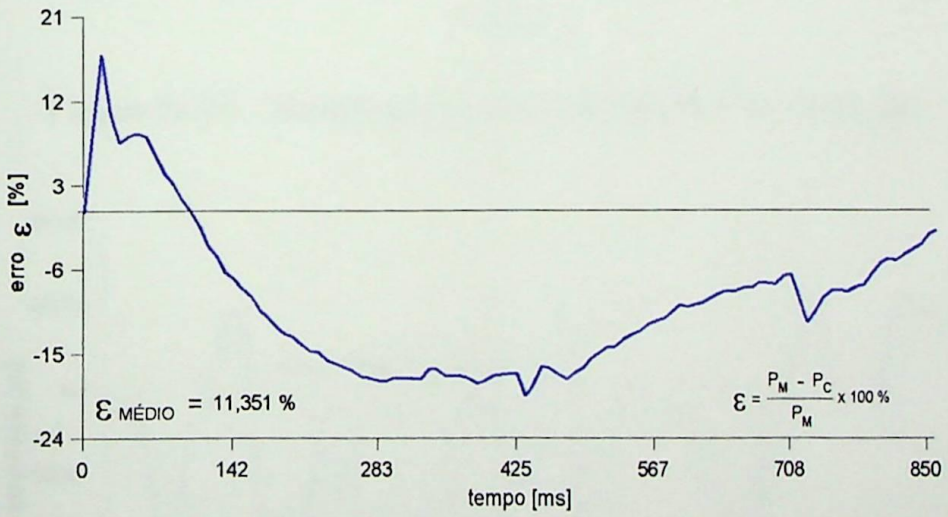


Figura IV.33 - Erro percentual para o primeiro distúrbio de validação

Pode-se observar que a potência reativa calculada acompanha a forma de oscilação da potência reativa medida durante o distúrbio, mas com seu valor numérico resultando praticamente sempre abaixo do valor medido. O modelo da RPF para a potência reativa, já apresentado na figura IV.29, é dependente de variações de tensão e de freqüência. Como a variação de freqüência foi muito pequena neste distúrbio, a mesma praticamente não influenciou nos valores calculados pela rede, ficando a saída da mesma dependente somente das oscilações de tensão. A saída do modelo acompanhou a forma de oscilação de tensão do distúrbio, como era de se esperar, mas não conseguiu reproduzir com precisão os valores da potência reativa. O erro máximo foi de 19,54% e o erro médio de 11,351%.

Segundo Distúrbio de Validação (Potência Reativa)

A tensão e a freqüência medidas estão apresentadas nas figuras IV.34 e VI.35. O distúrbio de tensão corresponde a uma queda de tensão, permanecendo a mesma durante cerca de 250 ms abaixo de 135 kV (0,937 pu da tensão pré-distúrbio de 144 kV), com um mínimo da ordem de 134,3 kV (queda de 6,8%). Logo após, a tensão tende a retornar aos níveis normais pré-distúrbio. A oscilação de freqüência foi insignificante, variando entre um máximo de 0,05% e um mínimo de 0,03% do valor de regime.

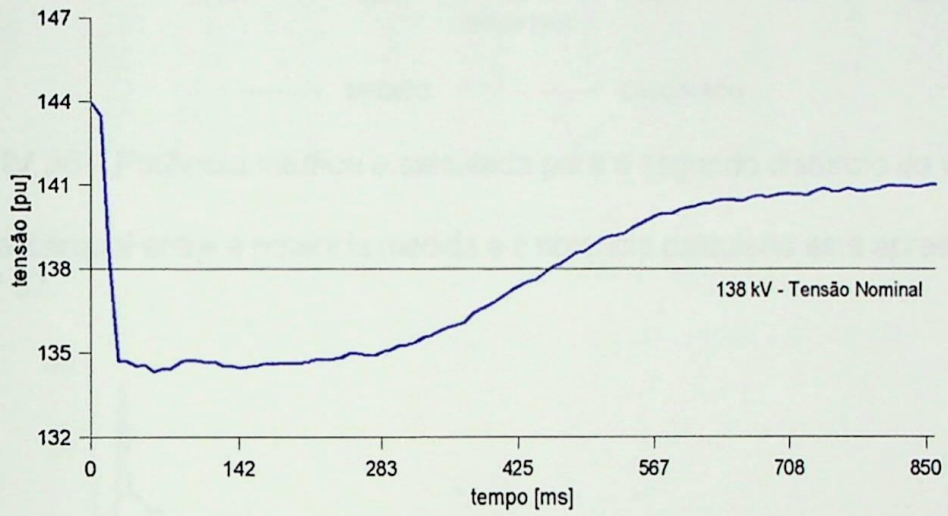


Figura IV.34 - Tensão para o segundo distúrbio de validação

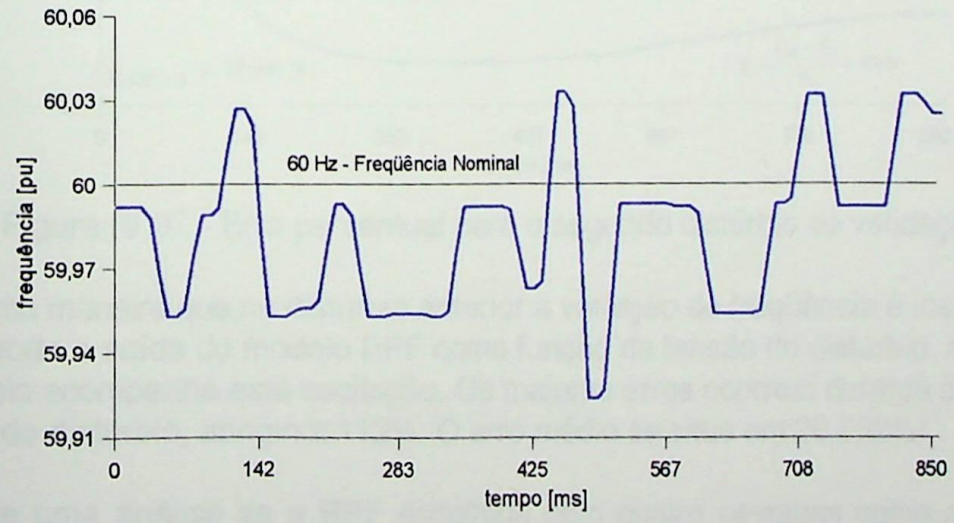


Figura IV.35 - Freqüência para o segundo distúrbio de validação

A figura IV.36 apresenta os valores da potência reativa medida durante o distúrbio e a calculada pela RPF.

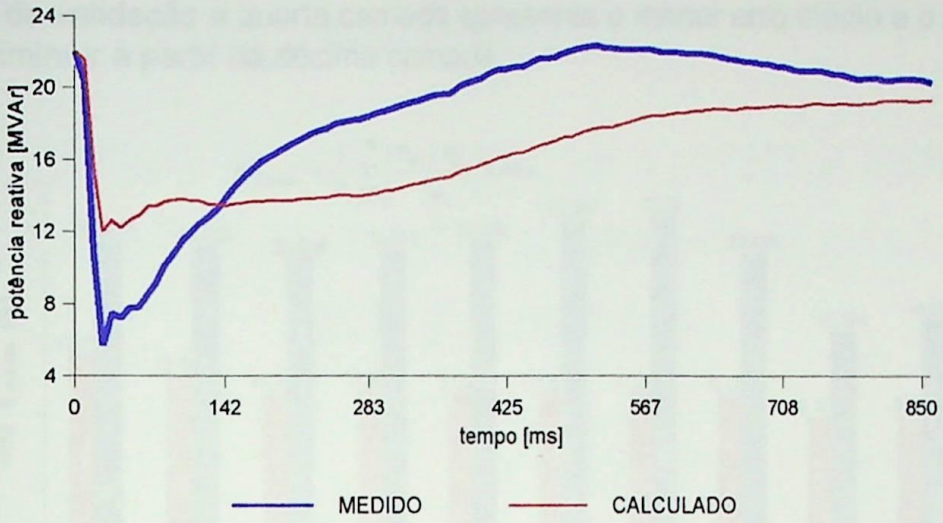


Figura IV.36 - Potência medida e calculada para o segundo distúrbio de validação

O erro percentual entre a potência medida e a potência calculada está apresentada na figura IV.37.

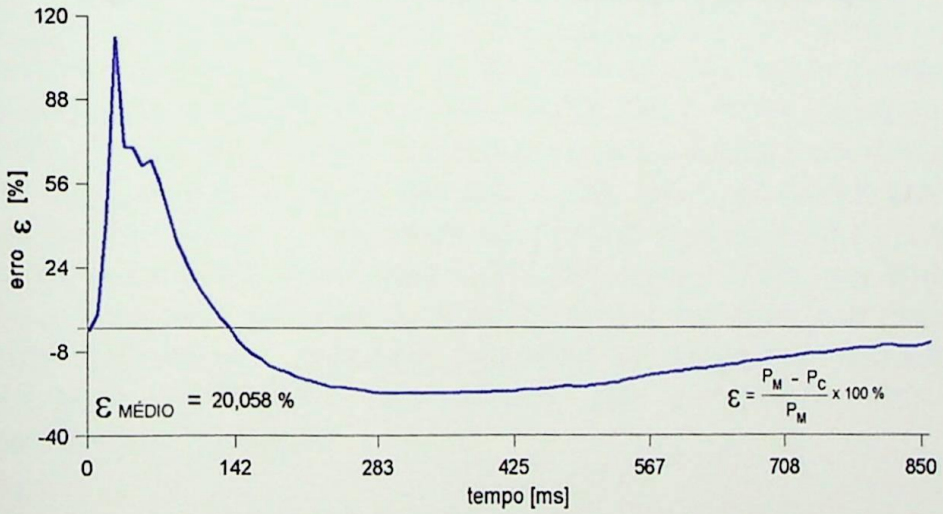


Figura IV.37 - Erro percentual para o segundo distúrbio de validação

Da mesma maneira que no distúrbio anterior a variação de freqüência é insignificante ficando toda a saída do modelo RPF como função da tensão do distúrbio. A resposta do modelo acompanha esta oscilação. Os maiores erros ocorrem durante os primeiro 100 ms de distúrbio, atingindo112%. O erro médio se situa em 20,058%.

A fim de uma análise se a RPF escolhida com quatro camadas como modelo da potência reativa foi a mais indicada, a figura IV.38 apresenta o erro médio para os dois conjuntos de validação.

Pode-se observar que a partir da quarta camada o erro médio para o primeiro distúrbio de validação praticamente se mantém, só diminuindo significativamente a partir da décima camada (caracterizando super-ajuste dos dados de teste). Para o segundo

distúrbio de validação a quarta camada apresenta o menor erro médio e o mesmo só volta a diminuir a partir da décima camada.

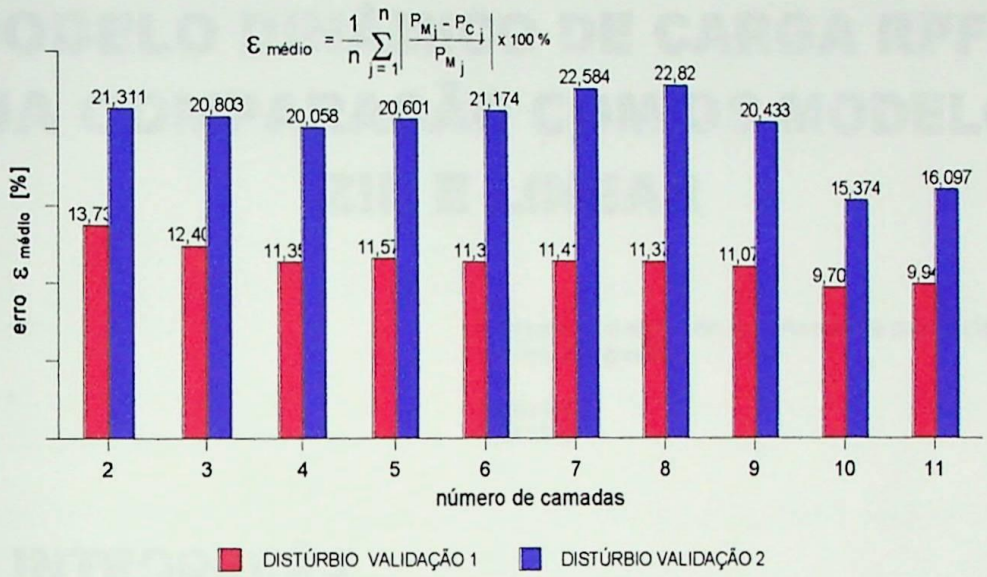


Figura IV.38 - Erro médio para os distúrbios de validação

CAPÍTULO V

MODELO DINÂMICO DE CARGA RPF E SUA COMPARAÇÃO COM OS MODELOS ZIP E LINEAR

Nunca encontrei alguém tão ignorante que não pudesse ter apreendido algo com sua ignorância.

Galileu Galilei
1564-1642

V.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão feitas comparações entre as respostas produzidas pelo modelo dinâmico RPF desenvolvido no capítulo anterior e as respostas produzidas por dois outros modelos de carga existentes na literatura. Um dos modelos escolhido foi o modelo ZIP (impedância, corrente e potência constantes) que é um modelo estático clássico de representação de carga, que embora não apresente grande precisão, está implementado em todos os programas de Análise de Sistemas. O outro modelo escolhido foi um modelo denominado LINEAR [Dovan, 1987], que é um modelo dinâmico que possibilita variações significativas em sua estrutura, bem como em seus parâmetros, de modo a considerar variações na composição da carga. Todo desenvolvimento matemático dos modelos ZIP e LINEAR estão expostos detalhadamente no Apêndice I.

V.2 - DESENVOLVIMENTO DOS TESTES

Para os testes foram modelados barramentos de uma subestação em 138 kV do Sistema Elétrico Brasileiro a qual alimenta importantes consumidores industriais (siderúrgia, mineração e química), já apresentado no Capítulo III.

Serão utilizados os mesmos grupos de potência ativa e reativa obtidos também no Capítulo II, o que possibilita gerar um modelo de carga mais robusto.

O treinamento dos modelos de carga ZIP, LINEAR e RPF serão feitos sempre com os mesmos distúrbios. Estes distúrbios serão escolhidos dentre aqueles pertencentes ao grupo de potência no qual se realizará o teste. A cada teste feito pode-se mudar os distúrbios selecionados para treinamento, o que significa que a cada teste podem ser obtidos modelos diferente de carga.

V.2.1 - Modelo ZIP

O modelo ZIP é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta P(k) = P_0 (a + b\Delta\bar{V}(k) + c\Delta\bar{V}(k)^2)$$

$$\Delta Q(k) = Q_0 (d + e\Delta\bar{V}(k) + f\Delta\bar{V}(k)^2)$$

onde:

- P_0 e Q_0 representam as condições iniciais de potência ativa e reativa respectivamente;
- $\Delta P(k) = P(k+1) - P(k)$, $\Delta Q(k) = Q(k+1) - Q(k)$ e $\Delta V(k) = V(k+1) - V(k)$, sendo k o instante de tempo;
- os coeficientes a e d especificam as parcelas em pu da potência ativa e reativa da carga que comportam-se como potência constante;
- os coeficientes b e e especificam as parcelas em pu da potência ativa e reativa da carga que comportam-se como corrente constante; e
- os coeficientes c e f especificam as parcelas em pu da potência ativa e reativa da carga que comportam-se como impedância constante.

Com os distúrbios destinados ao treinamento serão obtidos os coeficientes a, b, c, d, e e f.

V.2.2 - Modelo LINEAR

O modelo LINEAR apresenta a seguinte estrutura básica:

$$\Delta P(k) = \sum_{i=1}^{n_P} \hat{a}_i \Delta P(k-i) + \sum_{i=0}^{n_V} \hat{b}_i \Delta V(k-i) + \sum_{i=0}^{n_f} \hat{c}_i \Delta f(k-i)$$

$$\Delta Q(k) = \sum_{i=1}^{n_Q} \hat{d}_i \Delta Q(k-i) + \sum_{i=0}^{n'_V} \hat{e}_i \Delta V(k-i) + \sum_{i=0}^{n'_f} \hat{g}_i \Delta f(k-i)$$

onde:

- $\Delta P(k-i) = P(k-i+1) - P(k-i)$, $\Delta Q(k-i) = Q(k-i+1) - Q(k-i)$, $\Delta V(k-i) = V(k-i+1) - V(k-i)$ e $\Delta f(k-i) = f(k-i+1) - f(k-i)$, sendo k o instante de tempo;
- $\hat{a}_i$, $\hat{d}_i$, ($\hat{b}_i$ e $\hat{e}_i$), ($\hat{c}_i$ e $\hat{g}_i$) são os coeficientes da regressão em P, Q, V e f respectivamente;

- n_P, n_Q, (n_V e n_V') e (n_F e n_F') determinam as correspondentes ordens de regressão, ou seja, a estrutura do modelo.

Com os distúrbios destinados ao treinamento, serão obtidos os coeficientes ($\hat{a}_i$ ou $\hat{d}_i$), ($\hat{b}_i$ ou $\hat{e}_i$) e ($\hat{c}_i$ ou $\hat{g}_i$). As ordens de regressão, (n_P ou n_Q), (n_V ou n_V') e (n_F ou n_F') serão escolhidas pelo usuário, por tentativas, de tal modo a obter o menor erro médio no distúrbio destinado ao teste.

V.3 - TESTES REALIZADOS

Para os testes realizados serão apresentados os valores de tensão e freqüência medidos no distúrbio, os valores da potência medida e calculada pelos modelos (e respectivos erros percentuais) e a curva de autocorrelação da potência.

Serão analisados três distúrbios para a potência ativa e dois para a potência reativa.

V.3.1 - Primeiro Teste - Potência Ativa

A figura V.1 mostra a variação de tensão para o primeiro teste.

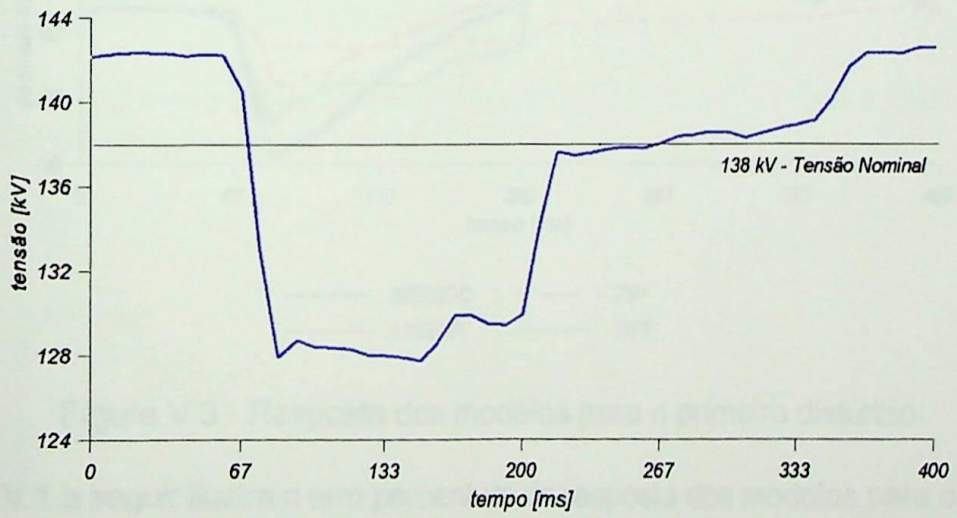


Figura V.1 - Tensão para o primeiro distúrbio

O distúrbio é caracterizado pela variação do nível de tensão de cerca de 10,5%, tendo a tensão atingido o mínimo de 127,7 kV. A tensão pré-distúrbio é de aproximadamente 1,03 pu.

A figura V.2 ilustra a variação de freqüência para o distúrbio analisado. A oscilação de freqüência é da ordem de 1,2%, com a mesma atingindo 60,61 Hz.

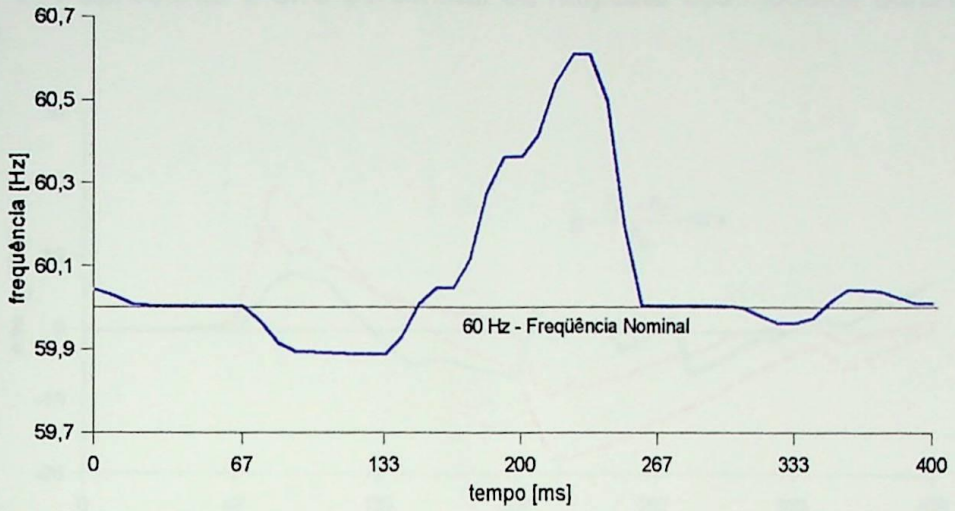


Figura V.2 - Freqüência para o primeiro distúrbio

As respostas dos modelos de carga são dados na figura V.3.

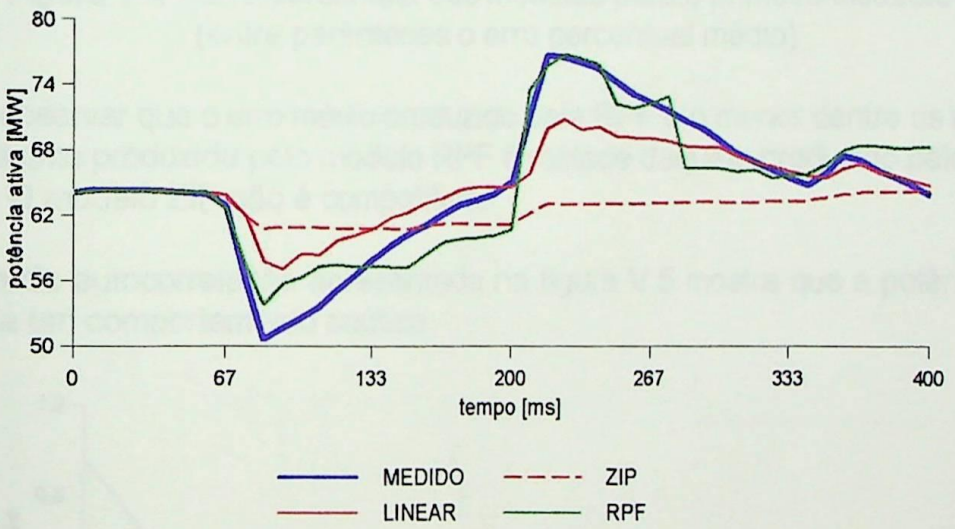


Figura V.3 - Resposta dos modelos para o primeiro distúrbio

A tabela V.1 a seguir ilustra o erro percentual da resposta dos modelos para o distúrbio analisado.

Tabela V.1 - Erro da resposta dos modelos para o primeiro distúrbio

Erro Percentual (%)	ZIP	LINEAR	RPF
Erro médio durante todo o distúrbio	6,72	3.49	2,80
Erro absoluto máximo	19,96	14,08	7,70
Erro médio na primeira oscilação (65-200 ms)	7,28	5,59	4,59

A figura V.4 apresenta o erro percentual da resposta dos modelos durante todo o distúrbio.

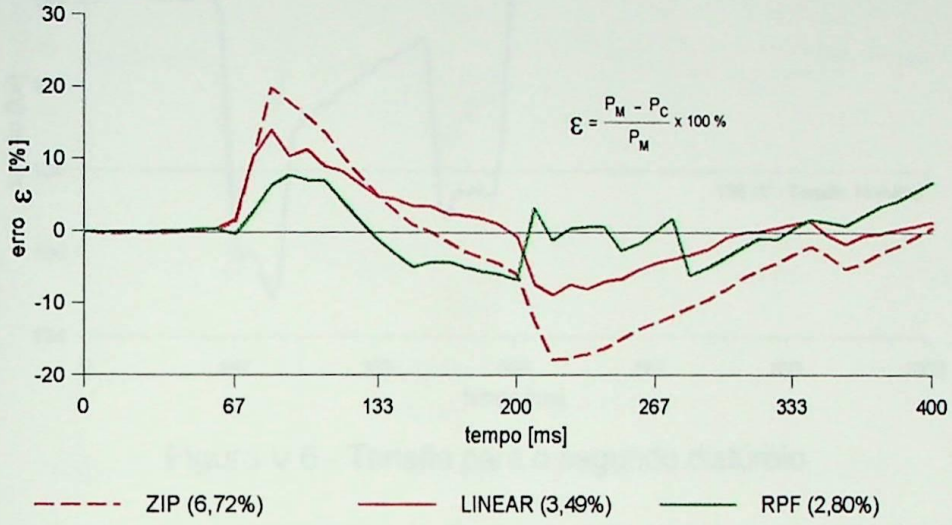


Figura V.4 - Erro percentual dos modelos para o primeiro distúrbio (entre parênteses o erro percentual médio)

Pode-se observar que o erro médio produzido pela RPF é o menor dentre os modelos. O erro máximo produzido pelo modelo RPF é metade daquele produzido pelo modelo LINEAR. O modelo ZIP não é competitivo.

A função de autocorrelação apresentada na figura V.5 mostra que a potência ativa apresenta um comportamento caótico.

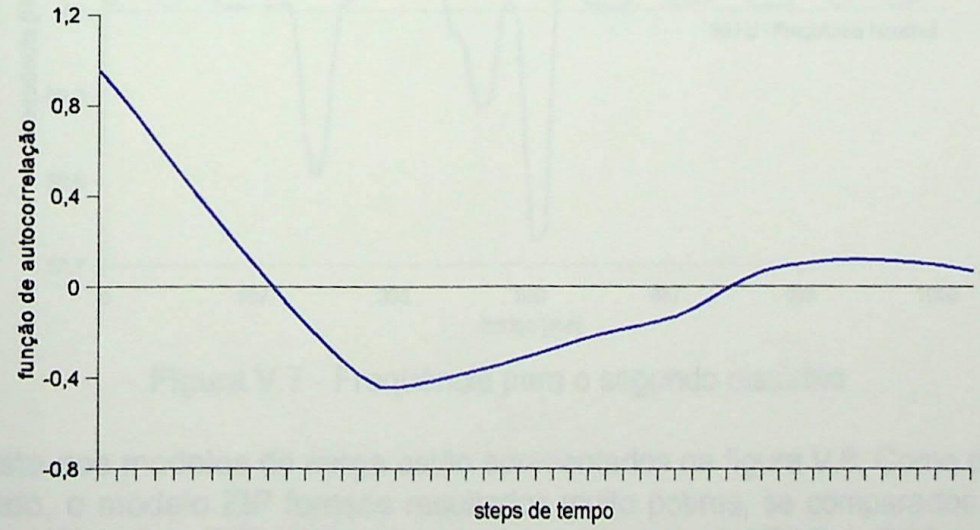


Figura V.5 - Função de autocorrelação para o primeiro distúrbio

V.3.2 - Segundo Teste - Potência Ativa

A figura V.6 mostra a variação de tensão para o segundo teste.

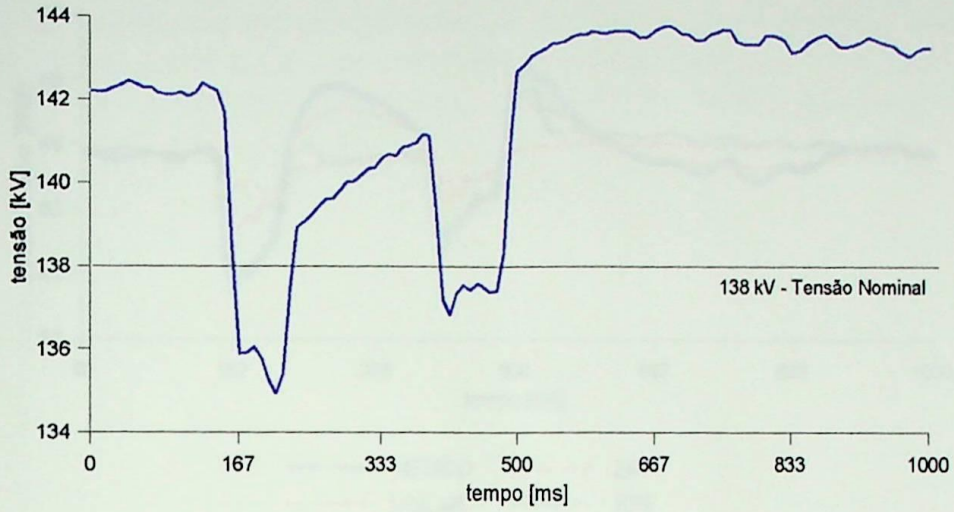


Figura V.6 - Tensão para o segundo distúrbio

O distúrbio é caracterizado pela variação do nível de tensão da ordem de 5,1%, com relação a tensão pré-distúrbio, tendo a tensão atingido o mínimo de 134,9 kV. A tensão pré-distúrbio é de cerca de 1,03 pu.

A figura V.7 ilustra a variação de freqüência para a perturbação analisada. A oscilação de freqüência é da ordem de 0,5%, com a mesma atingindo um mínimo de 59,73 Hz.

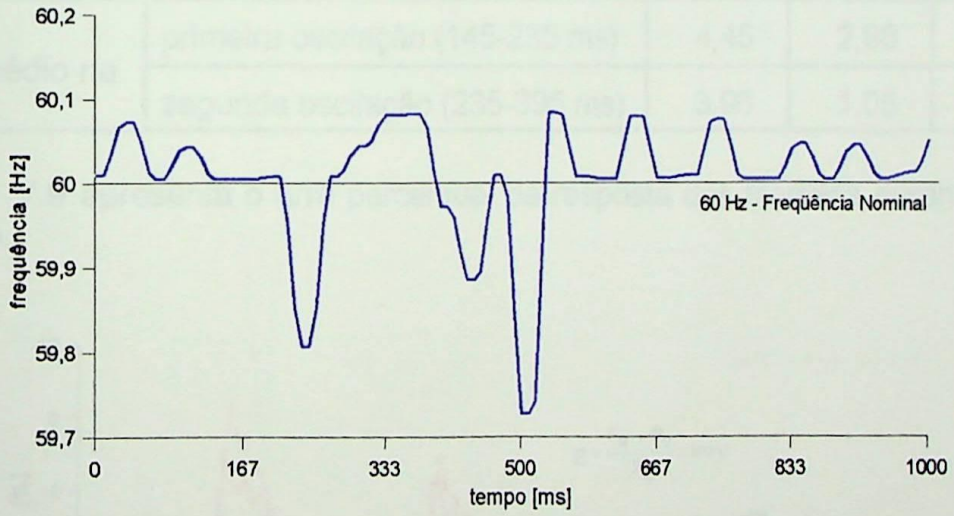


Figura V.7 - Freqüência para o segundo distúrbio

A resposta dos modelos de carga estão apresentados na figura V.8. Como pode ser observado, o modelo ZIP fornece resultados muito pobres, se comparados com os modelos LINEAR e RPF. Observa-se que os modelos LINEAR e RPF produzem resultados similares. Na primeira oscilação o modelo RPF apresenta resultados melhores que o LINEAR enquanto na segunda oscilação a situação se inverte.

A tabela V.2 ilustra o erro percentual da resposta dos modelos para o distúrbio analisado.

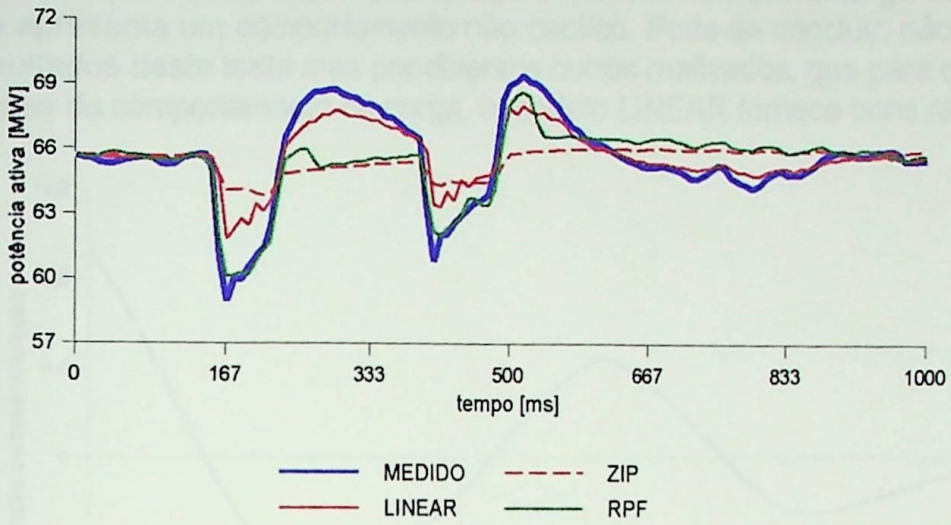


Figura V.8 - Resposta dos modelos para o segundo distúrbio

Tabela V.2 - Erro da resposta dos modelos para o segundo distúrbio

Erro Percentual (%)		ZIP	LINEAR	RPF
Erro médio durante todo o distúrbio		2,10	0,95	1,43
Erro absoluto máximo		8,71	5,97	5,18
Erro médio na	primeira oscilação (145-235 ms)	4,45	2,98	0,95
	segunda oscilação (235-395 ms)	3.96	1,05	3.46

A figura V.9 apresenta o erro percentual da resposta dos modelos durante todo o distúrbio.

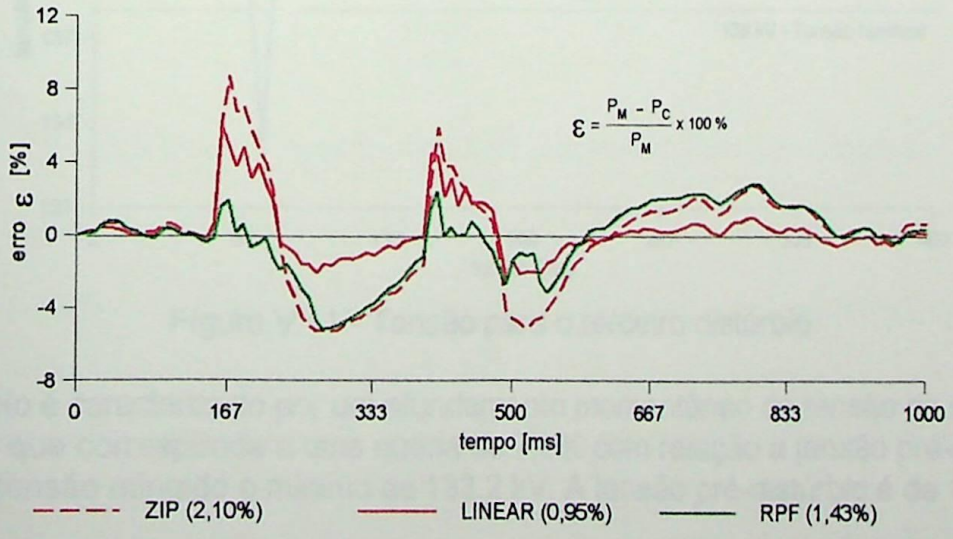


Figura V.9 - Erro percentual dos modelos para o segundo distúrbio (entre parênteses o erro percentual médio)

A função de autocorrelação plotada na figura V.10, indica que a carga ativa deste distúrbio apresenta um comportamento não caótico. Pode-se concluir, não somente pelos resultados deste teste mas por diversos outros realizados, que para condições não caóticas de comportamento de carga, o modelo LINEAR fornece bons resultados.

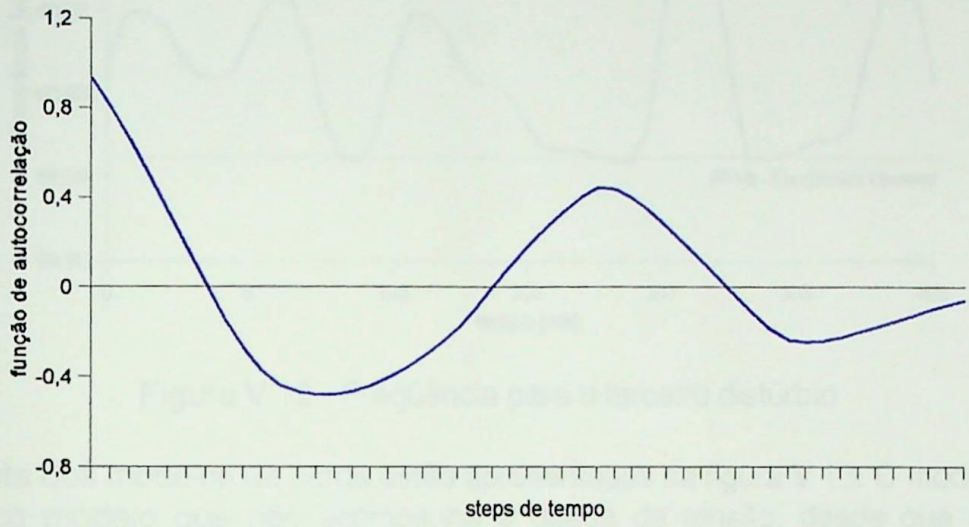


Figura V.10 - Função de autocorrelação para o segundo distúrbio

V.3.3 - Terceiro Teste - Potência Ativa

A figura V.11 ilustra a variação de tensão para o terceiro teste.

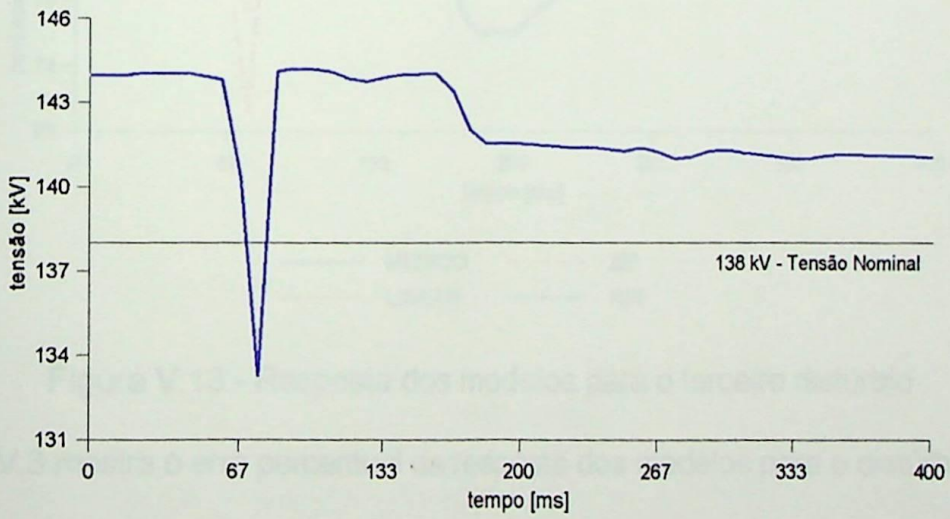


Figura V.11 - Tensão para o terceiro distúrbio

O distúrbio é caracterizado por um afundamento momentâneo de tensão da ordem de 10,8 kV, que corresponde a uma queda de 7,5% com relação a tensão pré-distúrbio, tendo a tensão atingido o mínimo de 133.2 kV. A tensão pré-distúrbio é de 1,04 pu.

A figura V.12 ilustra a variação de freqüência para a perturbação analisada. A oscilação de freqüência é insignificante da ordem de 0,1%.

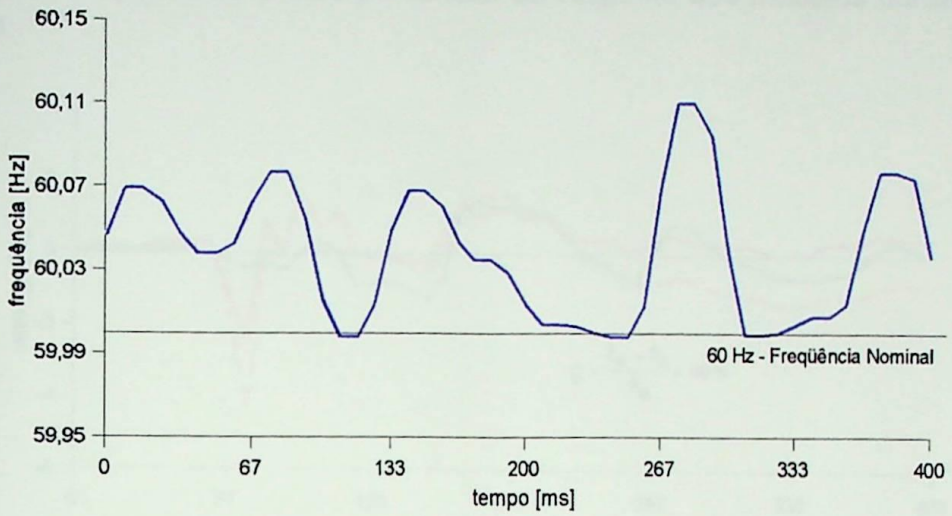


Figura V.12 - Freqüência para o terceiro distúrbio

A resposta dos modelos de carga estão apresentados na figura V.13. O modelo RPF é o único modelo que não acompanha a queda de tensão, desde que a carga apresenta um comportamento como potência constante neste caso.

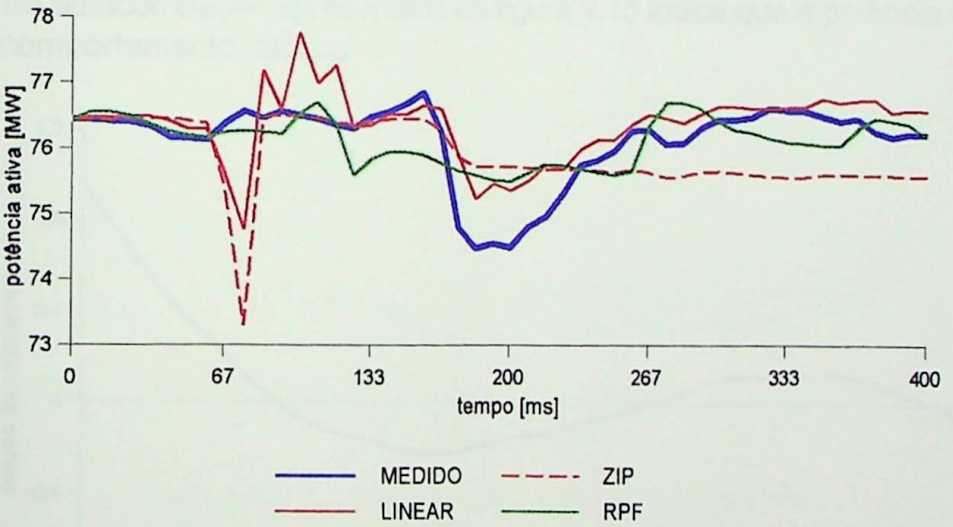


Figura V.13 - Resposta dos modelos para o terceiro distúrbio

A tabela V.3 mostra o erro percentual da resposta dos modelos para o distúrbio acima.

Tabela V.3 - Erro da resposta dos modelos para o terceiro distúrbio

Erro Percentual (%)	ZIP	LINEAR	RPF
Erro médio durante todo o distúrbio	0,73	0,49	0,49
Erro absoluto máximo	4,29	2,38	1,49
Erro médio na primeira oscilação (65-85 ms)	1,88	1,46	0,30

A figura V.14 apresenta o erro percentual da resposta dos modelos durante todo o distúrbio.

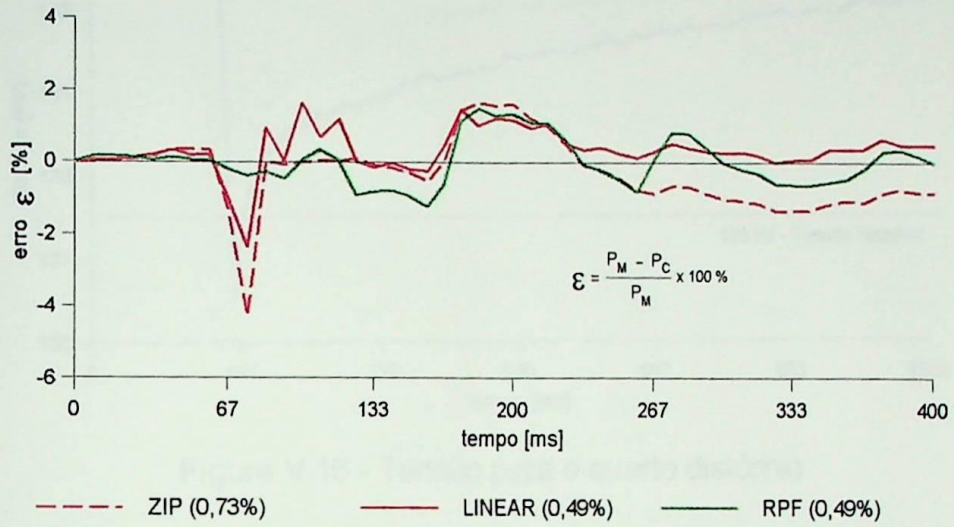


Figura V.14 - Erro percentual dos modelos para o terceiro distúrbio (entre parênteses o erro percentual médio)

A função de autocorrelação apresentada na figura V.15 indica que a potência ativa tem um forte comportamento caótico.

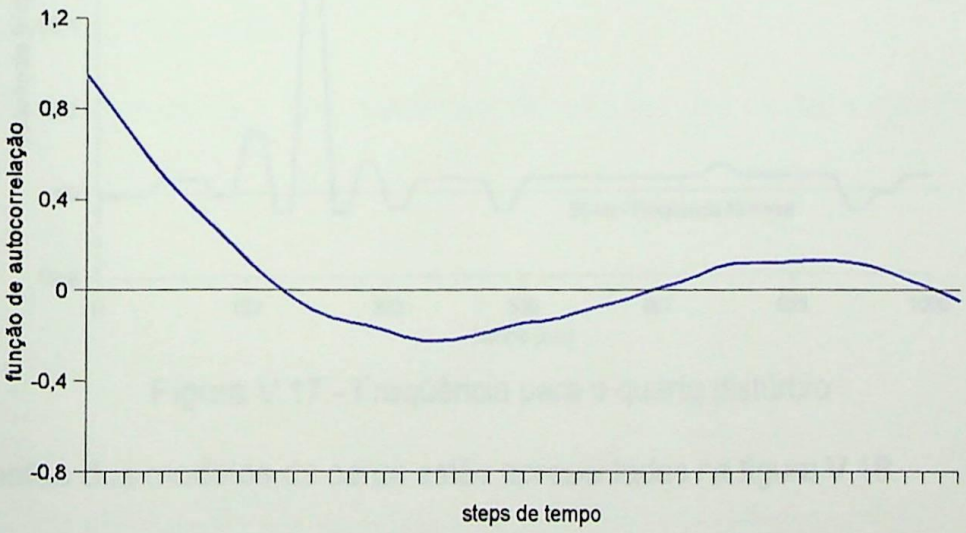


Figura V.15 - Função de autocorrelação para o terceiro distúrbio

V.3.4 - Quarto Teste - Potência Reativa

A figura V.16 ilustra a variação de tensão para o quarto teste. A perturbação é caracterizada por uma queda de tensão da ordem de 7,9 kV, tendo a tensão atingido 136 kV, que corresponde a uma queda de 5,5% com relação a tensão pré-distúrbio. A tensão retorna lentamente para seu valor de regime permanente. A tensão pré-distúrbio é de cerca de 1,04 pu.

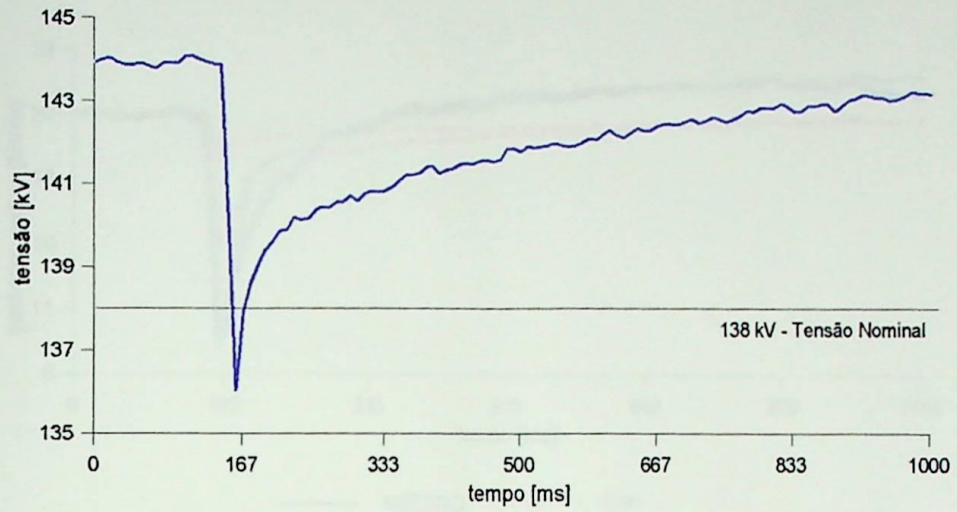


Figura V.16 - Tensão para o quarto distúrbio

A figura V.17 ilustra a variação de freqüência para a perturbação analisada. A oscilação máxima de freqüência é da ordem de 0,87% da freqüência pré-distúrbio.

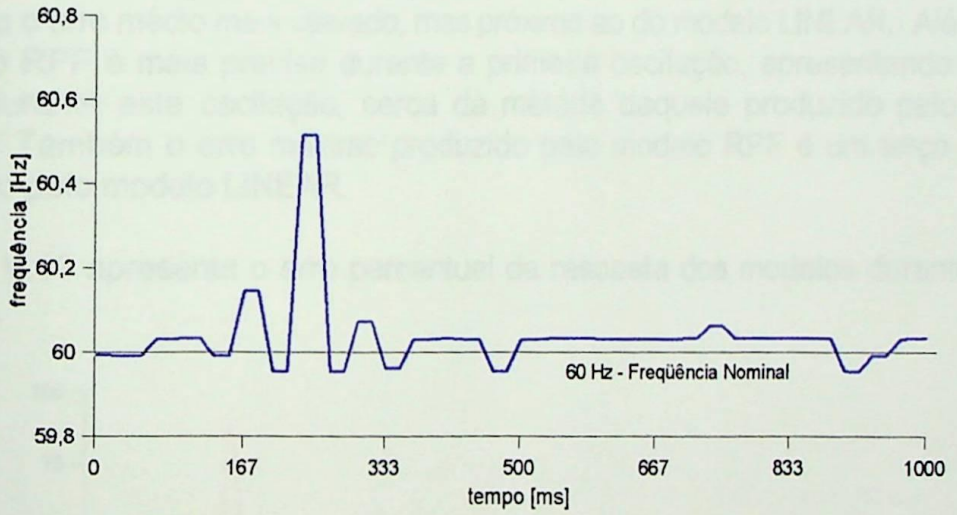


Figura V.17 - Freqüência para o quarto distúrbio

As respostas dos modelos da carga estão apresentadas na figura V.18.

A tabela V.4 mostra o erro percentual da resposta dos modelos para o distúrbio acima.

Tabela V.4 - Erro da resposta dos modelos para o quarto distúrbio

Erro Percentual (%)	ZIP	LINEAR	RPF
Erro médio durante todo o distúrbio	8,25	7,27	1,82
Erro absoluto máximo	88,23	46,21	15,91
Erro médio na primeira oscilação (130-340 ms)	17,34	9,59	4,96

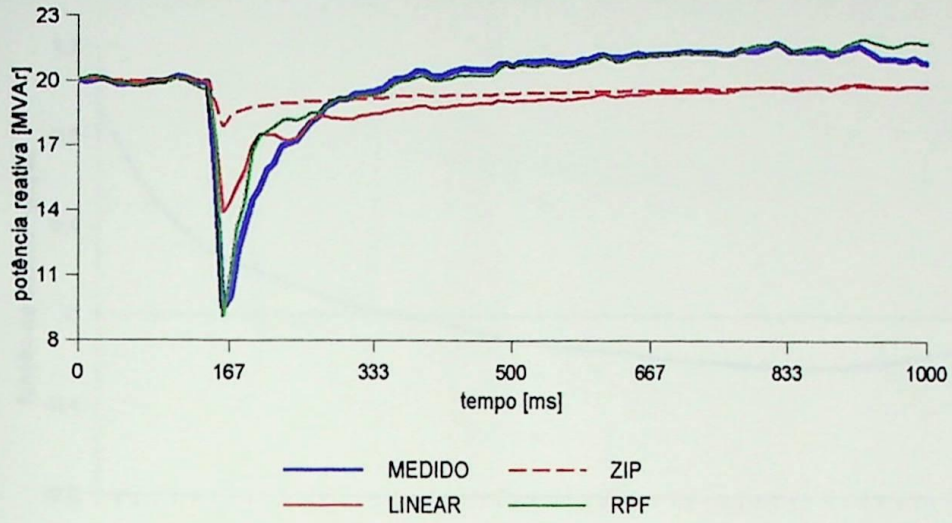


Figura V.18 - Resposta dos modelos para o quarto distúrbio

Pode-se observar que o modelo RPF produz os melhores resultados. O erro médio do modelo RPF é um quarto daquele produzido pelo modelo LINEAR. O modelo ZIP apresenta o erro médio mais elevado, mas próximo ao do modelo LINEAR. Além disso, o modelo RPF é mais preciso durante a primeira oscilação, apresentando um erro médio, durante esta oscilação, cerca da metade daquele produzido pelo modelo LINEAR. Também o erro máximo produzido pelo modelo RPF é um terço daquele produzido pelo modelo LINEAR.

A figura V.19 apresenta o erro percentual da resposta dos modelos durante todo o distúrbio.

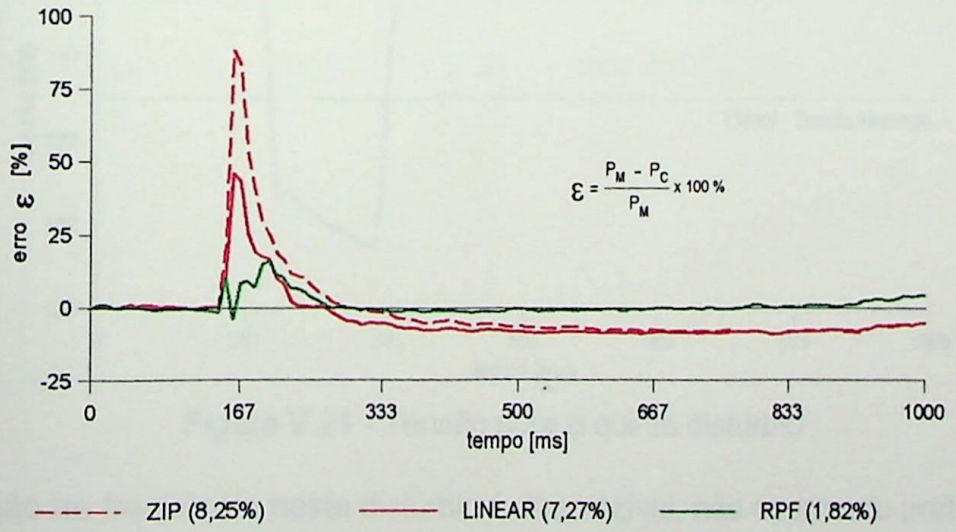


Figura V.19 - Erro percentual dos modelos para o quarto distúrbio
(entre parênteses o erro percentual médio)

Como pode-se notar, a função de autocorrelação apresentada na figura V.20 denota um comportamento mais caótico da potência reativa neste distúrbio, se comparado com

os casos anteriormente analisados para a potência ativa.

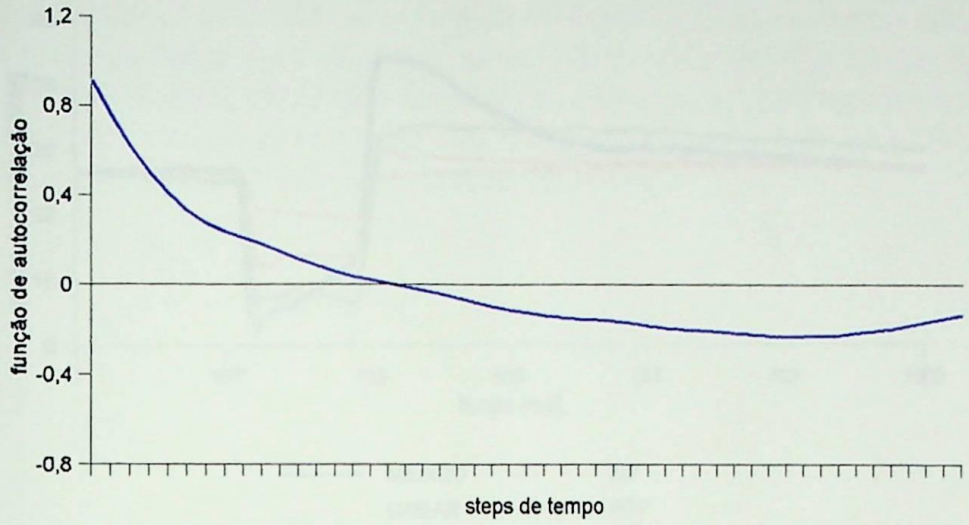


Figura V.20 - Função de autocorrelação para o quarto distúrbio

V.3.5 - Quinto Teste - Potência Reativa

A figura V.21 ilustra a variação de tensão para o quinto teste. No distúrbio ocorre uma queda de tensão da ordem de 14,4 kV, atingido 131 kV, que corresponde a uma queda de 9,9% com relação a tensão pré-distúrbio. A tensão pré-distúrbio é de aproximadamente 1,05 pu.

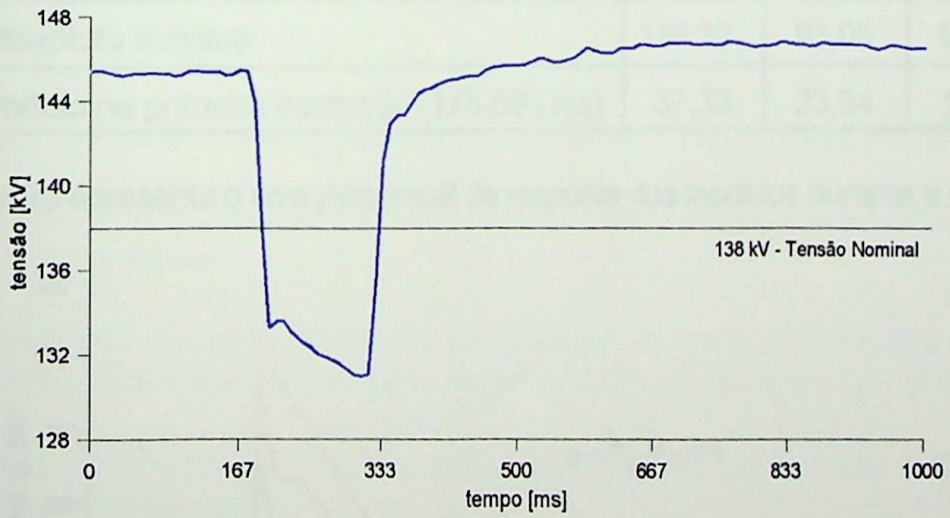


Figura V.21 - Tensão para o quinto distúrbio

A variação de freqüência neste distúrbio é desprezível, não ocorrendo praticamente nenhuma oscilação na mesma.

As respostas dos modelos de carga estão apresentados na figura V.22. Novamente, o modelo RPF apresenta os melhores resultados. Como sempre, o modelo ZIP não é competitivo. Vale a pena mencionar que, em diversos outros testes realizados, o

modelo ZIP para a parte reativa da carga atingiu resultados ligeiramente melhores que o modelo LINEAR devido ao termo quadrático envolvendo a tensão.

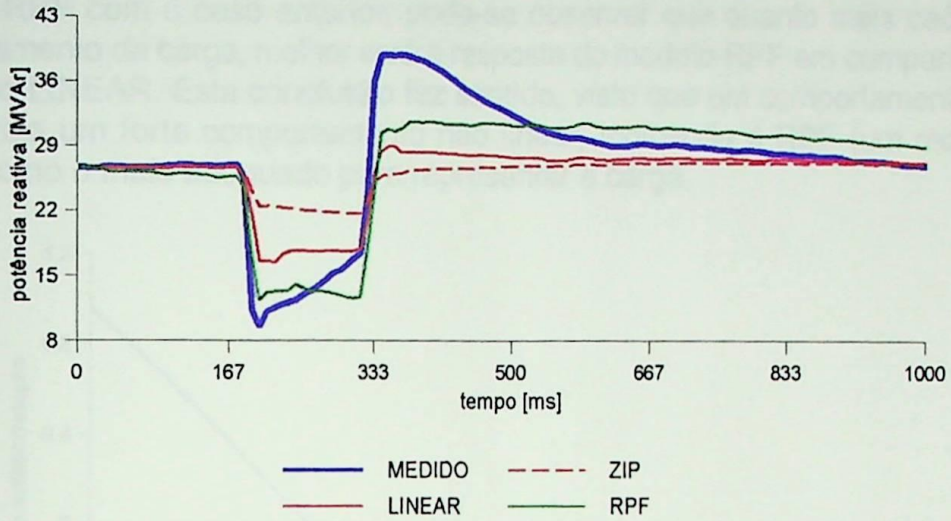


Figura V.22 - Resposta dos modelos para o quinto distúrbio

A tabela V.5 ilustra o erro percentual da resposta dos modelos para o distúrbio acima.

Tabela V.5 - Erro da resposta dos modelos para o quinto distúrbio

Erro Percentual (%)	ZIP	LINEAR	RPF
Erro médio durante todo o distúrbio	16,77	10,68	8,51
Erro absoluto máximo	136,32	91,05	53,63
Erro médio na primeira oscilação (175-580 ms)	37,33	23,34	13,16

A figura V.23 apresenta o erro percentual da resposta dos modelos durante o distúrbio.

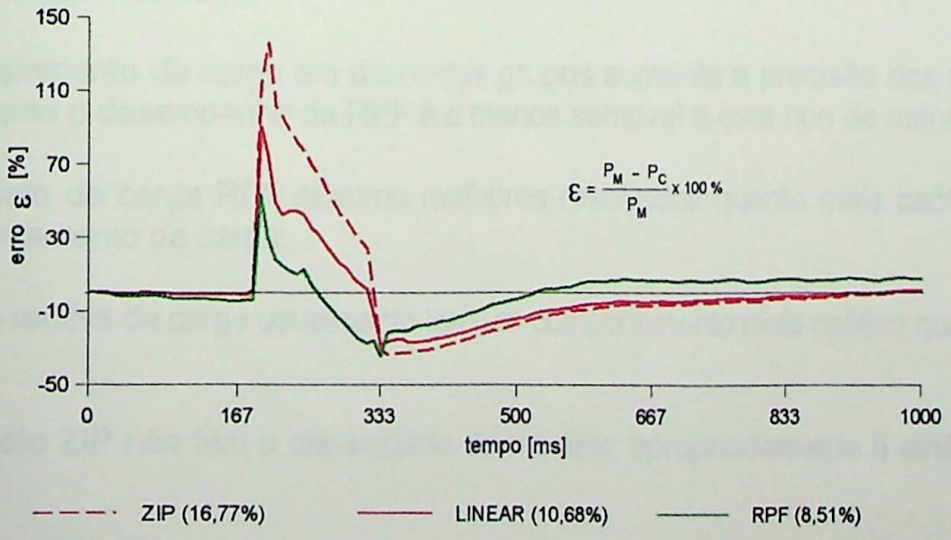


Figura V.23 - Erro percentual dos modelos para o quinto distúrbio
(entre parênteses o erro percentual médio)

A função de autocorrelação plotada na figura V.24 indica que um comportamento caótico da carga é observado para este distúrbio. Comparando o desempenho do modelo RPF com o caso anterior, pode-se observar que quanto mais caótico for o comportamento da carga, melhor será a resposta do modelo RPF em comparação com o modelo LINEAR. Esta conclusão faz sentido, visto que um comportamento caótico caracteriza um forte comportamento não linear, indicando a RPF (um modelo não linear) como o mais adequado para representar a carga.

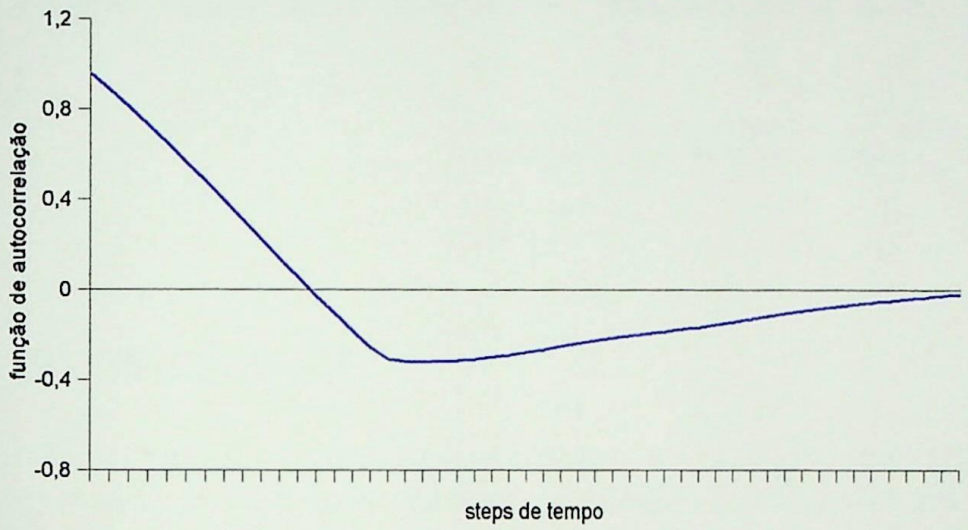


Figura V.24 - Função de autocorrelação para o quinto distúrbio

V.4 - CONCLUSÕES

As conclusões principais obtidas dos testes apresentados e de outros realizados são:

- a composição complexa da carga faz com que seu comportamento dinâmico seja difícil de ser modelado;

- o agrupamento da carga em diferentes grupos aumenta a precisão dos modelos; entretanto o desempenho da RPF é o menos sensível a este tipo de estratégia;

- o modelo de carga RPF mostrou melhores resultados quanto mais caótico for o comportamento da carga;

- a parte reativa da carga usualmente tem um comportamento mais caótico que a parte ativa;

- o modelo ZIP não tem a capacidade de modelar apropriadamente a dinâmica da carga;

- embora algumas vezes o erro para os modelos LINEAR e RPF fossem similares, a escolha da ordem adequada para o sistema linear não é fácil, necessitando o conhecimento da carga e/ou de vários testes (tentativas de ajustes);

- a utilização de RPF para a obtenção de modelos dinâmicos de carga elétrica são perfeitamente factíveis e os resultados obtidos mostraram sua validade e competitividade com os modelos de carga tradicionalmente utilizados em estudos realizados em SEP. Com isso, a RPF torna-se uma importante e nova contribuição no desenvolvimento de modelos de carga para utilização em SEP.

CAPÍTULO VI

COMPARAÇÃO DO MODELO RPF COM O MODELO DINÂMICO DE CARGA MIT AGREGADO COM O MODELO ZIP

Duvidar de tudo ou crer em tudo são duas soluções igualmente cômodas, que nos dispensam, ambas de refletir.

Henri Poincaré
1854-1912

VI.1 - INTRODUÇÃO

Os motores de indução normalmente constituem a grande maioria das cargas industriais, o que mostra a importância de um modelo específico para este tipo de carga. Muitos programas computacionais existentes de transitórios eletromecânicos têm a opção de representar este elemento com uma maior ou menor detalhamento.

Na literatura se encontram muitos artigos nos quais as cargas com características dinâmicas (motores) são agregadas em um modelo simples de motor de indução [Price, 1988], ou em um modelo que combina uma carga estática com motor de indução [Sabir, 1982; Rogers, 1984; Wong, 1985, Chiang, 1997]. Uma série grande de artigos também apresenta técnicas para agregação de motores de indução em uma unidade equivalente [Hakim, 1976; Lem, 1994; Franklin, 1994, 1997; Taleb, 1994].

Neste capítulo será apresentado um modelo dinâmico de motor de indução agregado com uma carga estática ZIP, sendo o modelo do motor de indução desenvolvido com diferentes graus de detalhamento. Os resultados obtidos com este modelo serão comparados como os modelos já desenvolvidos.

VI.2 - MOTOR DE INDUÇÃO

O motor de indução, dentre os motores de corrente alternada, é o de mais extenso uso industrial (estima-se que cerca de 90% dos motores fabricados sejam deste tipo). A procura por estes motores se deve ao fato dos mesmos possuírem importantes qualidades, tais como: construção simples, robustez, confiabilidade, custo reduzido, vida útil longa, facilidade de manobra e de manutenção.

O princípio de funcionamento do motor de indução é baseado na lei de Faraday e a

conversão eletromecânica de energia ocorre quando a variação do fluxo é associada ao movimento mecânico. Em outras palavras, quando ocorre uma variação de fluxo magnético, produzido por uma campo rotativo que se desloca em volta de uma bobina, correntes induzidas são geradas. Pela lei de Lenz, estas tentam opor-se à causa que as produziu. Da iteração entre esta corrente e o fluxo aparece uma força em cada lado da bobina, formando um conjugado cuja tendência é de girar a bobina no mesmo sentido do campo magnético, afim de eliminar a causa produtora da corrente através da diminuição da velocidade relativa.

Basicamente, o motor de indução é constituído por uma parte estacionária, denominada estator, e uma parte rotativa, denominada rotor. Normalmente, no estator estão inseridos os enrolamentos que produzirão o campo magnético rotativo (campo girante). No rotor estão colocados os condutores do outro enrolamento nos quais as correntes serão induzidas pelo campo girante. A corrente alternada é fornecida ao enrolamento do estator diretamente e, por indução, ao enrolamento do rotor. O rotor pode ser de dois tipos: enrolado ou em gaiola (mais comumente encontrado, devido à sua construção mais fácil, maior robustez e menor custo).

A conversão de energia no motor de indução se dá unicamente devido à indução eletromagnética tal como acontece no transformador.

Normalmente, a velocidade do rotor é menor do que a velocidade do campo girante, pois quando eles se igualam não existe deslocamento relativo entre o rotor e a indução eletromagnética, não aparecendo corrente no rotor e, por conseqüente, anulando a força motriz. Quando se coloca carga no eixo do motor, aumenta a velocidade relativa e, conseqüentemente, as correntes induzidas e as forças presentes, havendo maior conversão de energia elétrica em mecânica. A diferença entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona do campo girante no estator é dado o nome de escorregamento (s):

$$s = \frac{\omega_S - \omega_R}{\omega_S}$$

sendo:

ω_S - velocidade angular do campo magnético do estator (velocidade síncrona);

ω_R - velocidade angular elétrica do rotor.

Quando o motor de indução opera como gerador o escorregamento é negativo ($s < 0$); quando opera como motor o escorregamento é positivo ($0 < s < 1$) e quando opera como freio, $s > 1$.

Pode-se obter para o motor de indução um circuito elétrico equivalente em regime permanente. O circuito equivalente simplificado do motor de indução de gaiola simples está apresentado no Apêndice II.

O valor do torque ou conjugado eletromagnético interno do motor, correspondente à

potência interna dividida pela velocidade angular, é dado por expressões também apresentadas no Apêndice II.

A forma geral da curva do torque em função do escorregamento é mostrada na figura VI.1. As regiões de funcionamento são divididas como motor ($0 < s < 1$), como gerador ($s < 0$) e como freio ($s > 1$). A condição de partida é aquela para o qual $s = 1$.

Pode-se observar nesta figura ainda a influência da tensão de alimentação no valor do torque. Na região normal de funcionamento, esta influência é insignificante, para variações dentro da região operativa..

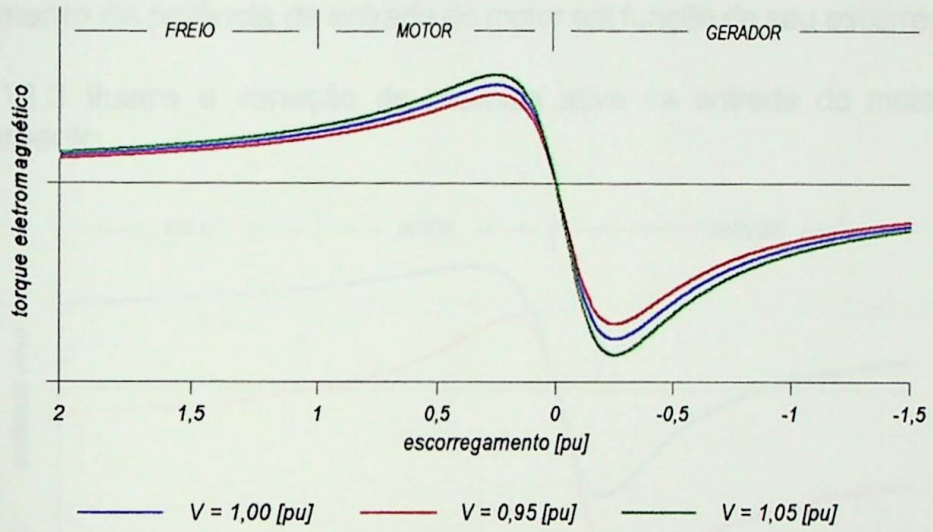


Figura VI.1 - Curva do torque elétrico em função do escorregamento para vários valores de tensão de alimentação

A figura VI.2 ilustra a variação de potência interna do motor com o escorregamento. Na região que o mesmo opera como freio ou como gerador, a potência elétrica é negativa. Na partida ou quando o escorregamento é nulo, a potência elétrica é igual a zero.

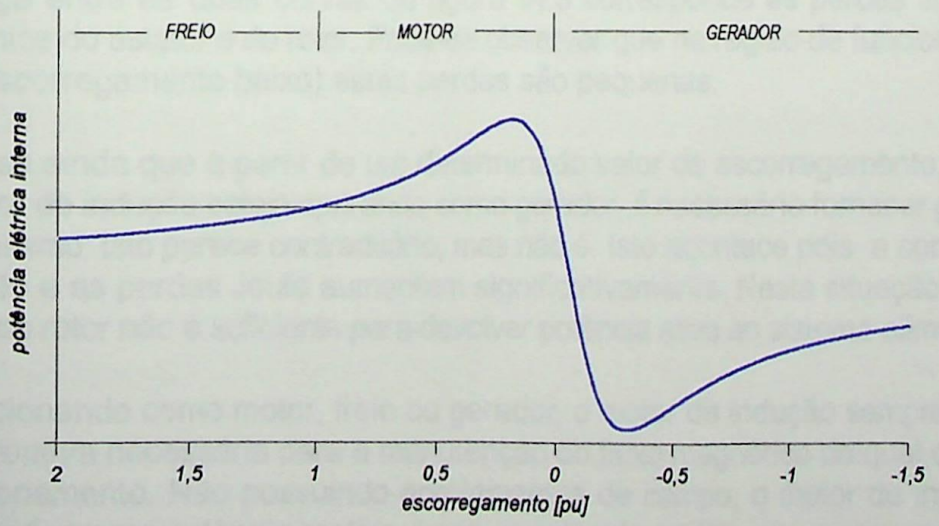


Figura VI.2 - Curva da potência elétrica interna em função do escorregamento

Os valores de torque e de potência interna apresentados acima ainda não são os valores disponíveis no eixo do motor, pois ainda devem ser descontadas as perdas por atrito, ventilação, entre outras.

Pode-se notar que o torque máximo e a potência máxima não ocorrem à mesma velocidade.

No problema da modelagem de carga, é conhecido a potência ativa e reativa em um determinado barramento. No caso da obtenção de um modelo de carga representado por um motor de indução, esta potência corresponde a potência na entrada do mesmo e não a interna ou a disponível no eixo. Por isso, torna-se interessante analisar o comportamento da potência de entrada do motor em função de seu escorregamento.

A figura VI.3 ilustra a variação de potência ativa na entrada do motor com o escorregamento.

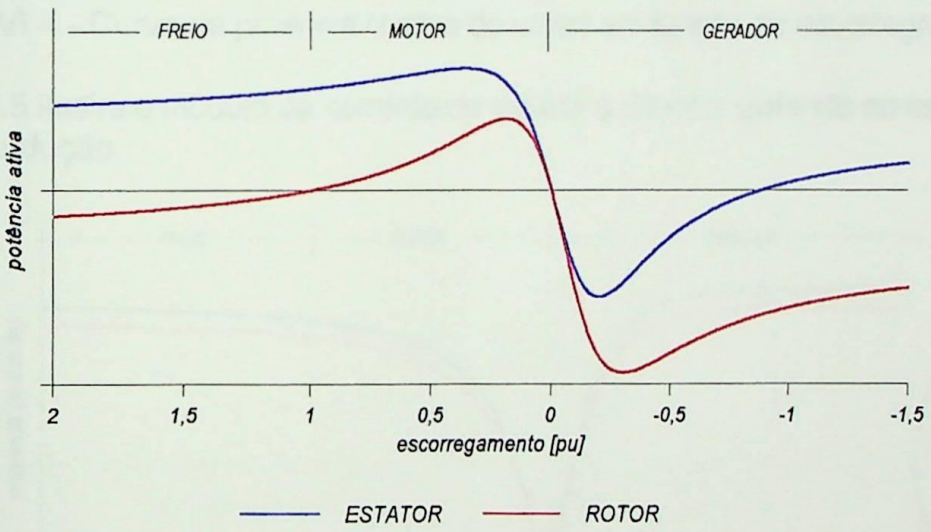


Figura VI.3 - Curva da potência ativa do motor em função do escorregamento

A diferença entre as duas curvas da figura VI.3 corresponde as perdas Joule nos enrolamentos do estator e do rotor. Pode-se observar que na região de funcionamento normal (escorregamento baixo) estas perdas são pequenas.

Observa-se ainda que a partir de um determinado valor de escorregamento, mesmo que o motor de indução esteja operando como gerador, é necessário fornecer potência ativa ao mesmo. Isto parece contraditório, mas não é. Isto acontece pois a corrente se eleva muito e as perdas Joule aumentam significativamente. Nesta situação o efeito "gerador" do rotor não é suficiente para devolver potência ativa ao sistema alimentador.

Quer funcionando como motor, freio ou gerador, o motor de indução sempre recebe potência reativa necessária para a manutenção do fluxo magnético do qual depende seu funcionamento. Não possuindo enrolamentos de campo, o motor de indução é incapaz de fornecer potência reativa. Logo, a potência reativa em qualquer situação operativa é positiva.

A figura VI.4 ilustra a variação de potência reativa na entrada do motor com o escorregamento.

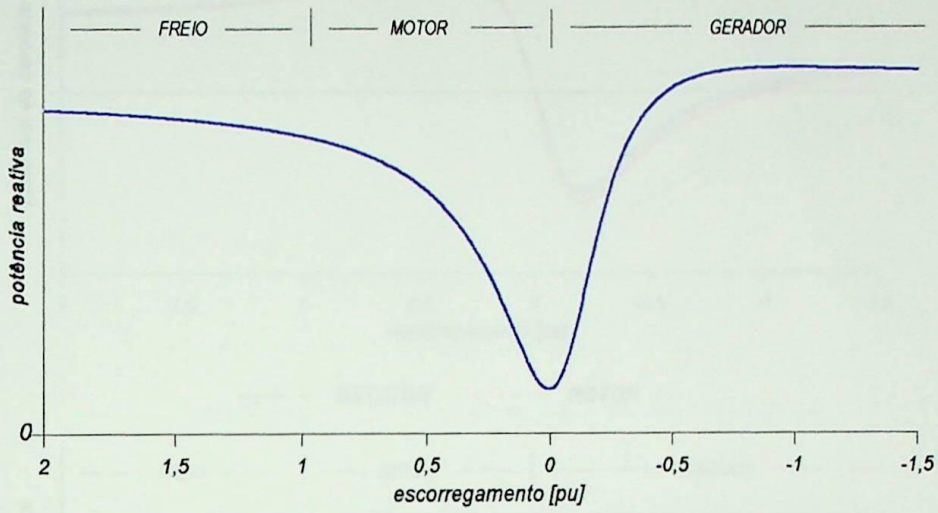
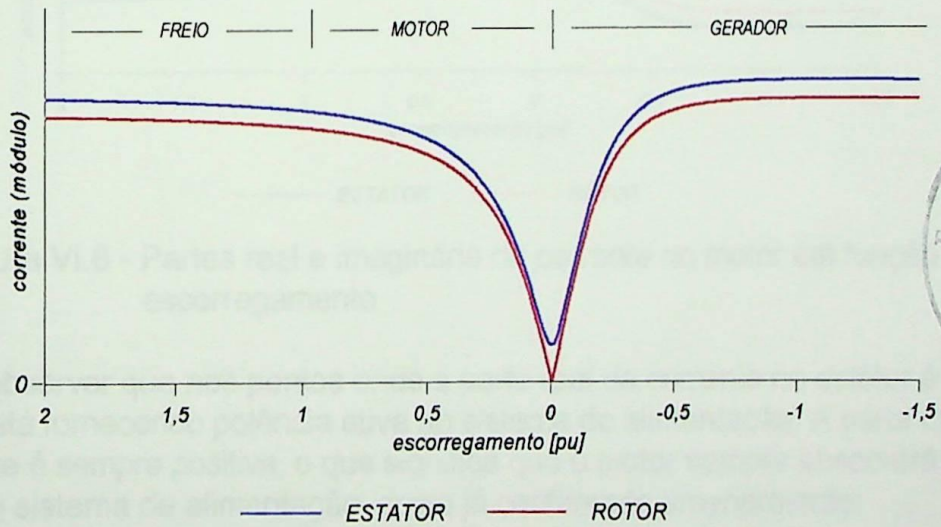


Figura VI.4 - Curva da potência reativa do motor em função do escorregamento

A figura VI.5 ilustra o módulo da corrente do estator e do rotor (referida ao estator) no motor de indução.



Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
MAUÁ
BIM

Figura VI.5 - Módulo da corrente no motor em função do escorregamento

Pode-se observar valores elevados de corrente fora da faixa de operação normal do motor de indução.

A diferença entre a corrente no estator e no rotor corresponde a parcela da corrente no ramo de magnetização do motor.

A figura VI.6 apresenta as partes real e imaginária da corrente do estator e do rotor (referida ao estator) no motor de indução.

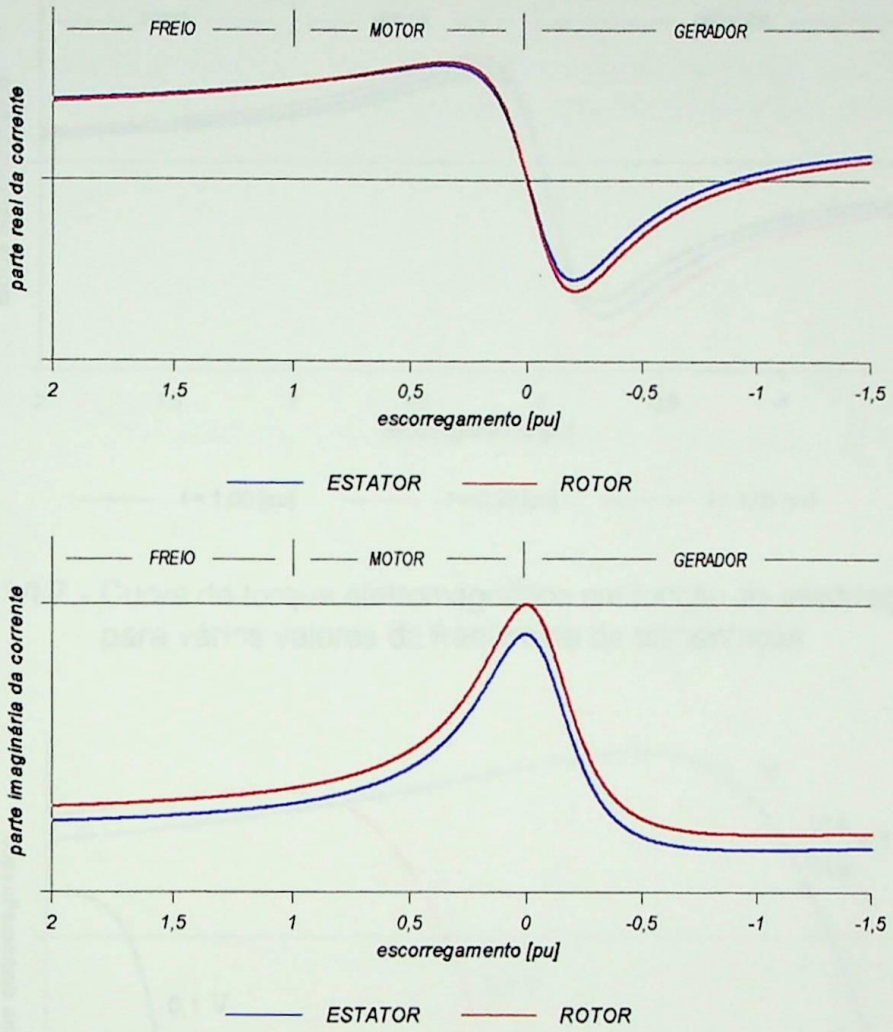


Figura VI.6 - Partes real e imaginária da corrente no motor em função do escorregamento

Pode-se observar que nos pontos onde a parte real da corrente no estator é negativa o motor está fornecendo potência ativa ao sistema de alimentação. A parte imaginária da corrente é sempre positiva, o que significa que o motor sempre absorverá potência reativa do sistema de alimentação, como já confirmado anteriormente.

A influência da freqüência de alimentação do motor no torque eletromagnético é mostrado na figura VI.7. Pode-se observar que a influência é pequena. A maior influência é na região onde o motor de indução opera como gerador. Deve-se observar que para um mesmo valor de escorregamento *s*, a velocidade do rotor varia a medida que a freqüência de alimentação do motor varia.

Alterações na freqüência de alimentação do motor, para uma determinada velocidade do rotor, acarretam variações significativas no escorregamento e no torque eletromagnético. A figura VI.8 ilustra a influência da velocidade do rotor (ω_R) no torque do motor para vários valores de tensão e freqüência de alimentação do mesmo (ω_S). Os valores estão em pu com relação a freqüência de base ou nominal do sistema de alimentação (ω_B).

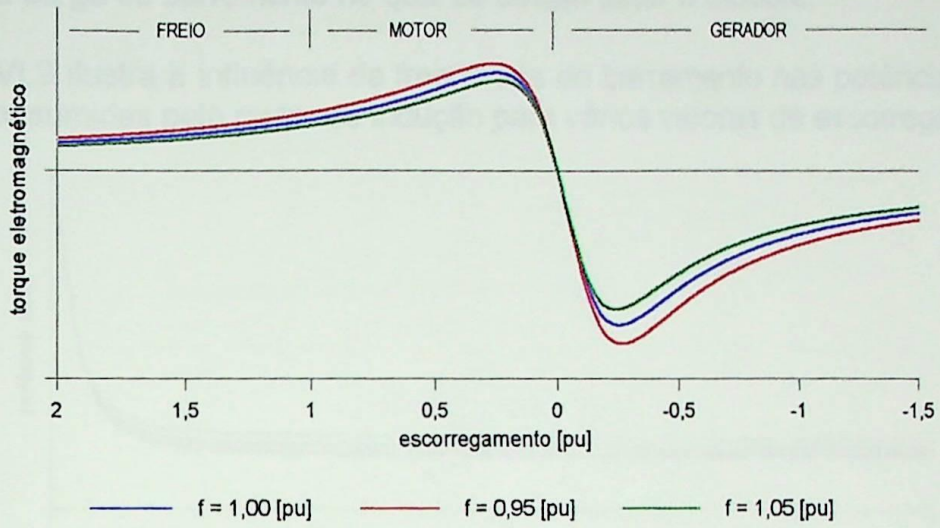


Figura VI.7 - Curva do torque eletromagnético em função do escorregamento para vários valores da freqüência de alimentação

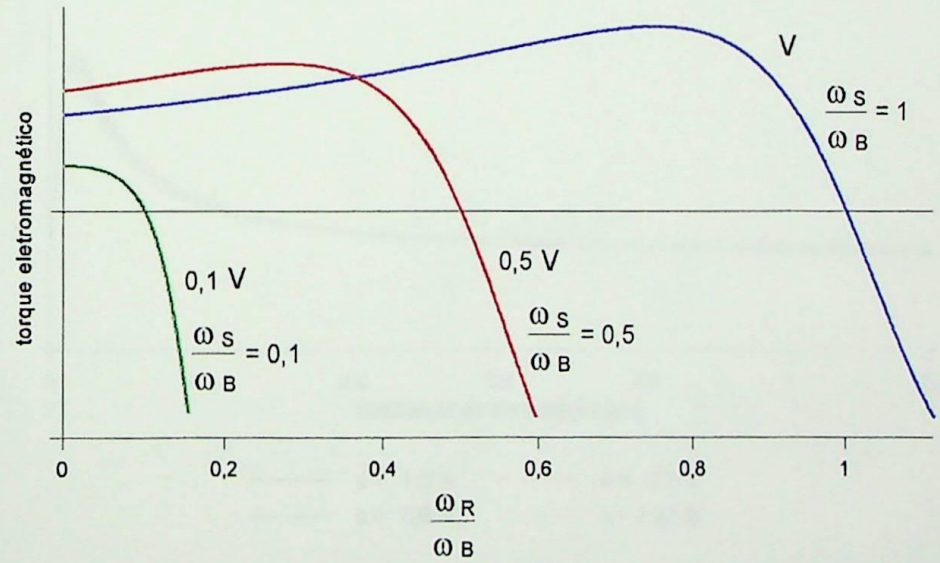


Figura VI.8 - Curva do torque elétrico em função da velocidade do rotor para vários valores da tensão e freqüência de alimentação

VI.3 - INFLUÊNCIA DA TENSÃO E DA FREQÜÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO NA POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA PELO MOTOR DE INDUÇÃO

Os dados de entrada para o modelo de carga elétrica, representado por um motor de indução, são a tensão e a freqüência do barramento onde a carga está conectada. Neste item será analisado a influência desses elementos na potência ativa e reativa consumidas pelo motor de indução que nada mais são do que as potências ativa e

reativa da carga do barramento no qual se deseja obter o modelo.

A figura VI.9 ilustra a influência da freqüência do barramento nas potências ativa e reativa consumidas pelo motor de indução para vários valores de escorregamento.

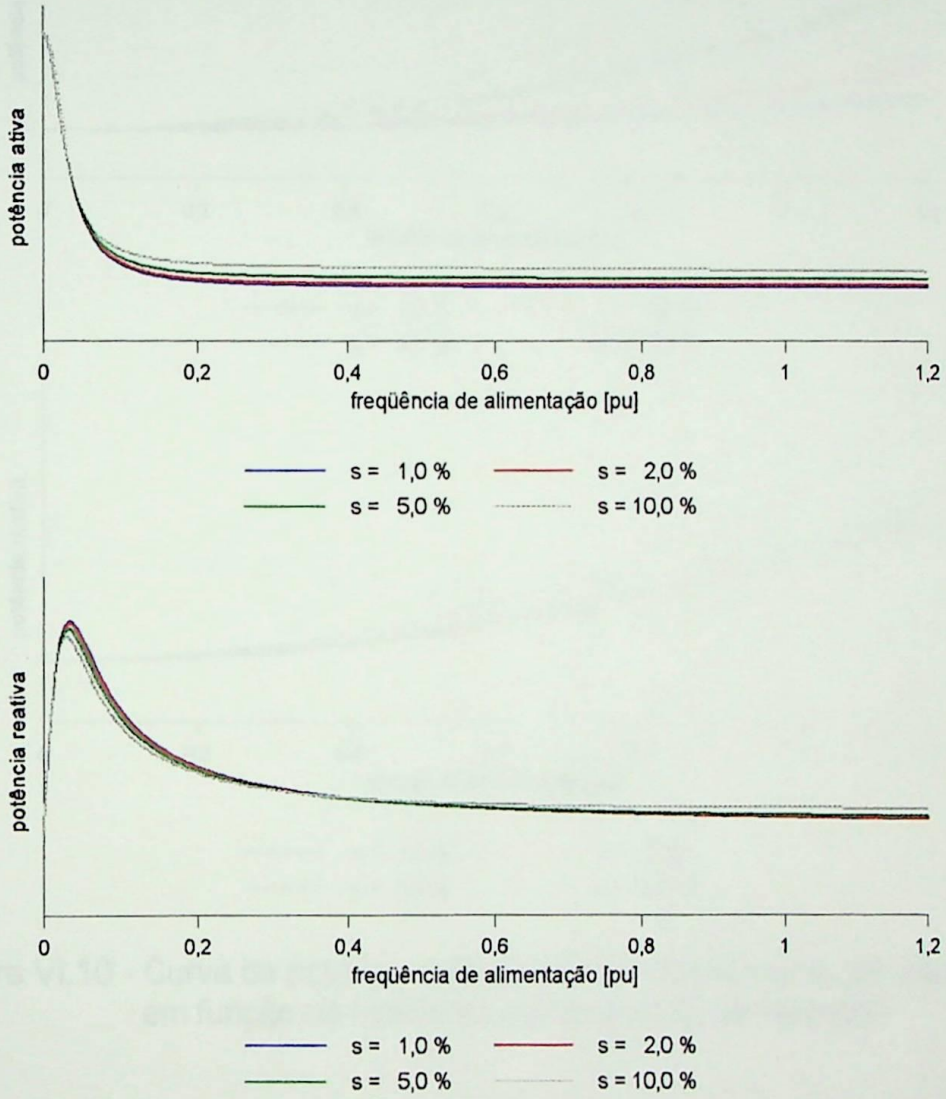


Figura VI.9 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da freqüência do barramento de alimentação

Pode-se observar que a freqüência do barramento de alimentação do motor não influi significativamente nas potência ativa e reativa consumidas pelo mesmo.

A figura VI.10 ilustra a influência da tensão do barramento nas potências ativa e reativa consumidas pelo motor de indução para vários valores de escorregamento.

Observa-se que a tensão do barramento de alimentação do motor apresenta uma influência bem maior que a freqüência nas potência ativa e reativa consumidas pelo mesmo. Para a potência ativa a influência da tensão diminui para baixos valores de escorregamento. Já para a potência reativa a influência do escorregamento é pequena.

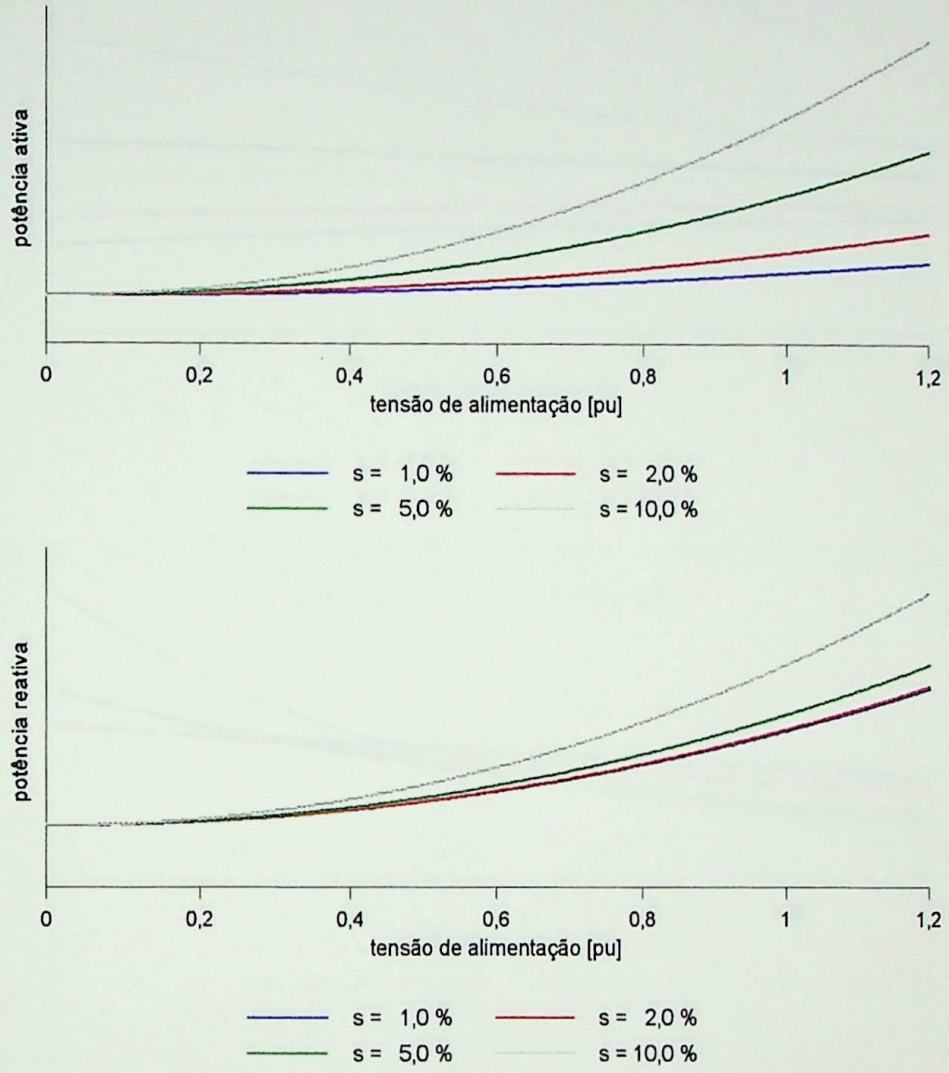


Figura VI.10 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da tensão do barramento de alimentação

VI.4 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO NA POTÊNCIA ELÉTRICA CONSUMIDA

Como na obtenção do modelo de carga através de um motor de indução são necessários estimar os parâmetros do mesmo, torna-se necessário analisar a influência desses parâmetros na potência consumida pelo motor.

As figuras VI.11 a VI.15 ilustram a influência dos parâmetros do motor nas potências ativa e reativa consumidas pelo mesmo para vários valores de escorregamento.

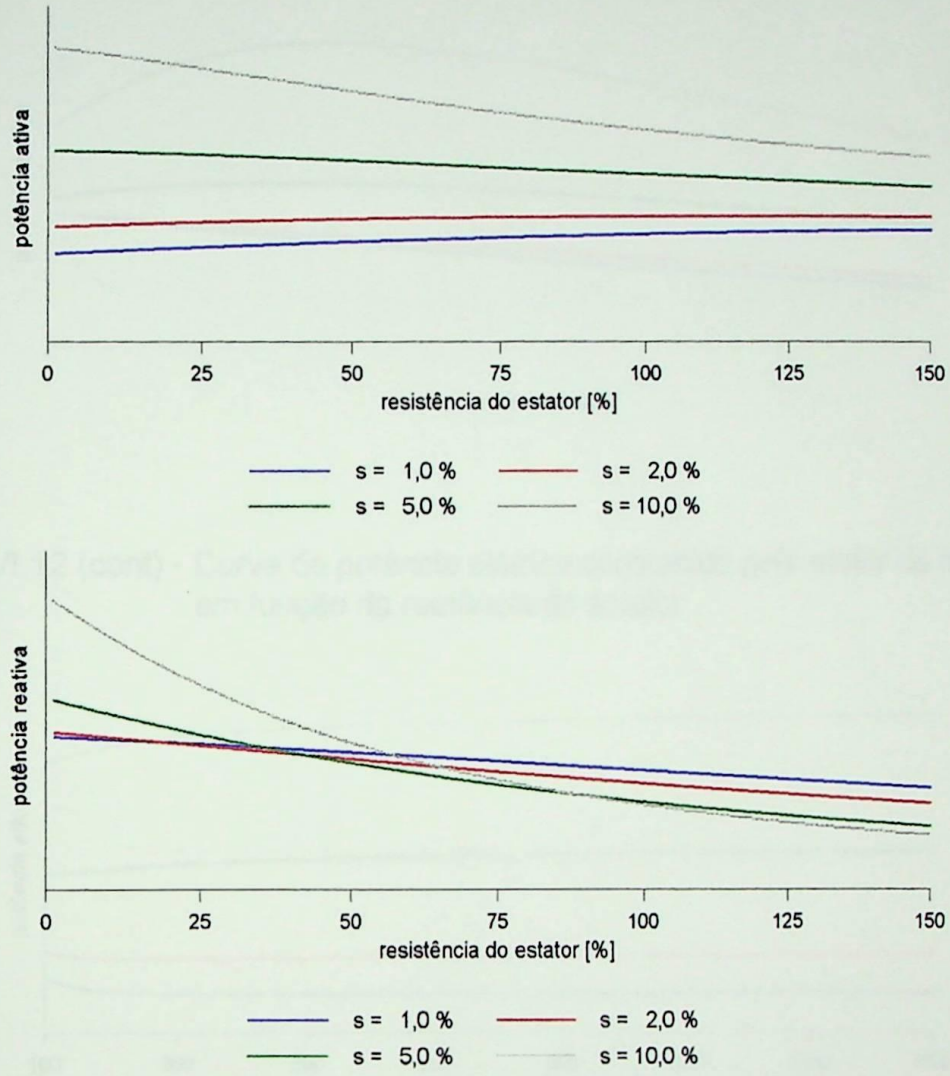


Figura VI.11 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da resistência do estator

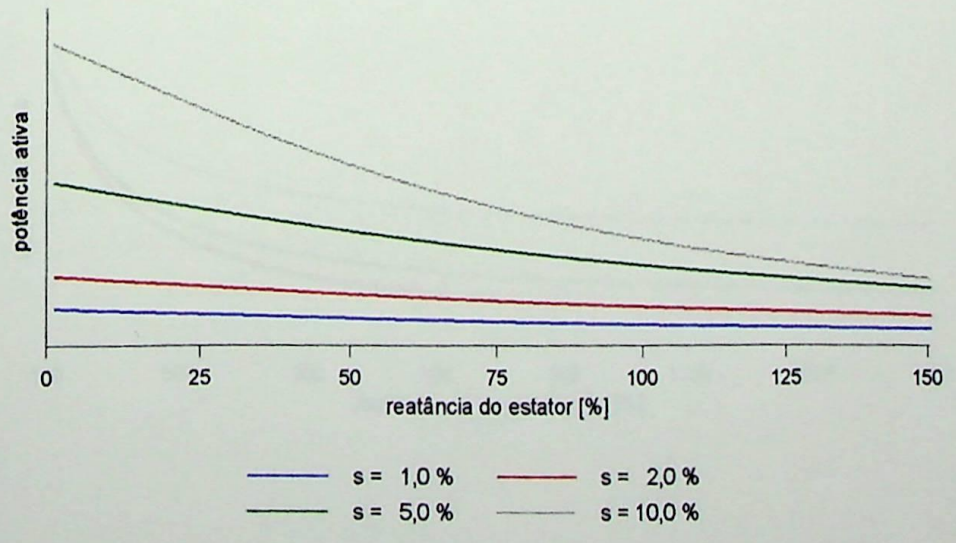


Figura VI.12 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da reatância do estator

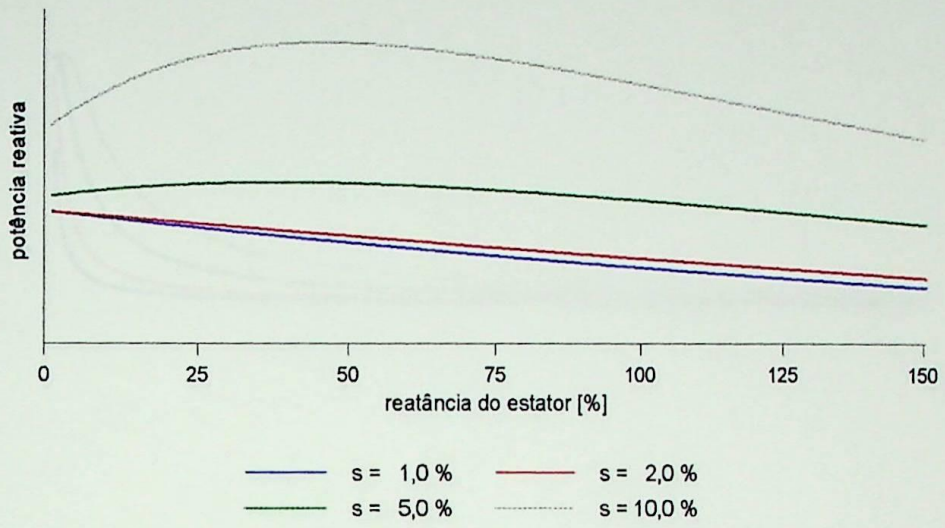
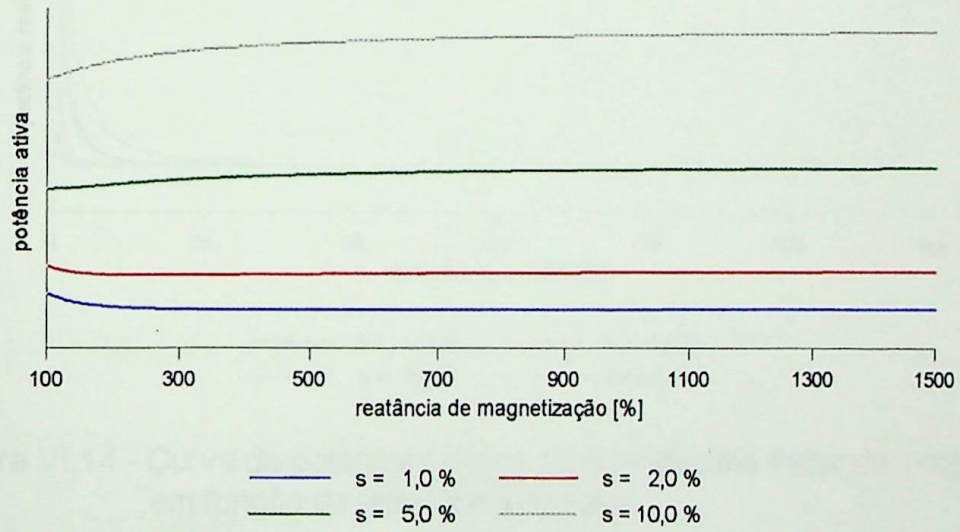


Figura VI.12 (cont) - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da reatância do estator



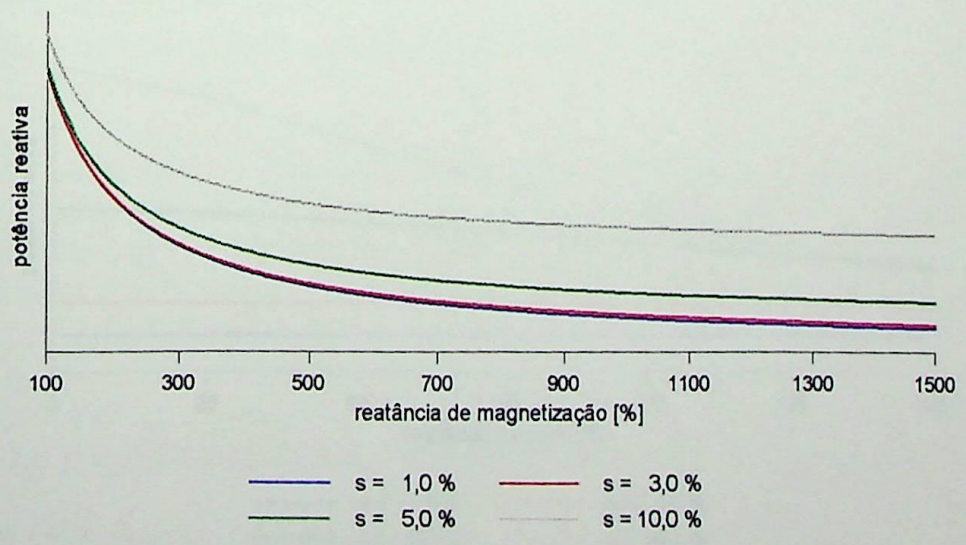


Figura VI.13 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da reatância de magnetização

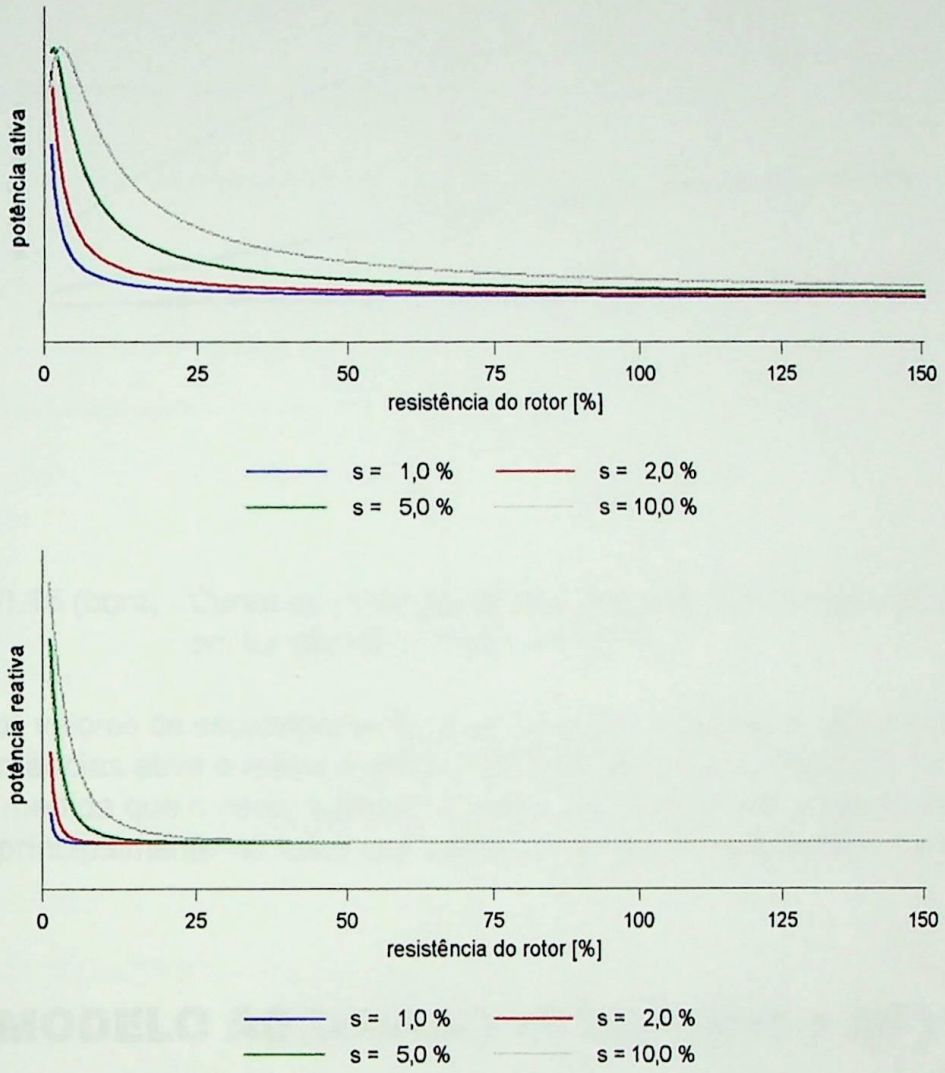


Figura VI.14 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da resistência do rotor

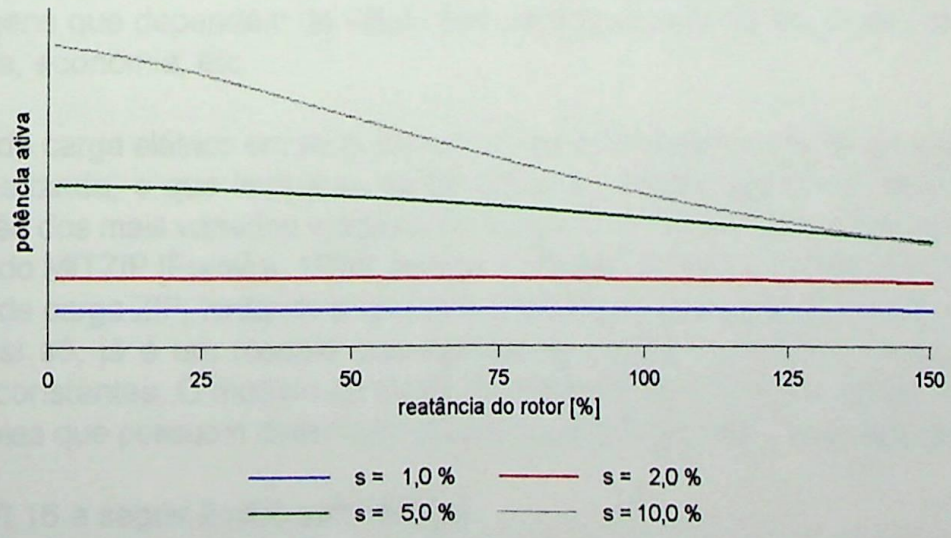


Figura VI.15 - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da reatância do rotor

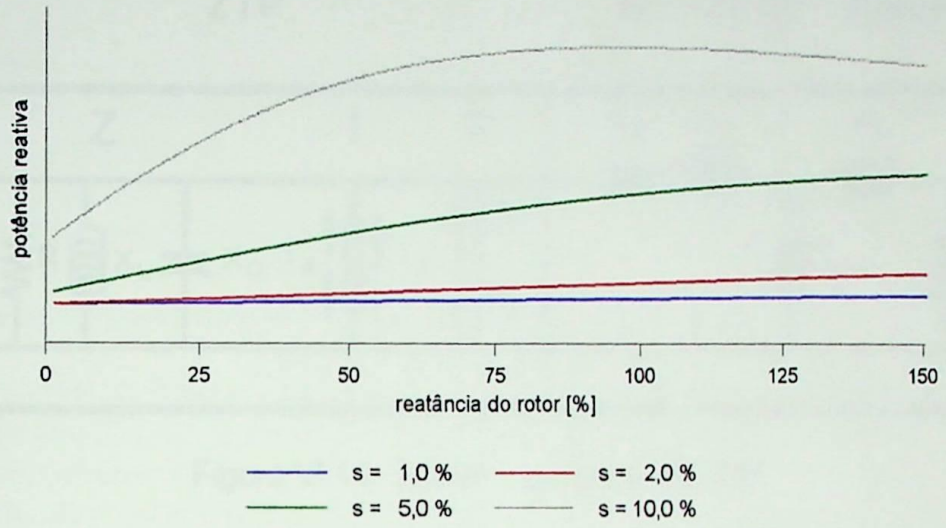


Figura VI.15 (cont) - Curva da potência elétrica consumida pelo motor de indução em função da reatância do rotor

Para baixos valores de escorregamento, a variação dos parâmetros não é significativa para as potências ativa e reativas consumidas, sendo maior a influência na potência reativa. A medida que o escorregamento cresce a influência dos parâmetros também aumenta principalmente na faixa dos valores normais dos parâmetros do motor de indução.

VI.5 - MODELO AGREGADO MITZIP (MIT + ZIP)

Como já comentado, as cargas elétricas, quer sejam de natureza residencial, industrial, comercial, agrícola, pública, etc, são compostas de cargas individuais dos mais variados tipos, como impedância, corrente e potência constantes (cargas passivas) e de motores (síncronos, corrente contínua e indução) que são cargas ativas, em percentagens que dependem de vários fatores, como, hora do dia, clima, localização geográfica, economia, etc.

A divisão da carga elétrica em seus componentes individuais é uma tarefa muito difícil de ser realizada, o que leva a se tentar obter um modelo agregado, resultante da composição dos mais variados modelos de carga. O modelo desenvolvido neste item, denominado MITZIP [Ferreira, 1998], agrega o modelo do motor de indução (MIT) com o modelo de carga ZIP, tentando englobar todos os tipos de cargas. O modelo de carga ZIP, por si só, já é um modelo que agrega as cargas de impedância, corrente e potência constantes. O modelo do motor de indução representa as cargas ativas, ou seja, aquelas que possuem dinâmica (influência de inércia e de constantes de tempo).

A figura VI.16 a seguir ilustra este modelo:

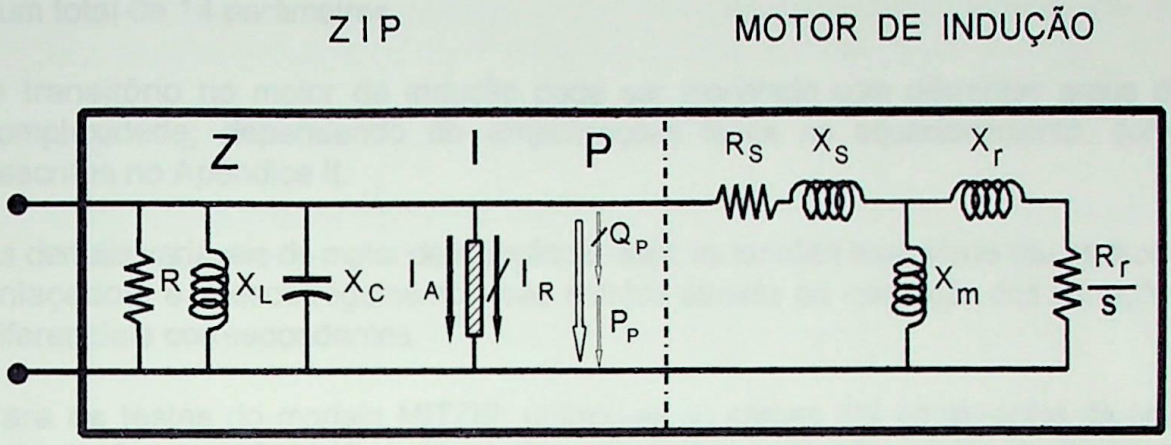


Figura VI.16 - Modelo agregado MITZIP

Para obter os parâmetros deste modelo pode-se utilizar de vários métodos. Foi utilizado aqui o método de recozimento simulado [Rich, 1994; Hassoun, 1995; Rendón 1997], que é um procedimento baseado em uma busca heurística, cujo desenvolvimento se encontra no Apêndice III.

Os parâmetros a serem obtidos para o modelo MITZIP são os seguintes:

- resistência da parcela da carga representada por impedância constante (R)
- reatância indutiva da parcela da carga representada por impedância constante (X_L)
- reatância capacitiva da parcela da carga representada por impedância constante (X_C)
- componente ativa da corrente da parcela da carga representada por corrente constante (I_A)
- componente reativa da corrente da parcela da carga representada por corrente constante (I_R)
- parcela ativa da carga representada por potência constante (P_P)
- parcela reativa da carga representada por potência constante (Q_P)
- resistência do estator do motor de indução que modela parcela da carga (R_S)
- reatância do estator do motor de indução que modela parcela da carga (X_S)
- reatância de magnetização do motor de indução que modela parcela da carga (X_M)
- resistência do rotor do motor de indução que modela parcela da carga (R_R)
- reatância do rotor do motor de indução que modela parcela da carga (X_R)
- constante de inércia do motor de indução que modela parcela da carga (H)
- expoente da carga mecânica aplicada no eixo do motor de indução (m)

num total de 14 parâmetros.

O transitório no motor de indução pode ser modelado com diferentes graus de complexidade, dependendo de simplificações feitas no equacionamento, como descritos no Apêndice II.

As demais variáveis do motor de indução, ou seja, as tensões transitórias (ou os fluxos enlaçados) e o escorregamento, são obtidos através da resolução das equações diferenciais correspondentes.

Para os testes do modelo MITZIP, utilizou-se as cargas dos barramentos de uma subestação em 138 kV, já apresentada neste trabalho, que são compostas de cargas predominantemente industriais. Também para os testes foi utilizado o primeiro grupo de potência ativa, que é composto de 12 distúrbios para treinamento e 6 para testes.

O número de padrões para treinamento correspondentes aos 12 distúrbios é da ordem de 900, sendo gasto em torno de 90 minutos de simulação para se obter os parâmetros do modelo MITZIP, através do processo de recozimento simulado, em um computador Pentium de 166 MHz.

Foram feitos vários testes empregando os 6 distúrbios reservados para esta função tendo todos eles comportamentos semelhantes, sendo aqui apresentado somente um deles.

A seguir será apresentado o algoritmo utilizado no programa MITZIP. O algoritmo é dividido em três partes. A primeira parte corresponde ao regime permanente onde serão estimados e obtidos os valores iniciais dos parâmetros e das variáveis associadas ao modelo. A segunda parte corresponde ao regime transitório onde serão calculados os valores da potência ativa e reativa na saída do modelo e os respectivos erros. A terceira parte corresponde a obtenção dos parâmetros do modelo utilizando o processo de recozimento simulado.

VI.5.1 - Modelo MITZIP com comportamento transitório do motor de indução de primeira ordem

Passo 1 - Regime Permanente

1a) Estimar, para o início do processo iterativo, os 14 parâmetros do modelo MITZIP. Para isso, fornecer a porcentagem da carga a ser representada por impedância constante (parte ativa, reativa indutiva e reativa capacitiva), corrente constante (parte ativa e reativa) e potência constante (parte ativa e reativa). Fornecer também os valores iniciais para os sete parâmetros do motor de indução.

1b) Para cada um dos arquivos de treinamento, utilizar o primeiro padrão do mesmo, que corresponde ao regime permanente (valores de potência ativa e reativa, freqüência e tensão), para obter as condições iniciais do motor de indução. Os valores a serem obtidos são: as tensões transitórias E'_d e E'_q, o escorregamento s_0

e a constante T_0 do conjugado mecânico da carga do eixo do motor. As expressões correspondentes podem ser obtidas no Apêndice II.

Passo 2 - Regime Transitório

2a) Com os parâmetros estimados do modelo MITZIP e com os valores de tensão e freqüência de cada padrão de treinamento:

1) obter a parcela de potência ativa e reativa da carga referente ao modelo ZIP:

$$P_{ZIP} = P_Z + P_I + P_P$$

$$Q_{ZIP} = Q_Z + Q_I + Q_P$$

onde P_Z , Q_Z , P_I , Q_I , P_P e Q_P são as potências ativa e reativa da carga de impedância constante, corrente constante e potência constante respectivamente.

2) obter o escorregamento do motor de indução resolvendo a equação de oscilação mecânica do rotor, usando qualquer método numérico de resolução de equações diferenciais (usado o método FACE):

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}\left[T_M - T_E \right]$$

onde as grandezas referenciadas estão apresentadas no Apêndice II.

3) obter as potências elétricas ativa (P_{MIT}) e reativa (Q_{MIT}) consumidas pelo motor de indução.

4) obter as potências ativa e reativa estimadas pelo modelo MITZIP:

$$P_{MITZIP} = P_{MIT} + P_{ZIP}$$

$$Q_{MITZIP} = Q_{MIT} + Q_{ZIP}$$

5) repetir o procedimento para todos os arquivos de treinamento.

2b) Avaliar o modelo MITZIP através da seguinte expressão:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} (P_{MITZIP} - P_T)^2 + (Q_{MITZIP} - Q_T)^2}{\sum_{i=1}^{N_t} (P_T^2 + Q_T^2)}$$

onde P_T e Q_T são os valores desejados de potência ativa e reativa (obtidas dos

padrões de treinamento), P_{MITZIP} e Q_{MITZIP}, os valores de potência ativa e reativa estimadas pelo modelo MITZIP, e N_t o número total de padrões de treinamento.

Passo 3 - Estimativa dos Parâmetros do modelo MITZIP

3a) Com o erro r e com os parâmetros já estimados do modelo MITZIP, estimar através do método de recozimento simulado, novos valores para estes parâmetros.

3b) Retornar ao Passo 2.

VI.5.2 - Modelo MITZIP com comportamento transitório do motor de indução de terceira ordem

O algoritmo é idêntico ao do modelo de primeira ordem só alterando o item:

2a) 2) obter as tensões transitórias E'_d e E'_q resolvendo as equações diferenciais que representam o comportamento transitório do rotor, usando qualquer método numérico de resolução de equações diferenciais (usado o método FACE):

$$\frac{dE'_d}{dt} = -V_{qR}\,\omega_S \frac{L_M}{L_{RR}} - \frac{1}{T'_0}\left[E'_d + (X - X'_S)\, I_{qS} \right] + s\,\omega_S\, E'_q$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = V_{dR}\,\omega_S \frac{L_M}{L_{RR}} - \frac{1}{T'_0}\left[E'_q - (X - X'_S)\, I_{dS} \right] - s\,\omega_S\, E'_d$$

obter o escorregamento do motor de indução resolvendo a equação de oscilação mecânica do rotor:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}\left[T_M - T_E \right]$$

onde as grandezas referenciadas estão apresentadas no Apêndice II.

VI.5.3 - Modelo MITZIP com comportamento transitório do motor de indução de quinta ordem

O algoritmo é idêntico ao do modelo de primeira ordem só alterando os itens:

1b) Para cada um dos arquivos de treinamento, utilizar o primeiro padrão do mesmo, que corresponde ao regime permanente (valores de potência ativa e reativa, freqüência e tensão), para obter as condições iniciais do motor de indução. Os valores a serem obtidos são: os fluxos concatenados ϕ_{dS}, ϕ_{qS}, ϕ_{dR}, ϕ_{qR}, o escorregamento s_0 e a constante T_0 do conjugado mecânico da carga do eixo do motor. As expressões correspondentes podem ser obtidas no Apêndice II.

2a) 2) obter os fluxos concatenados ϕ_{dS}, ϕ_{qS}, ϕ_{dR} e ϕ_{qR} resolvendo as equações dinâmicas que representam o comportamento transitório do estator e do rotor, usando qualquer método numérico de resolução de equações diferenciais (usado o método FACE):

$$\frac{d\phi_{dS}}{dt} = V_{dS} + \omega_S \phi_{qS} - \frac{R_S L_{RR}}{K}\phi_{dS} + \frac{R_S L_M}{K}\phi_{dR}$$

$$\frac{d\phi_{qS}}{dt} = V_{qS} - \omega_S \phi_{dS} - \frac{R_S L_{RR}}{K}\phi_{qS} + \frac{R_S L_M}{K}\phi_{qR}$$

$$\frac{d\phi_{dR}}{dt} = V_{dR} + s\,\omega_S \phi_{qR} - \frac{R_R L_{SS}}{K}\phi_{dR} + \frac{R_R L_M}{K}\phi_{dS}$$

$$\frac{d\phi_{qR}}{dt} = V_{qR} - s\,\omega_S \phi_{dR} - \frac{R_R L_{SS}}{K}\phi_{qR} + \frac{R_R L_M}{K}\phi_{qS}$$

obter o escorregamento do motor de indução resolvendo a equação de oscilação mecânica do rotor:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}\left[T_M - T_E \right]$$

onde as grandezas referenciadas estão apresentadas no Apêndice II.

Somente a título de complementação foi representado também o modelo do motor de indução de gaiola dupla, que corresponde a um modelo de quinta ordem (Apêndice II).

VI.6 - DESEMPENHO DO MODELO MITZIP

Para os testes de desempenho do modelo MITZIP serão utilizadas as classes de distúrbios de potência ativa e reativa obtidas no capítulo III.

VI.6.1 - Comparação entre os modelos de carga MITZIP representados somente por um motor de indução

Nestes testes o modelo MITZIP obtido para a carga será composto somente por um motor de indução, não tendo parcelas de impedância, corrente e potência constantes.

Para o primeiro grupo de potência ativa usado para treinamento do modelo MITZIP (12 distúrbios), os parâmetros obtidos para o motor de indução estão apresentados na tabela VI.1.

Tabela VI.1 - Parâmetros do modelo de carga MITZIP

Parâmetro (% - 100 MVA)	1ª Ordem	3ª Ordem	5ª Ordem	Gaiola Dupla
Resistência Estator (%)	2,03	2,07	1,00	2,07
Reatância Estator (%)	10,95	15,12	13,47	36,56
Reatância Magnetização (%)	676,00	1500,00	433,54	1500,00
Resistência Rotor (%)	41,56	1,59	1,05	1,56
				96,93
Reatância Rotor (%)	27,84	23,03	26,51	1,24
				1,03
Constante de Inércia (s)	5,23	0,50	0,50	0,50
Expoente Carga Mecânica	0 - 1 - 2	0 - 1 - 2	0 - 1 - 2	0 - 1 - 2

Para um dos distúrbios usados como teste, as oscilações de tensão e freqüência estão apresentados na figura VI.17 e VI.18.

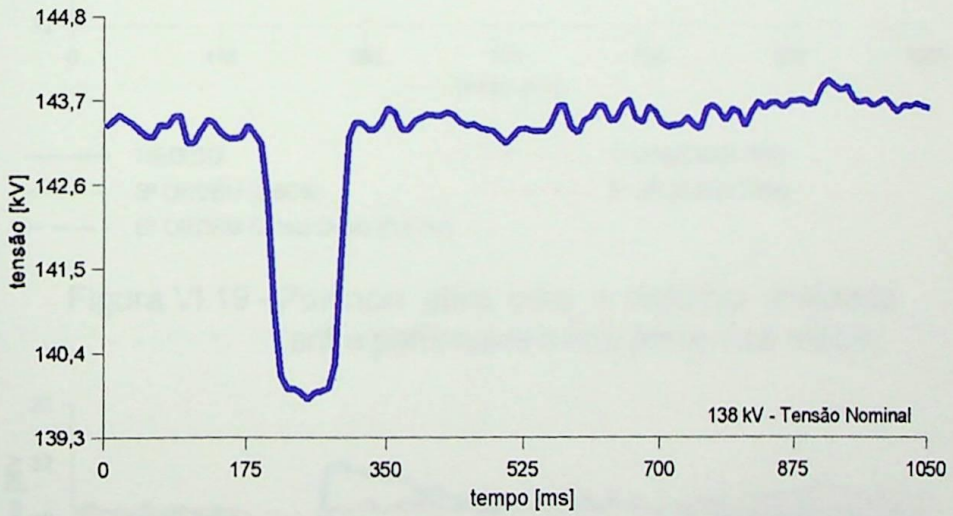


Figura VI.17 - Tensão para o distúrbio usado como teste

As curvas de potência ativa e reativa do distúrbio e as obtidas com os modelos estão apresentadas nas figuras VI.19 e VI.20.

Pode-se observar que os quatro modelos simulados apresentam comportamento e erros médios semelhantes, sendo que nenhum deles consegue acompanhar todas as oscilações da potência ativa e reativa.

O escorregamento, o fluxo concatenado e as tensões internas são obtidos através da integração das expressões correspondentes. Para o distúrbio acima foram obtidos os valores apresentados nas figuras VI.21, VI.22 e VI.23.

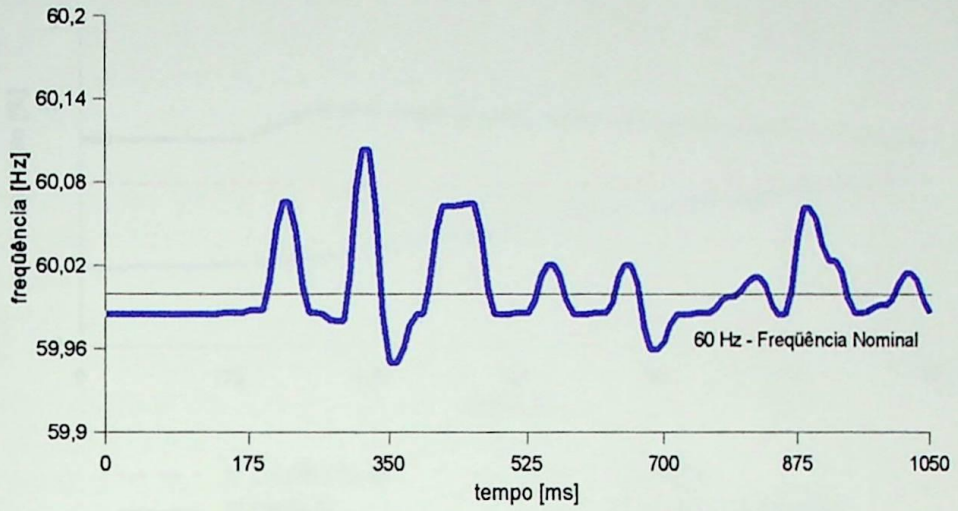


Figura VI.18 - Freqüência para o distúrbio usado como teste

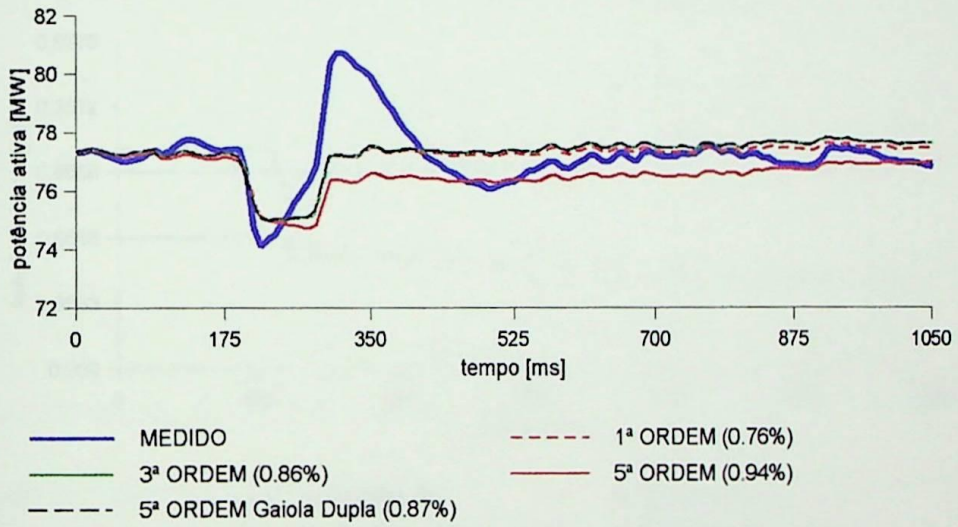


Figura VI.19 - Potência ativa para o distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio)

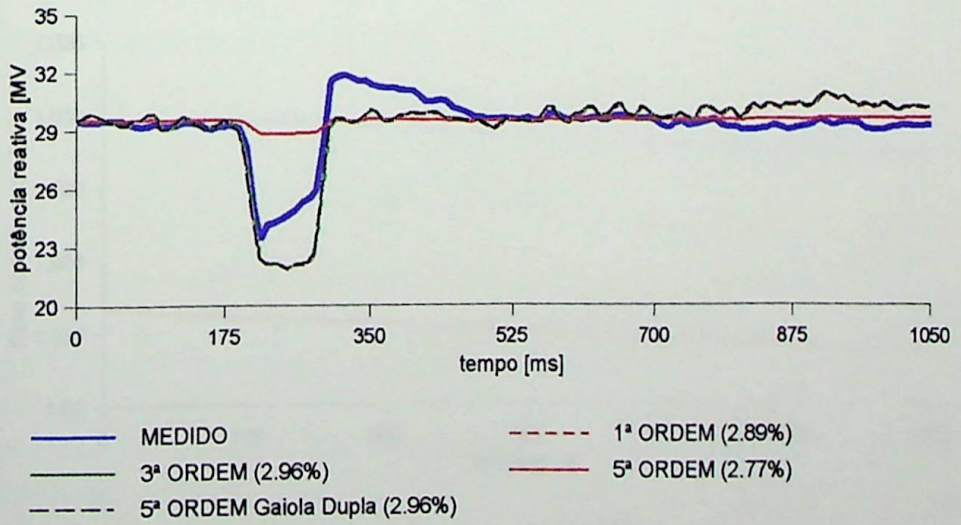


Figura VI.20 - Potência reativa para o distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio)

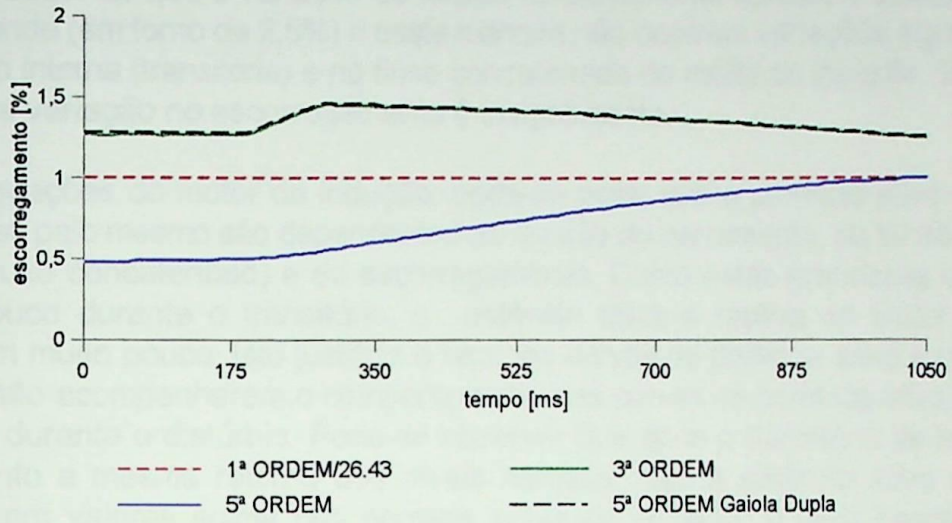


Figura VI.21 - Escorregamento do modelo MITZIP para o distúrbio analisado

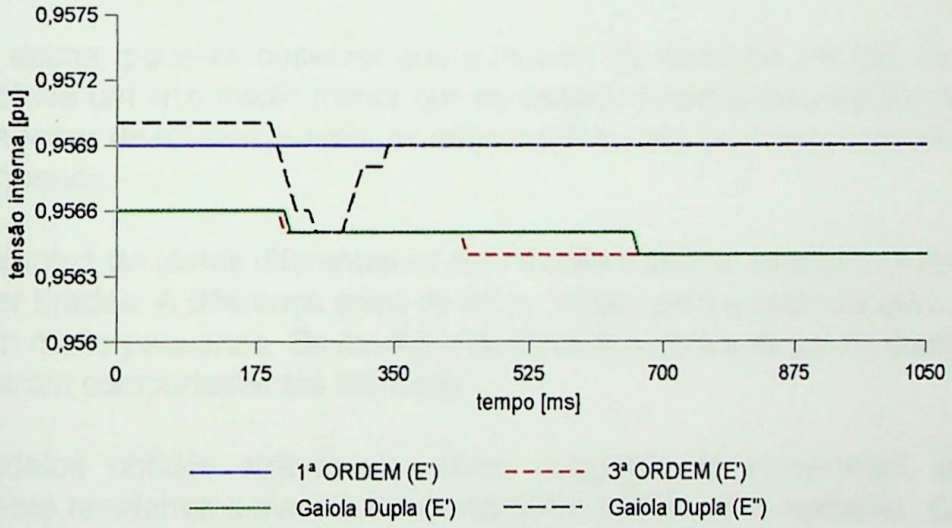


Figura VI.22 - Tensão interna do modelo MITZIP para o distúrbio analisado

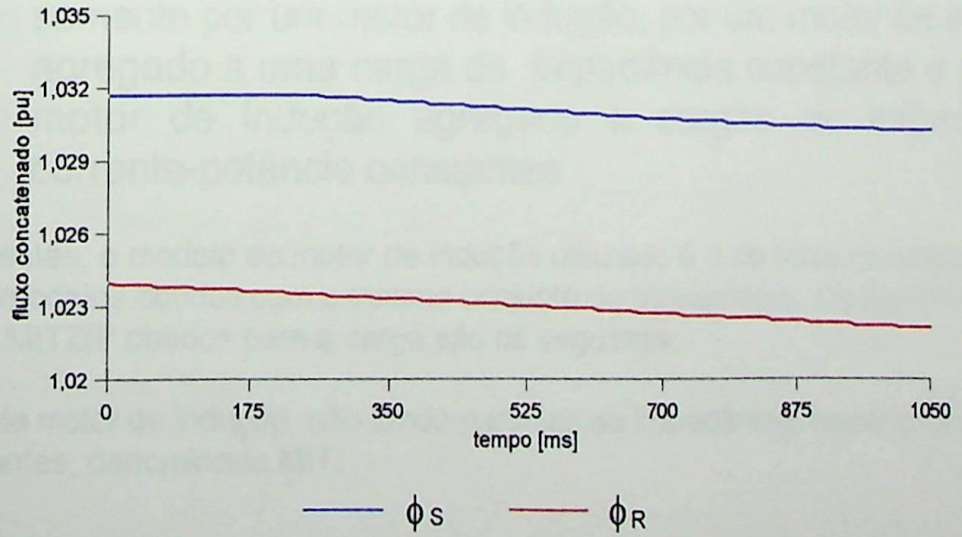


Figura VI.23 - Fluxo concatenado do modelo MITZIP para o distúrbio analisado

Pode-se observar que a variação de tensão no barramento durante o distúrbio não é muito grande (em torno de 2,5%) e desta maneira não ocorrem variações significativas na tensão interna (transitória) e no fluxo concatenado do motor de indução. Com isso, também a variação no escorregamento é insignificante.

Pelas equações do motor de indução, pode-se notar que a potência ativa e reativa absorvidas pelo mesmo são dependentes da tensão do barramento, da tensão interna (ou do fluxo concatenado) e do escorregamento. Como estas grandezas oscilaram muito pouco durante o transitório, a potência ativa e reativa no motor também oscilaram muito pouco. Isto justifica o fato das curvas de potência ativa e reativa do modelo não acompanharem o comportamento das curvas de potência ativa e reativa medidas durante o distúrbio. Pode-se observar que após o transitório de tensão no barramento a mesma retorna aos níveis normais, mas a potência ativa e reativa apresentam valores acima dos normais antes de voltarem a seus níveis de pré-distúrbio, alguns milissegundos depois. Esta oscilação o modelo do motor de indução não consegue reproduzir.

Do teste acima, pode-se observar que o modelo do motor de indução de primeira ordem obteve um erro médio menor que os demais modelos para a potência ativa e reativa, apesar da diferença entre os erros médios para os diversos modelos serem muito pequenos.

Para conjuntos de testes diferentes com os modelos acima, as mesmas conclusões podem ser tiradas. A diferença entre os erros médios para a potência ativa e reativa continuam muito pequenos. Os modelos de terceira ordem e de gaiola dupla sempre apresentaram comportamentos idênticos.

Com modelos obtidos através de outros conjuntos de treinamento, os testes praticamente revelaram o mesmo comportamento notado até o momento. Com base nos testes não se pode afirmar qual modelo é o melhor.

VI.6.2 - Comparação entre os modelos de carga representados somente por um motor de indução, por um motor de indução agregado a uma carga de impedância constante e por um motor de indução agregado a cargas de impedância-corrente-potência constantes

Nestes testes, o modelo do motor de indução utilizado é o de terceira ordem, sendo todos os modelos obtidos com o mesmo conjunto de treinamento. Os parâmetros dos modelos MITZIP obtidos para a carga são os seguintes:

- somente motor de indução, não tendo parcelas de impedância, corrente e potência constantes, denominado MIT:

Resistência Estator (%)	Reatância Estator (%)	Reatância Magn. (%)	Resistência Rotor (%)	Reatância Rotor (%)	Constante Inércia (s)	Expoente Carga
2,07	15,12	1500,0	1,59	23,03	0,5	0 - 1 - 2

- motor de indução agregado a uma carga de impedância constante, denominado Z + MIT.

Impedância Constante (pu)		
R	X_L	X_C
4,72	24,76	0,00

Resistência Estator (%)	Reatância Estator (%)	Reatância Magn. (%)	Resistência Rotor (%)	Reatância Rotor (%)	Constante Inércia (s)	Expoente Carga
3,18	16,81	1500,0	4,53	32,96	10,0	0 - 1 - 2

- motor de indução agregado à cargas de impedância constante, corrente constante e potência constante, denominado ZIP + MIT.

Impedância Constante (pu)			Corrente Constante (pu)		Potência Constante (pu)	
R	X_L	X_C	I_A	I_R	P_P	Q_P
8,09	25,33	0,00	0,201	0,062	0,300	0,215

Resistência Estator (%)	Reatância Estator (%)	Reatância Magn. (%)	Resistência Rotor (%)	Reatância Rotor (%)	Constante Inércia (s)	Expoente Carga
6,09	26,03	1220,0	17,80	93,41	10,0	0 - 1 - 2

Com os modelos descritos acima, para o mesmo distúrbio analisado no item anterior obteve-se os resultados apresentados nas figuras VI.24 e VI.25.

Dos resultados pode-se observar um comportamento similar para os três modelos analisados. Durante parte do transitório (entre 200 e 300 ms) o modelo Z + MIT apresenta o melhor ajuste. A segunda oscilação de potência não se consegue reproduzir com nenhum dos modelos.

Análises semelhantes feitas trocando o modelo do motor de indução de terceira para primeira e quinta ordens e mantendo o mesmo conjunto de testes, levaram as mesmas conclusões obtidas. Resultados obtidos com conjunto de testes diferentes e os mesmos modelos (mesmo conjunto de treinamento) também conduziram as mesmas conclusões já citadas.

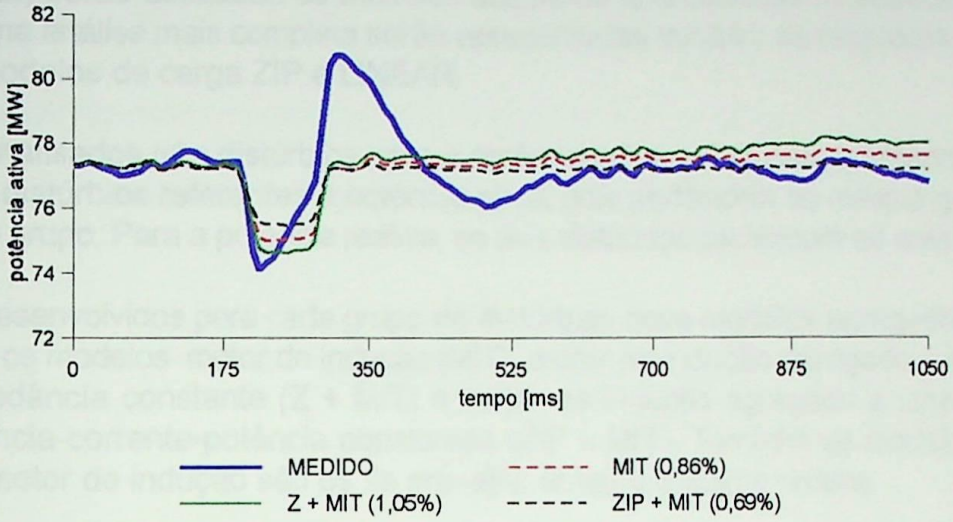


Figura VI.24 - Potência ativa para o distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio)

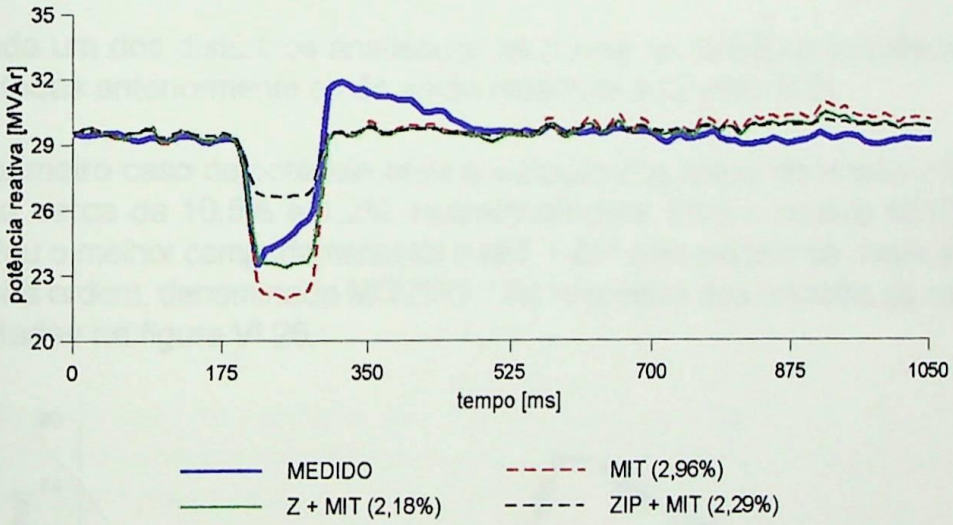


Figura VI.25 - Potência reativa para o distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio)

Com modelos obtidos através de outros conjuntos de treinamento, os testes não apresentaram nenhuma conclusão diferente das obtidas até o momento, confirmando-as. Os erros médios são próximos em quase todos os casos e não permitem definir um tipo de modelo que seja melhor em todas as situações.

VI.7 - COMPARAÇÃO DO MODELO AGREGADO MITZIP COM O MODELO REDE POLINOMIAL FUNCIONAL (RPF)

Para os testes comparativos entre os modelos de carga MITZIP e RPF (rede polinomial

funcional) serão utilizados os mesmos distúrbios já analisados no capítulo anterior. Para uma análise mais completa serão apresentadas também as respostas já obtidas pelos modelos de carga ZIP e LINEAR.

Serão analisados três distúrbios para a potência ativa e dois para a potência reativa, Para os distúrbios referentes a potência ativa, dois pertencem ao mesmo grupo e um ao outro grupo. Para a potência reativa, os dois distúrbios pertencem ao mesmo grupo.

Serão desenvolvidos para cada grupo de distúrbios nove modelos agregados MITZIP, ou seja, os modelos motor de indução (MIT), motor de indução agregado a uma carga de impedância constante (Z + MIT) e motor de indução agregado a uma carga de impedância-corrente-potência constantes (ZIP + MIT). Também os modelos usados para o motor de indução são os de primeira, terceira e quinta ordens.

Os distúrbios selecionados para análise serão testados com todos os modelos desenvolvidos e escolhido para comparação com os demais modelos (ZIP, LINEAR e RPF) aquele que apresentar o menor erro médio durante todo o transitório.

Para cada um dos distúrbios analisados as curvas de tensão e freqüência já foram apresentadas anteriormente e não serão repetidas aqui (item V.2).

Para o primeiro caso de potência ativa a variação dos níveis de tensão e freqüência foram de cerca de 10,5% e 1,2%, respectivamente. Para o modelo MITZIP, o que apresentou o melhor comportamento foi o MIT + ZIP com modelo do motor de indução de primeira ordem, denominado MITZIP1 . As respostas dos modelos de carga estão apresentadas na figura VI.26.

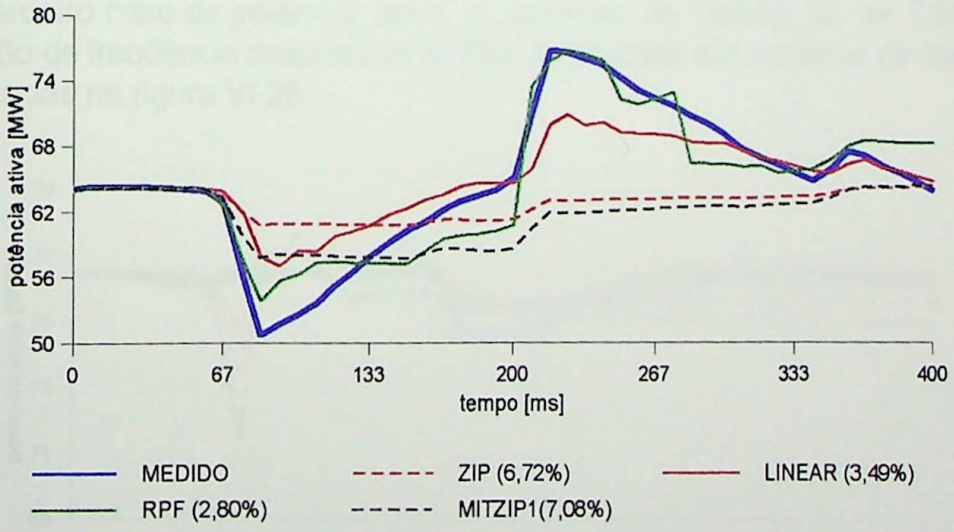


Figura VI.26 - Potência ativa para o primeiro distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio)

Pode-se observar que o modelo MITZIP1 apresenta o pior comportamento dentre os modelos analisados, sendo muito parecido como o do modelo ZIP. Isto é devido ao fato de que a variação percentual da potência ativa registrada no distúrbio foi muito

maior que a variação de tensão, não conseguindo o modelo MITZIP1 reproduzir esta situação visto que o mesmo é muito dependente da tensão.

Para o segundo caso de potência ativa, o distúrbio é caracterizado por uma variação de tensão e freqüência da ordem de 5,1% e 0,5%, respectivamente. A figura VI.27 apresenta os resultados obtidos com os modelos de carga.

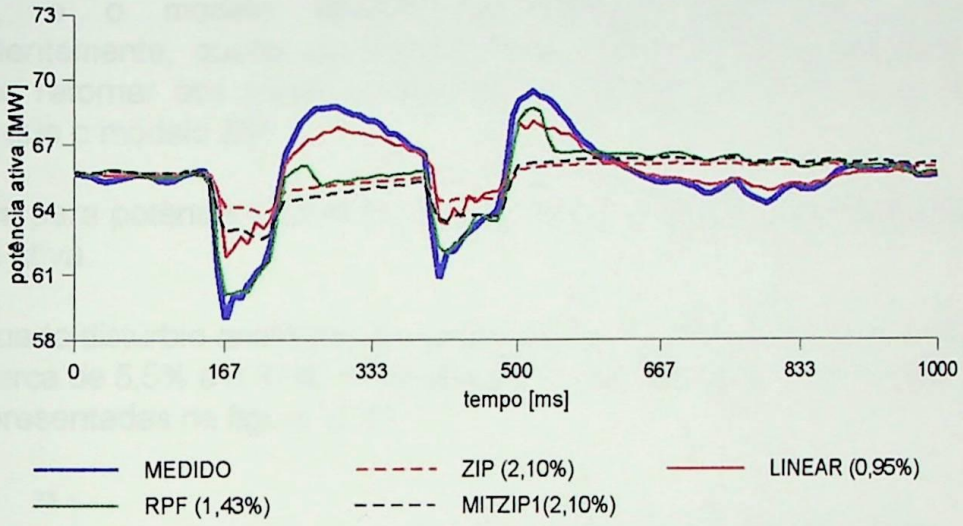


Figura VI.27 - Potência ativa para o segundo distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio)

Como pode ser observado os modelos ZIP e MITZIP1 fornecem resultados muito inferiores quando comparados com os modelos LINEAR e RPF.

Para o terceiro caso de potência ativa, a variação de tensão foi de 7,5%, sendo a oscilação de freqüência desprezível (0,1%). A resposta dos modelos de carga estão apresentados na figura VI.28.

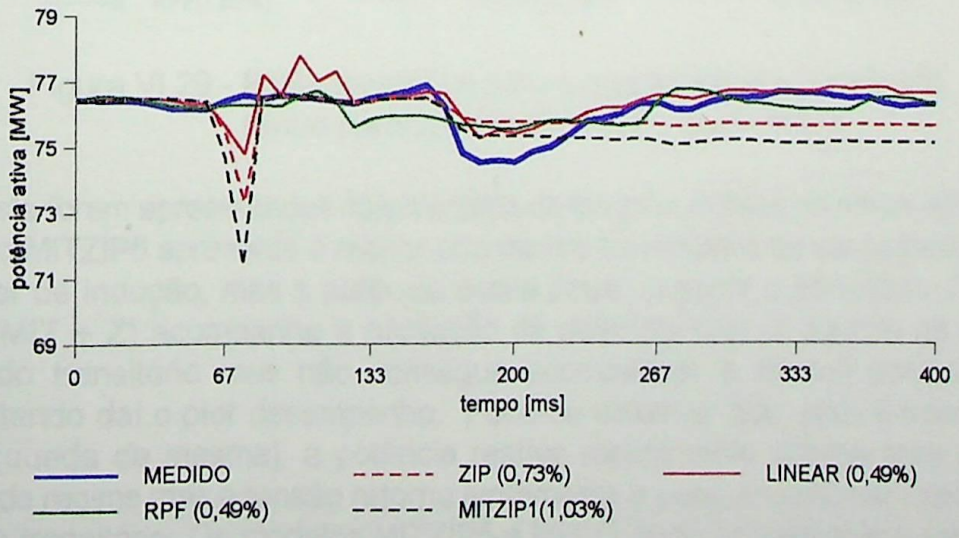


Figura VI.28 - Potência ativa para o terceiro distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio)

Novamente, o modelo agregado do motor de indução teve o pior desempenho. Durante a primeira queda de tensão (próximo de 75 ms) o modelo MITZIP1 apresentou uma grande queda na potência ativa, superior aos demais modelos. Isto pode ser explicado pelas parcelas da potência que são devidas à impedância constante (quadrado da tensão), à corrente constante (proporcional a tensão) e ao próprio motor de indução cuja potência também é dependente da tensão. Em torno de 160 ms do transitório ocorreu outra queda de tensão, de menor intensidade (cerca de 1,9%), mas de maior duração, e o modelo MITZIP1 acompanhou esta queda acarretando, conseqüentemente, queda na potência ativa modelada. O modelo MITZIP1 não consegue retornar aos níveis normais de potência após o transitório, da mesma maneira que o modelo ZIP.

A análise para potência reativa foi feita da mesma maneira que a realizada para a potência ativa.

Para o quarto distúrbio analisado, as variações dos níveis de tensão e de freqüência são de cerca de 5,5% e 0,87%, respectivamente. As respostas dos modelos da carga estão apresentadas na figura VI.29.

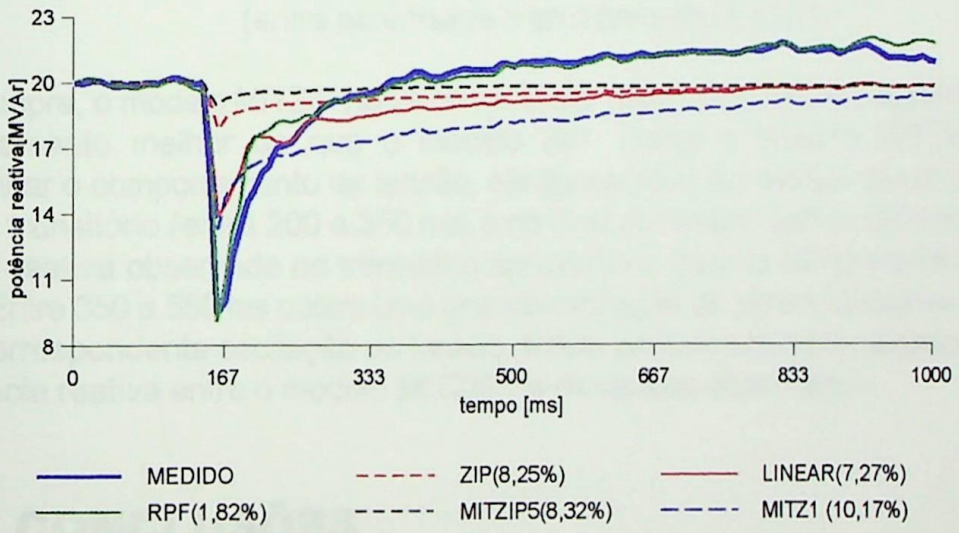


Figura VI.29 - Potência reativa para o quarto distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio)

Neste teste foram apresentados dois modelos de carga com base no motor de indução. O modelo MITZIP5 apresenta o menor erro dentro os modelos de carga baseados em um motor de indução, mas a potência oscila pouco durante o transitório. O modelo MITZ1 (MIT + Z) acompanha a oscilação da potência reativa durante os instantes iniciais do transitório mas não consegue acompanhar a mesma posteriormente, apresentando daí o pior desempenho. Pode-se observar que, após o transitório da tensão (queda da mesma), a potência reativa rapidamente retorna para os níveis normais de regime mas a tensão retorna lentamente e para um patamar inferior ao de antes do transitório. Os modelos MITZIP5 e MITZ1 tenta acompanhar a variação de tensão por isso não consegue reproduzir a potência reativa ficando em um valor inferior ao verificado no distúrbio.

A figura VI.30 apresenta os resultados obtidos para o quinto distúrbio analisado. A variação no nível de tensão é de cerca de 9,9%, sendo a variação de freqüência desprezível.

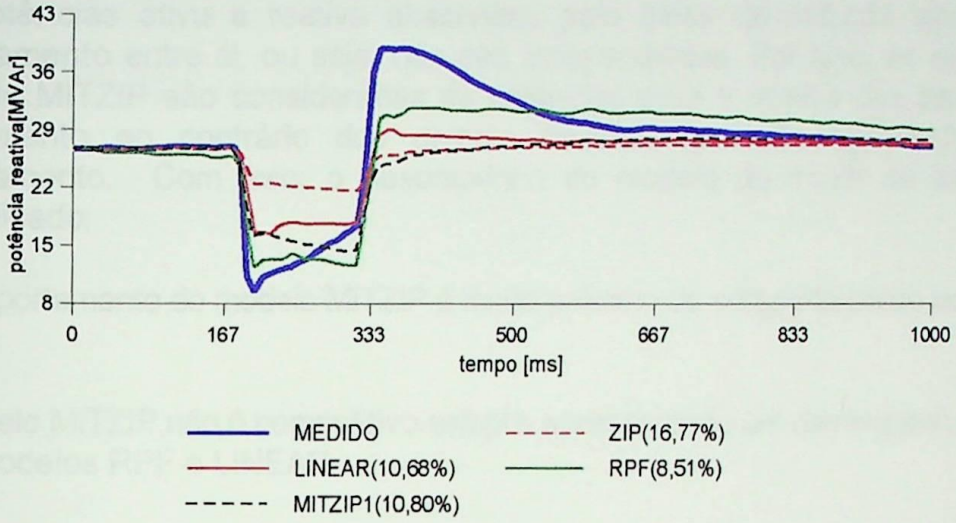


Figura VI.30 - Potência reativa para o quinto distúrbio analisado (entre parênteses o erro percentual médio)

Como sempre, o modelo MITZIP não é competitivo. Neste distúrbio ele apresentou um comportamento melhor do que o modelo ZIP. Como o modelo MITZIP1 tenta acompanhar o comportamento da tensão, ele apresentou um melhor desempenho no início do transitório (entre 200 e 350 ms) e no final do mesmo (após 550 ms), onde a potência reativa observada no transitório apresenta o mesmo comportamento que a tensão. Entre 350 e 550 ms ocorre uma grande oscilação de potência reativa sem que haja a correspondente oscilação de tensão. Neste período ocorrem os maiores erros de potência reativa entre o modelo MITZIP1 e os valores observados.

VI.8 - CONCLUSÕES

De todos os testes realizados as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- a potência e o conjugado em um motor de indução são bastante influenciados pelo escorregamento do mesmo;

- a potência na entrada do motor de indução praticamente não sofre influência da variação da freqüência de alimentação. Quanto maior o escorregamento do motor de indução maior é a influência da tensão de alimentação na potência da entrada do mesmo;

- o desempenho apresentado pelo modelo do motor de indução é melhor a medida que ocorrem oscilações elevadas de tensão no sistema;

- caso as oscilações de tensão e/ou freqüência sejam pequenas, não ocorrerão

variações significativas no escorregamento e na tensão transitória do motor. Com isso, o comportamento do modelo MITZIP se aproxima do comportamento do modelo ZIP;

- as potências ativa e reativa absorvidas pelo motor de indução apresentam acoplamento entre si, ou seja, não são independentes. Por isso, ao se obter o modelo MITZIP são consideradas as potências ativa e reativa dos padrões de treinamento ao contrário dos demais modelos que não apresentam este acoplamento. Com isso, o desempenho do modelo do motor de indução é prejudicado;

- o comportamento do modelo MITZIP é muito próximo do comportamento do modelo ZIP;

- o modelo MITZIP não é competitivo sempre apresentando um desempenho inferior aos modelos RPF e LINEAR.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E LINHAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Só há uma maneira de saber se o seu aprendizado está terminado: se você está vivo, não está.

Richard Bach

VII.1 - CONCLUSÕES

Para realizar um estudo qualquer em um SEP deve-se definir qual o modelo de cada componente da rede adequado ao estudo desejado, visto que a precisão dos resultados obtidos é função desta escolha. A literatura tem mostrado que é de fundamental importância a modelagem dos componentes do SEP. Modelos precisos de linhas de transmissão, transformadores, geradores, reguladores e compensadores têm sido propostos, mas o mesmo não tem acontecido com a carga, pois sua natureza aleatória torna a composição da mesma de representação muito difícil.

Duas abordagens tem sido usadas para a modelagem de carga:

- primeira é baseada no conhecimento dos componentes individuais e o modelo é obtido através da combinação de modelos dos componentes da carga. Esta abordagem tem a desvantagem de necessitar de informações que geralmente não estão disponíveis, e não é apropriada quando a determinação de uma composição média e precisa para cada barramento de carga de interesse é virtualmente impossível.;

- a segunda abordagem não requer o conhecimento das características físicas da carga. É baseada em medidas obtidas da resposta da carga quando sujeitas a distúrbios e o modelo é estimado usando métodos de identificação de sistemas. A carga a ser modelada pode ser assumida como uma caixa preta. Entretanto, uma quantidade significativa de dados relacionados a testes programados e a distúrbios naturais que afetam o sistema necessitam ser coletados.

Métodos de identificação de sistemas podem ser aplicados para estimar modelos de carga baseados em medidas. Até agora somente tem sido usado, em modelagem de carga, os métodos paramétricos. Neste trabalho, um modelo não paramétrico de carga baseado em uma nova rede neural (Rede Funcional Polinomial (RFP)) foi usado para a obtenção de um modelo dinâmico de carga elétrica devido a certas características das mesmas como mapeamento não-linear arbitrariamente complexo e capacidade de

generalização. O desempenho deste modelo foi comparado com os modelos LINEAR, ZIP e com um modelo agregado MITZIP (motor de indução mais carga estática ZIP).

Como a carga elétrica apresenta diferentes composições através do tempo, é recomendável estimar mais do que um modelo para cada barramento de carga. Por isso foi investigado o impacto de agrupar em um mesmo modelo os sinais de entrada e saída que apresentam comportamentos similares, provavelmente associados com as mesmas composições de carga, diminuindo com isso a extensão da não linearidade que deveria ser representado caso um único modelo de carga fosse obtido. Também uma comparação entre as respostas obtidas pelos diferentes modelos de carga para um comportamento caótico da mesma é apresentada e algumas conclusões importantes foram obtidas.

Dos testes apresentados e de outros realizados, as conclusões principais obtidas foram:

- a composição complexa da carga faz com que seu comportamento dinâmico seja difícil de ser modelado. Isto é devido aos seus componentes serem das mais variadas categorias, tamanho, simetria, permanência em funcionamento, ciclo de funcionamento, etc;.

- o modelo de carga RPF desenvolvido neste trabalho, mostrou competitividade com os modelos tradicionais de carga utilizados em estudos realizados em SEP. Os erros médios e máximos produzidos pela RPF foram sempre menores que aqueles produzidos pelo modelo tradicional ZIP e competitivo com aqueles apresentado pelo modelo denominado LINEAR;

- a precisão dos modelos de carga é aumentado com o agrupamento da carga em diferentes grupos, entretanto o desempenho da RPF é o menos sensível a este tipo de estratégia. Apesar do desempenho dos modelos aumentar ao se agrupar em um mesmo modelo os sinais de entrada e saída que apresentam comportamentos similares, a performance da RPF não mostrou ganhos ao se adotar este procedimento.

- o modelo de carga RPF mostrou melhores resultados quanto mais caótico for o comportamento da carga. Isto é devido ao fato de que um comportamento caótico caracteriza um forte comportamento não linear, o que indica a RPF (modelo não linear) como o mais adequado para representar a carga;

- apesar do modelo LINEAR ser competitivo com o modelo RPF a escolha da ordem adequada para o mesmo não é fácil, necessitando o conhecimento da carga e/ou de vários testes (tentativas de ajustes). O modelo LINEAR foi o que apresentou a maior competitividade com a RPF, mas enquanto a RPF é formada durante o processo de treinamento, o modelo LINEAR exige do usuário informações da ordem do mesmo, informações essas obtidas de conhecimento prévio das características da carga ou obtidas através de tentativa e erro no modelo;

- o desempenho apresentado pelo modelo dinâmico MIT é melhor a medida que

ocorrem oscilações elevadas de tensão no sistema. Pelas equações do motor de indução, pode-se notar que a potência ativa e reativa absorvidas pelo mesmo são dependentes, principalmente, da tensão do barramento no qual o mesmo se encontra conectado;

- para pequenas oscilações de tensão e/ou freqüência no sistema o comportamento do modelo MITZIP se aproxima do comportamento do modelo ZIP. Como já comentado, a potência (ativa e reativa) absorvida pelo motor de indução é dependente da tensão do barramento, do fluxo concatenado no motor e do escorregamento, que são funções da freqüência. Caso estas grandezas oscilem pouco durante o distúrbio ocorrerão pequenas variações na potência absorvida pelo motor de indução, prevalecendo com isso o comportamento do modelo ZIP ;

- o acoplamento entre as potências ativa e reativa absorvidas pelo motor de indução prejudicam o desempenho do modelo MITZIP. Como as potências ativa e reativa absorvidas pelo motor de indução apresentam acoplamento entre si, ou seja, não são independentes, ao contrário dos demais modelos, que apresentam um modelo independente para cada tipo de potência, o desempenho do MITZIP é prejudicado;

- o modelo MITZIP não é competitivo sempre apresentando um desempenho inferior aos modelos RPF e LINEAR. Em todos os casos analisados o desempenho do modelo MITZIP foi pior que o desempenho dos demais modelos, se aproximando do modelo ZIP.

Cabe enfatizar que a utilização de RPF para a obtenção de modelos dinâmicos de carga elétrica são perfeitamente factíveis e os resultados obtidos mostraram sua validade e competitividade com os modelos de carga, estáticos e dinâmicos, tradicionalmente utilizados em estudos realizados em SEP. Com isso, a RPF torna-se uma importante e nova contribuição no desenvolvimento de modelos de carga para utilização em SEP.

VII.2 - LINHAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Futuros desenvolvimentos podem ser listados:

- dos testes observou-se que devido ao limitado número de distúrbios o número de grupos resultou baixo. Agrupamento difuso pode superar este problema. Um desenvolvimento a ser feito é a utilização de técnicas difusas para agrupar os diferentes modelos de carga resultante de cada grupo de modo a obter um modelo único da carga elétrica para um determinado barramento do SEP;

- dos testes também foi observado um melhor desempenho da RPF para distúrbios que apresentavam um comportamento caótico. Uma maior análise do comportamento caótico da carga deve ser feito de modo a estabelecer uma maior relação entre os

modelos de carga e seu comportamento;

- devido ao acoplamento existente entre as potências ativa e reativa absorvidas pelo motor de indução seu desempenho é prejudicado, o que não com os demais modelos. Sugere-se o desenvolvimento de um modelo dinâmico de carga com base em um motor síncrono, onde existe independência entre as potências ativa e reativas absorvidas.

CAPÍTULO VIII

BIBLIOGRAFIA

Alguns ouvem com as orelhas, outros com o estômago, outros ainda com o bolso e há aqueles que não ouvem absolutamente nada.

Khalil Gibran
1883-1931

- **Abdel Hakim, H.M.**, G.J.Berg, **1976**. "Dynamic Single-Unit Representation of Induction Motor Groups", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, nº 1, January/February, 155-165.

- **Adler, R.B.**, C.C.Mosher, **1970**. "Steady-State Characteristics for Power System Loads", IEEE Paper 70 CP 706-PWR.

- **Alves da Silva, A.P.**, V.H. Quintana, **1995.1**. "Pattern Analysis in Power System State Estimation", Electric Power & Energy Systems, Vol. 17, nº 1, 51-60.

- **Alves da Silva, A.P.**, P.C. Nascimento, G.Lambert-Torres, L.E.B. da Silva, **1995.2** "An Alternative Approach for Adaptive Real-Time Control Using a Nonparametric Neural Network", IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Orlando, October, Vol. 2, 1788-1794.

- **Alves da Silva, A.P.**, P.C. Nascimento, G.Lambert-Torres, L.E.B. da Silva, **1995.3**. "A Nonparametric Neural Network for Adaptive Real-Time Control", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver, October, Vol. 3, 2488-2493.

- **Alves da Silva, A.P.**, C.Ferreira, G.Lambert-Torres, **1996**. "Dynamic Load Modeling Based on A Nonparametric ANN", Intern. Conf. on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP'96), Orlando, January, 55-59.

- **Alves da Silva, A.P.**, C.Ferreira, A.C.Zambroni de Souza, G.Lambert-Torres, **1997**. "A New Constructive ANN and Its Application to Electric Load Representation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, nº 4, November, 1569-1575.

- **Araújo, A.**, **1974**. *Modelos Representativos da Carga em Estudos de Estabilidade*, Tese de Livre Docência, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Maio.

- **Arrillaga, J.**, C.P.Arnold, B.J.Harker, **1983**. *Computer Modelling of Electrical Power System*, John Wiley & Sons.

- **Barbi, I.**, **1985**. *Teoria Fundamental do Motor de Indução*, Editora da UFSC/ELETROBRAS.

- **Berg, G.J.**, **1972**. "System and Load Behaviour Following Loss of Generation, Experimental Resultas and Evaluation", Proc IEE, Vol. 119, nº 10, October, 1483-1486.

- **Berg, G.J.**, **1973**. "Power-system Load Representation", Proc IEE, Vol. 120, nº 3, March, 344-348.

- **Bergé, P.**, Y.Pomeau, Ch.Vidal, **1984**. *Order Within Chaos*, Hermann.

- **Bezdek, J.C.**, **1981**. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press.

- **Boldea, I.**, S.A.Nasar, **1986**. *Electric Machines Dynamics*, Macmillan Publishing Company.

- **Borgetti, A.**, R.Caldon, A.Mari, C.A.Nucci, **1997**. "On Dynamic Load Models for Voltage Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, nº 1, February, 293-299.

- **Bostanci, M.**, J.Koplowitz, C.W.Taylor, **1997**. "Identification of Power System Load Dynamics Using Artificial Neural Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, nº 4, November, 1468-1473.

- **Brereton, D.S.**, D.G.Lewis, C.C.Young, **1957**. "Representation of Induction-Motor Loads during Power System Stability Studies", AIEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. 76, Part III, August, 451-461.

- **Cañizares, C.A.**, **1995**. "On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modeling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, February, 512-522.

- **Capasso, A.**, W.Grattieri, R.Lamedica, A.Prudenzi, **1994**. "A Botto-up Approach to Residential Load Modeling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 2, May, 957-964.

- **Carpenter, G.**, S.Grossberg, **1987**. "ART2: Self-Organization of Stable Category Recognition Codes for Analog Input Patterns", Applied Optics, Vol. 26, 4919-4930.

- **Chiang, H.-D.**, J.-C.Wang, C.-T.Huang, Y.-T.Chen, C.-H.Huang, **1997**. "Development of a Dynamic ZIP-motor Load Model From On-line Field Measurements", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, nº 7, 459-468.

- **Chiang, I.-D.**, C.-W.Liu, P.P.Varaiya, F.F.Wu, M.G.Lauby, **1993**. "Chaos in a simple power system", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, 1407-1417.

- **Concordia, S.**, S.Ihara, **1982**. "Load Representation in Power System Stability Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, nº 4, April, 969-977.

- **Delfino, B.**, M.Invernizzi, R.Marconato, A.Morini, P.Scarpellini, **1992**. "Considerations on Modelling and Behaviour of Some Typical Industrial Loads Following Large Variations of Frequency and Voltage", IP-16, III SEPOE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belo Horizonte, maio.

- **Dovan, T.**, T.S.Dillon, C.S.Berger, K.E.Forward, **1987**. "A Microcomputer Based On-Line Identification Approach to Power System Dynamic Load Modelling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, nº 3, August, 529-536.

- **Farlow, S.J. (Ed.)**, **1984**. *Self-Organizing Methods in Modeling*, Marcel Dekker, 1984.

- **Ferreira, C.** , A.P.Alves da Silva, G.Lambert-Torres, **1996.1**. "Dynamic Load Modeling Using Neural Networks", V Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Recife, Maio, 747-753.

- **Ferreira, C.**, A.P.Alves da Silva, A.C.Zambroni de Souza, G.Lambert-Torres, **1996.2**. "Uma Nova Rede Neural Plástica Aplicada a Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas", XI Congresso Brasileiro de Automática, São Paulo, Setembro, 1597-1602.

- **Ferreira, C.,** G.Lambert-Torres, A.P.Alves da Silva, **1998**. "Modelo Dinâmico de Carga MIT Agregado com o Modelo ZIP e sua Comparação com os Modelos ZIP e LINEAR", III Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica, São Paulo, Setembro, 486-490.

- **Fiedler-Ferrara, N.**, C.P.Cintra do Prado, **1994**. *Caos, uma introdução*, Editora Edgard Blücher Ltda.

- **Fitzgerald, A.E.**, C.Kingsley Jr., A.Kusko, **1975**. *Máquinas Elétricas*, McGraw-Hill do Brasil Ltda.

- **Franklin, D.C.**, A.Morelato, **1994**. "Improving Dynamic Agregation of Induction Motor Models", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 4, November, 1934-1941.

- **Franklin, D.C.**, A.Morelato, **1997**. "Identification of Induction Motor Load Models in Power Systems Using Recurrent Neural Networks", Intelligent System Application to Power Systems (ISAP'97), Seoul, July, 555-559.

- **Frantz, T.**, T.Gentile, S.Ihara, N.Simons, M.Waldron, **1984**. "Load Behavior Observed in LILCO and RG&E Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, nº 4, April, 819-831.

- **Gleick, J.** , **1990**. *Caos, a criação de uma nova ciência*, EditoraCampus Ltda.

- **GTEE**, SCEL, GCOI, **1989**. *Modelos de Carga para Estudos de Estabilidade*, Relatório SCEL-GTEE-001/89, Novembro.

- **Haque, M.H.**, **1996**. "Load Flow Solution of Distribution Systems With Voltage Dependent Load Models", Electric Power Systems Research, 36, 151-156.

- **Hassoun, M.H.**, **1995**. *Fundamentals of Artificial Neural Networks*, MIT Press.

- **Hiskens, I.A.**, J.V.Milanović, **1995**. "Load Modelling in Studies of Power System Damping", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, nº 4, November, 1781-1788.

- **Hyama, T.**, M.Tokieda, W.Hubbi, H.Andou, **1997**. "Artificial Neural Network Based Dynamic Load Modeling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, nº 4, November, 1576-1583.

- **Ihara, S.**, G.L.Paulsen, N.W.Simons, **1981**. "Bismarck Load Behavior During Field Tests", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, nº 11, November, 4540-4545.

- **Ihara, S.**, M.Tani, K.Tomiyama, **1994**. "Residential Load Characterisitics Observed at Kepco Power System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 2, May, 1092-1101.

- **IEEE** Task Force on Load Representation for Dynamic Performances, **1993**. "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, Nº 2, May, 472-482.

- **IEEE** Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, **1995**. "Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, February , 523-538.

- **Iliceto, F.**, Ceyhan, G.Ruckstuhl, **1972**. "Behavior of Loads During Voltage Dips Encountered in Stability Studies. Field and Laboratory Tests", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, nº 6, November/December, 2470-2479.

- **Kao, W.-S.**, C.-J.Lin, C.-T.Huang, Y.-T.Chen, C.-Y.Chiou, **1994**. "Comparison of Simulated Power System Dynamics Applying Various Load Models With Actual Recorded Data", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 1, February, 248-254.

- **Kao, W.-S.**, C.-T Huang, C.-Y.Chiou, **1995**. "Dynamic Load Modeling in Taipower System Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, nº 2, May, 907-914.

- **Kargupta, H.**, R.E.Smith, **1991**. "System Identification with Evolving Polynomial Networks", 4th International Conference on Genetic Algorithms, San Diego, July, 370-

376.

- **Karlsson, D.**, D.J.Hill, **1994**. "Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Powwer System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 1, February, 157-166.

- **Kent, M.H.**, W.R.Schmus, F.A.McCrakin, L.M.Wheeler, **1969**. "Dynamic Modeling of Loads in Stability Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, nº 5, May , 756-763.

- **Krause, P.C.**, **1986**. *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, Inc.

- **Ku, B.-Y.**, R.J. Thomas, C.-Y. Chiou, C.-J. Lin, **1994**. "Power System Dynamic Load Modeling Using Artificial Neural Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, November, 1868-1874.

- **Kundur, P.**, **1993**. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hil, Inc.

- **Lee, W.J.**, M.S.Chen, L.B.Williams, **1987**. "Load Model for Stability Studies", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-23, nº 1, January/February, 159-165.

- **Lem, T.Y.J.**, R.T.H.Alden, **1994**. "Comparison of Experimental and Aggregate Induction Motor Responses", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 4, November, 1895-1900.

- **Lorenz, E.N.**, **1963**. "Deterministic Non-periodic Flow", L. Atmosphere Science, Vol. 20, 130-141.

- **Maurício, W.**, A.Semlyen, **1972**. "Effect of Load Characteristics on the Dynamic Stability of Power System", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, November/December, 2295-2304.

- **Mendes, P.P.C.**, **1997**. *Aplicação de Rede Neurais Artificiais na Avaliação em Tempo Real da Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência*, Proposta de Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ.

- **Meyer, F.J.**, K.W.Lee, **1982**. "Improved Dynamic Load Model for Power System Stability Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, nº 9, September, 3303-3309.

- **Milanović, J.V.**, I.A.Hiskens, **1995**. "Effects of Load Dynamics on Power System Damping", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, nº 2, May, 1022- 1027.

- **Nayfeh, M.A.**, A.M.Hamdan, A.H.Nayfeh, **1990**. "Chaos and instability in a power system - primary resonant case", Nonlinear Dynamics, Vol. 1, 313-339.

- **Nguyen, T.T.**, H.X. Buy, **1993**. "Neural Network Dynamic Load Model", 4th

International Symposium on Expert System Application to Power Systems (ESAP), Melbourne, January, 467-472.

- **Nozari, F.**, M.D.Kankam, W.W.Price, **1987**. "Aggregation of Induction Motors for Transient Stability Load Modeling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, nº 4, November, 1096- 1103.

- **Ohyama, T.**, A.Watanabe, K.Nishimura, S.Tauruta, **1985**. "Voltage Dependence of Composite Loads in Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, nº 11, November, 3064-3073.

- **Pao, Y.H.**, **1989**. *Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks*, Addison-Wesley.

- **Power System Engineering Committee**, **1973.** "System Load Dynamics - Simulation Effects and Determination of Load Constants", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, nº 2, March-April, 600-609.

- **Price, W.W.**, K.A.Wiragu, A.Murdoch, J.V.Mitache, E.Vashedi, M.A.El-Kady, **1988**. "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, nº 1, February, 180-187.

- **Quan, G.R.**, M.Z. Tarnawecky, **1975**. "Load Representation for Transient Stability Studies - Digital Modeling", presented at the IEEE Summer Power Meeting, Paper nº A 75 583-5.

- **Rahim, A.H.M.A.**, A.R.Laldin, **1987**. "Aggregation Induction Motor Loads for a Transient Stability Studies", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, nº 1, March, 55-61.

- **Ren-mu, H.**, A.J. Germond, **1993**. "Comparasion of Dynamic Load Modeling Using Neural Network and Traditional Method", 2nd International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems (ANNPS), Yokohama, April, 253-258.

- **Rendón, R.A.G.**, **1997**. *Planejamento a Longo Prazo de Sistemas de Transmissão Usando Técnicas de Otimização Combinatorial* , Tese de Doutorado, FEEC-UNICAMP.

- **Ribeiro, J.R.**, F.J.Lange, **1982**. "A New Aggregation Method for Determining Composite Load Characteristics", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, nº 8, August, 2869-2875.

- **Rich, E.**, K.Knight, **1994**. *Inteligência Artificial*, 2ª Edição, Makron Books do Brasil Editora Ltda.

- **Roelofs, G.P.T.**, **1989**. "Effects of Load Modelling on the Behaviour of Power Systems", Electrical Power e Energy Systems, Vol. 11, nº 4, October, 289-292.

- **Rogers, G.J.**, J.Di Manno, R.T.H.Alden, **1984**. "An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, nº 4, April 1984, pag. 683-690.

- **Sabir, S.A.Y.**, D.C.Lee, **1982**. "Dynamic Load Models Derived from Data Acquired During System Transients", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, nº 9, September, 3365-3372.

- **Srinivasan, K.**, C.T.Nguyen, Y.Robichaud, **1979**. "Closed Loop Response to Random Pertubations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, nº 5, September/October, 1591-1595.

- **Srinivasan, K.**, C.T.Nguyen, Y.Robichaud, A.St.Jacques, G.J.Rogers, **1981**. "Load Response Coefficients Monitoring System: Theory and Field Experience", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, nº 8, August, 3818-3827.

- **Taleb, M.**, M.Akbaba, E.A.Abdullah, **1994**. "Aggregation of Induction Machines for Power System Dynamics Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 4, November, 2042-2048.

- **Taylor, C.W.**, **1994**. *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill.

- **Tenório, M.F.**, W.-T. Lee, **1990**. "Self-Organizing Network for Optimum Supervised Learning", IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 1, March, 100-110.

- **Vaahedi, E.**, M.A.El-Kady, J.A.Libaque-Esaine, V.F.Carvalho, **1987**. "Load Models for Large-Scale Srability Studies From End-User Consumption", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, nº 4, November, 864-872.

- **Vaahedi, E.**, H.M.Z.El-Din, W.W.Price, **1988**. "Dynamic Load Modeling in Large Scale Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, nº 3, August 1988, 1039-1045.

- **Valgas, H.M.**, R.G.R.Pinto, C.França, G.L.Torres, A.P.Alves da Silva, R.C.Pires, R.A.Costa Jr., **1994**. "Electrical Load Modelling", IV SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Foz do Iguaçu, maio.

- **Venikov, V.A.**, **1977**. *Transient Process in Electrical Power Systems*, Mir Publishers, Moscou.

- **Wang, J.-C.**, H.-D.Chiang, C.-L.Chang, A.-H.Liu, C.-H.Huang, C.-Y.Huang, **1994**. "Development of a Frequency-dependent Composite Load Model Using the Measurement Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 3, August, 1546-1556.

• **Wong, K.P.**, W.D.Humpage, T.T.Nguyen, K.K.K.Ho, **1985**. "Dynamic Load Model Synthesis", IEE Proceedings, Vol. 132, Parte C, nº 4, July , 179-188.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
BIM
de Itajubá - EFEI

APÊNDICE I

MODELOS DE CARGA ZIP E LINEAR

O pessimista se queixa do vento, o otimista espera que ele mude e o realista ajusta as velas.

WIllian George Ward
1812-1882

AI.1 - INTRODUÇÃO

Será desenvolvido neste apêndice a formulação básica dos modelos de carga ZIP e LINEAR. O modelo ZIP foi escolhido devido a ser um modelo tradicional de uso no setor elétrico estando implementado em todos os programas de Análise de Sistemas. O modelo denominado LINEAR também foi escolhido pois apresenta um bom desempenho [Dovan, 1987].

AI.2 - MODELO DE CARGA ZIP

A resposta de quase todas as cargas elétricas às variações de tensão podem ser representadas por combinação de três tipos: impedância constante Z_c, corrente constante I_c e potência constante S_c. Graficamente, pode-se representar o desempenho das cargas frente às variações de tensão através da figura II.1, já apresentada no capítulo II.

A figura AI.1 ilustra a corrente na carga para os modelos de carga descritos acima.

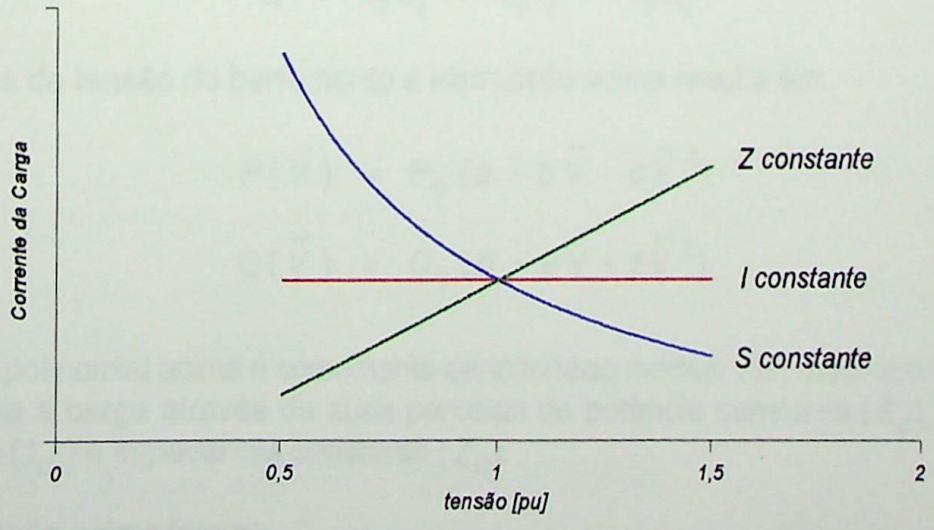


Figura AI.1 - Corrente em função da tensão para cargas de potência, corrente e impedância constantes

A representação por potência constante, na maioria dos casos, é a mais severa das modelagens, devido ao seu efeito na amplitude das oscilações de tensão. pois quando ocorre uma queda na tensão do barramento, este modelo causa um aumento na corrente da carga, o que acarreta uma queda de tensão ainda maior, e assim indefinidamente. O mesmo raciocínio pode ser feito para quando ocorre um aumento da tensão do barramento.

Por outro lado, a representação por impedância constante é a menos severa, também na maioria dos casos, possuindo efeito de amortecimento das oscilações de tensão, pois quando ocorre uma redução na tensão este modelo causa uma diminuição da corrente, diminuindo em conseqüência a queda de tensão.

A representação por corrente constante se situa de forma intermediária quanto à severidade se comparado com as representações de potência constante e impedância constante. Para pequenos distúrbios em torno do ponto de operação, a representação por corrente constante é equivalente a 50% de potência constante mais 50% de impedância constante. Já quando as variações de tensão se distanciam do ponto de operação, por exemplo, se a tensão atinge valores abaixo de 1 pu, a representação por corrente constante é menos severa se comparada com a modelagem através de 50% de impedância e 50% de potência constantes.

Cada uma das representações acima ou suas combinações podem modelar a carga para pequenas variações de tensão em torno do ponto de operação. Pode acontecer que as proporções adotadas não sejam adequadas para representar a carga quando ocorrem grandes variações de tensão no barramento.

A representação da carga pode ser feita através da combinação linear dos três tipos descritos acima, ou seja, em função da potência, da corrente e da impedância. A expressão correspondente é a seguinte:

$$P = k_1 S_c + k_2 I_c + k_3 Z_c$$

$$Q = k_3 S_c + k_4 I_c + k_5 Z_c$$

Em termos da tensão do barramento a expressão acima resulta em:

$$P(\bar{V}) = P_0 (a + b\bar{V} + c\bar{V}^2)$$

$$Q(\bar{V}) = Q_0 (d + e\bar{V} + f\bar{V}^2)$$

O modelo polinomial acima é comumente denominado modelo ZIP, visto que o mesmo representa a carga através de suas parcelas de potência constante (S_C), corrente constante (I_C) e impedância constante (Z_C).

Na expressão acima tem-se:

- $\bar{V} = \frac{V}{V_0}$;

- P_0, Q_0 e V_0 representam as condições iniciais de potência ativa, reativa e tensão, respectivamente. No caso de um componente específico pode ser a potência e a tensão nominais. Para representar a carga de um barramento, os valores acima são normalmente as condições iniciais operativas do sistema em estudo;

- os coeficientes *a* e *d* especificam as parcelas em pu da potência ativa e reativa da carga que comportam-se como potência constante;

- os coeficientes *b* e *e* especificam as parcelas em pu da potência ativa e reativa da carga que comportam-se como corrente constante; e

- os coeficientes *c* e *f* especificam as parcelas em pu da potência ativa e reativa da carga que comportam-se como impedância constante.

A expressão acima pode ser dada também em função dos desvios de potência e de tensão:

$$\Delta P(\Delta \bar{V}) = P_0 (m + n\Delta \bar{V} + o\Delta \bar{V}^2)$$

$$\Delta Q(\Delta \bar{V}) = Q_0 (r + s\Delta \bar{V} + t\Delta \bar{V}^2)$$

onde $\Delta P = P(k+1) - P(k)$, $\Delta Q = Q(k+1) - Q(k)$ e $\Delta \bar{V} = \bar{V}(k+1) - \bar{V}(k)$, sendo k o instante de tempo.

A dependência da freqüência na característica da carga é usualmente representada multiplicando-se o modelo ZIP por um fator:

$$P(\bar{V}) = P_0 (a + b\bar{V} + c\bar{V}^2)(1 + K_{pf}\Delta f)$$

$$Q(\bar{V}) = Q_0 (d + e\bar{V} + f\bar{V}^2)(1 + K_{qf}\Delta f)$$

onde $\Delta f = f - f_0$ e f_0 é a freqüência inicial do barramento ou a freqüência nominal do sistema. Tipicamente, K_{pf} varia na faixa de 0 a 3,0 e K_{qf} na faixa de -2,0 a 0.

O modelo ZIP não é realista para baixos valores de tensão e pode levar a problemas computacionais nesta situação.

AI.3 - MODELO DE CARGA LINEAR

O modelo denominado LINEAR é baseado no artigo "A Microcomputer Based On-Line Identification Approach to Power System Dynamic Load Modelling", de T.Dovan,

T.S.Dillon, C.S.Berger e K.E.Foward, publicado no IEEE Transactions on Power Systems, Vol PWRS-2, nº 3, agosto de 1987, páginas 529 a 536.

No desenvolvimento do modelo da carga é levado em conta uma realimentação entre os valores da potência *P* e *Q* de saída da carga e os valores de entrada (*V* e *f*) da mesma, ou seja, as variações na carga (*P* e *Q*) não são só dependentes das variações na tensão e na freqüência, naquele instante de tempo, mas também de instantes anteriores, inclusive da própria potência (*P* e *Q*) da carga.

O modelo de carga LINEAR apresenta a seguinte estrutura básica:

$$\Delta P(k) = \sum_{i=1}^{n_P} \hat{a}_i \Delta P(k-i) + \sum_{i=0}^{n_V} \hat{b}_i \Delta V(k-i) + \sum_{i=0}^{n_f} \hat{c}_i \Delta f(k-i)$$

$$\Delta Q(k) = \sum_{i=1}^{n_Q} \hat{d}_i \Delta P(k-i) + \sum_{i=0}^{n_V'} \hat{e}_i \Delta V(k-i) + \sum_{i=0}^{n_f'} \hat{g}_i \Delta f(k-i)$$

onde:

$$\Delta P(k) = P(k+1) - P(k)$$

$$\Delta Q(k) = Q(k+1) - Q(k)$$

$$\Delta V(k) = V(k+1) - V(k)$$

$$\Delta f(k) = f(k+1) - f(k)$$

Os coeficientes da regressão em *P*, *Q*, *V* e *f* são representados por $\hat{a}_i$, $\hat{d}_i$, ($\hat{b}_i$ e $\hat{e}_i$), ($\hat{c}_i$ e $\hat{g}_i$) respectivamente, enquanto n_P, n_Q, (n_V e n_V') e (n_F e n_F') determinam as correspondentes ordens de regressão, ou seja, a estrutura do modelo. Estes valores são escolhidos de acordo com o tipo da carga.

Pode-se observar que o número total de parâmetros a serem estimados é de:

$$N_P = n_P + n_V + n_F + 2$$

$$N_Q = n_Q + n_V' + n_F' + 2$$

Outros fatores externos, como por exemplo, temperatura, localização, horas do dia, estações do ano, etc. também influem na resposta da carga. Estes fatores externos tornam variáveis as características das cargas e, conseqüentemente, a estrutura do modelo da carga também deve ser variável. Para que isto ocorra deve-se incluir paralelamente à estimativa dos parâmetros uma monitoração do desempenho do modelo de modo que sua estrutura possa ser apropriadamente modificada.

O procedimento para selecionar a estrutura do modelo é partir de algumas estruturas previamente selecionadas em função do tipo de carga, das estações do ano e da hora do dia. Tais estruturas são determinadas "off-line" e progressivamente atualizadas à

medida que novas informações são recebidas. Através de uma função custo que avalia o desempenho do modelo em uso o mesmo é analisado e caso não esteja adequado uma nova estrutura é escolhida entre as previamente selecionadas. Esta função custo pode ser, por exemplo:

$$J_P = \frac{N}{N - n_P} \sum_{i=1}^{N} [\Delta P(k) - \Delta \hat{P}(k)]^2$$

$$J_Q = \frac{N}{N - n_Q} \sum_{i=1}^{N} [\Delta Q(k) - \Delta \hat{Q}(k)]^2$$

onde $\Delta \hat{P}(k)$ e $\Delta \hat{Q}(k)$ são as saídas do modelo utilizando os parâmetros estimados acima e N o número de observações consideradas. Note que o fator $\frac{N}{N - n}$, n = n_P ou n_Q, favorece os modelos de baixa ordem. Entre modelos com desempenho similar, deve-se selecionar aquele que tem a menor ordem, pois este geralmente terá melhor capacidade de generalização, ou seja, a de apresentar respostas mais precisas frente a novos distúrbios. Um outro procedimento é partir com um modelo estrutural de menor ordem possível (ordem 1 para todas as grandezas) e ir aumentando a ordem a medida da necessidade.

Uma das dificuldades deste modelo é a seleção da ordem apropriada para as potências ativa e reativa que melhor se adapta a representação dinâmica da carga.

AI.4 - OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE CARGA ZIP E LINEAR

Os parâmetros dos modelos desenvolvidos podem ser obtidos de várias maneiras. Por exemplo, o modelo ZIP pode ser obtido da agregação dos vários componentes que compõe a carga através do modelo ZIP individual de cada um dos componentes da mesma, ou seja, cada componente é modelado individualmente e participa do modelo total com um certo valor de pertinência. Neste caso, a agregação dos componentes da carga depende, fundamentalmente do conhecimento dos tipos envolvidos e do hábito de consumo, para as diversas classes de carga, o que nem sempre é possível.

No presente trabalho, a determinação dos parâmetros será feita através de medidas feitas e coletadas no sistema, que envolveram a monitoração das cargas face às variações de tensão e de freqüência no ponto onde se deseja representar a mesma. A precisão do modelo obtido dependerá da precisão dessas variáveis aquisitadas e da quantidade de medidas realizadas.

Nesta situação supõe-se a existência de um conjunto de N medidas ou observações coletadas no sistema ou no barramento de interesse referentes a potência ativa, potência reativa, tensão e freqüência.

Para o modelo de carga ZIP pode-se escrever o seguinte conjunto de equações para a potência ativa:

$$\frac{P_1}{P_0} = a + b\frac{V_1}{V_0} + c\left(\frac{V_1}{V_0}\right)^2$$

$$\frac{P_2}{P_0} = a + b\frac{V_2}{V_0} + c\left(\frac{V_2}{V_0}\right)^2$$

$$\vdots \qquad \vdots$$

$$\frac{P_k}{P_0} = a + b\frac{V_k}{V_0} + c\left(\frac{V_k}{V_0}\right)^2$$

$$\vdots \qquad \vdots$$

$$\frac{P_{N-1}}{P_0} = a + b\frac{V_{N-1}}{V_0} + c\left(\frac{V_{N-1}}{V_0}\right)^2$$

onde P_0 e V_0 representam as condições iniciais de potência ativa e de tensão, correspondente ao primeiro padrão da série de medidas coletadas. Se as N medidas forem devidas a vários distúrbios distintos, cada vez que um novo distúrbio é processado deve-se trocar as condições iniciais. As condições iniciais P_0 e V_0 também podem corresponder aos valores nominais do sistema ou do barramento a ser modelado.

Para a potência reativa conjunto de equações idêntico pode ser obtido.

Do mesmo modo, para o modelo de carga LINEAR pode-se escrever o seguinte conjunto de equações para a potência ativa:

$$\begin{aligned}
\Delta P_j &= a_1 \Delta P_{j-n_P} + \ldots + a_{n_P-1} \Delta P_{j-2} + a_{n_P} \Delta P_{j-1} + \\
&\quad b_1 \Delta V_{j-n_V} + \ldots + b_{n_V-1} \Delta V_{j-2} + b_{n_V} \Delta V_{j-1} + b_{n_V+1} \Delta V_j + \\
&\quad c_1 \Delta f_{j-n_F} + \ldots + c_{n_F-1} \Delta f_{j-2} + c_{n_F} \Delta f_{j-1} + c_{n_F+1} \Delta f_j \\
&\vdots \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \vdots \\
\Delta P_k &= a_1 \Delta P_{k-n_P} + \ldots + a_{n_P-1} \Delta P_{k-2} + a_{n_P} \Delta P_{k-1} + \\
&\quad b_1 \Delta V_{k-n_V} + \ldots + b_{n_V-1} \Delta V_{k-2} + b_{n_V} \Delta V_{k-1} + b_{n_V+1} \Delta V_k + \\
&\quad c_1 \Delta f_{k-n_F} + \ldots + c_{n_F-1} \Delta f_{k-2} + c_{n_F} \Delta f_{k-1} + c_{n_F+1} \Delta f_k \\
&\vdots \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \vdots \\
\Delta P_N &= a_1 \Delta P_{N-n_P} + \ldots + a_{n_P-1} \Delta P_{N-2} + a_{n_P} \Delta P_{N-1} + \\
&\quad b_1 \Delta V_{N-n_V} + \ldots + b_{n_V-1} \Delta V_{N-2} + b_{n_V} \Delta V_{N-1} + b_{n_V+1} \Delta V_N + \\
&\quad c_1 \Delta f_{N-n_F} + \ldots + c_{n_F-1} \Delta f_{N-2} + c_{n_F} \Delta f_{N-1} + c_{n_F+1} \Delta f_N
\end{aligned}$$

onde j é o índice da primeira equação a ser obtida, correspondente ao maior valor entre os parâmetros n_P, n_V e n_F. Como os valores anteriores de potência ativa, tensão e freqüência influem no valor atual da potência, deve-se iniciar nova série de equações toda vez que um novo distúrbio é processado. Também para a potência reativa um conjunto de equações idêntico ao acima pode ser obtido.

O número de equações obtidas (N_E) dependerá do número de distúrbios (N_D) e será sempre maior que o numero de parâmetros do modelo a serem determinados:

– para o modelo ZIP (3 parâmetros a serem determinados):

$$N_E = N - N_D$$

– para o modelo LINEAR (N_P parâmetros a serem determinados):

$$N_E = N - N_D \times N_P$$

As equações anteriores podem ser colocadas na seguinte forma matricial:

$$[Y] = [X][T]$$

onde:

- o vetor [Y] corresponde a uma matriz coluna, sendo composto com os valores da variável dependente, no caso a potência. Este vetor terá dimensão N_E. Tem-se:

  - para o modelo ZIP:

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{P_1}{P_0} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{P_k}{P_0} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{P_{N-1}}{P_0} \end{bmatrix}$$

  - para o modelo LINEAR:

$$[Y] = \begin{bmatrix} \Delta P_j \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_k \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta P_{N-1} \end{bmatrix}$$

- a matriz [X] corresponde aos valores das variáveis independentes. Tem-se:

– para o modelo ZIP a matriz $[X]$ terá dimensão ($N_E \times 3$) e será dada por:

$$[X] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{V_1}{V_0} & \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{V_k}{V_0} & \left(\frac{V_k}{V_0}\right)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{V_{N-1}}{V_0} & \left(\frac{V_{N-1}}{V_0}\right)^2 \end{bmatrix}$$

– para o modelo LINEAR o vetor $[X]$ terá dimensão ($N_E \times N_P$) e é dada por:

$$[X] = \begin{bmatrix} \Delta P_{j-n_P} & \cdots & \Delta P_{j-1} & \Delta V_{j-n_V} & \cdots & \Delta V_j & \Delta f_{j-n_F} & \cdots & \Delta f_j \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta P_{k-n_P} & \cdots & \Delta P_{k-1} & \Delta V_{k-n_V} & \cdots & \Delta V_k & \Delta f_{k-n_F} & \cdots & \Delta f_k \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta P_{N-n_P} & \cdots & \Delta P_{N-1} & \Delta V_{N-n_V} & \cdots & \Delta V_N & \Delta f_{N-n_F} & \cdots & \Delta f_N \end{bmatrix}$$

– o vetor $[T]$ corresponde a uma matriz coluna com os valores dos coeficientes a serem determinados. Tem-se:

– para o modelo ZIP o vetor $[T]$ terá dimensão *3* e corresponderá a:

$$[T] = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

– para o modelo LINEAR o vetor [T] terá dimensão N_P e corresponderá a:

$$[T] = \begin{bmatrix} a_1 \\ . \\ . \\ . \\ a_{n_P} \\ b_1 \\ . \\ . \\ . \\ b_{n_V+1} \\ c_1 \\ . \\ . \\ . \\ c_{n_F+1} \end{bmatrix}$$

Como o número de parâmetros a serem determinados (*3* para o modelo ZIP e N_P para o modelo LINEAR) é menor que o número de equações disponíveis (N_E) tem-se um sistema de equações sobre-determinado, não existindo uma solução única que satisfaça a todos os dados.

Desta maneira, o vetor [T] passa a ser uma estimativa dos parâmetros do modelo existindo então, para cada equação, um erro (ϵ_k), entre o valor devido (y_k) e a saída do modelo calculado com os parâmetros estimados ($\hat{y}_k$), ou seja:

$$\epsilon_k = y_k - \hat{y}_k$$

onde:

$$\hat{y}_k = t_1 x_1 + t_2 x_2 + \ldots + t_m x_m$$

sendo m a dimensão do vetor [T].

Pode-se então definir um vetor de erros:

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ . \\ . \\ . \\ \epsilon_k \\ . \\ . \\ . \\ \epsilon_{N_E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 - \hat{y}_1 \\ . \\ . \\ . \\ y_k - \hat{y}_k \\ . \\ . \\ . \\ y_{N_E} - \hat{y}_{N_E} \end{bmatrix}$$

Logo:

$$[\epsilon] = [Y] - [\hat{Y}] = [Y] - [X][T]$$

A soma dos quadrados dos erros é dada por:

$$F_C = \sum_{i=1}^{N_E} \epsilon_i^2 = [\epsilon]^t [\epsilon]$$

Daí:

$$F_C = ([Y] - [X][T])^t ([Y] - [X][T])$$

Da álgebra matricial tem-se que:

$$([L] - [M])^t = [L]^t - [M]^t$$

$$([L][M])^t = [M]^t [L]^t$$

Logo a expressão acima pode-se desenvolver:

$$F_C = ([Y]^t - [T]^t[X]^t)([Y] - [X][T])$$

$$= [Y]^t[Y] - [Y]^t[X][T] - [T]^t[X]^t[Y] - [T]^t[X]^t[X][T]$$

Pode-se escrever que:

$$[Y]^t[X][T] = (([X][T])^t([Y]^t)^t)^t$$

$$= ([T]^t[X]^t[Y])^t$$

$$= [T]^t[X]^t[Y]$$

visto que uma matriz é a transposta da outra e cada uma é formada por apenas um elemento.

Com isso a expressão do erro quadrático resulta em:

$$F_C = [Y]^t[Y] - 2[T]^t[X]^t[Y] - [T]^t[X]^t[X][T]$$

A função erro apresenta ponto de mínimo para os valores de $[T]$ que tornem sua derivada identicamente nula, ou seja:

$$\frac{\partial F_C}{\partial [T]} \equiv 0$$

Tem-se ainda que:

$$\frac{\partial [L(x)][M(x)]}{\partial [N(x)]} = \frac{\partial [L(x)]}{\partial [N(x)]}[M(x)] + [L(x)]\frac{\partial [M(x)]}{\partial [N(x)]}$$

$$\frac{\partial [L(y)]}{\partial [N(x)]} = 0$$

$$\left(\frac{\partial [L(x)]}{\partial [N(x)]}\right)^t = \frac{\partial [L(x)]^t}{\partial [N(x)]}$$

Logo:

$$\frac{\partial F_C}{\partial [T]} = \frac{\partial ([Y]^t[Y] - 2[T]^t[X]^t[Y] + [T]^t[X]^t[X][T])}{\partial [T]} =$$

$$= \frac{\partial ([Y]^t[Y])}{\partial [T]} - \frac{\partial (2[T]^t[X]^t[Y])}{\partial [T]} + \frac{\partial ([T]^t[X]^t[X][T])}{\partial [T]} =$$

$$= 0 - 2\frac{\partial [T]^t}{\partial [T]}[X]^t[Y] + \frac{\partial [T]^t}{\partial [T]}[X]^t[X][T] + [T]^t[X]^t[X]\frac{\partial [T]}{\partial [T]}$$

Tem-se ainda que:

$$[T]^t[X]^t[X]\frac{\partial [T]}{\partial [T]} = \left(\left(\frac{\partial [T]}{\partial [T]}\right)^t ([T]^t[X]^t[X])^t\right)^t =$$

$$= \left(\frac{\partial [T]^t}{\partial [T]}([X]^t[X])^t([T]^t)^t\right)^t =$$

$$= \frac{\partial [T]^t}{\partial [T]}[X]^t[X][T]$$

por serem matrizes formadas por um elemento somente e uma transposta da outra.

Finalmente:

$$\frac{\partial F_C}{\partial [T]} = -2\frac{\partial [T]^t}{\partial [T]}[X]^t[Y] - 2\frac{\partial [T]^t}{\partial [T]}[X]^t[X][T] =$$

$$= -2\frac{\partial [T]^t}{\partial [T]}([X]^t[Y] - [X]^t[X][T]) \equiv 0$$

A derivada será identicamente nula se:

$$[X]^t[Y] - [X]^t[X][T] \equiv 0$$

ou seja:

$$[X]^t[Y] = [X]^t[X][T]$$

Se $[X]^t[X]$ é não singular, existe a matriz inversa $([X]^t[X])^{-1}$. Pré multiplicando os dois membros da equação acima por esta inversa tem-se:

$$[T] = ([X]^t[X])^{-1}[X]^t[Y]$$

onde o termo $([X]^t[X])^{-1}[X]$ é denominado matriz pseudo-inversa de $[X]$.

APÊNDICE II

MODELOS EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO DO MOTOR DE INDUÇÃO

Há homens que lutam um dia e são bons. Há outros que lutam um ano e são melhores. Há os que lutam muitos anos e são muito bons. Porém, há os que lutam toda a vida. Estes são imprescindíveis.

Bertold Brecht
1898-1956

AII.1 - INTRODUÇÃO

Resumidamente, o motor de indução é constituído de duas partes principais: o estator e o rotor. O estator é a parte fixa e o rotor a parte móvel. Tanto o estator quanto o rotor apresentam estruturas magnéticas cilíndricas e simétricas. E ainda, os enrolamentos do estator e do rotor são iguais entre si e igualmente defasados. Teoricamente, qualquer um dos dois enrolamentos, do estator ou do rotor, pode constituir o enrolamento primário, mas por motivos práticos quase todos os motores de indução são construídos com o enrolamento primário no estator e o secundário no rotor.

A figura AII.1 apresenta desenhos simbólicos ilustrativos de um motor de indução trifásico bem como de seus enrolamentos do estator e do rotor.

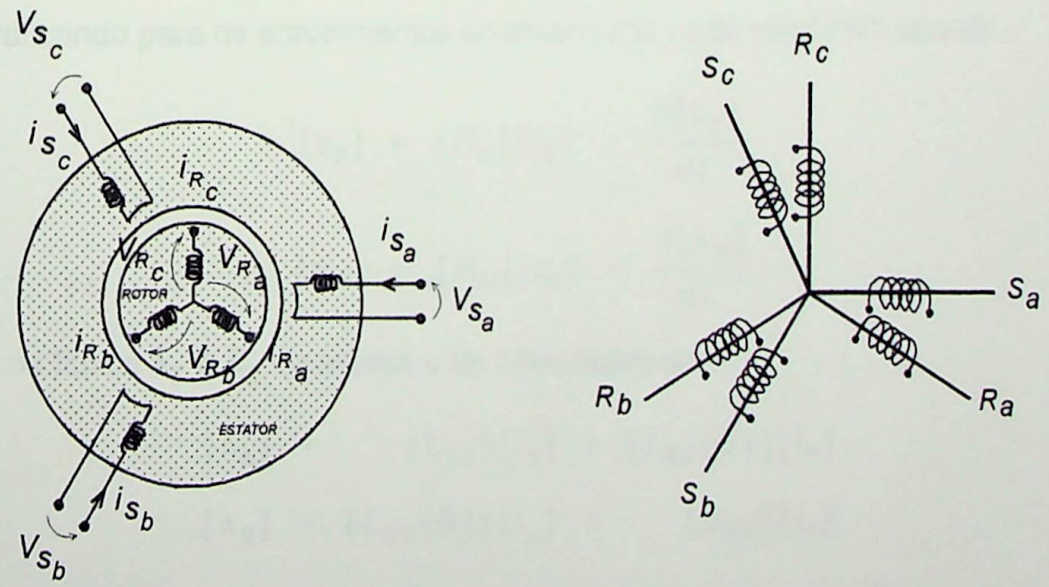


Figura AII.1 - Desenhos simbólicos ilustrativos de um motor de indução trifásico

Para que se possa representar matematicamente o motor de indução acima, as

seguintes hipóteses serão adotadas:

- os três enrolamentos do estator e do rotor são iguais entre si e igualmente defasados eletricamente.
- o entreferro é considerado constante.
- o circuito magnético é considerado ideal, portanto, não existe saturação.
- a distribuição da densidade do fluxo magnético no entreferro é radial e senoidal.
- as perdas magnéticas por histerese e Foucalt são desprezadas.

A seguinte expressão pode ser escrita para qualquer um dos enrolamentos:

$$v_e = R_e i_e + \frac{d\lambda_e}{dt}$$

onde v_e representa a tensão no enrolamento "*e*", R_e sua resistência ôhmica, i_e a corrente que atravessa o enrolamento e λ_e o fluxo concatenado com os demais enrolamentos.

O fluxo concatenado (enlaçe de fluxo) λ_e, baseado nas hipóteses acima, é dado por:

$$\lambda_e = L_e i_e + \sum_j M_{ej} i_j$$

onde L_e é a indutância própria do enrolamento "*e*" e M_{ej} a indutância mútua entre os enrolamentos "*e*" e "*j*".

Generalizando para os enrolamentos do estator ("S") e do rotor ("R") tem-se:

$$[v_S] = [R_S][i_S] + \frac{d[\lambda_S]}{dt}$$

$$[v_R] = [R_R][i_R] + \frac{d[\lambda_R]}{dt}$$

sendo os fluxos λ_S e λ_R do estator e do rotor dados por:

$$[\lambda_S] = [L_{SS}][i_S] + [L_{SR}(\theta)][i_R]$$

$$[\lambda_R] = [L_{RS}(\theta)][i_S] + [L_{RR}][i_R]$$

onde θ é o deslocamento angular entre os enrolamento do estator e do rotor e $[L_{RS}(\theta)] = [L_{SR}(\theta)]^t$.

A fim de simplificar as expressões acima pode-se aplicar a transformação de Park. A

transformação de Park é uma transformação linear, e fisicamente corresponde a transformar o motor de indução com enrolamentos do estator fixos e do rotor girantes em uma máquina com os enrolamentos do estator fixos e do rotor pseudo estacionários. A figura AII.2 ilustra simbolicamente esta transformação.

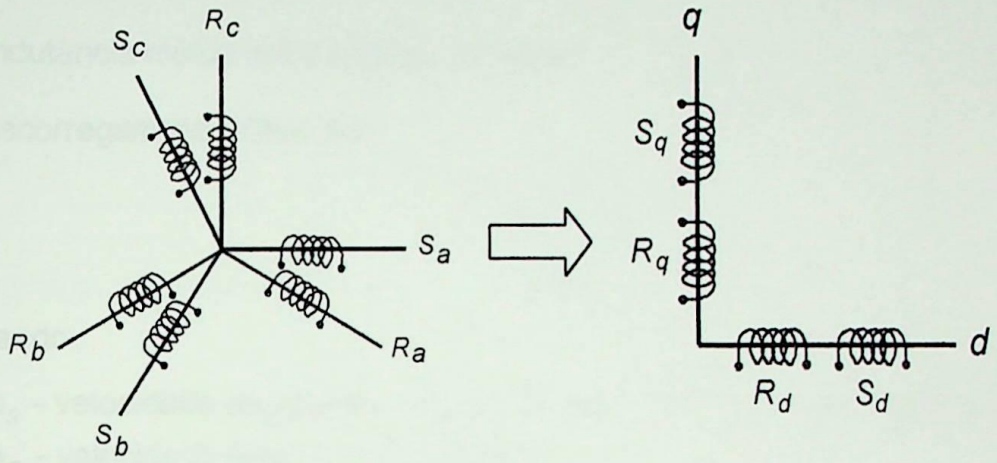


Figura AII.2 - Desenho simbólico ilustrando a transformação de Park

Aplicando a transformação acima obtem-se as seguintes expressões para as tensões no motor [Barbi, 1985]:

$$v_{dS} = R_S i_{dS} - \omega_S \lambda_{qS} + \frac{d\lambda_{dS}}{dt}$$

$$v_{qS} = R_S i_{qS} + \omega_S \lambda_{dS} + \frac{d\lambda_{qS}}{dt}$$

;

$$v_{dR} = R_R i_{dR} - s\,\omega_S \lambda_{qR} + \frac{d\lambda_{dR}}{dt}$$

$$v_{qR} = R_R i_{qR} + s\,\omega_S \lambda_{dR} + \frac{d\lambda_{qR}}{dt}$$

A relação entre os fluxos concatenados e a corrente são dadas por:

$$\lambda_{dS} = L_S i_{dS} + L_M (i_{dS} + i_{dR})$$

$$\lambda_{qS} = L_S i_{qS} + L_M (i_{qS} + i_{qR})$$

$$\lambda_{dR} = L_R i_{dR} + L_M (i_{dS} + i_{dR})$$

$$\lambda_{qR} = L_R i_{qR} + L_M (i_{qS} + i_{qR})$$

onde:

R_S - resistência ôhmica do estator;

R_R - resistência ôhmica do rotor.

L_S - indutância de dispersão do estator;

L_R - indutância de dispersão do rotor;

L_M - indutância mútua entre o estator e o rotor;

s - escorregamento, dado por:

$$s = \frac{\omega_S - \omega_R}{\omega_S}$$

sendo:

ω_S - velocidade angular do campo magnético do estator (velocidade síncrona);
ω_R - velocidade angular elétrica do rotor.

Os fluxos concatenados são tratados como variáveis independentes.

As equações diferenciais que descrevem o motor de indução são:

$$\frac{d\lambda_{dS}}{dt} = v_{dS} + \omega_S \lambda_{qS} - \frac{R_S L_{RR}}{K}\lambda_{dS} + \frac{R_S L_M}{K}\lambda_{dR}$$

$$\frac{d\lambda_{qS}}{dt} = v_{qS} - \omega_S \lambda_{dS} - \frac{R_S L_{RR}}{K}\lambda_{qS} + \frac{R_S L_M}{K}\lambda_{qR}$$

$$\frac{d\lambda_{dR}}{dt} = v_{dR} + s\omega_S \lambda_{qR} - \frac{R_R L_{SS}}{K}\lambda_{dR} + \frac{R_R L_M}{K}\lambda_{dS}$$

$$\frac{d\lambda_{qR}}{dt} = v_{qR} - s\omega_S \lambda_{dR} - \frac{R_R L_{SS}}{K}\lambda_{qR} + \frac{R_R L_M}{K}\lambda_{qS}$$

onde:

$$L_{SS} = L_S + L_M$$

$$L_{RR} = L_R + L_M$$

$$K = L_s L_R - L_M^2$$

A relação entre os fluxos concatenados e as correntes são dadas por:

$$i_{dS} = \frac{1}{K}\left[L_{RR}\lambda_{dS} - L_M\lambda_{dR}\right]$$

$$i_{qS} = \frac{1}{K}\left[L_{RR}\lambda_{qS} - L_M\lambda_{qR}\right]$$

$$i_{dR} = \frac{1}{K}\left[L_{SS}\lambda_{dR} - L_M\lambda_{dS}\right]$$

$$i_{qR} = \frac{1}{K}\left[L_{SS}\lambda_{qR} - L_M\lambda_{qS}\right]$$

A equação de oscilação dinâmica do rotor é dada por:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = -\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}\left[T_E - T_M\right]$$

onde:

H - constante de inércia do motor;

T_E - torque elétrico do motor, que é função do escorregamento s [Mendes, 1997]:

$$T_E = \lambda_{qR}\, i_{dR} - \lambda_{dR}\, i_{qR}$$

ou [Boldea, 1986]:

$$T_E = \lambda_{qS}\, i_{dS} - \lambda_{dS}\, i_{qS}$$

ou ainda [Lem, 1994]:

$$T_E = \frac{X_M}{K}\left(\lambda_{qS}\,\lambda_{dR} - \lambda_{qR}\,\lambda_{dS}\right)$$

T_M - torque mecânico do motor, ou seja, conjugado resistente da carga aplicada ao motor, normalmente uma função da velocidade do rotor, conseqüentemente de seu escorregamento, podendo ser representada por uma função exponencial dos mesmos:

$$T_M = T_w\,\omega_R^m = T_s\, s^m$$

onde o expoente da carga m depende do tipo da carga que está acoplada ao motor. Já que a maioria das cargas mecânicas acionadas pelo motor apresentam conjugados cujos expoentes de carga são iguais a 0, 1 ou 2, a maneira mais usual de representar este conjugado é pela seguinte expressão:

$$T_M = T_0(A\omega_R^2 + B\omega_R + C) = T_0(as^2 + bs + c)$$

onde os coeficientes *A*, *B* e *C* (ou *a*, *b* e *c*) dependem do tipo da carga a ser acionada. Por exemplo, gruas, guinchos, guindastes, transportadores de correia apresentam conjugado constante ($C = 1$, $A = B = 0$); moinhos de rolos, bombas de pistão, plainas e serras para madeira, apresentam conjugado proporcionais a velocidade ($B = 1$, $A = C = 0$); ventiladores, misturadores, centrífugas, bombas centrífugas, exaustores, compressores apresentam conjugado proporcionais ao quadrado da velocidade ($A = 1$, $B = C = 0$). Outros tipos de acionamentos como máquinas operatrizes (por exemplo, fresadores e mandriladoras) apresentam conjugado inversamente proporcionais a velocidade (potência constante), outros, como fornos rotativo de grande porte tem uma variação não uniforme com a velocidade e existem ainda cargas que não solicitam conjugados (volantes) como por exemplo, prensas de perfuração ou de estampagem profunda, não hidráulicas.

As expressões acima descrevem o modelo de quinta ordem do motor de indução.

AII.2 - MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO EM REGIME PERMANENTE

Nas condições de regime permanente tem-se:

$$\frac{d\lambda_{dS}}{dt} = \frac{d\lambda_{qS}}{dt} = \frac{d\lambda_{dR}}{dt} = \frac{d\lambda_{qR}}{dt} = 0$$

Substituindo-se os valores dos fluxos concatenados e lembrando-se que a relação entre valores instantâneos e eficazes para ondas senoidais é $\sqrt{2}$, tem-se as seguintes expressões para as tensões nos enrolamentos do motor de indução em valores eficazes:

$$V_{dS} = R_S I_{dS} - \omega_S L_{SS} I_{qS} - \omega_s L_M I_{qR}$$

$$V_{qS} = R_S I_{qS} + \omega_S L_{SS} I_{dS} + \omega_S L_M I_{dR}$$

$$V_{dR} = R_R I_{dR} - s\omega_S L_{RR} I_{qR} - s\omega_S L_M I_{qS}$$

$$V_{qR} = R_R I_{qR} + s\omega_S L_{RR} I_{dR} + s\omega_S L_M I_{dS}$$

Tem-se ainda que:

$$\dot{V}_S = V_{dS} + j V_{qS} \quad e \quad \dot{V}_R = V_{dR} + j V_{qR}$$

$$\dot{I}_S = I_{dS} + j I_{qS} \quad e \quad \dot{I}_R = I_{dR} + j I_{qR}$$

Logo:

$$\dot{V}_S = R_S \dot{I}_S + j X_S \dot{I}_S + j X_M (\dot{I}_S + \dot{I}_R)$$

$$\dot{V}_R = R_R \dot{I}_R + j s X_R \dot{I}_R + j s X_M (\dot{I}_R + \dot{I}_S)$$

Pode-se então obter para o motor de indução um circuito elétrico equivalente em regime permanente, mostrado na figura AII.3 [Krause, 1986].

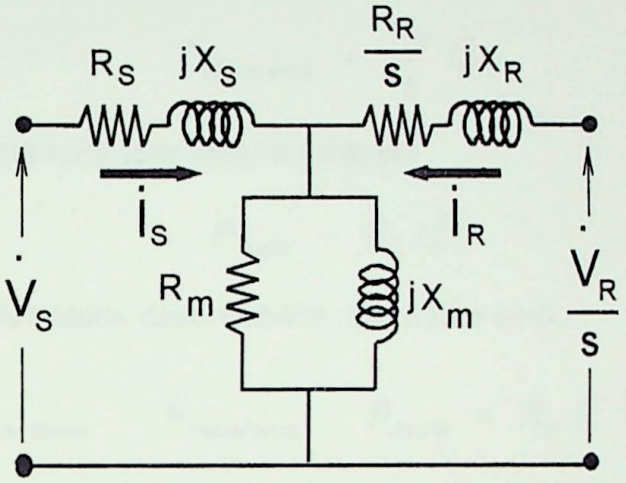


Figura AII.3 - Circuito elétrico equivalente do motor de indução de gaiola simples

onde os parâmetros já foram definidos anteriormente.

Normalmente os enrolamentos do rotor são curto-circuitados, ou seja, $\dot{V}_R = 0$. Com isso a expressão da tensão no rotor pode ser reescrita como:

$$0 = \frac{R_R}{s} \dot{I}_R + j X_R \dot{I}_R + j X_M (\dot{I}_R + \dot{I}_S)$$

resultando no circuito equivalente apresentado na figura AII.4 a seguir [Brereton, 1957; Fitzgerald, 1975; Arrilaga, 1983; Kundur, 1993].

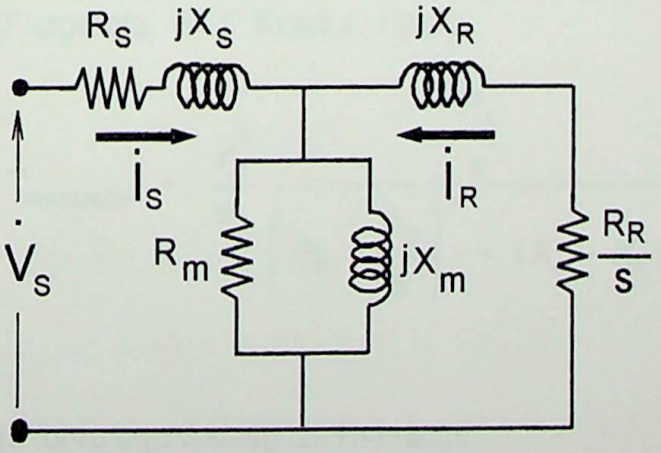


Figura AII.4 - Circuito elétrico equivalente do motor de indução de gaiola simples com rotor curto-circuitado

Obs: nos circuitos elétricos acima, foi representado no ramo em paralelo referente a magnetização, uma resistência de perdas no ferro R_m, referentes as perdas por histerese e Foucalt (hipótese adotada). Normalmente esta perda é muito pequena e portanto desprezada.

Dos circuitos apresentados pode-se observar que a potência total transferida através do entreferro a partir do estator (por fase) é dado por:

$$P_{entreferro} = \frac{R_R}{s} I_R^2$$

A perda Joule total no rotor (por fase) é dado por:

$$P_{Joule} = R_R I_R^2$$

A potência mecânica interna desenvolvida pelo motor será:

$$P_{mecânica} = P_{entreferro} - P_{Joule} = R_R I_R^2 \frac{1-s}{s}$$

O valor do torque ou conjugado eletromagnético interno do motor, correspondente a potência mecânica interna dividida pela velocidade angular será dado por:

$$T_{mecânico} = \frac{P_{mecânico}}{\omega_R} = R_R I_R^2 \frac{1-s}{\omega_S}$$

Como normalmente se desprezam as perdas por atrito, ventilação, etc. este conjugado é o disponível no eixo do motor. Estas perdas podem ser consideradas na resistência R_m ou através da aplicação de uma pequena carga mecânica (torque) no eixo da máquina [Krause, 1986].

A expressão do torque pode ser simplificada através da aplicação do teorema de Thèvenin no circuito elétrico equivalente do motor. Usando deste recurso, a expressão do torque resulta [Fitzgerald, 1975; Kundur, 1993]:

$$T_{mecânico} = \frac{V_E^2}{\omega_S} \frac{\frac{R_R}{s}}{\left(R_E + \frac{R_R}{s}\right)^2 + (X_E + X_R)^2}$$

onde:

V_E - tensão da fonte equivalente de Thèvenin:

$$V_E = V_S \frac{jX_M}{R_S + j(X_S + X_M)}$$

R_E , X_E - impedância do estator equivalente de Thèvenin:

$$R_E + jX_E = (R_S + jX_S) \;//\; jX_M = \frac{jX_M(R_S + jX_S)}{R_S + j(X_S + X_M)}$$

AII.3 - MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO

O modelo equivalente desenvolvido no item anterior é valido somente para estudos de regime permanente. Para estudos transitórios e dinâmicos é necessário o desenvolvimento de um modelo dinâmico, onde o modelo dependerá, com extensão considerável, da natureza e complexidade do problema e das necessidades de precisão associadas.

AII.3.1 - Modelo Transitório de Quinta Ordem

No modelo transitório de quinta ordem do motor de indução são considerados todos os efeitos transitórios no mesmo, tanto no estator como no rotor. Os fluxos concatenados são tratados como variáveis independentes.

As equações diferenciais do fluxo concatenado no estator e do rotor já foram descritas anteriormente e são as seguintes:

$$\frac{d\lambda_{dS}}{dt} = V_{dS} + \omega_S \lambda_{qS} - \frac{R_S L_{RR}}{K}\lambda_{dS} + \frac{R_S L_M}{K}\lambda_{dR}$$

$$\frac{d\lambda_{qS}}{dt} = V_{qS} - \omega_S \lambda_{dS} - \frac{R_S L_{RR}}{K}\lambda_{qS} + \frac{R_S L_M}{K}\lambda_{qR}$$

$$\frac{d\lambda_{dR}}{dt} = V_{dR} + s\,\omega_S \lambda_{qR} - \frac{R_R L_{SS}}{K}\lambda_{dR} + \frac{R_R L_M}{K}\lambda_{dS}$$

$$\frac{d\lambda_{qR}}{dt} = V_{qR} - s\,\omega_S \lambda_{dR} - \frac{R_R L_{SS}}{K}\lambda_{qR} + \frac{R_R L_M}{K}\lambda_{qS}$$

A equação de oscilação dinâmica do rotor é dada por:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}\left[T_M - T_E\right]$$

onde todos os parâmetros envolvidos também já foram descritos.

AII.3.2 - Modelo Transitório de Terceira Ordem

Muitas vezes deseja-se reduzir a ordem do sistema das equações diferenciais representativas do motor de indução, por exemplo, para facilitar a programação computacional quando se representa um grande número de motores.

Para transitórios simétricos em máquinas balanceadas, podem ser desprezados os transitórios do estator [Boldea, 1986]. Neste caso despreza-se as correntes no estator produzidas por variações na tensão no mesmo. Em outras palavras, as tensões induzidas por efeito de transformação são muito menores que as tensões induzidas por efeito de rotação:

$$\left| \frac{d\lambda_{dS}}{dt} \right| << \omega_S \left| \lambda_{dS} \right|$$

$$\left| \frac{d\lambda_{qS}}{dt} \right| << \omega_S \left| \lambda_{qS} \right|$$

Neste caso tem-se então:

$$\frac{d\lambda_{dS}}{dt} = \frac{d\lambda_{qS}}{dt} = 0$$

Com isso as equações diferenciais do fluxo concatenado no motor ficam restritas às do rotor:

$$\frac{d\lambda_{dR}}{dt} = V_{dR} + s\omega_S\lambda_{qR} - \frac{R_R L_{SS}}{K}\lambda_{dR} + \frac{R_R L_M}{K}\lambda_{dS}$$

$$\frac{d\lambda_{qR}}{dt} = V_{qR} - s\omega_S\lambda_{dR} - \frac{R_R L_{SS}}{K}\lambda_{qR} + \frac{R_R L_M}{K}\lambda_{qS}$$

como:

$$0 = \frac{d\lambda_{dS}}{dt} = V_{dS} + \omega_S\lambda_{qS} - \frac{R_S L_{RR}}{K}\lambda_{dS} + \frac{R_S L_M}{K}\lambda_{dR}$$

$$0 = \frac{d\lambda_{qS}}{dt} = V_{qS} - \omega_S\lambda_{dS} - \frac{R_S L_{RR}}{K}\lambda_{qS} + \frac{R_S L_M}{K}\lambda_{qR}$$

pode-se eliminar λ_{dS} e λ_{qS} das equações do fluxo concatenado do rotor, ficando as mesmas somente como funções de λ_{dR} e λ_{qR}.

Acrescentando-se a equação de oscilação dinâmica do rotor:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}\left[T_M - T_E \right]$$

obtem-se o modelo transitório de terceira ordem do motor de indução.

Como variação de fluxo resulta em tensão induzida, o modelo de terceira ordem do motor de indução pode ainda ser expresso em função dessas tensões. Para isso deve-se definir as tensões transitórias de eixo direto e quadratura do motor de indução. O modelo do motor de indução em função da tensão transitória resulta mais simples que o modelo em função do fluxo concatenado.

As expressões da tensão nos eixos direto e em quadratura do estator e do rotor do motor de indução já foram apresentadas anteriormente. Desprezando-se as variações do fluxo concatenado no estator tem-se:

$$v_{dS} = R_S i_{dS} - \omega_S \lambda_{qS}$$

$$v_{qS} = R_S i_{qS} + \omega_S \lambda_{dS}$$

$$v_{dR} = R_R i_{dR} - s\,\omega_S \lambda_{qR} + \frac{d\lambda_{dR}}{dt}$$

$$v_{qR} = R_R i_{qR} + s\,\omega_S \lambda_{dR} + \frac{d\lambda_{qR}}{dt}$$

Da relação entre os fluxos concatenados no rotor e as correntes no estator e no rotor pode-se obter:

$$i_{dR} = \frac{\lambda_{dR} - L_M i_{dS}}{L_{RR}}$$

$$i_{qR} = \frac{\lambda_{qR} - L_M i_{qS}}{L_{RR}}$$

Substituindo nas expressões dos fluxos concatenados no estator tem-se:

$$\lambda_{dS} = \frac{L_M}{L_{RR}} \lambda_{dR} + \left(L_{SS} - \frac{L_M^2}{L_{RR}} \right) i_{dS}$$

$$\lambda_{qS} = \frac{L_M}{L_{RR}} \lambda_{qR} + \left(L_{SS} - \frac{L_M^2}{L_{RR}} \right) i_{qS}$$

Levando estes valores nas expressões para as tensões no estator, obtem-se:

$$v_{dS} = R_S i_{dS} - \omega_S \frac{L_M}{L_{RR}} \lambda_{qR} - \omega_S \left(L_{SS} - \frac{L_M^2}{L_{RR}} \right) i_{qS}$$

$$v_{qS} = R_S\, i_{qS} + \omega_S \frac{L_M}{L_{RR}} \lambda_{qR} + \omega_S \left(L_{SS} - \frac{L_M^2}{L_{RR}} \right) i_{dS}$$

Pode-se definir [Mendes, 1997]:

$$X_S' \triangleq \omega_S \left(L_{SS} - \frac{L_M^2}{L_{RR}} \right) = X_S + \frac{X_R X_M}{X_R + X_M}$$

como a reatância transitória do motor de indução. A reatância transitória X_s' é a reatância aparente quando o rotor está bloqueado e o escorregamento é unitário,

$$e_d' \triangleq -\omega_S \frac{L_M}{L_{RR}} \lambda_{qR}$$

como a tensão transitória de eixo direto do motor de indução, e

$$e_q' \triangleq \omega_S \frac{L_M}{L_{RR}} \lambda_{dR}$$

como a tensão transitória de eixo em quadratura do motor de indução.

Logo, as tensões transitórias de eixo direto e em quadratura em valores eficazes resulta:

$$V_{dS} = R_S\, I_{dS} - X_S'\, I_{qS} + E_d'$$

$$V_{qS} = R_S\, I_{qS} + X_S'\, I_{dS} + E_q'$$

Então:

$$\dot{V}_S = V_{dS} + jV_{qS} = R_S\, \dot{I}_S + jX_S'\, \dot{I}_S + \dot{E}'$$

onde $\dot{E}'$ é a tensão atrás da impedância transitória do motor de indução.

Da expressão acima pode-se obter o circuito equivalente transitório do motor de indução, que está apresentado na figura AII.5 [Brereton, 1957; Fitzgerald, 1975; Arrilaga, 1983; Kundur, 1993; Mendes, 1997] :

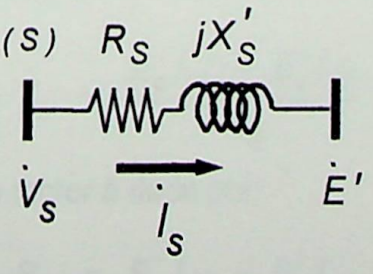


Figura AII.5 - Circuito elétrico transitório simplificado do motor de indução

Substituindo os valores de i_{dR} e i_{qR} nas expressões da tensão no rotor, obtem-se:

$$\frac{de'_d}{dt} = -v_{qR}\omega_S\frac{L_M}{L_{RR}} - \frac{R_R\omega_S L_M^2}{L_{RR}^2}i_{qS} - \frac{R_R}{L_{RR}}e'_d + s\omega_S e'_q$$

$$\frac{de'_q}{dt} = v_{dR}\omega_s\frac{L_M}{L_{RR}} + \frac{R_R\omega_S L_M^2}{L_{RR}^2}i_{dS} - \frac{R_R}{L_{RR}}e'_q - s\omega_S e'_d$$

Pode-se definir [Mendes, 1997]:

$$T'_0 \triangleq \frac{L_{RR}}{R_R} = \frac{X_R + X_M}{\omega_S R_R}$$

como a constante de tempo transitória de circuito aberto da motor de indução, e

$$X \triangleq \omega_S L_{SS} = X_S + X_M$$

como a reatância de circuito aberto do rotor do motor de indução.

Com isso em valores eficazes, resulta:

$$\frac{dE'_d}{dt} = -V_{qR}\omega_S\frac{L_M}{L_{RR}} - \frac{1}{T'_0}\left[E'_d + (X - X'_S)I_{qS}\right] + s\omega_S E'_q$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = V_{dR}\omega_S\frac{L_M}{L_{RR}} - \frac{1}{T'_0}\left[E'_q - (X - X'_S)I_{dS}\right] - s\omega_S E'_d$$

As equações acima, que representam o comportamento da tensão transitória do rotor em conjunto com a equação de oscilação dinâmica do rotor, mostrada abaixo:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}\left[T_M - T_E\right]$$

constituem também o modelo transitório de terceira ordem do motor de indução.

O torque eletromagnético resulta em:

$$T_E = \frac{E'_d I_{dS} + E'_q I_{qS}}{\omega_S}$$

A potência elétrica interna do motor é dada por:

$$P_E = E'_d I_{dS} + E'_q I_{qS}$$

$$Q_E = E'_q I_{dS} - E'_d I_{qS} = \frac{E'^2}{X - X'_S}$$

AII.3.3 - Modelo Transitório de Primeira Ordem

Desprezando-se os transitórios elétricos do estator e do rotor pode-se obter o modelo de primeira ordem do motor de indução. Neste caso a máquina é considerada em regime permanente eletromagnético e todos os valores de fluxo concatenado no estator e no rotor são obtidos de equações algébricas lineares. Sendo assim:

$$\frac{d\lambda_{dS}}{dt} = \frac{d\lambda_{qS}}{dt} = \frac{d\lambda_{dR}}{dt} = \frac{d\lambda_{qR}}{dt} = 0$$

ou, em termos das tensões transitórias, E'_d e E'_q sendo constantes, portanto:

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{dE'_q}{dt} = 0$$

Somente é considerada a equação de oscilação do rotor:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}\left[T_M - T_E \right]$$

Obs: cabe lembrar que normalmente o rotor do motor de indução é curto-circuitado, o que corresponde a:

$$V_{dR} = V_{qR} = V_R = 0$$

em todos os modelos desenvolvidos.

AII.4 - MODELO DO MOTOR DE INDUÇÃO DE GAIOLA DUPLA EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO

O motor de gaiola simples, para o qual os modelos foram desenvolvidos apresenta certas limitações em algumas situações, o que os torna imprecisos [Arrilaga, 1983]. Estas situações são minimizadas através do uso de rotores com barras profundas ou o arranjo em gaiola dupla.

A finalidade destes recursos é obter uma resistência de rotor que varie automaticamente com a velocidade a fim de obter um motor que tenha boas características de partida, resultantes de alta resistência do rotor, e ao mesmo tempo

boas características de funcionamento, resultantes da baixa resistência do rotor.

No motor de indução de gaiola dupla os enrolamentos do são curto-circuitados

A figura AII.6 apresenta o circuito equivalente simplificado do motor de indução de gaiola dupla [Arrilaga, 1983; Kundur, 1993].

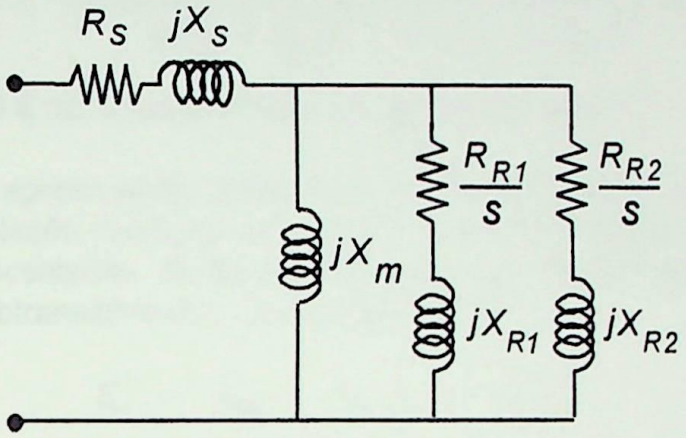


Figura AII.6 - Circuito elétrico equivalente do motor de indução de gaiola dupla

onde os parâmetros ainda não definidos são:

R_{R1} - resistência da gaiola superior do rotor;

X_{R1} - reatância de dispersão da gaiola superior do rotor;

R_{R2} - resistência da gaiola inferior do rotor;

X_{R2} - reatância de dispersão da gaiola inferior do rotor;

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BMI

todas referidas ao estator.

O circuito elétrico equivalente do motor de gaiola simples pode ser estendido para representar o motor de gaiola dupla, mas agora a resistência e a reatância do rotor são funções do escorregamento [Arrilaga, 183, Kundur, 1993]. A figura AII.7 ilustra este circuito.

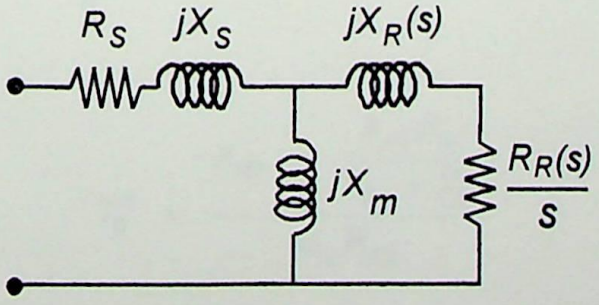


Figura AII.7 - Circuito elétrico equivalente do motor de indução de gaiola simples representando o motor de indução de gaiola dupla

sendo:

$$R_R(s) = \frac{R_{R1}R_{R2}(R_{R1}+R_{R2}) + s^2(R_{R1}X_{R2}^2 + R_{R2}X_{R1}^2)}{(R_{R1}+R_{R2})^2 + s^2(X_{R1}+X_{R2})^2}$$

$$X_R(s) = \frac{R_{R1}^2X_{R2} + R_{R2}^2X_{R1} + s^2X_{R1}X_{R2}(X_{R1}+X_{R2})}{(R_{R1}+R_{R2})^2 + s^2(X_{R1}+X_{R2})^2}$$

O modelo acima só é válido para estudos de regime permanente.

As expressões já apresentadas anteriormente que representam o comportamento transitório e a oscilação mecânica do rotor do motor de indução continuam válidas. Devem ser acrescentadas ainda as seguintes expressões que descrevem o comportamento subtransitório do rotor [Arrilaga, 1983]:

$$E_d'' = V_{dS} - R_S I_{dS} + X_s'' I_{qS}$$

$$E_q'' = V_{qS} - R_S I_{qS} - X_s'' I_{dS}$$

onde E_d'' e E_q'' são as correspondentes tensões subtransitórias nos eixos d e q, sendo ainda:

$$X_S'' = X_S + \frac{X_{R1}X_{R2}X_M}{X_{R1}X_{R2} + X_{R1}X_M + X_{R2}X_M}$$

chamada de reatância subtransitória.

A taxa de variação da tensão subtransitória é dada por:

$$\frac{dE_d''}{dt} = \frac{dE_d'}{dt} + \frac{1}{T_0''}\left[E_d' - E_d'' - (X_S' - X_S'')I_{qS}\right] - s\omega_S(E_q' - E_q'')$$

$$\frac{dE_q''}{dt} = \frac{dE_q'}{dt} + \frac{1}{T_0''}\left[E_q' - E_q'' + (X_S' - X_S'')I_{dS}\right] + s\omega_S(E_d' - E_d'')$$

onde:

$$T_0'' = \frac{X_{R2} + \dfrac{X_{R1}X_M}{X_{R1}+X_M}}{\omega_S R_{R2}}$$

é a constante de tempo subtransitória em circuito aberto do motor de indução.

O torque elétrico do motor passa a ser dado por:

$$T_E = \frac{E''_d I_{dS} + E''_q I_{qS}}{\omega_S}$$

APÊNDICE III

RECOZIMENTO SIMULADO

É costume de um tolo quando erra, queixar-se dos outros. É costume de uma sábio queixar-se de si mesmo.

Sócrates
470-399 A.C.

AIII.1 - INTRODUÇÃO

Muitos problemas que ocorrem na engenharia são complexos demais para serem resolvidos diretamente, ou seja, por técnicas que chegam diretamente a uma solução. Normalmente não é necessário atingir a solução ótima, mas a uma solução com uma boa aproximação, que satisfaça algumas condições. Neste caso, o problema pode ser resolvido por métodos de busca da solução apropriada, contando com o auxílio de técnicas para guiar esta busca. A utilização de heurísticas melhora a eficiência de um processo de busca, mas pode também fazer que uma melhor solução seja desprezada.

AIII.2 - RECOZIMENTO SIMULADO

O recozimento simulado, tradução de "simulated annealing", também chamada de têmpera simulada, é uma técnica de busca heurística, sendo uma variação do método de subida (ou descida) de encosta. A subida (ou descida) de encosta é um método no qual é gerado uma solução (ponto ou caminho possível no espaço do problema) sendo esta solução usada, em conjunto com uma função heurística, para ajudar o gerador a decidir para onde deslocar-se no espaço de busca. A diferença é que a subida (ou descida) de encosta só permite caminhar para um ponto mais elevado (ou inferior) e o recozimento simulado permite serem feitos alguns movimentos descendentes (ou ascendentes) ao longo do processo.

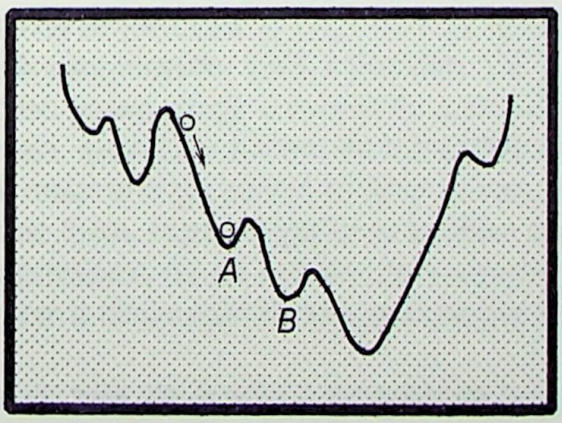
O recozimento simulado, como processo computacional, surgiu no início da década de 80, e é baseado no processo físico do recozimento, no qual metais ou outras substâncias físicas são fundidas (altos níveis de energia) e depois gradualmente resfriadas até atingir um estado sólido (mínimos níveis de energia). Este processo é um tipo de descida de encosta no qual se quer minimizar o nível de energia, ou seja, proceder a um movimento descendente com relação a este nível de energia. Durante o processo existe uma certa probabilidade de ocorrer uma transição para um estado de maior energia (movimento ascendente), cuja probabilidade diminui à medida que se diminui a temperatura do processo. Logo, os movimentos ascendente são mais prováveis no início do processo, quando a temperatura é mais alta, diminuindo com a

diminuição da temperatura. A probabilidade de ocorrer uma transição de um estado qualquer para um estado de maior energia, ou seja, a aceitação de um novo estado com uma energia maior que a do estado anterior, é dado pelo critério de Metrópolis e o algoritmo que o rege, denominado algoritmo de Metrópolis é o seguinte: dado um sólido em um estado (i) e com energia E_i, gera-se o estado seguinte (j) mediante a aplicação de um mecanismo que o transforma para o próximo estado através de um pequeno distúrbio. A energia do próximo estado (j) é E_j. Se a diferença de energia $\Delta E = E_j - E_i$ é menor ou igual a zero, o estado (j) é aceito (p = 1). Se a diferença de energia é maior do que zero, o estado (j) é aceito com a probabilidade p dada pela expressão:

$$p = e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

onde $\Delta E = E_j - E_i$ é a diferença no nível de energia (positiva) do estado (i) para o estado (j), T é a temperatura e k é uma constante física conhecida como constante de Boltzmann.

A velocidade com que o sistema é resfriado é denominado de cronograma de têmpera ou de recozimento. Os processos físicos são bastantes sensíveis a estes cronogramas. Se o processo de resfriamento for muito rápido, poderão ser formados regiões estáveis de alta energia (que em matemática corresponde a obter um mínimo local e não um mínimo global). Se o processo de resfriamento for lento, provavelmente se obtém uma estrutura cristalina uniforme (que em matemática corresponde a um mínimo global). Apesar de um resfriamento lento levar a uma melhor estrutura cristalina poderá haver perda de tempo no processo, visto que a estrutura final já pode ter sido formada e o resfriamento continuar lentamente sem acarretar variações nos níveis de energia. Por isso, a escolha do cronograma de têmpera é importante e, normalmente, deve ser obtido empiricamente de acordo com o problema específico a se resolver. Para se entender melhor o processo de recozimento e seu cronograma pode-se fazer uso do exemplo apresentado em [Rich, 1994], através da figura AIII.1 apresentada a seguir.



Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca MAUÁ BIM

Figura AIII.1 - Caixa preta com bola rolando

Suponha uma caixa preta com uma bola rolando na mesma, onde se deseja que a mesma atinja o nível mais profundo. Como não se pode ver a bola dentro da caixa não se sabe como proceder para que a mesma atinja o objetivo. A maneira mais fácil para

isto é sacudir a caixa. Se este processo for muito violento a bola poderá pular de nível para nível ao acaso podendo, por exemplo, ir do nível A para o nível B, ou se estiver no nível B voltar para o nível A. Caso este processo seja muito suave a bola poderá nem sair do lugar que se encontra. O cronograma de recozimento sugere que inicialmente se deva sacudir a caixa com violência e depois diminuir as sacudidelas gradualmente. A medida que o processo vai sendo realizado a probabilidade da bola pular de A para B será maior que a de B para A, sendo que com isso a bola encontrará o caminho para o nível C, e com as sacudidelas cada vez menores ela não conseguirá escapar.

Estas propriedades do recozimento físico podem ser usadas para definir um processo análogo de recozimento simulado, criando com isso uma nova técnica a ser utilizada na solução de grandes problemas combinatórios. Através do cronograma de recozimento pode-se explorar suficientemente todo o problema inicialmente, para que a solução seja insensível ao estado inicial, diminuindo com isso as chances de ficar preso em um mínimo ou máximo local. Deve-se ter em mente que agora ΔE não é mais a diferença no nível de energia mas sim a mudança no valor da função objetivo, seja ela qual for. Da mesma maneira, T (temperatura) e k (correspondência entre temperatura e energia) dão lugar a valores que produzam um comportamento desejável por parte do algoritmo.

Não existem regras para obter o cronograma de recozimento, dependendo do tipo de aplicação e a maneira como os parâmetros estão associados ao problema. Os três componentes a seguir devem ser analisados e escolhidos com bastante cuidado:

- valor inicial da temperatura (T_0). Como a solução não deve ser dependente da solução inicial deve-se sempre partir de uma temperatura inicial alta [Hassoun, 1995; Rendón, 1997]. Rich [1994] indica iniciar com T_0 em um valor de tal forma que, para uma energia média, a probabilidade de aceitação p seja igual a 0.5. Existem ainda outras maneiras de obter a temperatura inicial, relatadas em [Rendón, 1997].

- o número de iterações na temperatura T_k (N_k), ou seja, quando a temperatura deva ser reduzida. As referências [Hasson, 1995] e [Rendón, 1997] sugerem que N_k deva permitir que o processo possa atingir o estado de quase equilíbrio para o nível de temperatura T_k, ou seja, quando o número de transições de um estado de menor energia para outro de maior energia tornam-se desprezíveis, o que significa que está próximo de um mínimo local. Alguns algoritmos também escolhem N_k de acordo com o tamanho do problema ou do número de variáveis, podendo ser mantido constante ou variar com a diminuição da temperatura [Rendón, 1997].

- taxa de resfriamento, ou seja, de quanto a temperatura deve ser reduzida toda vez que ela mudar. Segundo Rendón [Rendón,1997] é recomendado na literatura taxas de resfriamento no intervalo [0.8 - 0.99], que corresponde a um resfriamento lento. Em [Hassoun, 1995] e [Rendón, 1997] também são apresentadas outras expressões para obtenção desta taxa de resfriamento. Deve se ter em mente que se a taxa de resfriamento é muito alta, ou seja, o resfriamento é feito rapidamente, poderão ocorrer convergências para mínimos locais e se for muito lenta, o algoritmo irá

requerer um excessivo tempo de computação para convergir.

A temperatura final T_f deveria ser aquela para o qual a mesma atinge zero. Pode-se observar que quando a temperatura T aproxima-se de zero, a probabilidade p de aceitar um estado pior do que o estado corrente é quase nula, portanto a temperatura final T_f na realidade resulta maior do que zero.

Existem vários critérios para a parada do processo de recozimento baseados no fato de que o mesmo deva ser interrompido quando não é obtida nenhuma melhoria na função objetivo quando se executa o algoritmo. Vários maneiras de se definir este critério estão apresentados em [Rendón,1997].

Várias experiências feitas com o processo de recozimento simulado em uma série de problemas têm mostrado que a melhor maneira de escolher um cronograma de recozimento é testar vários cronogramas e observar o efeito sobre a qualidade da solução encontrada e sobre a velocidade com que o processo converge.

Pode-se resumir todo o processo de recozimento simulado no seguinte: parte-se o processo de uma temperatura elevada, permitindo aceitar soluções piores; em seguida, diminui a temperatura e diminuindo com isso a probabilidade de se aceitar piores soluções. O processo começa com uma temperatura inicial (T_0) com uma determinada taxa de resfriamento; a temperatura T_{k+1} é obtida a partir da temperatura T_k e da taxa de resfriamento após serem feitas N_k iterações nesta temperatura T_k. Um algoritmo descrevendo todo este procedimento é o seguinte [Rich, 1994]:

- avalie o estado inicial. Se este estado for também um estado-meta (estado que é aceito como solução para o problema), então retorne-o e encerre. Caso contrário, continue com o estado inicial como estado corrente;

- inicialize melhor-até-o-momento como igual ao estado corrente;

- inicialize T de acordo com o cronograma de recozimento. O valor de T deve ser escolhido de acordo com o problema;

- repita o processo até ser encontrada uma solução ou até não haver mais nenhum operador que possa ser aplicado ao estado corrente:

  - selecione um operador que ainda não tenha sido aplicado ao estado corrente e aplique-o para produzir um novo estado;

  - avalie o novo estado. Calcule:

$$\Delta E = (\textit{valor do estado corrente}) - (\textit{valor do estado novo})$$

  . se o estado novo for um estado-meta, retorne-o e encerre;

  . se não for um estado-meta, mas for melhor que o estado corrente, então torne-o

o estado corrente. Atribua também este novo estado a melhor-até-o-momento;

. se ele não for melhor que o estado corrente, então torne-o o estado corrente com a probabilidade p dada por:

$$p = e^{-\frac{\Delta E}{T}}$$

se o movimento não for aceito, não faça nada;

Obs: esta etapa geralmente é implementada utilizando-se um gerador de números aleatórios para produzir um número na faixa [0,1]. Este número é comparado com a probabilidade p para verificar se o movimento será aceito;

– revise T sempre que necessário de acordo com o cronograma de recozimento;

– retorne melhor-até-o-momento como resposta.

APÊNDICE IV

ARTIGO APRESENTADO NO

IEEE PES WINTER MEETING

JANUARY 1997

A NEW CONSTRUCTIVE ANN AND ITS APPLICATION TO ELECTRIC LOAD REPRESENTATION

A.P. Alves da Silva C. Ferreira A.C. Zambroni de Souza G. Lambert-Torres

Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI)
BRAZIL

Abstract: Accurate dynamic load models allow more precise calculations of power system controls and stability limits. System identification methods can be applied to estimate load models based on measurements. Parametric and nonparametric are the two main classes in system identification methods. The parametric approach has been the only one used for load modeling so far. In this paper, the performance of a nonparametric load model based on a new constructive artificial neural network (Functional Polynomial Network (FPN)) is compared with a linear model and with the popular "ZIP" model. The impact of clustering different load compositions is also investigated. A comparison among the models performance for load chaotic behavior is presented, and some important conclusions are addressed. Substation buses (138 kV) from the Brazilian system feeding important industrial consumers have been modeled.

Keywords: Load Modeling, Neural Networks, Chaos, Stability Studies.

1. INTRODUCTION

The fundamental importance of power system components modeling has already been shown in the literature [1,2]. Regardless of the study to be performed, accurate models for transmission lines, transformers, generators, regulators and compensators have been proposed. However, the same has not occurred for loads. Although the importance of load modeling is well-known, specially for transient and dynamic stability studies, the random nature of a load composition makes its representation very difficult.

Two approaches have been used for load modeling. In the first one, based on the knowledge of the individual components, the load model is obtained through the aggregation of the load components models [3]. The second approach does not require the knowledge of the load physical characteristics. Based on measurements related to the load responses to disturbances, the model is estimated using system identification methods [4].

The composition approach requires information that is not generally available, which consists in a disadvantage of this method. This approach does not seem to be appropriate since the determination of an average (and precise) composition for each load bus of interest is virtually impossible. The second approach does not suffer from this drawback since the load to be modeled can be assumed a "black-box". However, a significant amount of data related to staged tests and natural disturbances affecting the system needs to be collected.

Considering the shortcomings of the two approaches, and the fact that data acquisition (and processing) systems are becoming very cheap, it seems that the system identification approach is more in accordance to current technology. This approach allows real-time load monitoring and modeling, which are necessary for on-line stability analysis.

Parametric [5] and nonparametric [6] are the two main classes in system identification methods. The parametric methods assume a known model structure with unknown parameters. Methods in this class have been the only ones used for load modeling so far. Their performance depends on a good guess of the model order, which usually requires previous knowledge of the load characteristics.

In recent years, artificial neural networks (ANNs) have been used for dynamic load modeling due to features such as nonlinear mapping (universal approximators) and generalization capability [7-10]. The multilayer perceptron trained with error back propagation has been employed. However, it has several shortcomings such as difficult setting of learning parameters, slow convergence, training failures due to local minima, pre-specified architecture (parametric model).

In this paper, the performance of a nonparametric load model based on the Functional Polynomial Network (FPN) [11] is compared with a linear model [4] and with the "ZIP" (constant impedance, current and power) model [3]. Chaotic load behavior is analyzed. The impact of clustering different load compositions is also investigated. The paper is organized as follows. Section 2 presents the load models used in this work, where the particular features of each one are shown. Section 3 describes the load clustering technique, whereas Section 4 introduces the autocorrelation function used to identify a chaotic load behavior. Section 5 shows the test results obtained for a real power system and Section 6 presents the conclusions of this work.

2. LOAD MODELS

The main idea is to obtain a model that represents the variations of electrical system loads (P and Q), taking into consideration the variations of voltage (V) and frequency (f). The ZIP model, Sections 2.1, is static, while the linear and FPN models, Sections 2.2 and 2.3 respectively, are dynamic.

2.1 ZIP Model

The ZIP model is a classic static load model. It is not an accurate model for the majority of power system loads. However, many programs employed by electric utilities use this type of representation.

The ZIP model can be expressed by Equation (1), and is also known by constant impedance, constant current and constant power.

PE-434-PWRS-0-12-1997 A paper recommended and approved by the IEEE Power System Engineering Committee of the IEEE Power Engineering Society for publication in the IEEE Transactions on Power Systems. Manuscript submitted July 29, 1996; made available for printing December 16, 1996.

0885-8950/97/$10.00 © 1997 IEEE

$$P(\bar{V}) = P_0 (a + b\bar{V} + c\bar{V}^2)$$
$$Q(\bar{V}) = Q_0 (d + e\bar{V} + f\bar{V}^2) \quad (1)$$

where:

- $\bar{V} = V / V_0$;
- P_0, Q_0 and V_0 represent the initial conditions;
- coefficients a and d specify the per unit change in real and reactive loads that behave as constant power;
- coefficients b and e specify the per unit change in real and reactive loads that behave as constant current; and
- coefficients c and f specify the per unit change in real and reactive loads that behave as constant impedance.

2.2 Linear Model [4]

This procedure allows the selection of the load model order. The general form of this load model is described in Equation (2).

$$\Delta P(k) = \sum_{l=1}^{n_P} a_l \Delta P(k-l) + \sum_{l=0}^{n_V} b_l \Delta V(k-l) + \sum_{l=0}^{n_f} c_l \Delta f(k-l)$$
$$\Delta Q(k) = \sum_{l=1}^{n_Q} d_l \Delta Q(k-l) + \sum_{l=0}^{n_V'} e_l \Delta V(k-l) + \sum_{l=0}^{n_f'} g_l \Delta f(k-l) \quad (2)$$

where $\Delta P, Q, V, f(k) = P, Q, V, f(k+1) - P, Q, V, f(k)$.

The parameters a_l, b_l, ..., and g_l, are calculated using least squares estimation, while the pre-selected order values (n_P, n_V, ..., n'_f) define the structure of the model. The order values are chosen according to the kind of load.

2.3 Load Model Based on the FPN

The network architecture proposed in references [11], the Functional Polynomial Network, is based on the following ANN models: functional link net and polynomial network.

2.3.1 Functional Link Net [12]

There are two types of functional networks, the functional expansion and the outer product models, although a combination of the two types can be used. The greatest advantage of this network is simplicity. A combination of orthonormal functions can be used to produce a desired continuous mapping. It is also well-known that every continuous function can be uniformly approximated by a polynomial (Weierstrass' approximation theorem). Therefore, the functional link network does not require the use of hidden layers. Consequently, the training process employs the delta rule instead of the generalized delta rule, speeding up the convergence process tremendously.

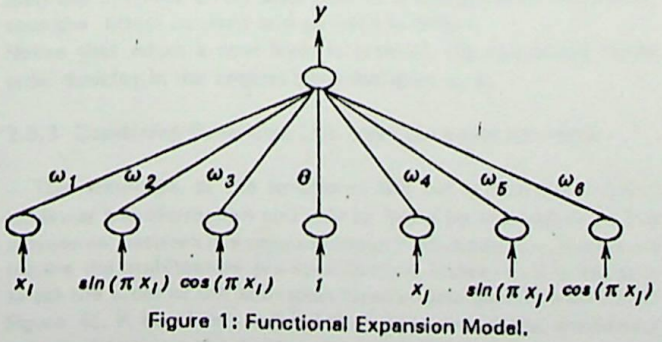


Figure 1: Functional Expansion Model.

A network that uses the functional expansion model is shown in Figure 1, where $y = f(x_1\omega_1 + \sin(\pi x_1)\omega_2 + \cos(\pi x_1)\omega_3 + x_j\omega_4 + \sin(\pi x_j)\omega_5 + \cos(\pi x_j)\omega_6 + \theta)$ denotes $\Delta P(k)$ or $\Delta Q(k)$, f is a sigmoidal function, and x_1, x_j represent $\Delta P(k-l)$ or $(\Delta Q(k-l))$, $\Delta V(k-m)$, $\Delta f(k-n)$. Notice that the new input variables include the original variables plus nonlinear transformations of these variables. No new information is added to the input layer, only a dimensionality expansion of the input space is applied. The idea is to employ a new input space in which a linear input-output mapping is sufficient for accomplishing a desired task. In Figure 2, an example of functional link net using the outer product model is shown.

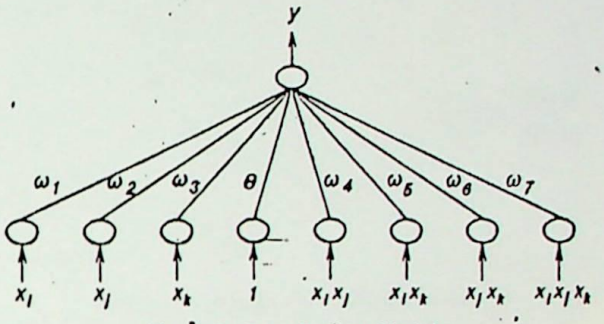


Figure 2: Outer Product Model.

2.3.2 Polynomial Network

The architecture of a polynomial network is formed during the training process (nonparametric model). The neuron activation function is based on an elementary polynomial of arbitrary order. A polynomial network is shown in Figure 3. In this example, the network has seven inputs, although the network uses only five of them. This is due to the automatic input selection capability of the training algorithm. Automatic input selection is very useful when the load characteristics are unknown. Therefore, there is no risk of using an ANN more complex than necessary, avoiding overfitting the data and loosing generalization capability.

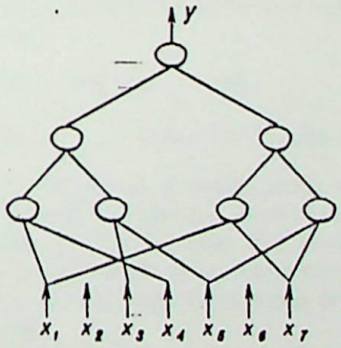


Figure 3: Polynomial Network.

Each neuron output can be expressed by a second-order polynomial function as shown in Figure 4, where x_1 and x_j (i.e., $\Delta P(k-l)$ (or $\Delta Q(k-l)$), $\Delta V(k-m)$, $\Delta f(k-n)$) are inputs and A, B, C, D, E, and F are the polynomial coefficients, which are equivalent to the network weights, and y ($\Delta P(k)$ or $\Delta Q(k)$) is the neuron output.

The Group Method of Data Handling (GMDH) [13] training algorithm can be used to adjust the polynomial coefficients and to find the network architecture. The GMDH algorithm employs two data sets. One for estimating the network weights (training) and the other for testing which neurons should survive during the training process.

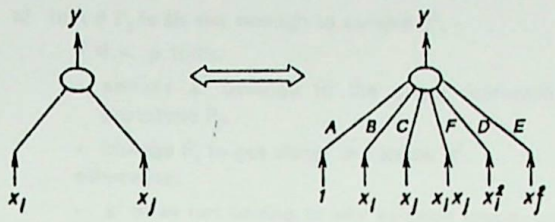


Figure 4: Neuron Model of a Polynomial Network where

$$y = A + Bx_I + Cx_J + Dx_I^2 + Ex_J^2 + Fx_Ix_J$$

Methods based on stochastic search, such as simulated annealing and genetic algorithms have been applied for training polynomial networks [6,14]. Besides the high computational effort, these variations of the basic GMDH algorithm include network complexity measures in the error functions to be minimized. This allows the elimination of the test set data which can be useful for problems with few available samples. However, these criteria for automatic selection of the network architecture do not guarantee optimality (maximum generalization capability).

The GMDH allows the construction of layers, one at a time, beginning at the input layer. Two different data sets, totalizing N input/output patterns are used for training (N_t samples) and testing ($N - N_t$ samples). The GMDH algorithm is described below (a second order elementary polynomial is assumed):

Step I) Combine the M inputs (to the current layer), two at a time, in order to form the following linear systems of equations:

$$\begin{aligned} y_1 &= A + Bx_{1I} + Cx_{1J} + Dx_{1I}^2 + Ex_{1J}^2 + Fx_{1I}x_{1J} \\ y_2 &= A + Bx_{2I} + Cx_{2J} + Dx_{2I}^2 + Ex_{2J}^2 + Fx_{2I}x_{2J} \\ &\vdots \\ y_{N_t} &= A + Bx_{N_tI} + Cx_{N_tJ} + Dx_{N_tI}^2 + Ex_{N_tJ}^2 + Fx_{N_tI}x_{N_tJ} \end{aligned} \quad (3)$$

Step II) Estimate the coefficients (weights) A, B, C, D, E, and, F solving the sets of equations above for the training set (in the sense of least squares). Then, the neurons outputs are represented by the following equation:

$$y = \hat{A} + \hat{B}x_I + \hat{C}x_J + \hat{D}x_I^2 + \hat{E}x_J^2 + \hat{F}x_Ix_J \quad (4)$$

Step III) Evaluate each of the neurons created in Step II using the test set.

$$r_K^2 = \sum_{I=1}^{N-N_t} (y_I - z_{Ik})^2 \;/\; \sum_{I=1}^{N-N_t} y_I^2 ; \quad k = 1,2,\ldots,\frac{M(M-1)}{2} \quad (5)$$

where y_I and z_{Ik} represent the desired output values and the values obtained from each of the M(M-1)/2 neurons, respectively.

Step IV) Sort the r_k^2 values. Compare the minimum value with the minimum r_k^2 of the previous layer. If the current error is greater than the previous error, stop (end of the algorithm). Otherwise, save the fittest neurons and go back to Step I.

Notice that when a new layer is created, the polynomial model order doubles in the original input variables x_I, x_J.

2.3.3 Combining Functional Link and Polynomial Networks

The drawback of the functional link net is that the required nonlinear transformation can only be found by trial and error. The polynomial network is a nonparametric ANN model, i.e., it does not require the architecture pre-specification. However, it is not easy to set the order of the activation function (elementary polynomial; Figure 4). It has been noticed that the order of the elementary polynomial affects the ANN performance [7]. Polynomial networks can suffer from excessive oscillatory behavior.

The combination of these two networks produces a very powerful ANN model due to the automatic input selection capability of the GMDH. Figure 5 shows this ANN model. The advantages of the FPN are:

- the ANN architecture is automatically defined by the training process;
- there is no learning parameter to be set;
- no local minima problem; and,
- fast convergence.

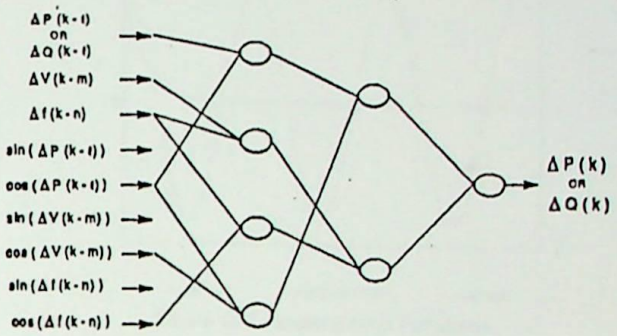


Figure 5: Functional Polynomial Network.

3. LOAD CLUSTERING

Electric loads have different compositions through time. Therefore, in order to improve the load model performance, more than one model for each load bus must be estimated. The idea is to separate input/output signals showing similar behavior, probably associated with similar load compositions, in order to decrease the extent of nonlinearity that should be provided by a single load model. An ART like neural network model [12] is used for the clustering task. It has been employed because there is no need for pre-specifying the number of groups. After dividing the set of disturbances related to a bus in groups, a load model for each group is created.

The voltage and/or frequency disturbances and respective load variations can be represented by points in a multi-dimensional space. For instance:

$$\underline{x} = (\, P(k), P(k-1), P(k-2), \ldots, f(k), f(k-1), f(k-2), \ldots, V(k), V(k-1), V(k-2), \ldots \,) \quad (6)$$

Procedures to find groups of similar points are known as nonsupervised learning mechanisms. Such procedures try to identify prototypes or exemplars that may serve as the best representations for each group. A prototype can be one of the defined points for the measured disturbances or the geometric center of the group.

The metric used in this work is the Euclidian distance. The algorithm is described step by step below:

I - At the beginning of the training process the units in the output layer are not activated.
  a) choose a vigilance parameter ρ.
  b) select the first entering pattern as the first group prototype.

II - Perform iterations until none of the training examples cause any change in the set of prototype vectors.
  a) choose a training sample x^l in cyclic order.
  b) find the P_j prototype closest (distance d) to the training sample x^l.

c) test if P_j is similar enough to sample x^l,
   if $d < \rho$ then:
   - sample x^l belongs to the group represented by prototype P_j.
   - change P_j to get closer to sample x^l.
   otherwise:
   - x^l does not belong to any existent group; create a new group and set the group prototype equal to x^l.

d) go back to step II.

4. LOAD MODEL AND CHAOTIC BEHAVIOR

The load models characteristics described in the foregoing sections allow one to obtain results according to a desired accuracy. For example, reference [15] shows that the classical ZIP model suffices for voltage stability analysis. This load model, however, may not produce accurate results if a chaotic behavior is present. Chaotic systems have originally been studied by Lorenz [16], and his classical chaotic system has been the basis of many activities in nonlinear system analysis.

Chaos in power systems is a particular area of analysis, and few results have been reported recently. For example, reference [17] applies perturbation techniques to analyze chaos in a power system. Reference [18] calculates the Lyapunov exponents associated to a two-bus system, and the results obtained show that chaos may be observed in power systems. The Lyapunov exponents are measures of the rate of convergence (or divergence) of trajectories initially close to each other. The chaotic behavior observed in reference [18] is detected through the analysis of the system equations. Therefore, if the system equations are known, the Lyapunov exponents are sufficient to determine the dynamic system response. Otherwise, a method based on signal measurements must be used.

The chaotic analysis by signal measurements is described in [19] through two methods: autocorrelation function and power spectrum. The autocorrelation function Φ_m of the signal $x(t) = \{x_j\}$ used in this work, and defined below, is a good indicator:

$$\Phi_m = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_j \, x_{j+m} \qquad (7)$$

where $\Phi_m = \Phi_m(t) = \Phi(m\Delta t)$. This function represents the average of the product of the signal $x(t)$ at times t and $t + m\Delta t$, and shows the dependence of the signal at time t on its previous values. In this paper the signal $x(t)$ is given by the measured values of active or reactive powers. The power spectrum, defined by the Fourier transform of the signal $x(t)$, can also be used for the same purpose.

The autocorrelation function, Equation (7), is employed in the following way. If its value is different from zero as $t \to \infty$, $x(t)$ is periodic or quasi-periodic, i.e. non-chaotic, since a signal at a time t is strongly correlated to a signal at a time $t + T$, where T is the period of analysis. For chaotic systems, $\Phi_m \to 0$ as $t \to \infty$, i.e. the dependence of the signal on its previous values vanishes as time increases. A strongly damped autocorrelation function characterizes a chaotic behavior. Figure 6 summarizes possible cases identified from the autocorrelation functions Φ_m.

5. TEST RESULTS

Substations buses (138 kV) from a Brazilian utility, feeding about 30 important industrial consumers (steel-making, mining, ferroalloy and chemical), have been modeled. Models for these loads are particularly important in stability studies. They represent 70% out of a total connected regional load of 5500 MW. Accurate models for these loads have been developed because stability studies are very sensitive to these loads characteristics. The remaining 30% of the total load consists of residential/commercial loads. The data acquisition sampling period is 8.3 ms. Some tests for an 138 kV feeder (mining load) are presented in Figures 7 to 13. Twenty nine measured disturbances are used.

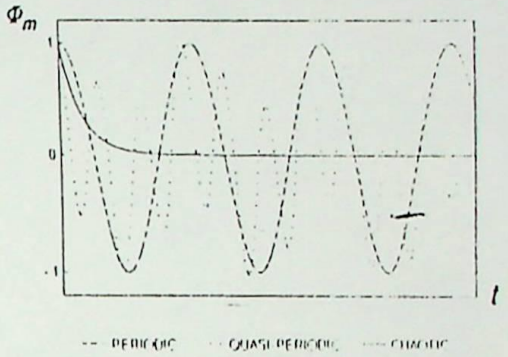


Figure 6: Autocorrelation Functions.

The disturbances are clustered as follows:

- Active Power (2 groups)
  1) 18 disturbances (12 for training, 6 for testing)
  2) 11 disturbances (7 for training, 4 for testing)
- Reactive Power (2 groups)
  1) 12 disturbances (8 for training, 4 for testing)
  2) 17 disturbances (11 for training, 6 for testing)

Other clustering configurations have been tried. The problem of increasing the number of clusters is that different load compositions still have common characteristics. Therefore, due the limited number of disturbances, the number of clusters have to be kept low. Fuzzy clustering [20] has been thought to overcome this problem. The clustering procedure determines when the load model is supposed to be accurate (based on the similarity between the test and training disturbances). As the number of disturbances available for each bus is usually limited, cross-validation or bootstrapping techniques should be applied to estimate the load model error rate.

Next, five disturbances (3 for active power and 2 for reactive power) are analyzed. Figure 7a presents the voltage and frequency variations for the first case of active power. The disturbance is characterized by voltage and frequency variations of 10.8% and 1.2%, respectively. The load models responses are given in Figure 7b. Notice that for the first swing, the FPN model average error is half of the one produced by the linear model. The ZIP model performance is not competitive. The corresponding autocorrelation function in Figure 10 shows that the active power presents a chaotic behavior.

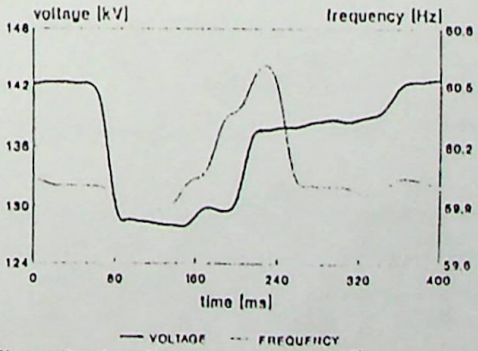
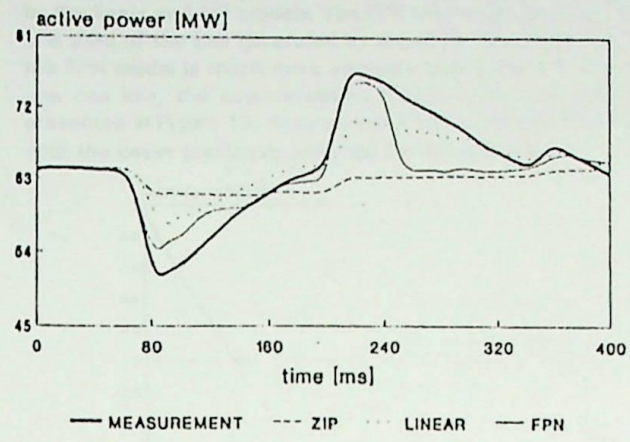


Figure 7a: Test Disturbance for the 1st Case (V, f).



	ZIP	LINEAR	FPN
FMAPE	8.24%	6.02%	2.95%
TMAPE	6.62%	3.53%	3.13%
MAX	20.45%	14.34%	12.17%

FMAPE : First Swing Mean Average Percentage Error
TMAPE : Total Mean Average Percentage Error
MAX : Maximum Absolute Percentage Error
Figure 7b: Test Disturbance for the 1st Case (P).

Figure 8a shows the voltage and frequency variations for the second case of active power. The disturbance is characterized by voltage and frequency variations of 6.2% and 0.6%, respectively. The load models responses are given in Figure 8b. As one can see, the ZIP model provides poor results, if compared with the linear and FPN models. The linear and FPN models produce similar results. The corresponding autocorrelation function plotted in Figure 10 indicates that the active power presents a non-chaotic behavior. It has been concluded, based on several tests, that the linear model provides good results for non-chaotic load behavior.

In Figure 9a, a voltage variation of 7.7% occurs in the third case of active power. The frequency oscillation is negligible. The load models responses are given in Figure 9b. The FPN model is the only one that is not fooled by the voltage dip, since the load behaves as constant power in this case. The corresponding autocorrelation function (Figure 10) indicates that the active power has a strong chaotic behavior.

The reactive power analysis follows the same structure as that used for the active power. Figure 11a shows that the voltage and frequency variations are about 5.6% and 0.94%, respectively, and the corresponding load model responses are shown in Figure 11b.

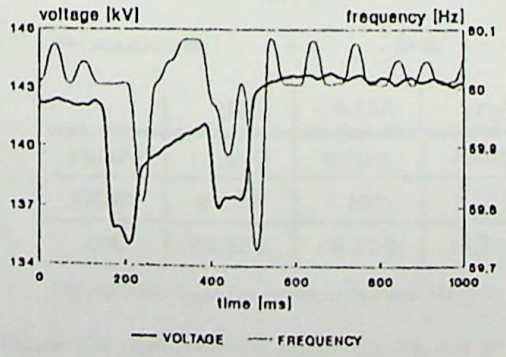
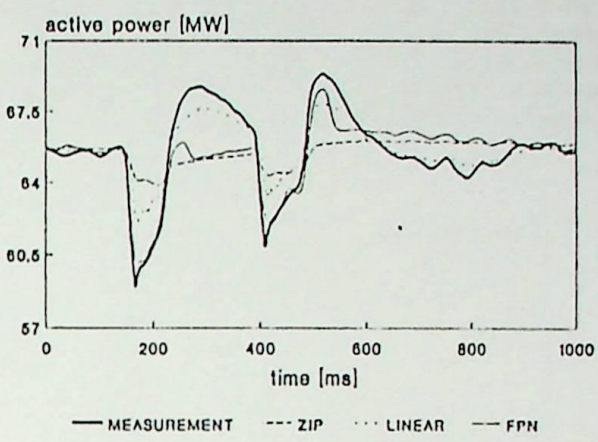


Figure 8a: Test Disturbance for the 2nd Case (V, f).



	ZIP	LINEAR	FPN
FMAPE	4.43%	2.17%	2.40%
TMAPE	2.08%	0.93%	1.41%
MAX	8.71%	5.97%	5.18%

Figure 8b: Test Disturbance for the 2nd Case (P).

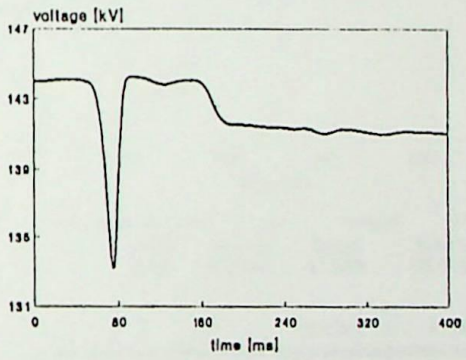
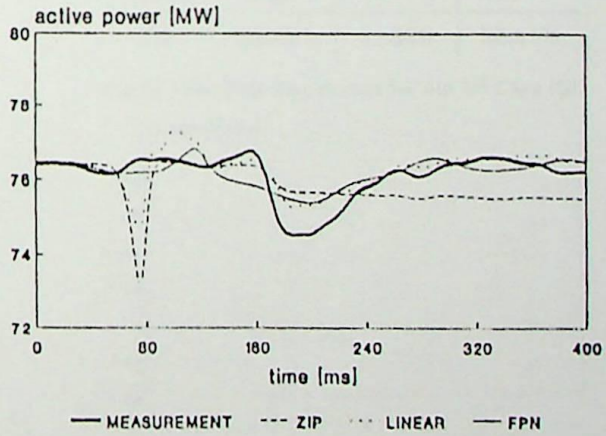


Figure 9a: Test Disturbance for the 3rd Case (V).



	ZIP	LINEAR	FPN
FMAPE	1.24%	0.93%	0.33%
TMAPE	0.75%	0.44%	0.43%
MAX	4.34%	2.47%	1.37%

Figure 9b: Test Disturbance for the 3rd Case (P).

The FPN model provides much better results than those produced by the linear and ZIP models. The FPN load model average error is one third of the one generated by the linear model. Furthermore, the FPN model is much more accurate during the first swing. As one can see, the autocorrelation functions for reactive power, presented in Figure 13, denote a more chaotic behavior compared with the cases previously analyzed for active power.

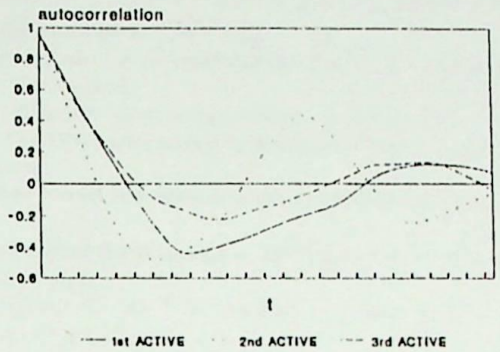


Figure 10: Autocorrelation Functions (Active Power).

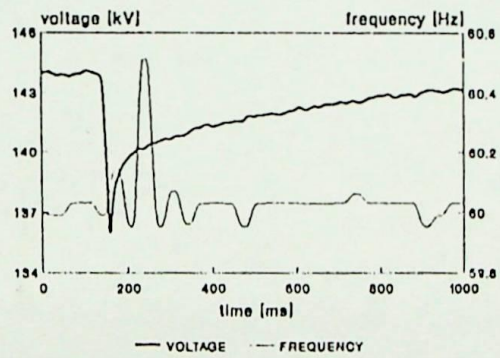
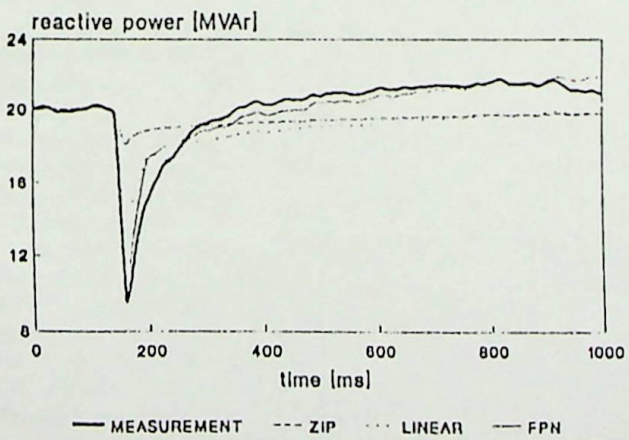


Figure 11a: Test Disturbance for the 1st Case (V, f).



	ZIP	LINEAR	FPN
FMAPE	13.52%	8.70%	4.46%
TMAPE	8.23%	7.26%	2.31%
MAX	88.23%	46.21%	15.74%

Figure 11b: Test Disturbance for the 1st Case (Q).

Figure 12a represents the second disturbance of the reactive power analysis. The voltage variation is about 10.9%. The frequency oscillation is negligible. The load models responses shown in Figure 12b. Again, the FPN model provides the b results. As usual, the ZIP model is not competitive. It is worthwl to mention that for the reactive part of the loads, for a few ot disturbances, the ZIP model provides slightly better results than linear model because of the quadratic term involving voltage.

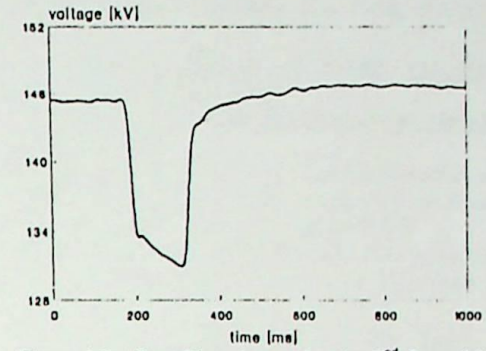
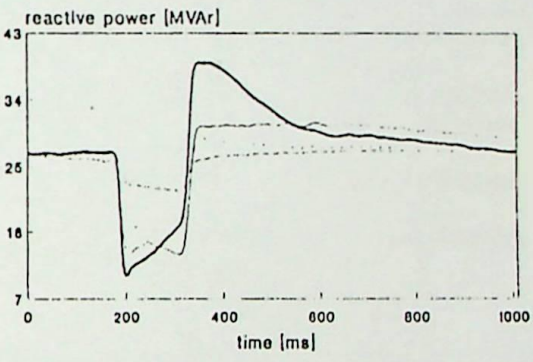


Figure 12a: Test Disturbance for the 2nd Case (V).



	ZIP	LINEAR	FPN
MAPE	16.64%	10.61%	8.34%
MAX	136.62%	91.05%	52.51%

	ZIP	LINEAR	FPN
FMAPE	51.89%	27.88%	17.54%
TMAPE	16.64%	10.61%	8.34%
MAX	136.62%	91.05%	52.51%

Figure 12b: Test Disturbance for the 2nd Case (Q).

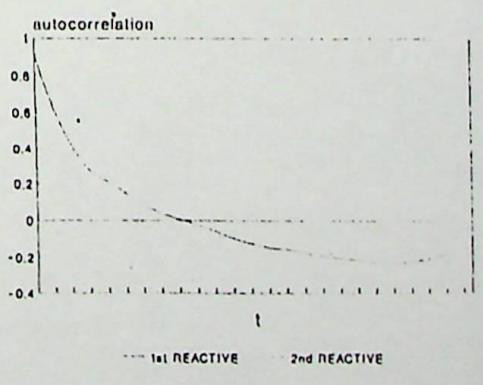


Figure 13: Autocorrelation Functions (Reactive Power).

Comparing the FPN model performance in the previous ca one can expected that as more chaotic is the load behavio better is the FPN model response if compared with the li model. This conclusion makes sense since chaos characteriz

strong nonlinear behavior, rendering the FPN (a nonlinear model) as adequate to represent the load. The FPN training time is about five minutes for 1500 patterns (~12 disturbances) on a 486-DX4-100 MHz.

6. CONCLUSIONS

The main conclusions of this work are:

- The complex load composition makes its dynamic behavior difficult to be modeled.
- Clustering different load compositions improves the models accuracy. The FPN performance is less sensitive to the number of load groups.
- The FPN load model has shown better results for chaotic load behavior.
- The reactive part of the load usually has a more chaotic behavior than its active part.
- The ZIP model has not been capable of modeling the load dynamics appropriately.
- Although sometimes the errors for the linear and FPN models are similar, the selection of an appropriate order for the linear model is not easy.

7. ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Brazilian Agencies CAPES and CNPq for the financial support. Tests described in this paper are the results of the work conducted by Mr. R.S. Cabral at Federal Engineering School at Itajuba.

8. REFERENCES

[1] C.W. Taylor: Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, 1994.

[2] P. Kundur: Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1993.

[3] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance: "Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 10, Fev. 1995, pp. 523-538.

[4] T. Dovan, T.S. Dillon, C.S. Berger, and K.E. Forward: "A Microcomputer Based On-Line Identification Approach to Power System Dynamic Load Modelling", IEEE Trans. Power Syst., Vol. PWRS-2, Aug. 1987, pp. 529-536.

[5] A.P. Alves da Silva and V.H. Quintana: "Pattern Analysis in Power System State Estimation", Elect. Power & Energy Syst., Vol. 17, No. 1, 1995, pp. 51-60.

[6] M.F. Tenorio and W.-T. Lee: "Self-Organizing Network for Optimum Supervised Learning", IEEE Trans. Neural Nets., Vol. 1, Mar. 1990, pp. 100-110.

[7] A.P. Alves da Silva, C. Ferreira, and G. Lambert-Torres: "Dynamic load modeling based on a nonparametric ANN", Intern. Conf. on Intelligent Systems Applications to Power Systems, Orlando, Jan. 1996, pp. 55-59.

[8] B.-Y. Ku, R.J. Thomas, C.-Y. Chiou, and C.-J. Lin: "Power System Dynamic Load Modeling Using Artificial Neural Networks", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 9, Nov. 1994, pp. 1868-1874.

[9] T.T. Nguyen and H.X. Buy: "Neural Network Dynamic Load Model", 4th Intern. Symp. on Expert System Application to Power Systems, Melbourne, Jan. 1993, pp. 467-472.

[10] H. Ben-mu and A.J. Germond: "Comparasion of Dynamic Load Modeling Using Neural Network and Traditional Method", 2nd Intern. Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems, Yokohama, April 1993, pp. 253-258.

[11] A.P. Alves da Silva, P.C. Nascimento, G. Lambert-Torres and L.E.B. da Silva: "A Nonparametric Neural Network for Adaptive Real-Time Control", IEEE Intern. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver, Oct. 1995, Vol. 3, pp. 2488-2493.

[12] Y.H. Pao: Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks, Addison-Wesley, 1989.

[13] S.J. Farlow (Ed.): Self-Organizing Methods in Modeling, Marcel Dekker, 1984.

[14] H. Kargupta and R.E. Smith: "System Identification with Evolving Polynomial Networks", 4th Intern. Conf. on Genetic Algorithms, San Diego, July 1991, pp. 370-376.

[15] C.A. Cañizares: "On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modeling", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 10, Fev. 1995, pp. 512-522.

[16] E.N. Lorenz: "Deterministic non-periodic flow", L. Atmosphere Science, Vol. 20, 1963, pp. 130-141.

[17] M.A. Nayfeh, A.M. Harndan, and A.H. Nayfeh: "Chaos and instability in a power system - primary resonant case", Nonlinear Dynamics, Vol. 1, 1990, pp. 313-339.

[18] I.-D. Chiang, C.-W. Liu, P.P. Varaiya, F.F. Wu, and M.G. Lauby: "Chaos in a simple power system", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 8, 1993, pp. 1407-1417.

[19] P. Bergé, Y. Pomeau, and Ch. Vidal: Order Within Chaos, Hermann, 1984.

[20] J.C. Bezdek: Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, 1981.

9. BIOGRAPHIES

Alexandre P. Alves da Silva (M'92) was born in Rio de Janeiro (RJ), Brazil, in 1962. He received the B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering (EE) from the Catholic University of RJ (PUC-RJ), Brazil, in 1985 and 1987, and the Univ. of Waterloo, Canada, in 1992, respectively. He worked with the Brazilian Electric Energy Center (CEPEL) during 1987 and 1988. During 1992, he was a Visiting Prof. in the Dept. of EE, PUC-RJ. Since 1993, he has been with the Institute of EE, Federal Engineering School at Itajuba (EFEI). Dr. Alves da Silva research interests include neural networks, expert systems and numerical optimization applied to power systems.

Claudio Ferreira was born in São Lourenço, Brazil, in 1955. He obtained his B.Sc. and M.Sc. degrees in Electrical Engineering from the Federal Engineering School at Itajuba (EFEI) and from the National University of Brasilia (UnB), in 1977 and 1983, respectively, both in Brazil. From 1978 to 1991, he worked for Themag Engenharia Ltda in power system analysis. Since 1992, he is an Assistant Professor at EFEI. His research interests are neural networks and power system analysis.

Antonio C. Zambroni de Souza (M'95) was born in Volta Redonda, Brazil, in 1963. In 1990, he obtained his M.Sc. degree in Electrical Engineering from the Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-RJ), Brazil. His PhD in Electrical Engineering was obtained in 1995 from the University of Waterloo, Canada. He is currently working at the Federal Engineering School at Itajuba (EFEI), sponsored by the Brazilian agency CNPq.

Germano Lambert-Torres (M'90) was born in Rio de Janeiro, Brazil, in 1959. He received the B.Sc., M.Sc. and Ph.D degrees in Electrical Engineering from the Federal Engineering School at Itajuba (EFEI), Brazil, in 1982 and 1986, and from École Polytecnique de Montreal, in 1990, respectively. He is a Full Professor at EFEI. His research interests include intelligent systems applied to power.