

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM DE CARGAS PARA ESTUDOS DINÂMICOS

MARIANA MARÇAL PINTO DE SOUZA

ITAJUBÁ, OUTUBRO DE 2010.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARIANA MARÇAL PINTO DE SOUZA

MODELAGEM DE CARGAS PARA ESTUDOS DINÂMICOS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Cláudio Ferreira

Outubro de 2010

Itajubá - MG

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

S729m

Souza, Mariana Marçal Pinto de
Modelagem de cargas para estudos dinâmicos / Mariana Marçal Pinto de Souza. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2010.
144 p. : il.

Orientador: Prof. D. Sc. Cláudio Ferreira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Modelagem de cargas elétricas. 2. Medições de campo. 3. Sistemas elétricos de potência. I. Ferreira, Cláudio, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002


A N E X O I

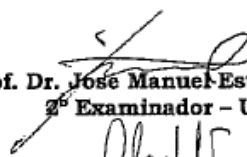
PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº1371 de 13 de outubro de 2010, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“Modelagem de Cargas para Estudos Dinâmicos”**, apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Concentração Sistemas Elétricos de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais, a **Mariana Marçal Pinto de Souza**.

Itajubá, 15 de outubro de 2010.


Prof. Dr. Ronaldo Rossi
1º Examinador - UNESP


Prof. Dr. Pedro Paulo de Carvalho Mendes
3º Examinador - UNIFEI


Prof. Dr. José Manuel Esteves Vicente
2º Examinador - UNIFEI


Prof. Dr. Cláudio Ferreira
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“Modelagem de Cargas para Estudos Dinâmicos”**

Autor: **Mariana Marçal Pinto de Souza**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
	A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
 - (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
 - (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.
- Este documento terá a validade de **60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.**

Resultado Final: Conceito: A, ou seja, APROVADO

Observações: _____

Itajubá, 15 de outubro de 2010.

Prof. Dr. Ronaldo Rossi
1º Examinador - UNESP

Prof. Dr. Pedro Paulo de Carvalho Mendes
3º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. José Manuel Esteves Vicente
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Cláudio Ferreira
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI



Aos meus pais, Cláudio e Edna, que me ensinaram a ser quem sou...



"Não se pode esperar resultados diferentes fazendo as coisas da mesma forma."

Albert Einstein



AGRADECIMENTOS

Ao engenheiro e amigo Antonio Felipe da Cunha Aquino, pela colaboração, incentivo, apoio moral e técnico, solidariedade, sabedoria e genialidade, sem as quais não seria capaz de chegar ao final deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para o resultado final do mesmo.

Ao engenheiro e mestre Alexandre Garcia Massaud pelas oportunidades e contínuo aprendizado, que contribuem de forma ímpar para minha formação profissional.

Ao engenheiro e professor Paulo Gomes e ao ONS pela confiança, incentivo e inúmeras oportunidades.

Ao Professor Cláudio Ferreira pela orientação e incentivo demonstrados ao longo destes anos de trabalho.

Aos engenheiros Renan Giovanni e Paulo Eduardo Quintão pela ajuda nas macros do Visual Basic e blocos CDU do Anatem, respectivamente, e ao engenheiro Antonio de Pádua Guarini pela sugestão do tema.

Aos colegas da GPE, em especial, aos engenheiros Gustavo Souza Francisco, Adriano de Andrade Barbosa, Daniele de Vasconcelos Pereira da Motta e Lúcia Mariana de Souza Abreu pelas palavras de apoio e incentivo, e principalmente pela paciência e amizade.

Aos meus pais, Cláudio e Edna, por nunca medirem esforços para me oferecer uma escola de qualidade e por me ensinarem a ter coragem e determinação para acreditar nos meus sonhos e agarrar as oportunidades, sem esquecer o significado das palavras respeito, honestidade, amor e gratidão. Em fim, por terem me ensinado a ser quem sou.

Ao meu irmão Bruno e à minha irmã Dine pela amizade e por tudo.

Ao meu marido Cristiano pelo amor e carinho de todos os dias, por compreender minha ausência nos momentos de dedicação a este trabalho e principalmente por me fazer feliz.



Resumo da Dissertação apresentada à UNIFEI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM DE CARGA PARA ESTUDOS DINÂMICOS

Mariana Marçal Pinto de Souza

Outubro / 2010

Orientador: Cláudio Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Esse trabalho apresenta uma metodologia que permite aprimorar a representação das cargas nos estudos de estabilidade transitória e de regime permanente, sendo possível estimar modelos estáticos e dinâmicos a partir de dados registrados em campo, através de métodos de identificação de sistemas. Desta forma, são estimados os parâmetros do Modelo Estático ZIP e do Modelo Dinâmico Linear para alimentadores de carga de oito subestações do sistema elétrico brasileiro. O trabalho apresenta ainda um estudo comparativo que avalia o desempenho dos modelos ZIP e Linear estimados a partir dos dados de medição em campo e o desempenho do atual modelo ZIP da base de dados do Programa Anatem. E por fim detalha-se a implantação do modelo Linear, via CDU, no programa Anatem.



Abstract of Thesis presented to UNIFEI as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

LOAD MODELLING FOR DYNAMIC STUDIES

Mariana Marçal Pinto de Souza

October / 2010

Advisor: Cláudio Ferreira

Department: Electrical Engineering

This work presents a methodology to improve load representation for transient stability and dynamic studies, allowing to estimate static and dynamic models based on recorded data from the field through methods of system identification. Thus, the ZIP Static Model and the Linear Dynamic Model parameters are estimated for load feeders of 8 Brazilian power system substations. It also presents a comparative study that evaluates the performance of the ZIP and Linear models estimated from field measurement data, and the performance of current Anatem's ZIP model database. Finally, it details the deployment of the Linear model, via CDU, on Anatem software.



SUMÁRIO

Capítulo I	1
INTRODUÇÃO.....	1
I.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	1
I.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	2
I.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	3
I.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
Capítulo II.....	5
ESTADO DA ARTE	5
II.1 EVOLUÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	5
II.2 CONCEITOS, CLASSIFICAÇÃO E COMPORTAMENTO DA CARGA	9
II.2.1 DEPENDÊNCIA DA CARGA COM A TENSÃO	11
II.2.2 DEPENDÊNCIA DA CARGA COM A FREQUÊNCIA	17
II.3 MODELAGEM DE CARGA	22
II.3.1 MODELOS ESTÁTICOS DE CARGA:.....	25
II.3.1.1 MODELO EXPONENCIAL NÃO-LINEAR.....	26
II.3.1.2 MODELO POLINOMIAL NÃO-LINEAR.....	30
II.3.1.3 INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA NOS MODELOS EXPONENCIAL E POLINOMIAL	33
II.3.1.4 MODELO COMPOSTO DE CARGA	35
II.3.1.5 MODELO DE CARGA ESTÁTICO USADO NO PROGRAMA COMPUTACIONAL LOADSYN.....	36
II.3.1.6 MODELO DE CARGA ESTÁTICO USADO NO PROGRAMA COMPUTACIONAL ETMSP	38
II.3.1.7 OUTROS MODELOS ESTÁTICOS DE CARGA	40
II.3.2 MODELOS DINÂMICOS DE CARGA.....	42
II.3.2.1 MODELOS DE MOTORES DE INDUÇÃO	45
II.3.2.1.1 TÉCNICAS PARA AGREGAÇÃO DE MOTORES EM UMA UNIDADE EQUIVALENTE	45
II.3.2.1.2 MODELO DE CARGAS DINÂMICAS DO PROGRAMA LOADSYN.....	47
II.3.2.2 MODELOS COMPOSTOS (MOTOR DE INDUÇÃO + CARGA ESTÁTICA).....	49
II.3.2.2.1 MODELO COMPOSTO POR MOTOR DE INDUÇÃO E CARGA ESTÁTICA (RC).....	49
II.3.2.2.2 MODELO COMPOSTO LINEARIZADO (MOTOR DE INDUÇÃO + CARGA ESTÁTICA)	52



II.3.2.2.3	ESTUDOS COMPARATIVOS ENVOLVENDO MODELOS COMPOSTOS DE CARGA.....	52
II.3.2.3	MODELO DINÂMICO DESENVOLVIDO POR SRINIVASAN (MODELO CANADENSE).....	54
II.3.2.4	MODELO DINÂMICO GENÉRICO NÃO-LINEAR	57
II.3.2.5	MODELO DINÂMICO LINEAR (MODELO AUSTRALIANO)	60
II.3.2.6	MODELO DINÂMICO DESENVOLVIDO POR LIN	63
II.3.2.7	MODELO DINÂMICO SIMPLIFICADO NÃO-LINEAR DE PRIMEIRA ORDEM.....	63
II.3.2.8	MODELO DINÂMICO PROPOSTO POR HONGBIN.....	64
Capítulo III.....		66
PROJETO DE MEDIÇÃO DE CARGAS		66
III.1	INTRODUÇÃO.....	66
III.2	EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO.....	66
III.3	MEDIÇÕES REALIZADAS EM CAMPO	68
Capítulo IV		70
METODOLOGIA ADOTADA PARA ANÁLISE DOS DADOS DE MEDIÇÃO		70
IV.1	METODOLOGIA ADOTADA	70
IV.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO ESTÁTICO ZIP	72
IV.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO DINÂMICO LINEAR	74
IV.4	OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DOS MODELOS ZIP E LINEAR	77
Capítulo V		82
RESULTADOS OBTIDOS.....		82
V.1	MODELOS ESTIMADOS E DESEMPENHO DOS MESMOS.....	82
V.1.1	SE ITAJUBÁ 138kV	83
V.1.1.1	ALIMENTADOR ITAJUBÁ 138kV:.....	83
V.1.2	SE RAMON REBERTE FILHO 88kV	85
V.1.2.1	ALIMENTADOR SILVESTRE 4 - 88kV:	85
V.1.2.2	ALIMENTADOR ADELINO 2 - 88kV:	87
V.1.2.3	ALIMENTADOR CARRÃO 1 - 88kV:.....	89
V.1.3	SE TAQUARIL 138kV	91
V.1.3.1	ALIMENTADOR SANTA EFIGÊNIA 138kV:	91
V.1.3.2	ALIMENTADOR OURO PRETO 138kV:.....	95



V.1.3.3	ALIMENTADOR NOVA LIMA 138kV:	95
V.1.4	SE FORTALEZA 69kV.....	99
V.1.4.1	ALIMENTADOR DISTRITO INDUSTRIAL II - 69kV	99
V.1.4.2	ALIMENTADOR MONDUBIM 69kV:.....	101
V.1.4.3	ALIMENTADOR MESSEJANA 69kV:.....	103
V.1.5	SE BARREIRAS 138/69kV	105
V.1.5.1	ALIMENTADOR RIO BRANCO 138kV:.....	105
V.1.5.2	ALIMENTADOR ANGICAL 69kV	107
V.1.5.3	ALIMENTADOR RIO GRANDE 69kV	109
V.1.6	SE GRAVATAÍ II - 230/69kV	111
V.1.6.1	ALIMENTADOR VIAMÃO 2 - 69kV	111
V.1.6.2	ALIMENTADOR GRAVATAÍ 1 - 69kV	113
V.1.6.3	ALIMENTADOR COMPLEXO AUTOMOTIVO INDUSTRIAL DE GRAVATAÍ (GIAG) 230kV:.....	115
V.1.7	SE JOINVILLE IV	115
V.1.7.1	ALIMENTADOR COMPARTILHADA 138kV	115
V.1.7.2	ALIMENTADOR IRIRU 138kV	117
V.1.7.3	ALIMENTADOR GERAL BT 13,8kV (TRANSFORMADOR TT1)	119
V.1.8	SE UMBARÁ 230/69kV	121
V.1.8.1	ALIMENTADOR SIDERÚRGICA GUAÍRA 230kV	121
V.1.8.2	ALIMENTADOR PINHEIRINHO 69kV	122
V.1.8.3	ALIMENTADOR TATUAQUARA 69kV	124
V.2	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DINÂMICO LINEAR NO ANATEM.....	126
V.3	SIMULAÇÕES NO ANATEM	128
Capítulo VI	133
CONCLUSÕES.....		133
VI.1	CONCLUSÕES GERAIS	133
VI.2	ETAPAS FUTURAS	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		136



LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Modelo de Classificação e Composição de Carga	9
Figura 3	Torque (T) x Escorregamento (s) de um motor [82]	19
Figura 4	Comportamento de Cargas Compostas em Relação à Frequência [82]	20
Figura 5	Comportamento da Potência Reativa em Relação à Variação de Tensão [82]	20
Figura 6	Modelos Estáticos de Carga (Z, I e P constantes)	27
Figura 7	Circuito Equivalente de Dois Motores em Paralelo	46
Figura 8	Circuito Equivalente do Motor de Indução	47
Figura 9	Carga Composta (Motor de Indução + Carga Estática)	49
Figura 10	Vista frontal do equipamento de medição	67
Figura 11	Eventos de Treino – Alimentador Itajubá 138kV	83
Figura 12	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Itajubá 138kV	84
Figura 13	Eventos de Treino – Alimentador Silvestre 4 - 88kV	85
Figura 14	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Silvestre 4 - 88kV	86
Figura 15	Eventos de Treino – Alimentador Adelino 2 - 88kV	87
Figura 16	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Adelino 2 - 88kV	88
Figura 17	Eventos de Treino – Alimentador Carrão 1 - 88kV	89
Figura 18	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Carrão 1 - 88kV	90
Figura 19	Eventos usados no 1º Treino – Alimentador Santa Efigênia 138kV	91
Figura 20	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Santa Efigênia 138kV	92
Figura 21	Eventos usados no 2º Treino – Alimentador Santa Efigênia 138kV	93
Figura 22	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Santa Efigênia 138kV	94
Figura 23	Eventos usados no 1º Treino – Alimentador Nova Lima 138kV	95
Figura 24	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Nova Lima 138kV	96
Figura 25	Eventos usados no 2º Treino – Alimentador Nova Lima 138kV	97



Figura 26 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Nova Lima 138kV	98
Figura 27 Eventos de Treino – Alimentador Distrito Industrial II - 69kV	99
Figura 28 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Distrito Industrial II 69kV	100
Figura 29 Eventos de Treino – Alimentador Mondubim 69kV	101
Figura 30 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Mondubim 69kV	102
Figura 31 Eventos de Treino – Alimentador Messejana 69kV	103
Figura 32 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Messejana 69kV	104
Figura 33 Eventos de Treino – Alimentador Rio Branco 138kV	105
Figura 34 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Rio Branco 138kV	106
Figura 35 Eventos de Treino – Alimentador Angical 69kV	107
Figura 36 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Angical 69kV	108
Figura 37 Eventos de Treino – Alimentador Rio Grande 69kV	109
Figura 38 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Rio Grande 69kV	110
Figura 39 Eventos de Treino – Alimentador Viamão 2 - 69kV	111
Figura 40 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Viamão 2 - 69kV	112
Figura 41 Eventos de Treino – Alimentador Gravataí 1 - 69kV	113
Figura 42 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Gravataí 1 - 69kV	114
Figura 43 Eventos de Treino – Alimentador Compartilhada 138kV	115
Figura 44 Eventos de Treino – Alimentador Compartilhada 138kV	116
Figura 45 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Compartilhada 138kV	117
Figura 46 Eventos de Treino – Alimentador Iririu 138kV	117
Figura 47 Eventos de Treino – Alimentador Iririu 138kV	118
Figura 48 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Iririu 138kV	119
Figura 49 Eventos de Treino – Alimentador Geral BT 13,8kV (Transformador TT1)	119



Figura 50	Eventos de Treino – Alimentador Geral BT 13,8kV (Transformador TT1).....	120
Figura 51	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Geral BT 13,8kV	121
Figura 52	Eventos de Treino – Alimentador Pinheirinho 69kV.....	122
Figura 53	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Pinheirinho 69kV	123
Figura 54	Eventos de Treino – Alimentador Tatuaguara 69kV	124
Figura 55	Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Tatuaguara 69kV	125
Figura 56	Bloco Delay	126
Figura 57	CDU para Representação do Modelo Linear no Anatem (Potência Ativa e Potência Reativa)	127
Figura 58	Diagrama Unifilar da Área	128
Figura 59	Perda de 3 unidades geradoras da UHE GNB	129
Figura 60	Energização da LT 525kV Areia – Curitiba a partir do Terminal de Areia.	130
Figura 61	Aplicação de um curto-circuito no 69kV da SE Tatuaguara (100ms) e eliminação do mesmo (150ms).....	131



LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Componentes de Carga x Variação de Tensão	12
Tabela 2	Dependência da Carga com a Frequência.....	17
Tabela 3	Componentes de Carga x Variações de Frequência	18
Tabela 4	Comportamento dos Motores de Indução	29
Tabela 5	Classes de Carga x Estações do Ano x Composição	31
Tabela 6	Modelos Estáticos para Componentes de Carga.....	40
Tabela 7	Subestações e respectivos alimentadores onde foram realizadas as medições.....	68
Tabela 8	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	84
Tabela 9	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	86
Tabela 10	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	88
Tabela 11	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	90
Tabela 12	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	92
Tabela 13	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	94
Tabela 14	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	96
Tabela 15	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	98
Tabela 16	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	100
Tabela 17	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	102
Tabela 18	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	104
Tabela 19	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	106
Tabela 20	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	108
Tabela 21	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	110



Tabela 22	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	112
Tabela 23	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	114
Tabela 24	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	116
Tabela 25	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	118
Tabela 26	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	120
Tabela 27	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	123
Tabela 28	Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem	125



LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

\approx	Aproximadamente
$>$	Maior
%	Por cento
∞	Infinito
Σ	Somatório
a	Coefficiente da parcela de potência ativa constante do modelo ZIP
a_i	Coefficiente de regressão da potência ativa (modelo Linear)
ANAREDE	Programa de Análise de Redes
ANATEM	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
b	Coefficiente da parcela de corrente constante que compõe a parte ativa do modelo ZIP
b_i	Coefficiente de regressão da tensão para a potência ativa (modelo Linear)
B	Susceptância da carga
BT	Baixa tensão
c	Coefficiente da parcela de impedância constante que compõe a parte ativa do modelo ZIP
c_i	Coefficiente de regressão da frequência para a potência ativa (modelo Linear)
CDU	Controlador Definido pelo Usuário
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CERJ	Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CIAG	Complexo Industrial Automotivo de Gravataí
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
cte	Constante
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
d	Coefficiente da parcela de potência reativa constante do modelo ZIP
d_i	Coefficiente de regressão da potência reativa (modelo Linear)
DELAY	Bloco de atraso do programa Anatem
DLDN	Função do Anatem para representação do modelo de carga dinâmico
Δf	Varição da frequência
ΔP	Varição da potência ativa
ΔQ	Varição da potência reativa
Δt	Varição de tempo
ΔV	Varição de tensão
$\frac{df}{dt}$	Derivada da frequência em função do tempo
$\frac{dP}{df}$	Derivada da potência ativa em função da frequência



$\frac{dP}{dV}$	Derivada da potência ativa em função da tensão
$\frac{dQ}{df}$	Derivada da potência reativa em função da frequência
$\frac{dQ}{dV}$	Derivada da potência reativa em função da tensão
$\frac{dV}{dt}$	Derivada da tensão em função do tempo
$\frac{\partial P}{\partial f}$	Derivada parcial da potência ativa em função da frequência
$\frac{\partial P}{\partial V}$	Derivada parcial da potência ativa em função da tensão
$\frac{\partial Q}{\partial f}$	Derivada parcial da potência reativa em função da frequência
$\frac{\partial Q}{\partial V}$	Derivada parcial da potência reativa em função da tensão
e	Coefficiente da parcela de corrente constante que compõe a parte reativa do modelo ZIP
e_i	Coefficiente de regressão da tensão para a potência reativa (modelo Linear)
EPRI	Electric Power Research Institute
ETMSP	Extended Transient Mid-term Stability Program
EUA	Estados Unidos da América
f	Frequência
f₀	Frequência inicial
g	Coefficiente da parcela de impedância constante que compõe a parte reativa do modelo ZIP
g_i	Coefficiente de regressão da frequência para a potência reativa (modelo Linear)
G	Condutância da carga
GCOI	Grupo Coordenador para a Operação Interligada
GESIS	Grupo de Engenharia de Sistemas
GNB	Governador Ney Braga
GNLD	Modelo Dinâmico Genérico Não-Linear de Primeira Ordem
GTEE	Grupo de Trabalho de Estudos Especiais do Sistema
H	Constante de inércia do motor
HP	Cavalo Vapor
Hz	Hertz
I	Corrente
I_c	Corrente constante
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
LILCO	Long Island Lighting Company
LOADSYN	Load Model Synthesis



LT	Linha de Transmissão
MATLAB	Matrix Laboratory
MIT	Modelo de motor de indução
MITZIP	Modelo de motor de indução associado ao modelo de carga ZIP
ms	10^{-3} segundos
Mvar	Megavar
MW	Megawatt
n_f	Ordem de regressão da frequência (modelo Linear)
n_p	Ordem de regressão da potência ativa (modelo Linear)
n_q	Ordem de regressão da potência ativa reativa (modelo Linear)
n_v	Ordem de regressão da tensão (modelo Linear)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
pu	Por unidade
P	Potência ativa
P_0	Potência ativa na condição inicial
P_c	Potência constante
PMU	Unidades de Medição Fasorial
PSEC	Power System Engineering Committee
Q	Potência reativa
Q_0	Potência reativa na condição inicial
R	Resistência ou Carga estática representada no barramento
RG&E	Rochester Gas e Electric Corporation
R_r	Resistência do rotor (referida ao estator)
R_s	Resistência do estator
s	Escorregamento
s	Operador de La'Place
s	Segundos
S	Potência
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
t	Tempo
t_0	Tempo na condição inicial
T	Torque
T'_{do}	Constante de tempo do motor
T_b	Constante de tempo da carga associada à susceptância
T_E	Torque elétrico do motor
T_g	Constante de tempo da carga associada à condutância
T_L	Torque mecânico da carga
T_M	Torque mecânico do motor
UHE	Usina Hidroelétrica
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
V	Tensão



\bar{V}	Tensão normalizada
V_0	Tensão na condição inicial
X	Reatância
X_c	Carga estática representada no barramento
X_m	Reatância de magnetização do motor ou Reatância mútua do estator / rotor (magnetização)
X_{mM}	Reatância de magnetização do motor equivalente
X_r	Reatância de dispersão do rotor (referida ao estator)
X_s	Reatância de dispersão do estator
Z	Impedância
Z_c	Impedância constante
ZIP	Modelo de carga composto por parcelas de impedância, corrente e potência constante
ϵ	Erro
ω	Velocidade angular
ω_r	Velocidade angular do rotor
$\dot{\omega}_r$	Dinâmica do motor de indução
ω_s	Velocidade angular do estator (velocidade síncrona)



Capítulo I

INTRODUÇÃO

I.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um dos maiores sistemas elétricos do mundo e com características próprias, como as interligações de longas distâncias e bacias hidrográficas típicas de cada região. A atual estrutura do setor elétrico brasileiro impõe que a operação do sistema seja feita de forma a explorar os recursos existentes ao menor preço possível.

Durante a operação de um sistema elétrico, um dos principais objetivos é manter a estabilidade do sistema. De acordo com a definição do IEEE [33], a estabilidade de um sistema de potência é a capacidade do sistema de desenvolver, em seus elementos, forças restauradoras iguais ou maiores que as forças perturbadoras e estabelecer um estado de equilíbrio, ou seja, é a habilidade das máquinas síncronas, após um distúrbio, ir de um ponto de operação para outro, sem perder o sincronismo. A qualidade de energia elétrica é, então, avaliada pela magnitude das tensões nas barras de consumo e pela frequência estabelecida no sistema. Dois estados devem ser considerados durante a operação do sistema elétrico: o regime permanente e o regime transitório.

Dentro deste contexto, torna-se necessário um profundo conhecimento da operação, dos ajustes e do desempenho de cada elemento do sistema, tanto isoladamente quanto em conjunto, pois as características de um elemento isolado podem ser alteradas diante da operação em conjunto.

A correta representação dos elementos de um sistema de potência é fator decisivo para a confiabilidade dos resultados de estudos elétricos, seja em regime



permanente, seja em regime transitório. Em qualquer estudo é necessário definir-se inicialmente um modelo adequado para cada componente do sistema elétrico.

Diversos modelos têm sido propostos para representação de geradores, transformadores, linhas de transmissão, elos de corrente contínua, reguladores, compensadores, motores e diversos outros elementos que compõem um sistema elétrico de potência. Uma vez conhecidas as características e a operação destes componentes torna-se possível a construção de modelos matemáticos que os representam adequadamente.

Ao longo do tempo vários estudos e pesquisas foram realizados com o propósito de aprimorar os modelos conhecidos, porém desde o início a carga do sistema apresentou-se como grande incógnita do problema. Apesar de se conhecer como cada elemento da carga se comporta individualmente, não se tem uma idéia precisa da sua composição final, devido a grande diversidade de equipamentos que a compõem de forma aleatória.

A atual representação das cargas utilizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) nas simulações dinâmicas baseia-se em critérios da década de 1980 e merece ser revista para o contexto atual. O resultado de imprecisões na modelagem de carga pode mascarar informações preciosas durante as simulações. Se o resultado das simulações dinâmicas forem otimistas corre-se o risco de determinar margens de estabilidade que podem comprometer a segurança do sistema. Já se os resultados forem pessimistas a capacidade de transferência de potência entre regiões pode ser subutilizada.

I.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Duas abordagens têm sido usadas para se obter uma modelagem de carga. A primeira delas é baseada no conhecimento dos componentes individuais e o modelo é obtido através da combinação de modelos dos diferentes componentes da carga. A segunda abordagem não requer o conhecimento das características físicas da carga. Ela 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.

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, é necessária uma quantidade significativa de dados relacionados a testes programados e a distúrbios naturais que afetam o sistema e a carga.

Com objetivo de aprimorar a representação das cargas do sistema elétrico brasileiro, em 2003, o ONS iniciou um projeto de medição de cargas em parceria com a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Na primeira etapa deste projeto foi feita uma análise detalhada dos modelos de carga existentes e utilizados nos programas de transitórios eletromecânicos, bem como foram desenvolvidos equipamentos de medição, específicos para colher dados de campo sobre o comportamento da carga durante perturbações. A segunda etapa do projeto aconteceu entre os anos de 2004 e 2006, quando foram monitorados e armazenados dados de eventos ocorridos em diferentes tipos de ramais alimentadores de carga, de oito subestações do sistema elétrico brasileiro.

A enorme massa de dados obtidas através dessas medições permite uma análise detalhada sobre o comportamento das cargas monitoradas, sendo possível estimar modelos estáticos e dinâmicos através de métodos de identificação de sistemas e aprimorar a representação das mesmas.

I.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem o objetivo de usar dados de medições de campo para realizar uma análise detalhada sobre o comportamento das cargas de oito subestações de diferentes regiões do SIN, de forma a estimar modelos estáticos e dinâmicos através de métodos de identificação de sistemas e melhorar a representação das mesmas nos estudos de estabilidade dinâmica.

Para tanto, apresenta-se uma pesquisa bibliográfica detalhada sobre o assunto, relata-se o projeto a partir do qual foram obtidos os dados de campo, descreve-se a metodologia a ser empregada e desenvolve-se em Visual Basic e Matlab um programa computacional para tratar os dados monitorados em campo e estimar parâmetros para os modelos ZIP e Linear. Em seguida, é realizado um estudo comparativo entre o comportamento da carga observado no campo, o desempenho do modelo ZIP atualmente implantado no Anatem e o desempenho dos modelos ZIP e Linear obtidos através da rotina de simulação desenvolvida. Para finalizar, o modelo Linear é implantado via CDU no Anatem e são apresentados resultados de simulações utilizando o modelo ZIP atual e modelo Linear implantado no Anatem.



I.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi dividida em seis capítulos. O Capítulo I dedica-se a descrição do problema sobre a modelagem de carga, a motivação do trabalho, ao objetivo e a definição da estrutura da dissertação.

No Capítulo II é apresentado um breve histórico sobre a evolução do sistema elétrico brasileiro ao longo dos anos, bem como é feito um detalhamento sobre a parte teórica do tema, seguido de uma pesquisa bibliográfica sobre as principais formas de modelagem de carga.

O Capítulo III dedica-se a apresentação do projeto de medição de cargas, desenvolvido pelo ONS em parceria com a UNIFEI, a partir do qual foram extraídos os dados de medição de campo, de oito subestações de diferentes regiões do SIN, usados nessa dissertação.

No Capítulo IV descreve-se a metodologia empregada para estimar modelos de carga a partir de dados reais de medição e a formulação matemática dos modelos ZIP e Linear, escolhidos para serem implantados na rotina de simulação desenvolvida no Matlab, associada a macros criadas em Visual Basic.

No Capítulo V são estimados, a partir dos dados coletados em campo e através de da rotina de simulação desenvolvida no Matlab, os parâmetros dos modelos ZIP e Linear. Em seguida é realizado um estudo comparativo entre o comportamento da carga observado no campo, o desempenho do modelo ZIP atualmente implantado no Anatem e o desempenho dos modelos ZIP e Linear estimados. Para finalizar detalha-se a implantação do modelo Linear via CDU no Anatem e são apresentados resultados de simulações do Anatem utilizando o atual modelo ZIP e modelo Linear implementado.

Finalmente, o Capítulo VI traz as conclusões desta dissertação.



Capítulo II

ESTADO DA ARTE

Este capítulo dedica-se a um breve histórico sobre a evolução do sistema elétrico brasileiro e ao detalhamento da parte teórica do tema, seguido de uma pesquisa bibliográfica sobre as principais formas de modelagem de carga.

II.1 EVOLUÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

O SIN é um dos maiores sistemas elétricos do mundo e com características próprias, como as interligações de longas distâncias e bacias hidrográficas típicas de cada região. A atual estrutura do setor elétrico brasileiro impõe que a operação do sistema seja feita de forma a explorar os recursos existentes ao menor preço possível.

Durante a operação de um sistema elétrico, um dos principais objetivos é manter a estabilidade do sistema. De acordo com a definição do IEEE [33], a estabilidade de um sistema potência é a capacidade do sistema de desenvolver, em seus elementos, forças restauradoras iguais ou maiores que as forças perturbadoras e estabelecer um estado de equilíbrio, ou seja, é a habilidade das máquinas síncronas, após um distúrbio, ir de um ponto de operação para outro, sem perder o sincronismo. A qualidade de energia elétrica é, então, avaliada pela magnitude das tensões nas barras de consumo e pela frequência estabelecida no sistema. Dois estados devem ser considerados durante a operação do sistema elétrico: o regime permanente e o regime transitório.

Os problemas de estabilidade apareceram junto com os primeiros sistemas elétricos, que eram constituídos basicamente de um gerador adicionado a uma carga, normalmente um motor. As primeiras discussões sobre a modelagem de carga de um



sistema elétrico datam da década de 30 do século passado, embora o objetivo principal fosse modelagem de geradores.

Com o decorrer do tempo e com o aumento dos sistemas elétrico de potência, os problemas com a correta representação de seus componentes começaram a surgir. Inicialmente, grande atenção foi dada aos geradores, linhas de transmissão e transformadores. Porém já na década de 1950 começaram a surgir trabalhos enfocando também a carga e o modelo matemático que melhor representaria o seu comportamento frente uma oscilação no sistema.

Na década de 1960, com o blecaute de Nova York, a modelagem de carga atingiu seu lugar de destaque nos estudos e pesquisas então realizados [16].

O Brasil, nesta época, vivia graves problemas de suprimento e estratégias de expansão do sistema existente começavam a ser traçadas. As duas décadas seguintes foram marcadas por grandes investimentos no setor elétrico, largamente financiado por capital estrangeiro. Destes investimentos surgiu um sistema de potência extremamente robusto em geração e transmissão, onde uma melhor representação do comportamento de carga não representava qualquer influência significativa nos resultados dos estudos. Ênfase maior foi dada novamente a equipamentos e novos componentes que então começavam a surgir.

A grande folga existente no sistema elétrico, porém, rapidamente foi sendo reduzida. A estratégia de crescimento industrial orientou o modelo de desenvolvimento concebido voltado para indústrias eletro-intensivas. Nesta época, o consumo era incentivado, inclusive através de tarifas reduzidas, introduzindo dessa forma uma cultura de desperdício [16].

A partir da década de 1990, verificou-se uma drástica redução nos investimentos para expansão do Sistema Elétrico Brasileiro. A crise econômica enfrentada pelo país nos anos anteriores não impediu que as demandas por energia elétrica continuassem crescendo, não acompanhadas pela expansão do sistema e culminando em dificuldades técnicas, tais como carência de sistemas de distribuição e transmissão, bem como desequilíbrios localizados entre oferta e demanda [16].

Essa degradação das condições de suprimento energético foi resultado dos sucessivos adiamentos dos programas de obras de geração e expansão e queda nos investimentos em energia elétrica: na década de 1980, a média anual dos investimentos foi superior a US\$ 10 bilhões (só em 1987, foram investidos US\$ 16 bilhões); na década



de 1990, a média anual foi aproximadamente US\$ 6 bilhões; no ano de 2000 os investimentos foram menores que US\$ 2 bilhões [16].

Historicamente, o crescimento da demanda por energia elétrica sempre superou o crescimento do PIB, mostrando certa resistência à recessão. O crescimento médio anual registrado nos últimos 10 anos, anteriores ao racionamento de 2001, foi de 4,3% ao ano [16].

Diante deste quadro de falta de investimentos, diversos desafios foram impostos ao setor elétrico que buscou melhor utilização dos recursos e capacidades já instalados. Inicialmente, utilizou-se a tarifa para controlar a demanda. Os grandes consumidores passaram a programar suas demandas para horários e estações do ano em que o custo de produção de energia fosse mais baixo. Assim, obteve-se a minimização dos custos para o atendimento de um mesmo consumidor e o uso mais racional das instalações existentes.

Isto porém não foi suficiente e, acompanhando uma tendência mundial, uma reestruturação no setor de energia elétrica brasileiro, que até então era essencialmente estatal e monopolista, foi proposta uma vez que não havia recursos disponíveis para financiar a expansão necessária. O principal objetivo desta reestruturação seria incentivar a entrada de capital privado no setor a fim de garantir a auto-sustentação e, conseqüentemente, a expansão do sistema.

Entretanto, as reformas no setor energético brasileiro começaram a ocorrer sem que houvesse sido implementado um modelo consolidado para a reestruturação do setor. Os investimentos necessários previstos não se concretizaram com a rapidez esperada e as conseqüências foram constatadas por vários blecautes que atingiram o sistema elétrico brasileiro, a partir de 1997, culminado com o racionamento em 2001.

Condições hidrológicas altamente desfavoráveis, verificadas no final da década de 1990 e durante todo o ano de 2000, aliadas à não implementação de obras planejadas, levaram o país à crise energética de 2001, refletida na forma de racionamento. Verificou-se nova desaceleração do setor industrial, com graves conseqüências para a sociedade, prejudicando a imagem do país perante o mercado internacional, principalmente diante da necessidade de atrair investimentos estrangeiros para o fortalecimento e crescimento de sua economia [16].

Com o início da reforma legislativa buscou-se criar instrumentos legais que viabilizassem a delegação a terceiros da prestação do serviço público de energia elétrica,



a competição e o investimento privado no setor. As empresas do setor elétrico brasileiro, face ao novo modelo de reestruturação, vêm buscando uma melhor exploração de seu sistema devido às grandes pressões econômicas, com a finalidade de minimizar custos através da maximização do uso de suas instalações.

Esta nova estrutura foi colocada como grande desafio a todos os profissionais do setor elétrico brasileiro, que agora são obrigados a encarar em mesmo patamar de prioridade, as responsabilidades técnicas e os interesses econômicos.

Dentro deste contexto, torna-se necessário um profundo conhecimento da operação, dos ajustes e do desempenho de cada elemento do sistema, tanto isoladamente quanto em conjunto, pois as características de um elemento isolado podem ser alteradas diante da operação em conjunto.

A correta representação dos elementos de um sistema de potência é fator decisivo para a confiabilidade dos resultados de estudos elétricos, seja em regime permanente, seja em regime transitório. Em qualquer estudo é necessário definir-se inicialmente um modelo adequado para cada componente do sistema elétrico.

Diversos modelos têm sido propostos para representação dos elementos que compõem um sistema elétrico de potência. Uma vez conhecidas as características e a operação dos mesmos tornou-se possível a construção de modelos matemáticos que os representam adequadamente.

Ao longo do tempo vários estudos e pesquisas foram realizados com o propósito de aprimorar os modelos conhecidos, porém desde o início a carga do sistema apresentou-se como grande incógnita do problema. Apesar de se conhecer como cada elemento da carga se comporta individualmente, não se tem uma idéia precisa da sua composição final, devido a grande diversidade de equipamentos que a compõem de forma aleatória.

A atual representação das cargas utilizada pelo ONS nas simulações dinâmicas baseia-se em critérios da década de 1980 e merece ser revista para o contexto atual. O resultado de imprecisões na modelagem de carga pode mascarar informações preciosas durante as simulações. Se o resultado das simulações dinâmicas forem otimistas corre-se o risco de determinar margens de estabilidade que podem comprometer a segurança do sistema. Já se os resultados forem pessimistas a capacidade de transferência de potência entre regiões pode ser subutilizada.

II.2 CONCEITOS, CLASSIFICAÇÃO E COMPORTAMENTO DA CARGA

Segundo o IEEE [35] a carga pode ser entendida como uma parte do sistema que não é explicitamente representada, ou seja, é um conjunto de dispositivos que não estão individualmente modelados, mas que são tratados particularmente como se fosse um único dispositivo que consome potência conectado a um barramento.

Alguns conceitos básicos do tema em questão são apresentados a seguir, conforme definição do IEEE 1993 [35], para um melhor entendimento do assunto.

- **Componentes de Carga:** é o agregado equivalente de todos os dispositivos de tipos específicos ou semelhantes. Por exemplo: aquecedor de água, ar condicionado, iluminação, motores, fornos, etc.
- **Composição da Carga:** é a composição fracionária da carga por componente.
- **Classe da Carga:** é o agrupamento das cargas que têm composição e características similares, por exemplo: industriais, residenciais, públicas, comerciais, agrícolas e etc.
- **Mix da Carga:** é a composição fracionária de cada classe de carga em um barramento.
- **Características da Carga:** é o conjunto de parâmetros como, por exemplo, fator de potência e variação da potência com a tensão, que caracterizam o comportamento de uma carga específica.
- **Modelos de Carga:** é a representação matemática da relação entre tensão no barramento (magnitude e frequência) e a potência (ativa e reativa) ou corrente fluindo para a carga.

A Figura 1 ilustra os conceitos apresentados.

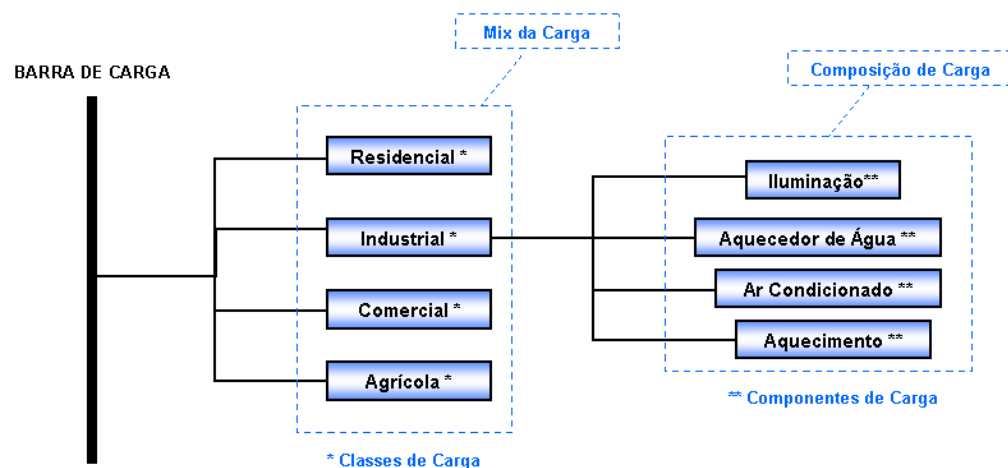


Figura 1 Modelo de Classificação e Composição de Carga.



A composição da carga é difícil de ser estimada, pois esta varia continuamente de acordo com os consumidores quando os mesmos decidem utilizar seus equipamentos e máquinas. A composição da carga pode variar ainda de acordo com a hora do dia, o dia da semana, estação do ano, condições climáticas, estado da economia, etc.

Cada dispositivo conectado a um barramento apresenta um comportamento específico. Alguns dispositivos exibem uma resposta dinâmica a distúrbios, outros não. Alguns variam suas características com a variação do ponto de operação do sistema.

Sabe-se que o comportamento dinâmico das cargas do sistema é afetado de acordo com variações da tensão e da frequência do barramento ao qual estão conectados.

As características estáticas das cargas são válidas somente sobre uma estreita faixa de variação de tensão e frequência. Quando a tensão e a frequência sofrem uma variação de grande amplitude, as características dinâmicas devem ser incluídas para uma representação mais precisa das cargas.

Desta forma, um modelo de carga busca representar a relação entre a tensão e a frequência com as potências ativa e reativa em um determinado barramento de carga.

A taxa de interesse na tensão e na frequência depende da natureza do distúrbio a ser analisado. Perda acidental de carga geralmente ocorre por condições altas de tensão e frequência; perda de geração e colapso tensão no sistema usualmente acontecem por baixas condições de frequência e tensão; já um curto-circuito provoca severos afundamentos de tensão seguidos por oscilações de tensão e frequência no sistema.

Srinivasan [63], em 1979, afirma que existe uma realimentação entre os valores das potências ativa (P) e reativa (Q) de saída da carga e os valores de entrada (tensão e frequência) da mesma, ou seja, que variações na carga (P e Q) causam subsequentes variações na tensão e na frequência, ao invés de somente variações na tensão e na frequência provocarem variações na carga.

Nos itens II.2.1 e II.2.2 a seguir será apresentado o comportamento das potências ativa e reativa da carga com a variação da tensão e da frequência no barramento onde a mesma está conectada. Para tal, são levados em consideração os vários tipos de componentes de carga, bem como as diferentes classes de carga.



II.2.1 DEPENDÊNCIA DA CARGA COM A TENSÃO

Em 1972, Iliceto [39] afirma que os componentes de uma carga industrial composta basicamente por grandes motores geram uma notável oscilação transitório na ocorrência de grandes quedas de tensão (de 25 a 75%).

Ainda em 1972, o Power System Engineering Committee (PSEC) [55] diz que para cargas residenciais compostas basicamente por lâmpadas incandescentes a potência ativa varia com a tensão elevada a 1,6, ou seja, $P = k \cdot V^{1,6}$. Já para lâmpadas fluorescentes afirma-se que a variação da potência ativa com a tensão é linear ($P = k \cdot V$), enquanto que para equipamentos de aquecimento a potência ativa varia com o quadrado da tensão ($P = k \cdot V^{2,0}$).

Em 1974, a partir da realização de estudos que avaliaram o comportamento de uma carga composta essencialmente por motores síncronos, Araújo [3] conclui que para uma potência ativa abaixo da potência a plena carga a variação de potência reativa com a tensão é menor. Para o tipo de carga considerado foi observado um comportamento como potência constante para a potência reativa frente a variações de tensão inferior a 20%.

Araújo [3] define ainda que a potência ativa da carga em uma subestação composta em 50% de cargas residenciais / comerciais e 50% de cargas industriais é dada por $P = 0,50 + 0,50 \cdot V^{2,0}$, admitindo variações de tensão de até 30% na barra de carga.

Finalmente, para cargas residenciais / comerciais compostas basicamente por lâmpadas fluorescentes e equipamentos de aquecimento, o autor determina que a potência ativa varia apenas em função da tensão elevando-se esta a um índice "n". Para o tipo de carga em questão "n" assume valor equivalente a 1,6, ou seja, $P = k \cdot V^n = k \cdot V^{1,6}$, onde P é a potência ativa de cargas resistivas, k é uma constante que depende das unidades empregadas na composição da carga e V é a tensão no barramento de carga.

Em 1975, a partir de alguns testes realizados em laboratório considerando o sistema elétrico da Manitoba Hydro, Quan [57] avalia o comportamento de certos componentes de carga frente a variações de tensão. Foi verificado que para lâmpadas incandescentes, aquecedores e resistores a potência ativa varia somente com tensão. Já para as lâmpadas de descarga as potências ativa e reativa não apresentaram variação com a tensão, enquanto que para os motores de indução verificou-se variação de ambas as potências com a tensão. No caso dos conversores apenas a potência ativa apresentou



variação com a tensão e finalmente no caso dos fornos elétricos somente a potência reativa apresentou variação de comportamento com a tensão. A Tabela 1 a seguir apresenta um resumo das observações mencionadas.

Tabela 1 Componentes de Carga x Variação de Tensão

Componentes de Carga	Comportamento x Variações na Tensão
Lâmpadas Incandescentes, Aquecedores e Resistores	Potência ativa varia somente com a tensão
Motores de Indução	As potências ativa e reativa variam com a tensão
Lâmpadas de Descarga	Ambas as potências não variam com tensão
Conversores	Apenas a potência reativa varia com a tensão
Fornos Elétricos	Somente a potência ativa varia com a tensão

A partir das observações apresentadas na Tabela 1 os autores montaram uma composição das cargas dividindo-as em classes (residencial, comercial, industrial e agrícola) e também realizaram testes com as mesmas. A principal conclusão obtida para cargas formadas basicamente por lâmpadas de descarga e motores de indução foi que a variação da potência ativa com a tensão é pequena, quando comparada à variação da mesma com a frequência.

Em 1976, Abdel Hakim [1] realizou testes em laboratório considerando uma carga composta por motores de indução. O autor observou que para uma queda de tensão de 40%, não considerando variações na frequência, ocorre uma queda temporária seguida de recuperação tendendo ao valor inicial na potência ativa, enquanto que a potência reativa sofre uma redução no seu valor inicial.

No ano seguinte, Venikov [82] realizou estudos e afirmou que para carga de iluminação compostas por lâmpadas incandescentes a potência ativa pode ser determinada através da relação $P = k \cdot V^{1,6}$, independente da frequência e do tempo, tanto para regime permanente como para transitórios. Note que o resultado encontrado pelo autor foi o mesmo que o apresentado pelo Power System Engineering Committee (PSEC) [55] e por Araújo [3], ambos citados anteriormente. A partir de deduções de equações que relacionam a potência mecânica de um motor com o seu escorregamento crítico e tensão crítica, o autor concluiu ainda que para cargas compostas por motores assíncronos, à tensão nominal, a inclinação da curva dP/dV nas condições iniciais de operação varia entre 0,30 e 0,75 pu e a da curva dQ/dV entre 1,5 e 3,5 pu.



Em 1981, Ihara [37] realizou uma série de testes em campo no sistema de 230kV de Bismark, Dakota do Norte, onde a composição das cargas em grande parte foi dada por motores de indução com alguma contribuição das cargas de iluminação. Os resultados mostraram que as características da potência ativa da carga são praticamente lineares à tensão, enquanto que esta linearidade não foi observada no comportamento da potência reativa.

Concórdia [15], em 1982, apresentou um artigo com resultados coletados em literaturas sobre testes feitos em campo e relatou ainda uma série de observações de vários autores sobre problemas encontrados em estudos de comportamento de carga, dentre os quais podem ser destacados os seguintes:

- Dificuldade de se obter dados e medições para variações de tensão superiores a $\pm 10\%$;
- A potência reativa apresenta uma variação bem maior que a potência ativa frente a um distúrbio de variação de tensão, sendo que esta relação não é linear;
- Os valores de dP/dV variam geralmente dentro de uma estreita faixa, exceto para cargas industriais e esta relação é ainda maior no verão devido, principalmente, as cargas de refrigeração (aparelhos de ar condicionado);
- Os valores de dQ/dV são bem sensíveis ao fator de potência, o que confirma as observações e estudos que mostram que a compensação reativa tem efeito estabilizante no sistema.

Ribeiro [60], em 1982, apresentou em seu artigo alguns gráficos que representam a dependência da carga com a tensão, tanto no inverno quanto no verão para cargas industriais, comerciais e residenciais, com base em dados coletados na Rochester Gas e Electric Corporation, nos quais foram consideradas variações de tensão da ordem de $\pm 10\%$. A principal constatação foi a de que quando ocorre uma variação na tensão para mais ou para menos, as potências ativa e reativa também sofrem esta variação, sendo que na potência reativa esta acontece de forma muito mais brusca do que na potência ativa.

Sabir [62], em 1982, realizou estudos considerando variações lentas e súbitas de tensão na área da Ontário Hydro Northwest System. Para cargas residenciais / comerciais, compostas em sua maioria por carga de iluminação, aquecimento e ar condicionado, foi observado que as potências ativa e reativa da carga variam em fase com a tensão e que não há características dinâmicas para este tipo carga. Também foi analisado o comportamento de cargas industriais compostas basicamente por motores de indução e alguns motores síncronos. Neste caso, independentemente da amplitude e da velocidade das variações, verificou-se que a potência reativa varia em fase com a tensão.



Em 1984, Frantz [24], recorreu a dados registrados em uma série de testes de duas empresas a RG & E e LILCO, em New York, cujas cargas são compostas principalmente por cargas residenciais. Ao se considerar variações de tensão relativamente lentas e apenas as características estáticas da carga, os autores concluíram que a potência ativa da carga pode ser aproximada a uma função linear da tensão, enquanto que a potência reativa se aproxima melhor de uma função quadrática.

Ohyama [53], em 1985, realizou medidas em campo e obteve dados sobre o comportamento da carga frente a distúrbios de tensão. Para pequenas variações de tensão foram identificadas grandes variações nas potências ativa e reativa das cargas residenciais e comerciais, enquanto que as cargas industriais apresentaram variações de potência muito pequenas. Já para grandes variações de tensão, as cargas industriais passam a apresentar resposta dinâmica para as potências ativa e reativa. As cargas residenciais e comerciais apresentam uma recuperação da potência na forma exponencial, atingindo o valor inicial mais rapidamente que as cargas industriais, porém o valor final apresenta um pequeno desvio com relação ao valor inicial.

Segundo Roelofs [61], a representação de um modelo de carga independente das variações de tensão no barramento, o que leva a resultados mais pessimistas. Desta forma, o autor recomenda que os desvios de tensão sejam considerados para o desenvolvimento de um modelo de carga mais otimista.

Com base em testes realizados em laboratórios e medidas extraídas de barramentos de carga de sistemas reais, Hill [29], em 1993, afirma que cargas compostas por motores de indução apresentam uma recuperação das potências ativa e reativa na forma exponencial frente a uma pequena variação de tensão, como apresentado na Figura 2 .

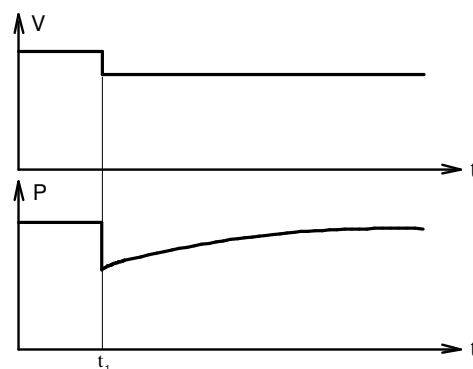


Figura 2 Modelo de Classificação e Composição de Carga.



Kundur [46] em 1993, afirmou que a potência reativa da carga sofre uma variação com a tensão maior do que a potência ativa, pois varia como uma função não linear da tensão devido à saturação magnética em transformadores de distribuição e motores.

Ainda em 1993, Pal [54], também afirmou que a potência reativa requerida por uma carga composta por motores de indução aumenta quando a tensão no barramento da carga em questão diminui, e vice-versa.

Ihara [38], em 1994, analisou dados de cargas residenciais coletados na Kansai Electric Power Company e suas principais constatações foram:

- Para afundamentos de tensão durante faltas balanceadas e desbalanceadas o impacto na potência não é significativo;
- O consumo de potência reativa nas faltas desbalanceadas é maior que a consumida durante as faltas balanceadas;
- A variação da potência ativa em função da tensão (resposta estática) no tempo de falta é pequena quando comparada a variação da potência reativa;
- As respostas estáticas, $P(V)$ e $Q(V)$, até 5 ciclos após a falta representam bem o comportamento da carga durante os afundamentos de tensão;
- Para degraus de tensão da ordem de $\pm 2\%$, a potência reativa varia com o tempo mais do que a potência ativa, e após 30 ciclos da variação da tensão atinge um padrão de regime. Desta forma, as respostas estáticas da carga podem ser determinadas com dados carga x tensão após cerca de 30 ciclos da ocorrência destas variações.

Kao, em 1994, analisou o comportamento das potências ativa e reativa de uma carga da Taiwan Power Company (Taipower), composta basicamente por cargas industriais (65%) com grande quantidade de motores de indução e conectadas a um barramento de 69kV. Para isto foi considerada uma variação de tensão no barramento da mesma provocada por uma falta fase-terra em uma linha de transmissão de 161kV. Foi constatado que apesar dos modelos estáticos usados na representação da carga estarem consistentes com os valores medidos durante a falta, estes não refletiam o comportamento dinâmico após a eliminação da mesma, principalmente no que diz respeito à potência reativa.

Os autores analisaram ainda o comportamento do sistema da Taipower durante a ocorrência de uma falta trifásica à terra em uma das suas unidades geradoras. Durante a ocorrência da falta, uma grande queda de tensão (58%) no barramento de uma



subestação de 69kV composta principalmente por cargas industriais provocou o desligamento de algumas cargas. Concluiu-se então que durante um curto-circuito com rápida e grande queda de tensão (maior do que 20%) no barramento da carga é imprescindível introduzir um corte de carga, que por sua vez torna o modelo utilizado impreciso, dificultando assim a sua representação.

Em 1994, Karlsson [43] realizou testes em campo no sul da Suécia e analisou o comportamento de cargas basicamente industriais e residenciais, quando submetidas a variações de tensão da ordem de 10%. Os autores notaram que em estações do ano onde a temperatura é mais elevada (verão) há uma redução na potência ativa recuperada. Esta observação também é válida para os períodos da madrugada quando comparados aos períodos do dia ou da noite.

Ainda em 1994, Ku [45] apresentou medições no 345kV do Sistema Elétrico da Taiwan Power Company, nas quais foram consideradas quedas de tensão da ordem de 12%. Os autores observaram que tanto a potência ativa quanto a potência reativa variam proporcionalmente com a tensão, porém com uma amplitude maior. A potência reativa apresentou-se mais sensível as variações de tensão, atingindo uma amplitude de 30% contra 22% da potência ativa.

Taylor [66], em 1994, afirmou que a variação da carga com a tensão é muito maior do que com a frequência e que para cargas compostas principalmente por motores a potência reativa é mais sensível às variações de tensão do que a potência ativa.

Milanovic [52], em 1995, apresentou um artigo no qual fez as mesmas observações que Karlsson [43], em 1994.

Em 1997, Borghetti [5] afirmou que cargas compostas basicamente por motores de indução passam a absorver uma quantidade maior de potência reativa quando submetidas a decréscimos contínuos de tensão e que este aumento no consumo de potência reativa pode vir a provocar problemas de instabilidades de tensão.

Ferreira [21], em 1999, analisa o comportamento de cargas industriais, compostas principalmente por motores de indução e chega as seguintes conclusões:

- As potências ativa e reativa absorvidas pelo motor de indução apresentam acoplamento entre si, ou seja, dependem uma da outra; e
- Quanto maior é o escorregamento do motor, maior é a influência da tensão de alimentação na potência.



Dai [17], em 2001, analisou o comportamento de cargas compostas por motores de indução quando submetidas a diferentes quedas de tensão e suas principais constatações foram as seguintes:

- Quando a carga é submetida a uma queda de tensão maior que 30%, o valor em regime permanente das potências ativa e reativa após o distúrbio é sempre diferente do valor antes distúrbio;
- As características transitórias da carga aumentam com a queda de tensão.

II.2.2 DEPENDÊNCIA DA CARGA COM A FREQUÊNCIA

Kent [44], em 1969, relataram as dificuldades de se realizar testes para verificação do comportamento da carga frente a uma variação de frequência, dentre as quais podem ser citadas as seguintes:

- As variações de carga devido à frequência são difíceis de ser obtidas, pois estas geralmente são acompanhadas por variações de tensão;
- Há um risco muito grande de se danificar equipamentos ou causar alguma inconveniência ao consumidor associada à subfrequência.

O autor mostra ainda em seu artigo que é comum se admitir uma variação linear percentual da carga em função de uma variação percentual na frequência. Desta forma, para cada 1% de variação na frequência, por exemplo, deve-se admitir que as potências ativa e reativa da carga também variem em 1%.

Araújo [3], em 1974, apresentou um artigo no qual é analisado o comportamento de cargas dos tipos industriais e residenciais / comerciais em função de variações na frequência. Algumas conclusões do autor estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 Dependência da Carga com a Frequência.

Cargas Residenciais / Comerciais	
Variação na Potência	Dependência com a Frequência
Ativa	Independente
Reativa	Varia Inversamente
Cargas Industriais	
Composição da Carga	Coefficiente da Variação da Potência Ativa em Função da Frequência
Principalmente por Motores de Indução	> 1,0 pu
Pequena Parcela de Motores	≈ 1,0 pu
Grande Parcela de Motores	≈ ou > 2,0 pu



Quan [57], em 1975, afirmou que o comportamento transitório da carga frente a grandes quedas de frequência é geralmente desconhecido e diz que a realização de testes para se verificar o comportamento das potências ativas e reativas da carga em função das variações de frequência são de grande importância, entretanto, estes testes dificilmente são permitidos.

Naquela época, o autor realizou alguns testes em laboratório para se avaliar o comportamento de diferentes componentes de carga frente a variações de frequência. Os principais resultados e observações desses testes estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Componentes de Carga x Variações de Frequência

Componentes de Carga	Comportamento x Variações na Frequência
Lâmpadas Incandescentes	Potência ativa não varia com a frequência
Aquecedores	
Resistores	
Lâmpadas de Descarga	Potências ativa e reativa variam somente com a frequência
Motores de Indução	Potências ativa e reativa variam com a frequência
Conversores	
Fornos Elétricos	

Foi feita então uma composição das cargas dividindo-as em classes (residencial, comercial, industrial e agrícola), com base nas quais, da mesma forma que para a tensão, foram realizados novos testes para se avaliar o comportamento das cargas frente a distúrbios na frequência. Nas simulações foram aplicados distúrbios, onde a frequência oscilava entre 1,050 e 0,950 pu e em seguida retornava a 1,00 pu em um tempo de 500ms.

Com base nos resultados dessas simulações, os autores concluíram que a potência ativa de cargas compostas por lâmpadas de descarga e motores de indução é bastante sensível a qualquer variação de frequência. Sendo assim, as representações para este tipo de carga que apenas consideram a sua dependência com a tensão podem levar a erros grosseiros, haja visto que uma pequena variação na frequência pode produzir uma variação significativa na potência ativa.

Em 1977, Venikov [82] destaca que apesar das variações de tensão e de frequência serem tratadas, até então, de forma independentes entre si, na prática as variações de frequência são sempre acompanhadas de variações de tensão. O autor

afirma que quedas de frequência geralmente causam quedas na tensão, e que as variações na frequência alteram a potência reativa das cargas e as perdas ativa e reativa da rede.

O autor divide as cargas de um sistema elétrico de potência em cargas assíncronas e cargas de iluminação. As cargas de iluminação compostas por lâmpadas incandescentes independem da frequência e do tempo, enquanto que a potência ativa de cargas de iluminação compostas por lâmpadas fluorescentes pode ser reduzida de 0,50 a 0,80% para uma redução de 1% na frequência. Para cargas compostas (carga estática + motores de indução) à tensão nominal e à frequência nominal, o autor afirma que o valor de $\frac{dQ}{df}$ pode variar de -0,80 a -1,20; enquanto que o valor de $\frac{dP}{df}$ pode ser de 1,70 a 2,50.

Através de curvas de torque mecânico x escorregamento, Figura 3, o autor mostrou que a redução na frequência afeta a operação de um motor de forma semelhante a uma elevação na tensão. Assim, se a frequência ficar abaixo do nominal, uma maior queda de tensão pode ser tolerada sem perigo de perda de estabilidade. Desta forma a redução da frequência e a conseqüente redução da demanda de potência, Figura 4, e o afastamento da tensão crítica, Figura 5, pode ser desejável para melhorar a estabilidade de sistemas muito carregados, operando abaixo da tensão nominal.

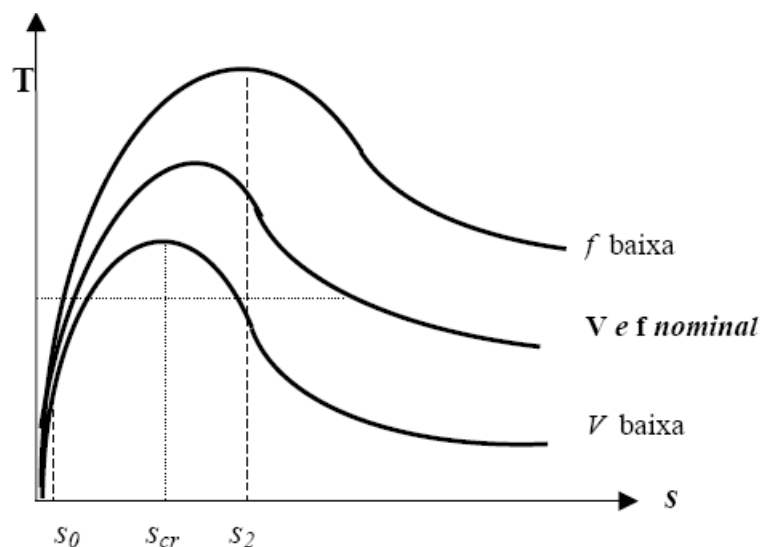


Figura 3 Torque (T) x Escorregamento (s) de um motor [82].

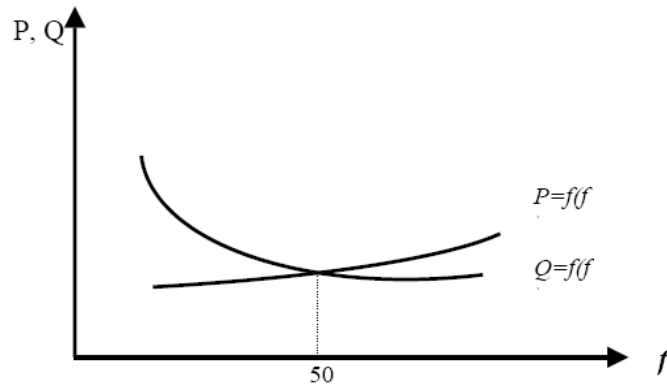


Figura 4 Comportamento de Cargas Compostas em Relação à Frequência [82].

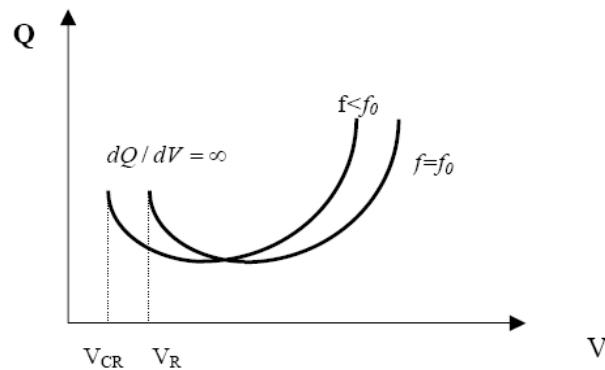


Figura 5 Comportamento da Potência Reativa em Relação à Variação de Tensão [82].

Venikov destacou, porém, que estas condições de operação de um sistema de potência não são aceitáveis, exceto em condições extremas como as ocorridas durante a segunda guerra mundial.

No ano de 1981, Srinivasan [64] realizou testes no Canadá em duas subestações de 120kV, cujas cargas eram compostas principalmente por cargas dos tipos residenciais e comerciais. Os autores observaram que para pequenas variações de frequência as respostas das potências ativa e reativa permaneceram próximas a zero, o que se deve à composição das cargas monitoras e à magnitude dos distúrbios de frequência aplicados nos testes.

Concórdia [15], em 1982, assim como para tensão, relatou a dificuldade de se obter grandes variações na frequência e ressalta que para validação dos modelos de carga é extremamente importante que se conheça o seu comportamento frente a este tipo de distúrbio. O autor realiza então alguns testes e suas principais observações e conclusões são as seguintes:



- Para variações significativas de frequência a variação da potência reativa é relativamente pequena;
- Em algumas situações, observou-se um aumento acentuado na potência reativa, enquanto que a frequência estava diminuindo e a tensão aumentando, o que indica saturação magnética de transformadores.

Ribeiro [60], em 1982, apresentou um artigo no qual afirma que variações significantes na frequência sempre vêm acompanhadas de variações de tensão, o que impossibilita a determinação da dependência da carga somente com a frequência, pois o efeito da variação da frequência na carga será sempre mascarado pelo efeito da variação de tensão.

Neste mesmo ano, Sabir [62] realizou estudos na área da Ontário Hydro Northwest System, no Canadá. Ao se analisar o comportamento de cargas industriais, compostas principalmente por motores de indução e alguns motores síncronos, observou-se que para pequenas e lentas variações de frequência a potência ativa das cargas variava apenas em função da frequência, independente da tensão. O autor analisa ainda o comportamento de cargas residenciais / comerciais quando submetidas a variações lentas e súbitas de frequência e conclui que a variação da carga com a frequência pode ser descartada, pois esta é infinitamente pequena quando comparada com a tensão.

Em 1987, Dovan [18] realizou testes no sistema australiano para diferentes tipos de carga. Para cargas dos tipos industriais, agrícolas, residenciais e comerciais observou-se uma notável variação da potência ativa frente a significantes distúrbios de frequência. O autor observa ainda que as variações dinâmicas das cargas residenciais são muito pequenas quando comparadas com as cargas industriais e agrícolas.

Assim como para tensão, em 1989, Roelofs [61] diz que a representação das potências ativa e reativa independe das variações de frequência no barramento, o que leva a resultados mais pessimistas. Desta forma, para que se desenvolva um melhor modelo de carga, o autor recomenda que os desvios de frequência sejam levados em consideração.

Taylor [66], em 1994, afirma que a potência reativa da carga aumenta com a diminuição da frequência, enquanto que a potência ativa decresce. Sendo assim, o coeficiente de variação da potência ativa em relação à frequência pode ser representado por um valor positivo e o da potência reativa por um valor negativo.



Em 1999, Ferreira [21] analisou o comportamento de cargas conectadas a um barramento do 138kV, compostas principalmente por motores de indução. Os autores verificaram que a potência do motor de indução praticamente não sofre influência da variação da frequência de alimentação.

II.3 MODELAGEM DE CARGA

A correta representação dos elementos de um sistema de potência sempre foi fator decisivo para a confiabilidade dos resultados de estudos elétricos, seja em regime permanente, seja em regime transitório. Em qualquer estudo de fluxo de potência é necessário definir-se inicialmente um modelo adequado para componente do sistema elétrico.

Diversos modelos têm sido propostos para representação de geradores, transformadores, linhas de transmissão, elos de corrente contínua, reguladores, compensadores, motores e diversos outros elementos que compõem um sistema elétrico de potência. Uma vez conhecidas às características e a operação destes componentes torna-se possível à construção de modelos matemáticos que os representem adequadamente.

O problema de estabilidade em sistemas elétricos vem sendo estudado há longa data. Inicialmente, quando geradores eram acionados por máquinas a vapor, um dos maiores problemas de funcionamento era das oscilações causadas pelas variações de tensão e frequência, que levavam a perda total de sincronismo. Os primeiros estudos a este respeito datam de 1920.

Segundo Ferreira [20], em 1934, S. B. Cray ressaltou, em um artigo sobre estabilidade em sistemas elétricos, cujo foco central era a correta modelagem de unidades geradoras, a importância da modelagem de carga de um sistema de potência. A partir de então, o interesse em uma melhor representação da carga aumentou significativamente, conforme também aumentavam em dimensões e complexidade os sistemas elétricos de potência. Vários estudos tentaram estabelecer um modelo que representasse adequadamente o comportamento da carga diante de eventos que provocassem a instabilidade do sistema.

Com a expansão industrial vivida na primeira metade do século XX e a crescente substituição do vapor por energia elétrica, a participação do segmento industrial na carga total do sistema elétrico cresceu acentuadamente. Com a grande



quantidade de motores elétricos que passaram a fazer parte da composição da carga, surgiu a necessidade de considerar o comportamento dinâmico dessas máquinas na representação dos transitórios do sistema.

Em 1957, Brereton [8], apresentou vários métodos para representação de cargas compostas basicamente por motores de indução. Na modelagem deste tipo de carga, foram usadas equações dinâmicas de motores de indução para representação do comportamento dinâmico como um motor de indução equivalente.

A representação detalhada de modelos, tanto de unidades geradoras como de componentes de carga encontravam outra grande dificuldade para sua implementação nos estudos de estabilidade: as ferramentas computacionais disponíveis na época. A complexidade da representação dos modelos de carga, unidades geradoras, e equipamentos auxiliares de um sistema de potência aumentavam tremendamente os tempos de processamento dos estudos de estabilidade nos computadores de grande porte existentes, além da limitação no número de barras representadas nos programas.

A precisão dos modelos usados nos estudos de estabilidade veio aumentando conforme se aprimorava a capacidade dos programas de estabilidade e dos computadores, refletindo principalmente no tempo de processamento e na precisão dos resultados.

A evolução na rapidez de processamento e a robustez dos computadores modernos têm levado ao uso de programas de estabilidade cada vez mais potentes e com melhores condições de representação dos componentes dos sistemas elétricos de potência.

Apesar da evolução de equipamentos e ferramentas computacionais, a correta representação de todos os elementos de um sistema elétrico de potência continua sendo imprescindível para se obter precisão na resposta do comportamento do sistema frente a uma contingência de grande porte.

Ao longo do tempo vários estudos e pesquisas foram realizados com o propósito de aprimorar os modelos conhecidos, porém desde o início a carga do sistema apresentou-se como grande incógnita do problema. Apesar de conhecido como cada elemento da carga se comporta individualmente, não se tem uma idéia precisa da sua composição final, devido a grande diversidade de equipamentos que a compõem.



Duas abordagens vêm sendo 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 [36]. Já 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 [18].

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, é necessária uma quantidade significativa de dados relacionados à testes programados e à distúrbios naturais que afetam o sistema e a carga.

Desta forma, com objetivo de aumentar o conhecimento do comportamento dinâmico da carga, várias empresas iniciaram processos de medição e testes em seus sistemas a fim de acumular dados para posteriores estudos.

Em 1987, o IEEE promoveu um painel de discussões, presidido por Kundur [34], onde foram apresentadas e discutidas técnicas de monitoramento necessárias para registrar o desempenho dos sistemas elétricos de grandes empresas dos Estados Unidos, Canadá e da Europa, durante grandes distúrbios.

Como já constatado por diversas pesquisas e estudos, o comportamento dos sistemas elétricos de potência conduziu a representação das cargas para dois modelos distintos: os modelos estáticos e os modelos dinâmicos.

O modelo estático de carga expressa as potências ativa e reativa, em qualquer instante de tempo, como uma função algébrica do módulo e da frequência da tensão do barramento no mesmo instante de tempo. Neste tipo de modelo, os componentes de potência ativa e reativa são representados separadamente.

Já no modelo dinâmico de carga, as potências ativa e reativa são expressas para qualquer instante de tempo como uma função do módulo e da frequência da tensão no barramento, em instantes anteriores e no mesmo instante de tempo. Para se representar tal modelo são usadas equações diferenciais ou variações (diferenças entre dois instantes de tempo) das grandezas (tensão, frequência, e potências) em um, ou vários, instantes de tempo.



Nos itens a seguir é apresentado o estado da arte dos modelos estáticos e dinâmicos de carga.

II.3.1 MODELOS ESTÁTICOS DE CARGA:

Os modelos estáticos, devido a sua simplicidade, têm sido tradicionalmente usados nos estudos de estabilidade do SIN. Estes modelos vêm sendo aprimorados ao longo do tempo e, para determinadas empresas, os resultados mostram-se satisfatórios.

Nestes modelos as potências ativa e reativa são representadas como um polinômio ou uma função exponencial da tensão e da frequência do barramento. Os modelos estáticos são usados principalmente para cargas estáticas não temporais, ou seja, cargas cujo comportamento é invariante no tempo, tais como cargas resistivas (iluminação e aquecimento). Conforme alguns autores, estes modelos também podem ser usados como uma aproximação para se verificar o comportamento de componentes dinâmicos de carga, ou seja, cargas cujo acionamento é feito por motores e/ou variam no tempo.

De forma geral, as potências ativa e reativa consumidas pela carga podem ser expressas em função da variação da tensão e da frequência, conforme equação abaixo:

$$P = g(\Delta V, \Delta f) \quad (\text{equação 1})$$

$$Q = h(\Delta V, \Delta f) \quad (\text{equação 2})$$

ou como uma combinação linear de potência, corrente e impedância:

$$P = k_1 S + k_2 I + k_3 Z \quad (\text{equação 3})$$

$$Q = k_4 S + k_5 I + k_6 Z \quad (\text{equação 4})$$

onde k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 e k_6 representam as parcelas de carga com potência, corrente e impedância constantes, para as componentes ativa e reativa, sendo que $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ e $k_4 + k_5 + k_6 = 1$.

As variações de frequência e/ou tensão em um sistema elétrico de potência vão depender da natureza do distúrbio ocorrido. Por exemplo, perdas de carga ou geração acarretam elevadas oscilações de frequência e elevados desvios de tensão, enquanto que a ocorrência de curtos-circuitos provocam severas quedas de tensão, porém sem registrar elevadas oscilações de frequência.



Desta forma, as equações (1) e (2) podem ser expressas por:

$$P = P_0 \left[\frac{V}{V_0} \right]^{n_p} (1 + k_{pf} * \Delta f) \quad (\text{equação 5})$$

$$Q = Q_0 \left[\frac{V}{V_0} \right]^{n_q} (1 + k_{qf} * \Delta f) \quad (\text{equação 6})$$

II.3.1.1 MODELO EXPONENCIAL NÃO-LINEAR

Visto que a variação da carga com a tensão é muito mais significativa que a variação da carga com a frequência, vários autores desprezam esta parcela, sem prejuízo considerável na precisão dos resultados. Assim sendo, as equações (5) e (6) ficarão reduzidas a:

$$P = P_0 \left[\frac{V}{V_0} \right]^{n_p} \quad (\text{equação 7})$$

$$Q = Q_0 \left[\frac{V}{V_0} \right]^{n_q} \quad (\text{equação 8})$$

onde:

- V_0 , P_0 e Q_0 → Representam as condições iniciais da tensão e das potências ativa e reativa, respectivamente;
- V , P e Q → Representam as potências ativa, reativa consumidas pela carga quando a tensão de suprimento é V .
- n_p e n_q → São os parâmetros do modelo para as potências ativa e reativa, respectivamente

Quando n_p e n_q são iguais a 2, as potências variam diretamente com o quadrado da tensão e o modelo representa uma carga de **IMPEDÂNCIA CONSTANTE**. Para estes coeficientes iguais a 1, as potências variam linearmente com a tensão e o modelo representa uma carga de **CORRENTE CONSTANTE**. E finalmente quando n_p e n_q são iguais a 0, as potências não variam com a tensão e a carga consome sempre a mesma potência, ou seja, o modelo representa uma carga de **POTÊNCIA CONSTANTE**. Para as cargas compostas, os valores dos coeficientes n_p e n_q vão depender das características da carga quando são agregados os componentes da mesma.

Na Figura 6 são ilustrados os três modelos de carga acima descritos.

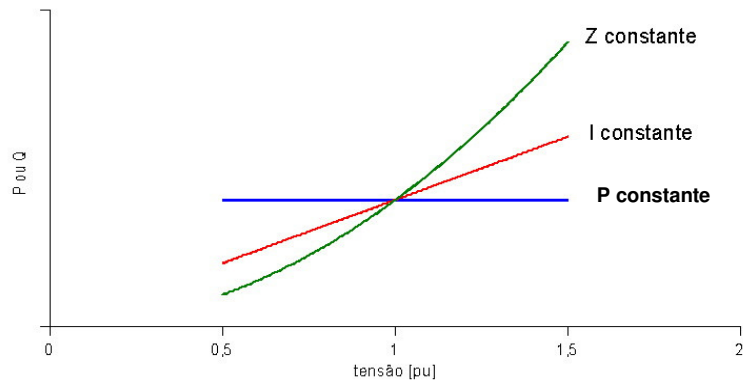


Figura 6 Modelos Estáticos de Carga (Z, I e P constantes).

Os valores de n_p e n_q podem ser determinados através de medições ou por deduções matemáticas, conforme apresentado a seguir:

$$P = V^{n_p} \quad \rightarrow \quad \left(\frac{dP}{dV} \right)_{V=V_0} = n_p V_0^{n_p-1} \quad (\text{equação 9})$$

Fazendo $dP = \Delta P$ e $dV = \Delta V$, tem-se:

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = n_p V_0^{n_p-1} \quad (\text{equação 10})$$

Considerando a tensão inicial V_0 igual a 1 pu, tem-se:

$$n_p = \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad \text{e} \quad n_q = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (\text{equação 11})$$

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

Concórdia [15], em 1982, apresentou um artigo onde são abordadas as características de cada componente da carga, os efeitos das cargas compostas e mostra ainda resultados coletados de diferentes literaturas sobre testes realizados em campo. Neste artigo, o autor menciona que é muito difícil conseguir uma exata composição da carga, devido a fatores já citados anteriormente (estilo de vida dos consumidores, estação do ano, estado da economia, etc). Além disso, o artigo consegue sintetizar diversas dificuldades e observações feitas por vários autores sobre problemas



encontrados em estudos de comportamento de carga, dentre as quais podem ser destacadas as seguintes:

- Dificuldades de se obter dados e medições do comportamento da carga quando submetidos a perturbações que causem variações de tensão acima de 10%, sendo estes dados os de maior interesse em estudos de estabilidade;
- Dificuldade de se obter medidas de distúrbios na carga relativos a variações significativas da frequência;
- Prática de se converter qualquer tipo de representação de carga para o modelo Z constante quando a tensão cai abaixo de um valor crítico (por exemplo, 40%), a fim de se evitar problemas computacionais. Isto leva os resultados das simulações a valores mais conservativos;
- As características da carga têm efeitos significativos na estabilidade do sistema;
- Para motores não muito carregados, a característica da potência ativa tende a ser do tipo potência constante ($n_p=0$), enquanto que a característica da potência reativa tende a ser do tipo impedância constante ($n_q=2$);
- A potência reativa apresenta uma variação muito maior que a potência ativa frente a um distúrbio de variação de tensão, sendo que esta relação não é linear;
- Os valores de $\frac{dP}{dV}$ variam normalmente dentro de uma pequena faixa, exceto para cargas industriais;
- Os valores de $\frac{dQ}{dV}$ são muito mais sensíveis ao fator de potência, o que confirma os estudos que mostram que a compensação reativa tem efeito estabilizante no sistema.

Ainda em 1982, Ribeiro [60] apresentou um método matemático para determinação de n_p e n_q , onde estes são obtidos através dos valores de $\frac{dP}{dV}$ e $\frac{dQ}{dV}$ das cargas individuais e a participação das mesmas na carga agregada. Com base em dados coletados na Rochester Gas and Electric Corporation (RG&E), o autor através do seu método obteve valores típicos de n_p e n_q para verão e inverno, de cargas industriais, comerciais e residenciais. Os resultados obtidos foram validados através de testes de campo.

Através de testes realizados no sistema da Ontário Hydro, em 1987, Vaahedi [79] apresenta valores de n_p e n_q para cargas residenciais, comerciais e industriais, levando em conta os efeitos do inverno e do verão, do dia e da noite. Com intuito de se



obter um modelo agregado de carga, também foi realizada uma grande pesquisa envolvendo diferentes regiões geográficas e classes de consumidores.

Em 1987, Kundur [46] indica que o coeficiente n_p varia normalmente entre 0,50 e 1,80 enquanto que o coeficiente n_q entre 1,50 e 0,60. O autor diz ainda que na falta de informações é comum representar a potência ativa da carga com corrente constante ($n_p = 1$) e a potência reativa como impedância constante ($n_q = 2$).

Em 1993, o IEEE Task Force [35] também orientou que na falta de informações sobre a composição da carga a potência ativa seja representada como corrente constante e a potência reativa como impedância constante.

Antes mesmo disto, em 1974, Araújo [3] também havia chegado a mesma conclusão do Kundur [46] e do IEEE Task Force [35], com relação à falta de informação da carga. O autor afirma ainda que a potência ativa dos motores de indução fica bem representada pelo modelo potência constante e propõem que a potência reativa dos mesmos seja representada de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 Comportamento dos Motores de Indução

Motores de Indução	
Porcentagem da Capacidade Nominal do Motor	Representação da Potência Reativa
100 %	P cte
60 %	I cte
30 %	Z cte

Araújo [3] também verifica que a compensação shunt tende a deslocar a potência reativa de impedância constante para corrente constante.

Coker [14], em 1999, apresenta vários valores para os parâmetros de n_p e n_q em função da estação do ano, do dia da semana e da hora do dia para diferentes tipos de consumidores (residencial, comercial, agrícola, etc). Da mesma forma que os últimos três autores, verificou-se que na falta de informações mais precisas os coeficientes n_p e n_q podem ser bem representados por valores iguais a 1 e 2, respectivamente.

A partir de dados coletados no sistema elétrico da Taiwan Power Company, em 1993, Chiou [13] estima os parâmetros de n_p e n_q usando o método dos mínimos



quadrados. Foram encontrados valores de 0,683 e 2,856 para n_p e n_q , respectivamente. Estes valores foram validados através da simulação de uma falta fase-terra em uma subestação de 161kV.

Kao [41], em 1994, apresentou em seu artigo valores típicos de n_p e n_q para várias subestações do sistema elétrico da Taiwan Power Company em função dos períodos do dia e da noite e para o inverno e o verão. Estes valores foram obtidos a partir da composição das parcelas de carga residencial, comercial e industrial, utilizando os seus respectivos coeficientes para cada um desses tipos de carga.

II.3.1.2 MODELO POLINOMIAL NÃO-LINEAR

Um outro modelo que também tem sido bastante usado na representação da carga estática com a tensão é o modelo polinomial. Este modelo é composto pela combinação dos três modelos (Z, I, P cte), como mostrado nas equações a seguir:

$$P(\bar{V}) = P_o \left(a + b\bar{V} + c\bar{V}^2 \right) \quad (\text{equação 12})$$

$$Q(\bar{V}) = Q_o \left(d + e\bar{V} + g\bar{V}^2 \right) \quad (\text{equação 13})$$

onde:

- V_o , P_o e Q_o → Condições iniciais da tensão e das potências ativa e reativa, respectivamente;
- $\bar{V} = \frac{V}{V_o}$ → Tensão normalizada. Alguns autores usam o desvio de tensão $\Delta V = V(k+1) - V(k)$, onde k é o instante de tempo.
- a e d → Coeficientes (em pu) da parcela de potência constante;
- b e e → Coeficientes (em pu) da parcela de corrente constante;
- c e g → Coeficientes (em pu) da parcela de impedância constante;
- $a + b + c = 1$, e $d + e + g = 1$.

O modelo polinomial é comumente denominado modelo ZIP, uma vez que este representa a carga através de suas parcelas de impedância, corrente e potência constante, ou seja, Z_c , I_c e P_c , respectivamente. Apesar de este modelo ser um clássico na representação de cargas e muitos programas computacionais o adotarem, o mesmo não apresenta uma boa precisão na estimativa da maioria das cargas existentes no sistema elétrico.



Com base em diversos testes realizados na Southern California Edison Company, em 1969, Kent [44] determina a composição das cargas baseada na classe (residencial, comercial e rural) para as estações do ano (inverno e verão). Os resultados obtidos foram os apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 Classes de Carga x Estações do Ano x Composição

Modelo x Estação		Residencial / Comercial	Industrial	Rural
Inverno	P cte	34%	49%	58%
	Z cte	66%	51%	42%
Verão	P cte	49%	61%	68%
	Z cte	51%	39%	32%

Entretanto, o autor recomenda utilizar 50% de potência constante e 50% de impedância constante para representação da carga, na falta de dados mais precisos.

Na discussão do artigo de Kent[44], Kimbark e Peterson sugerem o uso da expressão $P = P_o \left(\bar{V} \right)^{np}$ como mais adequada para representação de todas as cargas (exceto das cargas de potência constante) quando da ocorrência de grandes quedas de tensão. Peterson obtém inclusive resultados mais expressivos com este tipo de representação para o exemplo apresentado no artigo.

Testes realizados na rede de 154kV da Turquia são relatados por Iliceto [39], em 1972. Com base nas medições feitas, o autor conclui que a representação de cargas industriais em forma de agrupamento como qualquer carga estática está bem longe da realidade. Já as cargas residenciais podem ser agrupadas em grandes blocos sem maiores problemas e representadas por suas características estáticas na forma polinomial, tomando o cuidado de modificá-las adequadamente quando ocorrerem grandes afundamentos de tensão no sistema.

Em 1989, o GCOI através do Grupo de Trabalho de Estudos Especiais – GTEE, com a participação de algumas empresas do setor elétrico brasileiro, publicou o relatório SCEL/GTEE 001/89 – Modelos de Carga para Estudos de Estabilidade e Fluxo de Potência [27]. Este relatório teve como objetivo sintetizar e traçar metodologias e estratégias para a implantação de uma melhor representação da carga das empresas brasileiras. Como conclusão foi recomendada que na falta de dados mais elaborados, sejam utilizados, para a parte ativa da carga elétrica, modelos constituídos de uma parcela de potência constante e uma de impedância constantes, variando de 48 a 83% e



52 a 17%, respectivamente, dependendo das características de cada estado do país (Brasil). Para a potência reativa, foi recomendado o uso de Z constante para todas as empresas. Para a ELETRONORTE, cuja carga representava basicamente indústrias de alumínio, foi recomendado o uso de impedância constante, tanto para potência ativa quanto para potência reativa. O relatório faz ainda uma análise sobre a representação de modelos de carga mais precisos nos programas então existentes.

Ainda em 1989, Roelofs [61] analisa os diferentes modelos de carga (potência, corrente e impedância constante, composição de modelos, etc) e conclui que o modelo potência constante leva os estudos a resultados mais pessimistas. O autor recomenda, no caso de estudos específicos, se não existirem dados mais precisos sobre a natureza da carga, que seja adotado o modelo de carga impedância constante.

Kao [41], em 1994, apresenta valores típicos para os coeficientes **a**, **b**, **c**, **d**, **e** e **g** para várias subestações do sistema elétrico da Taiwan Power Company. Estes valores foram obtidos pela composição das parcelas da carga residencial, comercial e industrial utilizando os respectivos coeficientes para cada um desses tipos de carga.

Em 2003, Corrêa [16] afirma que para pequenas variações de tensão (normalmente 5%) e frequência, o modelo ZIP apresenta desempenho satisfatório, visto que para este ponto de operação as variáveis do sistema não apresentam variações significativas. Porém para grandes excursões de tensão e/ou frequência, este modelo apresenta desempenho insatisfatório, principalmente para a componente reativa da potência.

Conforme ressaltado por diversos autores, os modelos estáticos apresentados não refletem corretamente o comportamento das cargas para tensões muito baixas (de 0 a 0,50pu), sendo válidos somente em uma faixa limitada de tensão. Além disso, esses modelos podem levar à problemas de convergência ou mesmo inviabilizar soluções matemáticas quando a tensão cai abaixo de um determinado valor.

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

Desta forma, os programas de estabilidade normalmente usam o artifício de mudar as características especificadas da carga para Z constante quando a tensão cai



abaixo de um determinado valor, conforme citado por Kundur [46]. O IEEE [32], em 1973, indica o valor de 50% e Concórdia [15] indica o valor de 40% da tensão nominal para chaveamento automático feito pelo programa dos modelos P constante ou I constante para Z constante, quando a tensão cair abaixo deste valor. Para o sistema brasileiro, cujo programa oficial é o ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL [10] e [11] usa-se, como default, o valor de 70% da tensão para chaveamento automático da modelagem de carga utilizada para Z constante, porém o usuário pode alterá-lo para o valor desejado.

II.3.1.3 INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA NOS MODELOS EXPONENCIAL E POLINOMIAL

Apesar do foco central da maioria dos trabalhos publicados ser o comportamento da carga com a tensão, deve ser registrado que alguns autores também levaram em consideração a dependência da carga com a frequência. Esta dependência é usualmente representada pela multiplicação do modelo polinomial ou exponencial por um fator dado por:

$$1 + k \cdot \Delta f \quad (\text{equação 14})$$

onde:

- $\Delta f = f - f_0$;
- $f \rightarrow$ frequência do barramento;
- $f_0 \rightarrow$ frequência inicial [46] ou nominal [35];
- $k \rightarrow$ Parâmetros de sensibilidade da frequência.

Logo:

- **Modelo Exponencial:**

$$P(\bar{V}, \Delta f) = P_0 (\bar{V})^{np} (1 + k_p \cdot \Delta f) \quad (\text{equação 15})$$

$$Q(\bar{V}, \Delta f) = Q_0 (\bar{V})^{nq} (1 + k_q \cdot \Delta f) \quad (\text{equação 16})$$

- **Modelo Polinomial:**

$$P(\bar{V}, \Delta f) = P_0 \left(a + b\bar{V} + c\bar{V}^2 \right) \cdot (1 + k_p \cdot \Delta f) \quad (\text{equação 17})$$

$$Q(\bar{V}, \Delta f) = Q_0 \left(d + e\bar{V} + g\bar{V}^2 \right) \cdot (1 + k_q \cdot \Delta f) \quad (\text{equação 18})$$

onde:



- k_p e k_q \rightarrow são os parâmetros de sensibilidade da frequência para a potência ativa e reativa, respectivamente.

A razão do reduzido interesse por parte dos pesquisadores em relação à dependência da carga com a frequência deve-se ao fato de que dificilmente consegue-se dissociar a variação da carga com a frequência, da variação da carga com a tensão. Na maioria dos eventos, a variação da tensão é muito maior (de 0 a 120%) que a variação da frequência ($\pm 3\%$) e a grande parcela da carga rejeitada deve-se à primeira. Assim, normalmente a excursão da frequência não é considerada nos modelos, exceto nos casos onde se exija uma precisão absoluta de resultados dos estudos. Porém, a dependência da frequência é conhecida como uma importante contribuição para colapsos nos sistemas elétricos de potência.

Em 1969, Kent [44] alerta que muito pouco se sabe sobre o comportamento da carga com a frequência e como regra geral recomenda o uso de uma variação linear de 1 % da carga ativa para cada 1 % de variação na frequência.

Araújo [3], em 1974, conclui que o efeito da variação da carga com a frequência ocasiona sempre amortecimento positivo nas oscilações das máquinas. Segundo o autor o valor da $\frac{dP}{df}$ deve ser maior que 1 para cargas industriais, sendo próxima a este valor quando a parcela de motores for pequena, e próximo ou superior a 2 quando a carga for composta por uma grande parcela de motores.

Concórdia [15], em 1982, e Taylor [66], em 1994, afirmam em seus artigos que a potência ativa da carga apresenta um valor de $k_p \cdot \left(\frac{dP}{df} \right)$ positiva, enquanto que a potência reativa apresenta um valor de $k_q \cdot \left(\frac{dQ}{df} \right)$ negativa. Ou seja, a potência ativa diminui com a diminuição da frequência, enquanto que a potência reativa aumenta com a diminuição da frequência.

Concórdia [15] destaca ainda que foram observadas em algumas situações um aumento acentuado na potência reativa quando a frequência estava diminuindo e a tensão aumentando, o que indica saturação magnética de transformadores. Este evento também tinha sido observado no ano anterior por Ihara [37] durante testes realizados em circuitos de 230kV do sistema elétrico da Dakota do Norte.



Com base nos dados da carga da Rochester Gas e Electric, Ribeiro [60], em 1982, apresenta valores de $\frac{dP}{df}$ e $\frac{dQ}{df}$ para os períodos de inverno e verão dos diversos componentes da carga residencial.

Frantz [24], em 1984, apresenta resultados interessantes sobre grandes excursões de frequência (de 56,9 a 63,0 Hz) e o comportamento das potências ativa e reativa, durante os períodos de inverno e verão, nos sistemas da Long Island Lighting Company (LILCO) e RGeE.

Ainda seguindo o enorme interesse, assim como a grande indefinição de um consenso neste assunto, em 1993, o IEEE Task Force [35] publica um artigo onde tenta nivelar todos os leitores sobre o assunto. Neste trabalho é apresentada 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 e etc.

II.3.1.4 MODELO COMPOSTO DE CARGA

Em 1975, Quan [57] apresenta um artigo no qual faz considerações sobre os diversos tipos de carga (iluminação, motores, aquecimento e etc.) e fornece valores de $\frac{dP}{dV}$, $\frac{dQ}{dV}$, $\frac{dP}{df}$ e $\frac{dQ}{df}$ para essas cargas. O autor apresenta ainda um modelo, denominado modelo composto de carga, no qual é feita a combinação dos vários tipos e classes de cargas. Este modelo é expresso pelas seguintes equações:

$$P(\bar{V}) = P_o (\bar{V})^A . (\bar{f})^B \quad (\text{equação 19})$$

$$Q(\bar{V}) = Q_o (\bar{V})^C . (\bar{f})^D \quad (\text{equação 20})$$

onde:

- **A, B, C e D** → 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 compõem a carga total.

Berg [7], em 1973, obtém um modelo composto onde além das características da carga também é levado em conta o efeito dos elementos da rede de distribuição nos parâmetros característicos da carga.

Ihara [37], em 1981, realiza diversos testes em campo no sistema de 230kV de Bismark, Dakota do Norte. Os resultados mostraram que a característica estática da



carga em relação à tensão é praticamente linear para a potência ativa e não linear para a potência reativa.

Frantz [24], em 1984, recorre a dados registrados em uma série de testes realizados para diferentes épocas do ano em duas empresas do sistema elétrico do estado de Nova York (EUA), a RGeE e a LILCO. Com base nos resultados, o autor conclui que para a potência ativa as características estáticas podem ser satisfatoriamente associadas com as características individuais da composição da carga, o que veio a reforçar o modelo desenvolvido por Quan [57], em 1975. Porém, para a parcela reativa da carga, o autor afirma que as características estáticas da carga dependem não só da sua composição e da característica de seus componentes, como também da característica dos capacitores e transformadores de distribuição, o que, por sua vez, vem a confirmar o modelo desenvolvido por Berg [7], em 1973.

Em 1985, Ohyama [53], com base em dados obtidos em campo, analisa a influência das horas do dia e dos meses do ano nos parâmetros da carga e propõe um modelo de carga semelhante ao modelo composto apresentado por Quan [57], em 1975. Vale ressaltar que nas análises realizadas a variação de frequência sobre a carga não foi levada em conta pelo autor.

Entretanto, todos esses autores ressaltam que o modelo composto de carga somente deve ser aplicado para pequenas variações de frequência e tensão, devido às considerações feitas ao se obter esse modelo.

II.3.1.5 MODELO DE CARGA ESTÁTICO USADO NO PROGRAMA COMPUTACIONAL LOADSYN

Em 1976, o EPRI (Electric Power Research Institute) em conjunto com diversas universidades, pesquisadores e empresas de energia elétrica iniciou um projeto de pesquisa, RP849, a fim de se desenvolver um procedimento para modelagem de carga, no qual as empresas poderiam usar para modelar sua própria carga; o qual é de interesse fundamental para estudos, tanto de fluxo de potência quanto de estabilidade transitória, planejamento e operação dos seus respectivos sistemas.

Desta forma, o programa computacional do EPRI, o Load Model Synthesis (LOADSYN), permite que o usuário prepare os seus modelos de carga para estudos de fluxo de potência e estabilidade. O LOADSYN converte os dados de carga (classes, composição e características) nos parâmetros que geralmente são utilizados nos



programas de fluxo de potência e estabilidade transitória, utilizando o seguinte modelo de carga [56], [35] e [66] :

$$P(\bar{V}, \Delta f) = P_o \left[P_{A1} \cdot (\bar{V})^{k_{PV1}} \cdot (1 + k_{PF1} \cdot \Delta f) + (1 - P_{A1}) \cdot (\bar{V})^{k_{PV2}} \right] \quad (\text{equação 21})$$

$$Q(\bar{V}, \Delta f) = Q_o \left[Q_{A1} \cdot (\bar{V})^{k_{QV1}} \cdot (1 + k_{QF1} \cdot \Delta f) + \left(\frac{Q_o}{P_o} - Q_{A1} \right) \cdot (\bar{V})^{k_{QV2}} \cdot (1 + k_{QF2} \cdot \Delta f) \right] \quad (\text{equação 22})$$

onde:

- $\bar{V} = \frac{V}{V_o}$
- $\Delta f = f - f_o$;
- $V \rightarrow$ tensão do barramento;
- $f \rightarrow$ frequência do barramento;
- $f_o \rightarrow$ frequência nominal;
- V_o, P_o e $Q_o \rightarrow$ condições iniciais da tensão e das potências ativa e reativa.
- $P_{A1} \rightarrow$ parcela da potência ativa que é dependente da frequência;
- $K_{PV1} \rightarrow$ expoente da tensão para a parte da carga ativa que é dependente da frequência;
- $K_{PV2} \rightarrow$ expoente da tensão para a parte da carga ativa que não é dependente da frequência;
- $K_{PF1} \rightarrow$ parâmetro de sensibilidade da frequência para a potência ativa.
- $Q_{A1} \rightarrow$ coeficiente da potência reativa dado pela relação entre a carga reativa inicial sem compensação e a potência ativa inicial (P_o);
- $K_{QV1} \rightarrow$ expoente da tensão para a parte da carga reativa que não é compensada;
- $K_{QV2} \rightarrow$ expoente da tensão para o termo da carga reativa compensada;
- $K_{QF1} \rightarrow$ parâmetro de sensibilidade da frequência para a parte da carga reativa não compensada;
- $K_{QF2} \rightarrow$ parâmetro de sensibilidade da frequência para a compensação reativa.

Como pode ser observado na equação 21, a potência ativa (P) apresenta uma dependência exponencial com a tensão. O primeiro termo da expressão de (P) agrega todos os componentes da carga que são dependentes da frequência, como por



exemplo, motores e lâmpadas fluorescentes, enquanto que o segundo termo representa os componentes que não são dependentes da frequência, por exemplo, aparelhos resistivos.

Assim como a potência ativa (P), a dependência da potência reativa (Q) com a tensão também é exponencial. O primeiro termo da expressão de (Q) é construído usando fator de potência dos componentes individuais da carga e representa a potência reativa consumida por todos os componentes da carga. Já o segundo termo de (Q) é composto da diferença entre o fator potência dos componentes individuais da carga e a potência reativa inicial existente no barramento e representa as perdas reativas e a compensação shunt dos sistemas de subtransmissão e distribuição.

Segundo os autores do programa LOADSYN, para se evitar um valor nulo de potência reativa quando a soma das cargas com as perdas reativas é cancelada pela compensação shunt, a potência reativa (Q) foi normalizada em termos da potência ativa (P_o) ao invés da reativa (Q_o). Com o uso de (P_o) pode-se obter o valor da carga reativa quando a tensão (V) varia, independente da potência reativa inicial ser nula. Entretanto, o uso desta normalização dificulta a utilização direta dos parâmetros do modelo de carga reativa em programas de fluxo de potência e estabilidade transitória.

Sendo assim, o programa LOADSYN converte os modelos obtidos para os modelos tradicionalmente adotados nos programas computacionais de fluxo de potência e estabilidade. O modelo resultante [66] é uma combinação de impedância constante, corrente constante e potência constante, ou seja, o modelo ZIP descrito no item II.3.1.2.

O programa LOADSYN requer que o usuário especifique cada barramento ou área a ser modelada, o percentual de cada classe de carga (residencial, comercial, industrial e etc.), bem como os dados de composição de carga de cada classe (estação do ano, período do dia e etc.). O usuário também tem a opção de usar a base de valores padrão do programa para representação da composição de cada classe. Entretanto, todos esses parâmetros muitas vezes não estão disponíveis ou são de difícil obtenção.

II.3.1.6 MODELO DE CARGA ESTÁTICO USADO NO PROGRAMA COMPUTACIONAL ETMSP

O programa computacional ETMSP (Extended Transient Mid-term Stability Program), também desenvolvido pelo EPRI, adota um modelo estático de carga [35] [46] que se baseia na composição do modelo estático ZIP com o modelo exponencial dependente da frequência. Uma das vantagens deste modelo é que ele oferece



flexibilidade às várias formas de representação de carga, conforme pode ser verificado nas equações a seguir:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 [\mathbf{P}_{ZIP} + \mathbf{P}(\mathbf{V}, \mathbf{f})] \quad (\text{equação 23})$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_0 [\mathbf{Q}_{ZIP} + \mathbf{Q}(\mathbf{V}, \mathbf{f})] \quad (\text{equação 24})$$

sendo:

$$\mathbf{P}_{ZIP} = \mathbf{P}_1 \cdot \bar{\mathbf{V}}^2 + \mathbf{P}_2 \cdot \bar{\mathbf{V}} + \mathbf{P}_3 \quad (\text{equação 25})$$

$$\mathbf{Q}_{ZIP} = \mathbf{Q}_1 \cdot \bar{\mathbf{V}}^2 + \mathbf{Q}_2 \cdot \bar{\mathbf{V}} + \mathbf{Q}_3 \quad (\text{equação 26})$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{V}, \mathbf{f}) = \mathbf{P}_4 \cdot \bar{\mathbf{V}}^{A1} \cdot (1 + k_{PF1} \cdot \Delta \mathbf{f}) + \mathbf{P}_5 \cdot \bar{\mathbf{V}}^{A2} \cdot (1 + k_{PF2} \cdot \Delta \mathbf{f}) \quad (\text{equação 27})$$

$$\mathbf{Q}(\mathbf{V}, \mathbf{f}) = \mathbf{Q}_4 \cdot \bar{\mathbf{V}}^{B1} \cdot (1 + k_{QF1} \cdot \Delta \mathbf{f}) + \mathbf{Q}_5 \cdot \bar{\mathbf{V}}^{B2} \cdot (1 + k_{QF2} \cdot \Delta \mathbf{f}) \quad (\text{equação 28})$$

onde:

- $\bar{\mathbf{V}} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_0}$
- $\Delta \mathbf{f} = \mathbf{f} - \mathbf{f}_0$;
- $\mathbf{V} \rightarrow$ tensão do barramento;
- $\mathbf{f} \rightarrow$ frequência do barramento;
- $\mathbf{f}_0 \rightarrow$ frequência nominal;
- $\mathbf{V}_0, \mathbf{P}_0$ e $\mathbf{Q}_0 \rightarrow$ condições iniciais da tensão e das potências ativa e reativa.
- k_{PF1} e $k_{PF2} \rightarrow$ parâmetros de sensibilidade da frequência para a potência ativa;
- k_{QF1} e $k_{QF2} \rightarrow$ parâmetros de sensibilidade da frequência para a potência reativa;
- $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{B}_1$ e $\mathbf{B}_2 \rightarrow$ expoentes da tensão para a potência ativa e reativa da carga;
- $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4$ e $\mathbf{P}_5 \rightarrow$ parâmetros para a potência ativa, sendo $\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_3 + \mathbf{P}_4 + \mathbf{P}_5 = 1$;
- $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_3, \mathbf{Q}_4$ e $\mathbf{Q}_5 \rightarrow$ parâmetros para a potência reativa, sendo $\mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2 + \mathbf{Q}_3 + \mathbf{Q}_4 + \mathbf{Q}_5 = 1$.

Entretanto, deve-se chamar atenção para o fato de que este modelo, assim como os demais, não é realista para tensões baixas.



II.3.1.7 OUTROS MODELOS ESTÁTICOS DE CARGA

Alder [2], em 1970, realizou uma série de testes nos laboratórios do Edison Electric Institute, a partir dos quais obtém expressões para as potências ativa e reativa de cada componente de carga testado, ou seja, pequenas unidades de ar condicionado, lâmpadas fluorescentes e motores de indução de 150HP. Estas expressões estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 Modelos Estáticos para Componentes de Carga

COMPONENTE DE CARGA	EXPRESSÕES MATEMÁTICAS	
	POTÊNCIA ATIVA (P)	POTÊNCIA REATIVA (Q)
AR CONDICIONADO (Pequenas Unidades)	$P = 2,97 - 4,00.(V) + 2,02.(V)^2$	$Q = 12,9 - 26,8.(V) + 14,9.(V)^2$
LÂMPADA FLUORESCENTE	$P = 2,18 + 2,86.(V) - 1,45.(V)^{-1}$	$Q = 6,31 - 15,6.(V) + 10,3.(V)^2$
MOTOR DE INDUÇÃO	$P = 0,72 + 0,109.(V) + 0,17.(V)^2$	$Q = 2,08 + 1,63.(V) - 7,60.(V)^2 + 4,89.(V)^3$

Venikov [82], em 1977, analisou o comportamento estático de diferentes tipos de cargas elétricas. Neste trabalho, o autor apresenta também uma aproximação, através de curvas, da característica estática de cargas compostas e analisa os vários elementos que a influenciam. O autor afirma então, que a variação nas potências ativa e reativa podem ser representadas pelas seguintes expressões:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial V} . \Delta V + \frac{\partial P}{\partial f} . \Delta f \quad (\text{equação 29})$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial V} . \Delta V + \frac{\partial Q}{\partial f} . \Delta f \quad (\text{equação 30})$$

onde:

- $\frac{\partial P}{\partial V}$ → Coeficiente de regulação da tensão para a potência ativa, expresso em pu.
Geralmente, estes coeficientes encontram-se entre 0,30 e 0,75;
- $\frac{\partial Q}{\partial V}$ → Coeficiente de regulação da tensão para a potência reativa, expresso em pu.
Usualmente, estes valores assumem um valor entre 1,50 e 3,50;



- $\frac{\partial P}{\partial f}$ → Coeficiente de regulação da frequência para a potência ativa, expresso em pu. Os valores típicos deste coeficiente costumam assumir valores de 1,50 a 3,0;
- $\frac{\partial Q}{\partial f}$ → Coeficiente de regulação da frequência para a potência reativa, em pu. Este coeficiente costuma assumir valores de 1 a 5 ou 6.

Todos esses valores foram obtidos através da linearização em torno do ponto de operação, das curvas apresentadas. Entretanto, é importante ressaltar que as expressões apresentadas somente são válidas para pequenas variações na tensão e na frequência de alimentação das cargas.

Com base em resultados de testes, nos quais foram obtidas grandes quedas de tensão e excursões de frequência em um sistema de potência isolado no sudeste da Noruega, em 1972, Berg [6] apresenta valores para os parâmetros característicos de modelos estáticos para cargas comerciais, residenciais e industriais (fábricas de alumínio e de fornos elétricos). O modelo geral adotado foi o mesmo utilizado por Venikov [82], entretanto foi assumida uma dependência da carga com a tensão e com a frequência na forma exponencial.

Em 1984, o seguinte modelo estático de carga, baseado em dados de campo, foi apresentado na discussão do artigo de Frantz [24], por McGee e Shackshaft:

$$P = P_S \cdot V^2 + P_M \cdot V^0 \quad (\text{equação 31})$$

$$Q = Q_S \cdot V^2 + Q_{SAT} \cdot V^N + Q_M \cdot V^{-2} \quad (\text{equação 32})$$

onde:

- P_S e Q_S → Cargas estáticas ativa e reativa, incluindo as perdas na transmissão;
- P_M → Potência ativa das cargas tipo motores;
- Q_M → Potência reativa das cargas tipo motores;
- Q_{SAT} → Saturação equivalente dos transformadores e motores;
- N → Valor empírico que é considerado como 7 [28].

Em 1987, Lee [47] compara diferentes modelos de carga para estudos de estabilidade e propõem o modelo composto polinomial a seguir:



$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 \cdot (\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_1 \cdot \Delta V + \mathbf{r}_2 \cdot \Delta V^2 + \mathbf{r}_3 \cdot \Delta V^3 + \mathbf{r}_4 \cdot \Delta V^4 + \mathbf{r}_5 \cdot \Delta f + \mathbf{r}_6 \cdot \Delta V \cdot \Delta f) \quad (\text{equação 33})$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_0 \cdot (\mathbf{s}_0 + \mathbf{s}_1 \cdot \Delta V + \mathbf{s}_2 \cdot \Delta V^2 + \mathbf{s}_3 \cdot \Delta V^3 + \mathbf{s}_4 \cdot \Delta V^4 + \mathbf{s}_5 \cdot \Delta f + \mathbf{s}_6 \cdot \Delta V \cdot \Delta f) \quad (\text{equação 34})$$

Neste trabalho, o autor apresenta ainda coeficientes para nove tipos de carga que podem ser compostas a partir de um modelo agregado.

Para todos modelos estáticos apresentados é fundamental o conhecimento da composição da carga a ser estudada, não só para que haja um dimensionamento correto dos dados de entrada em cada um desses modelos, mas também para que melhor se compreenda os resultados obtidos.

Conforme observado, os modelos estáticos apresentados não são realistas para condições de baixa tensão, o que pode acarretar em 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 da corrente requerida pelas mesmas, provocando novas quedas de tensão, seguidos de novos aumentos de corrente e assim sucessivamente. Nos modelos utilizados nos programas computacionais é normal, quando a tensão cai abaixo de certo valor, que as parcelas de carga que são representadas por potência e corrente constantes sejam 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 da frequência no próprio instante de tempo, mas também utilizam informações passadas dessas grandezas e da própria carga, limitando com isso, por exemplo, os impactos diretos de uma queda de tensão.

Segundo Venikov [82] as características de regime permanente, $\mathbf{P}, \mathbf{Q} = \mathbf{f}(\mathbf{V}, \mathbf{f})$, podem ser aplicadas para variações lentas de tensão e de frequência, enquanto que as características transitórias, $\mathbf{P}, \mathbf{Q} = \mathbf{f}\left(\mathbf{V}, \mathbf{f}, \frac{d\mathbf{V}}{dt}, \frac{d\mathbf{f}}{dt}\right)$, devem ser aplicadas para variações bruscas.

De acordo com Araújo [3], é difícil selecionar um modelo estático de carga que seja conservativo para todas as partes do sistema e para os mais variados distúrbios.

II.3.2 MODELOS DINÂMICOS DE CARGA

Em 1973, o IEEE definiu modelo dinâmico de carga como o modelo que expressa a potência ativa e reativa, em qualquer instante de tempo, como função da



magnitude da tensão e da frequência de instantes anteriores e, normalmente, incluindo o instante presente.

Nos eventos onde as variações de tensão e de frequência são relativamente pequenas e o estado de regime permanente é atingido rapidamente, os modelos estáticos apresentados no item anteriores são adequados e justificados, face a sua simplicidade e ao tempo de processamento. Porém, para grandes perturbações no sistema é necessário que o comportamento dinâmico da carga seja modelado.

Os próprios componentes da carga apresentam características dinâmicas que devem ser levadas em conta em determinados tipos de estudos, como por exemplo, estudos de estabilidade tensão, ilhamentos de sistemas, oscilações entre áreas, estabilidade de longo termo, rejeição de carga, auto-excitação, ressonância sub-síncrona e etc. Em estudos de sistemas industriais ou em sistemas onde haja elevada concentração de motores também é necessário que se representem as características dinâmicas dos componentes de carga.

Em 1993, Kundur [46] relatou em seu livro uma série de observações com relação ao comportamento dinâmico dos componentes da carga de um sistema elétrico de potência, dentre os quais os seguintes componentes merecem destaque:

- Da energia suprida por um sistema elétrico de potência, de 60 a 70 % é consumida por motores. Desta forma, o comportamento dinâmico dos motores é normalmente o aspecto mais significativo das características dinâmicas da carga do sistema;
- Lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio, vapor de sódio e lâmpadas fluorescentes) que se extinguem a baixo de um determinado valor de tensão (0,70 a 0,80 pu) e religam com 1 ou 2 segundos de retardo, quando a mesma se recupera. Estes tipos de lâmpada são muito utilizados em iluminação pública e iluminação industrial;
- Operação de relés de proteção, como por exemplo, relés térmicos e de sobrecorrente;
- Contatores eletromagnéticos e partida de motores que desligam os mesmos, em poucos ciclos, quando a tensão cai a baixo de um determinado valor (entre 0,75 e 0,55 pu);
- Cargas com controle termostático (aquecedores ambiente, ar condicionado, aquecedores de água, refrigeradores) que operam mesmo em condições de subtensão. Aparelhos de ar condicionado e refrigeradores também apresentam estas características para condições de subfrequência;
- Respostas de controle automático de tapes em transformadores de distribuição, reguladores de tensão e banco de capacitores automáticos controlados por tensão normalmente não são modelados na maioria dos estudos de estabilidade. Nestes casos, seus efeitos devem ser



levados em conta na representação da carga na barra de suprimento. A ação desses controles começa aproximadamente 1 (um) minuto após a alteração da tensão e entre 2 (dois) e 3 (três) minutos estes dispositivos restauram a tensão na barra, dentro de seus limites de capacidade.

Em 1972, Maurício [50] afirma que a representação por impedância constante de determinadas cargas tem efeito acima de 30% no limite de estabilidade e que motores de indução, em muitos casos, podem reduzir a estabilidade do sistema.

Neste mesmo ano, o Power System Engineering Committe (PSEC) [55] compara diferentes modelos dinâmicos de carga, através de resultados de estudos de estabilidade.

Ainda em 1972, Iliceto [39] compara resultados de testes realizados em campo e em laboratório e conclui que o modelo estático de carga não é adequado para situações onde ocorrem grandes quedas de tensão no sistema, devendo, portanto, ser utilizados modelos com base em equações diferenciais ou como função do tempo (modelo dinâmico).

Meyer [51] , em 1982, apresenta estudos que mostram que o modelo de carga pode variar o limite de estabilidade de um sistema de potência em mais de 50%.

Ferreira [19], em 1997, realiza testes e conclui que o Modelo ZIP não representa apropriadamente a dinâmica da carga. O autor ressalta ainda que a complexa composição das cargas faz com que o seu comportamento dinâmico seja difícil de ser representado por um modelo matemático.

De forma geral, as variações de potência ativa e reativa da carga podem ser expressas basicamente pelo seguinte modelo [6] [82]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial f} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial f} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (\text{equação 35})$$

onde:

- ΔP e ΔQ \rightarrow Variações de potência ativa e reativa da carga, respectivamente;
- ΔV e Δf \rightarrow Variações de tensão e frequência, respectivamente;



- $\frac{\partial P}{\partial V}$, $\frac{\partial P}{\partial f}$, $\frac{\partial Q}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial f}$ → Coeficientes de regulação. Neste caso estes coeficientes não assumem valores constantes como no modelo estático de carga.

II.3.2.1 MODELOS DE MOTORES DE INDUÇÃO

Em 1957, Brereton [8] destaca que os motores de indução, normalmente, constituem a grande maioria das cargas industriais. Por este motivo, o autor sugere que a representação dinâmica da carga elétrica seja realizada através de equações dinâmicas do motor de indução e ressalta que a inclusão dessas equações nos programas de estabilidade não é um desafio fácil.

Em 1982, Concordia [15] afirma que as características dinâmicas dos motores têm sido as mais estudadas dinamicamente, não só para avaliar seus impactos no desempenho do sistema, mas também para se garantir uma operação estável dos motores em si. Assim como Bereton [8], Concordia ressalta que a modelagem na forma de motores de indução apresenta a facilidade de ser incorporada nos programas computacionais.

Conforme menção do Grupo de Engenharia de Sistemas (GESIS) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) [67], 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. Observa-se que através de uma simples redução do circuito elétrico equivalente do motor chega-se ao modelo estático de carga (impedância constante).

Entretanto, a grande quantidade e variedade de motores tornam as representações individuais praticamente impossíveis. A solução óbvia para este problema seria o agregamento dos motores de pequeno e médio porte em um único modelo de motor equivalente.

II.3.2.1.1 TÉCNICAS PARA AGREGAÇÃO DE MOTORES EM UMA UNIDADE EQUIVALENTE

O problema da representação desses motores em um único modelo se resume em como agregar a grande variedade de motores, de forma que seja reproduzido adequadamente o seu comportamento dinâmico.

Ao longo do tempo, vários métodos para agregação de motores em uma unidade equivalente têm sido propostos, diferindo apenas nas variáveis do modelo agregado e na inclusão de parâmetros específicos que nem sempre apresentam efeitos significativos nos resultados. Dentre outros, pode-se destacar, por exemplo, os métodos desenvolvidos por Abel Haking [1] em 1976, Rahim [58] em 1987, Franklin [22] em 1994 e 1997 [23], e Lem [48] também em 1994.

A seguir é mostrada uma técnica básica para agregação de motores, onde são considerados dois motores operando em paralelo, conforme Figura 7.

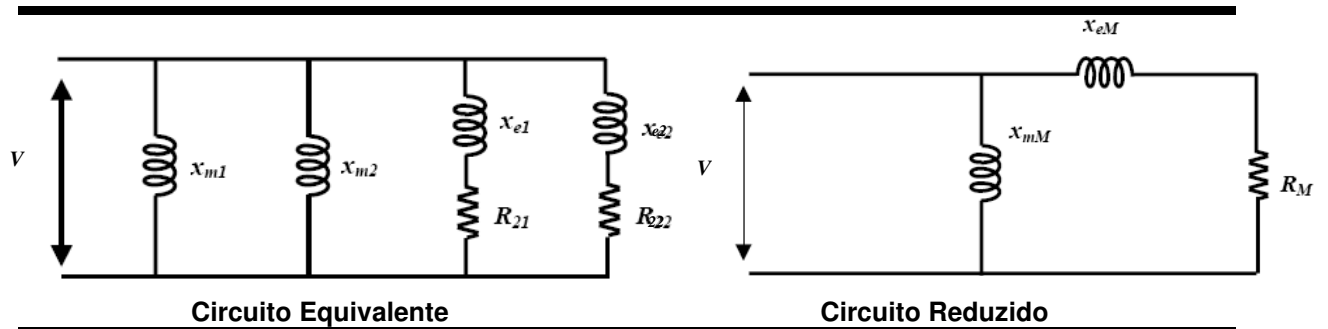


Figura 7 Circuito Equivalente de Dois Motores em Paralelo.

Onde:

$$X_{mM} = \frac{X_{m1} \cdot X_{m2}}{X_{m1} + X_{m2}} \quad (\text{equação 36})$$

- X_{mM} → Reatância de magnetização do motor equivalente;
- X_{m1} e X_{m2} → Reatâncias de magnetização dos motores 1 e 2, respectivamente.

$$R_M = \frac{R_{21}(X_{e2}^2 + R_{22}^2) + R_{22}(X_{e1}^2 + R_{21}^2)}{(R_{21} + R_{22})^2 + (X_{e1} + X_{e2})^2} \quad (\text{equação 37})$$

$$X_{eM} = \frac{X_{e1}(X_{e2}^2 + R_{22}^2) + X_{e2}(X_{e1}^2 + R_{21}^2)}{(R_{21} + R_{22})^2 + (X_{e1} + X_{e2})^2} \quad (\text{equação 38})$$

Em 1974, Iliceto [40] propõem que pequenos e médios motores (da ordem de 0,75 à 200kW) sejam agrupados por classe de potência e que desta forma seja traçado o comportamento de cada classe. Neste modelo agregado, os parâmetros são calculados pelas médias ponderadas dos parâmetros de cada motor que compõem determinada classe. Segundo o autor, a constante de inércia (H) e a constante de tempo (T'do) são os parâmetros de maior influência no comportamento de grandes motores. Entretanto, devido ao grande trabalho para levantamento dos dados necessários, o autor

afirma que o uso do modelo agregado só é justificável para cargas consideradas críticas em termos de estabilidade.

Frowd [25], em 1982, apresenta um trabalho no qual foi determinado o comportamento dinâmico de motores de uso residencial e um modelo para sua representação em cargas residenciais alimentadas por subestações de distribuição. Os resultados obtidos com o modelo proposto foram comparados com respostas obtidas em testes, os quais foram realizados para regime permanente através de mudanças de tapes, variando a tensão entre 0,950 e 1,100 pu e para comportamento dinâmico da carga utilizando-se abertura / fechamento de disjuntor.

Em 1994, Franklin [22] apresenta uma técnica para agregação de motores baseada na carga mecânica do motor e na constante de inércia equivalente. Assim como Iliceto [40] o objetivo do autor era desenvolver um modelo que representasse, por classe de potência, os grupos de motores equivalentes.

Ainda neste ano, Taleb [65] apresenta uma técnica para agrupamento de motores de indução, usando o teorema de Thévenin e algumas características transitórias do motor para cálculo dos parâmetros do motor equivalente. Não foram apresentados resultados de testes, mas foi feita uma comparação do modelo proposto com modelos publicados em outros trabalhos.

II.3.2.1.2 MODELO DE CARGAS DINÂMICAS DO PROGRAMA LOADSYN

Em 1988, Price [56] representa no Programa Loadsyn (EPRI) as cargas com características dinâmicas na forma de um simples modelo de motor de indução; como indicado na Figura 8.

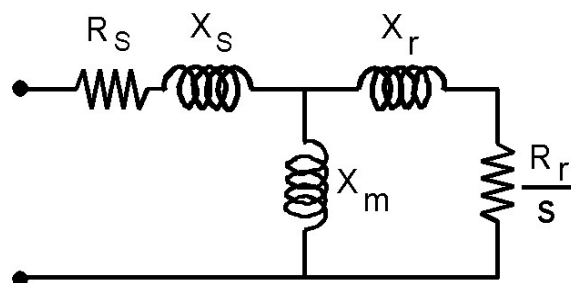


Figura 8 Circuito Equivalente do Motor de Indução.

Os parâmetros R_s , X_s , X_m , R_r , X_r e s da figura acima são os mesmos definidos no item II.3.2.2.



O modelo considera a dinâmica do motor de indução como função da velocidade e a representa conforme a equação a seguir:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} [T_M(\omega_r) - T_E(s)] \quad (\text{equação 39})$$

onde:

- $H \rightarrow$ Constante de inércia do motor;
- $T_E \rightarrow$ Torque elétrico do motor;
- $s \rightarrow$ Escorregamento;
- $T_M \rightarrow$ Torque mecânico do motor;
- $\omega_r \rightarrow$ Velocidade do rotor.

Onde o torque mecânico do motor (T_M) em função da velocidade do rotor (ω_r) é dado pela seguinte equação:

$$T_M = T_{M0} (A\omega_r^2 + B\omega_r + C) \quad (\text{equação 40})$$

Sendo:

- $A \rightarrow$ Parcela da carga mecânica proporcional ao quadrado da velocidade do rotor;
- $B \rightarrow$ Parcela da carga mecânica proporcional a velocidade do rotor;
- $C \rightarrow$ Parcela da carga mecânica que independe da velocidade do rotor;
- $T_{M0} \rightarrow$ Carga mecânica inicial.

Neste modelo pode-se observar uma evolução da dinâmica do motor com relação ao modelo proposto por Sabir [62], que é apresentado posteriormente no item II.3.2.2.1.

Para este tipo de modelo, os parâmetros do motor equivalente são definidos pelo agregado dos parâmetros de cada motor e ponderados segundo a potência individual de cada unidade.

Para validação do modelo foram realizadas comparações entre os resultados de testes dinâmicos em campo e simulações utilizando o modelo em questão. Apesar de ter sido verificada uma diferença nos valores de pico de potência ativa e reativa durante o período transitório, o modelo apresentou desempenho satisfatório, podendo ser verificado inclusive, uma boa concordância entre os demais valores obtidos. Os autores atribuem a diferença encontrada à modelagem de outros elementos do sistema.

Ainda em 1988, Vaahedi também realiza comparações entre dados de eventos ocorridos e resultados de simulações com o programa LOADSYN. Neste trabalho destacam-se significativas diferenças entre os modelos estático e dinâmico do programa LOADSYN, principalmente nos eventos onde foram verificadas grandes variações de tensão e frequência.

II.3.2.2 MODELOS COMPOSTOS (MOTOR DE INDUÇÃO + CARGA ESTÁTICA)

II.3.2.2.1 MODELO COMPOSTO POR MOTOR DE INDUÇÃO E CARGA ESTÁTICA (RC)

Em 1982, Sabir [62] analisou dados coletados no Sistema da Ontário Hydro e propõe um modelo para representação adequada de cargas industriais, composto por um motor de indução associado a uma carga estática (RC). A Figura 9 ilustra o modelo desenvolvido.

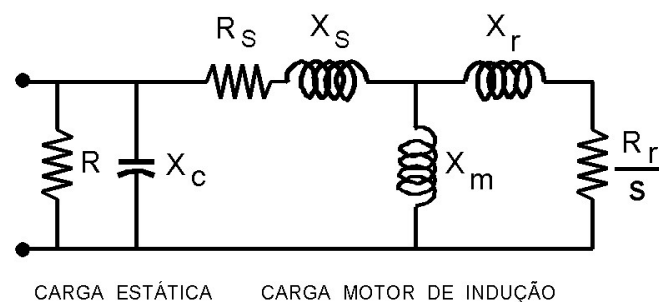


Figura 9 Carga Composta (Motor de Indução + Carga Estática).

onde:

- **Rs** → Resistência do estator;
- **Xs** → Reatância de dispersão do estator;
- **Xm** → Reatância mútua do estator / rotor (magnetização);
- **Rr** → Resistência do rotor (referida ao estator);
- **Xr** → Reatância de dispersão do rotor (referida ao estator);
- **R** → Carga estática representada no barramento;
- **Xc** → Carga estática representada no barramento;
- **s** → Escorregamento do motor $\left(s = \frac{\omega_S - \omega_R}{\omega_S} \right)$;



- $\omega_s \rightarrow$ Velocidade angular do campo magnético do estator (velocidade síncrona);
- $\omega_r \rightarrow$ Velocidade angular elétrica do rotor.

A dinâmica do motor de indução é dada por:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} [T_E - T_L] \quad (\text{equação 41})$$

Onde:

- $T_E \rightarrow$ Torque elétrico do motor;
- $T_L \rightarrow$ Torque mecânico da carga;
- $H \rightarrow$ Constante de inércia do motor (constante de tempo).

Como não há informação disponível da carga conectada ao motor, considera-se o torque mecânico da carga sendo dado pela seguinte equação:

$$T_L = K(1-s)^n \quad (\text{equação 42})$$

Onde:

- η e $K \rightarrow$ Variáveis independentes.

Os parâmetros deste modelo são classificados como independentes ou dependentes. Os parâmetros independentes R_s , X_s , X_m , R_r , X_r , H , η e k são estimados utilizando o método dos mínimos quadrados, usando como dados as respostas (da tensão e da potência ativa e reativa) de eventos ocorridos no sistema. Os parâmetros dependentes R , X_c , e s são determinados a partir dos parâmetros independentes de modo a garantir o ponto de operação do modelo em regime permanente.

O autor afirma que o sucesso deste método depende da habilidade de se obter os parâmetros do modelo através de informações obtidas dos mais variados eventos ocorridos no sistema.

São apresentados resultados para a modelagem de duas fábricas de papel, sendo a carga destas compostas por motores de indução e por motores síncronos, os quais por sua vez estão conectados a uma série de cargas mecânicas. Os resultados mostram um desempenho satisfatório para o modelo escolhido. Também pode-se observar que os valores de potência ativa obtidos através do modelo apresentaram uma maior concordância com os valores de campo, do que as respostas para potência reativa.



O modelo agregado para motores de indução tem uma boa aceitação por grande parte dos autores, porém alguns divergem com relação à necessidade da sua melhor representação.

Em 1984, Rogers [58] utiliza o mesmo modelo acima, porém a obtenção dos parâmetros é feita de uma outra forma. Com exceção de H e s todos os parâmetros são obtidos de valores de regime permanente da carga a ser representada e dos dados de especificação dos motores. A escolha da constante de inércia (H) e do escorregamento (s) do motor é feita de forma a otimizar o comportamento dinâmico do modelo. O modelo desenvolvido foi testado a partir de simulações de curto-circuito trifásico no sistema de 39 barras do IEEE (New England) e mostrou-se eficiente para este tipo de perturbação.

Em 1994, Lem [48] comparou medidas realizadas em laboratório com simulações usando o modelo agregado de Rogers [59], para variações de tensão no sistema. As simulações foram realizadas com modelos de terceira e quinta ordem para o motor de indução. Onde no modelo de terceira ordem é representado somente transitório do rotor, enquanto que o modelo de quinta ordem representa tanto os transitórios do rotor quanto o do estator. De acordo com resultados das simulações realizadas, o modelo de quinta ordem apresentou um desempenho bem superior com relação às respostas transitórias do modelo de terceira ordem. O autor afirma que o modelo de terceira ordem pode ser usado para prognosticar variações grosseiras, porém quando o número de motores é maior recomenda-se que também sejam representados os transitórios do estator (modelo de quinta ordem).

Ainda em 1994, Wang [83] inclui no modelo composto anterior os parâmetros dependentes da frequência e realiza testes para pequenas variações de frequência. As respostas obtidas, considerando ou não a influência da frequência foram bastante semelhantes. Por este motivo o autor afirma que há a necessidade de se avaliar o desempenho do modelo em questão para grandes variações de tensão, frequência e corrente.

Seguindo os passos de Kao [41], em 1997, Chiang [12] usa medidas de campo para desenvolver um modelo composto ZIP mais motor de indução, onde os parâmetros foram obtidos através de um algoritmo baseado no método de gradiente conjugado. Para o motor de indução foi adotado um modelo de terceira ordem. A validação do modelo foi feita a partir de dados de eventos ocorridos no sistema de 161/69kV da Taiwan Power Company. De acordo com os resultados encontrados, o



modelo desenvolvido apresentou desempenho satisfatório, representando com precisão os comportamentos estático e dinâmico da carga.

II.3.2.2.2 MODELO COMPOSTO LINEARIZADO (MOTOR DE INDUÇÃO + CARGA ESTÁTICA)

Em 2001, a partir da combinação de um motor de indução com uma carga estática, Daí [17] desenvolve o seguinte modelo de carga linearizado de primeira ordem:

$$\Delta P = \frac{b_1 s + b_0}{s + a_0} \Delta V \quad (\text{equação 43})$$

$$\Delta Q = \frac{b_2 s + b_3}{s + a_1} \Delta V \quad (\text{equação 44})$$

onde:

- b_0, b_1, b_2, b_3, a_0 e $a_1 \rightarrow$ Parâmetros a serem determinados;
- $s \rightarrow$ Operador de Laplace;
- $\Delta V \rightarrow$ Variação da tensão;
- $\Delta P \rightarrow$ Variação da potência ativa da carga;
- $\Delta Q \rightarrow$ Variação da potência reativa da carga.

Este modelo de carga linearizado não leva em conta as variações de frequência do sistema e seus parâmetros são obtidos através do método dos mínimos quadrados. Para validação do modelo em questão foram realizados testes e os resultados obtidos mostraram um desempenho satisfatório. Entretanto, o autor o recomenda apenas para variações de tensão de até 20%.

II.3.2.2.3 ESTUDOS COMPARATIVOS ENVOLVENDO MODELOS COMPOSTOS DE CARGA

Kao [41], em 1994, apresenta um trabalho no qual é feita uma comparação entre dois modelos estáticos e um modelo composto de carga dinâmica, cujos parâmetros foram obtidos através do programa LOADSYN. Os modelos estáticos avaliados foram o exponencial e o ZIP. Já o modelo dinâmico era composto por um motor de indução associado a uma carga estática ZIP. O resultado desta avaliação mostrou um desempenho superior para o modelo composto, quando comparado com os demais. Para validação dos resultados deste estudo foram usados dados do sistema de 161 kV da Taiwan Power Company.

No ano seguinte, Kao [42] apresenta outro estudo comparativo envolvendo modelos dinâmicos de carga. Desta vez, avaliou-se o desempenho do modelo composto



de motor de indução mais carga estática e de dois modelos de motor de indução, o primeiro com um único motor e outro com dois motores. Mais uma vez os parâmetros dos modelos testados foram obtidos através do programa LOADSYN. O autor realiza simulações para faltas trifásicas e oscilações de baixa frequência e compara os resultados com dados de eventos registrados no sistema elétrico da Taiwan Power Company. Foi concluído que apesar dos modelos dinâmicos com um e dois motores de indução aumentarem a precisão dos resultados das simulações, o modelo composto por motor de indução mais carga estática apresentou melhores resultados.

Ferreira [21], em 1999, desenvolve um modelo agregado, denominado MITZIP, composto por um modelo de motor de indução mais um modelo de carga ZIP. Os parâmetros deste novo modelo foram obtidos a partir do método de “recozimento simulado”, baseado em busca Heurística. Neste trabalho, os autores desenvolvem nove modelos agregados MITZIP, conforme apresentado a seguir:

- Modelos de motor de indução (MIT);
- Modelos de motor de indução agregado a uma carga de impedância constante (MIT + Z);
- Modelos de motor de indução agregado a uma carga de impedância, corrente e potência constantes (MIT + ZIP).

O motor de indução foi modelado, com maior ou menor complexibilidade, através de modelos de primeira, terceira e quinta ordem.

Os modelos desenvolvidos foram testados através de dados de eventos ocorridos no barramento de uma subestação de 138kV, composta predominantemente por cargas industriais, e comparados com o modelo ZIP (item II.3.1.2) e com o modelo linear desenvolvido por Dovan [18] em 1987. Os resultados mostraram que desempenho do modelo MITZIP é bem próximo do comportamento do modelo ZIP, e que este não é competitivo, pois sempre apresenta desempenho inferior ao modelo linear.

Balanathan [4], em 1999, faz uma comparação entre o desempenho do modelo de carga de motor de indução de terceira ordem e do modelo de carga genérico de primeira ordem nos estudos para se desenvolver um esquema de corte de carga em situações de instabilidade de tensão no sistema. Os resultados obtidos mostraram que o uso do modelo genérico implica num corte de carga de duas a três vezes maior que a quantidade calculada utilizando o modelo proposto. Os autores concluíram que o modelo genérico não reproduz o verdadeiro comportamento dos motores de indução e recomendaram a aplicação do modelo de carga de motor de indução de terceira ordem



toda vez que a carga fosse constituída por motores de indução ou quando se conhecer a proporção das cargas de motor de indução em uma carga agregada.

Em 2003, Corrêa [16] realiza um estudo comparativo entre os desempenhos da modelagem estática (ZIP), dinâmica (motor de indução) e composta (motor de indução + ZIP) para as cargas da Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro (CERJ), na época, uma das empresas de distribuição da Área Rio de Janeiro / Espírito Santo. Para representação da carga desta empresa foram efetuados levantamentos, por subestação, da participação de cada classe de carga (residencial, comercial, industrial e rural) na carga total da empresa. A área geoeletrica da CERJ caracterizava-se pela forte participação da classe residencial, que representava cerca de 70% da sua carga total. Através de simulações utilizando as ferramentas computacionais ANAREDE e ANATEM, foram analisados dois eventos de grande porte, envolvendo principalmente a área Rio de Janeiro / Espírito Santo. Os resultados obtidos mostraram que o modelo composto apresentou melhor desempenho dentre os modelos estudados, visto que este considera, em cada classe de carga, não só a participação dos motores de indução, mas também de outros tipos de carga, como iluminação. A autora ressalta que a grande dificuldade encontrada durante o trabalho foi, sem dúvida, o levantamento de dados, tanto relativos a própria carga (distribuição por classe de carga, parâmetros de motores) como os dados registrados de eventos ocorridos, bem como a inclusão destes dados nos programas computacionais utilizados.

II.3.2.3 MODELO DINÂMICO DESENVOLVIDO POR SRINIVASAN (MODELO CANADENSE)

Em 1979, Srinivasan [63] afirma que há uma realimentação entre as saídas de potência ativa (P) e reativa (Q) da carga e os valores de entrada (V e f) da mesma, ou seja, que variações na carga (P e Q) causam subseqüentes variações na tensão e na frequência, assim como variações na frequência provocam variações na carga. Com base nisso o autor propõe um modelo dinâmico de carga completamente diferente dos modelos até então apresentados e estudados. O modelo proposto pelo autor é conhecido na literatura como Modelo Canadense ou Modelo da Hydro-Quebec.

Partindo das equações de modelos lineares:

$$\frac{\Delta P}{P} = n_p \frac{\Delta V}{V} + m_p \frac{\Delta f}{f} + \omega_1 \quad (\text{equação 45})$$



$$\frac{\Delta Q}{Q} = n_q \frac{\Delta V}{V} + m_q \frac{\Delta f}{f} + \omega_2 \quad (\text{equação 46})$$

o autor propõe as seguintes equações baseadas na existência de realimentação entre as potências ativa e reativa (carga) e a tensão e a frequência (excitação):

$$\frac{\Delta V}{V} = s_p \frac{\Delta P}{P} + s_q \frac{\Delta Q}{Q} + \omega_3 \quad (\text{equação 47})$$

$$\frac{\Delta f}{f} = l_p \frac{\Delta P}{P} + l_q \frac{\Delta Q}{Q} + \omega_4 \quad (\text{equação 48})$$

onde:

- $s_p \rightarrow$ Parâmetro da resposta de potência ativa (P) a perturbações na tensão (V);
- $s_q \rightarrow$ Parâmetro da resposta de potência reativa (Q) a perturbações na tensão (V);
- $l_p \rightarrow$ Parâmetro da resposta de potência ativa (P) a perturbações na frequência (f);
- $l_q \rightarrow$ Parâmetro da resposta de potência reativa (Q) a perturbações na frequência (f).

Generalizando as equações 47 e 48 em um modelo de série temporal tem-se:

$$\mathbf{A} \mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^n \mathbf{B}_k \cdot \mathbf{x}(t-k) + \boldsymbol{\omega} \quad (\text{equação 49})$$

Expandindo a série de (t) a (t-1) instantes de tempo, ou seja, dois instantes de tempo sucessivos, obtém-se o seguinte grupo de equações:

$$\frac{\Delta P}{P}(t) = b_1 \frac{\Delta P}{P}(t-1) + a_{12} \frac{\Delta Q}{Q}(t) + a_{13} \frac{\Delta V}{V}(t) + a_{14} \frac{\Delta f}{f}(t) + \omega_1 \quad (\text{equação 50})$$

$$\frac{\Delta Q}{Q}(t) = b_2 \frac{\Delta Q}{Q}(t-1) + a_{21} \frac{\Delta P}{P}(t) + a_{23} \frac{\Delta V}{V}(t) + a_{24} \frac{\Delta f}{f}(t) + \omega_2 \quad (\text{equação 51})$$

$$\frac{\Delta V}{V}(t) = b_3 \frac{\Delta V}{V}(t-1) + a_{31} \frac{\Delta P}{P}(t) + a_{32} \frac{\Delta Q}{Q}(t) + a_{34} \frac{\Delta f}{f}(t) + \omega_3 \quad (\text{equação 52})$$

$$\frac{\Delta f}{f}(t) = b_4 \frac{\Delta f}{f}(t-1) + a_{41} \frac{\Delta P}{P}(t) + a_{42} \frac{\Delta Q}{Q}(t) + a_{43} \frac{\Delta V}{V}(t) + \omega_4 \quad (\text{equação 53})$$

onde:

- $\omega_i \rightarrow$ Erro do modelo;
- a_{ij} e $b_i \rightarrow$ Parâmetros a serem determinados pelas equações 54 e 55 a seguir.



$$a_{ij} = \frac{H_{ij}}{H_{ii}} \quad (\text{equação 54})$$

$$b_i = \frac{1}{H_{ii}} \quad (\text{equação 55})$$

As equações 50, 51, 52 e 53 podem ser reescritas na forma da expressão a seguir, que corresponde a um modelo auto-regressivo de primeira ordem.

$$[x(t)] = [A].[x(t - 1)] + \omega(t) \quad (\text{equação 56})$$

Os 16 parâmetros do modelo, correspondentes à matriz A, são estimados a partir de amostras coletadas em campo de valores de tensão (V), frequência (f), potência ativa (P) e reativa (Q).

No trabalho apresentado pelos autores, estes parâmetros foram obtidos a partir de medições realizadas em uma subestação de 120kV do sistema elétrico da Hydro Quebec. Entretanto, não foi realizada nenhuma simulação para mostrar a validade do modelo desenvolvido.

Os autores recomendam que o modelo obtido seja utilizado para pequenas variações em torno do ponto de operação e afirmam que este é válido apenas para variações de até 10%. Para variações acima deste limite é recomendada uma avaliação mais detalhada do modelo.

A implementação deste modelo em programas digitais não é tão direta como no caso do modelo de motor de indução, entretanto a simplicidade da sua expressão torna esta tarefa extremamente fácil. Esta simplicidade também se traduz na possibilidade de se usar o modelo em questão para estudos “on-line”.

Outra vantagem deste modelo é que os componentes da carga não precisam ser conhecidos de forma explícita. A obtenção de parâmetros do modelo depende de medidas de tensão (V), frequência (f), potência ativa (P) e reativa (Q) realizadas diretamente no ponto de onde se deseja representar a carga. A precisão do modelo obtido depende somente da precisão dessas variáveis aquisitadas e da quantidade de medidas realizadas.

Em 1981, Srinivasan [64] apresenta em um outro trabalho um sistema de monitoração de carga que permite a obtenção dos dados necessários para estimação dos parâmetros do modelo.



II.3.2.4 MODELO DINÂMICO GENÉRICO NÃO-LINEAR

Em 1982, Meyer [51] se convence que os modelos estáticos representados nos programas de estabilidades não reproduzem de forma adequada o comportamento dinâmico da carga, e propõem um modelo de carga baseado em equações de espaço de estado lineares, conforme apresentado a seguir.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}.\mathbf{x} + \mathbf{B}.\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}.\mathbf{x} + \mathbf{D}.\mathbf{u}\end{aligned}\tag{equação 57}$$

onde:

- $\mathbf{x} \rightarrow$ Vetor de estado de segunda ordem, pois esta é a ordem mínima para se considerar a dinâmica produzida pela equação de balanço do motor de indução;
- $\mathbf{u} \rightarrow$ Vetor de entrada, que pode ser a tensão, ângulo ou frequência referidos à carga;
- $\mathbf{y} \rightarrow$ Vetor de saída, que pode ser a potência ativa ou reativa da carga ou as componentes real e imaginária da corrente da carga.

Por facilidade de implementação computacional, 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.

Através de diversas simplificações nas equações acima, chega-se à forma final do modelo, o qual apresenta oito parâmetros não conhecidos. Estes parâmetros devem ser determinados a partir de medidas de respostas da carga para eventos nas variáveis de entrada (V e f).

Para determinação dos parâmetros em questão, os autores fizeram uso do método dos mínimos quadrados. Por falta de dados de campo, não foi realizado nenhum teste do modelo obtido com valores reais de distúrbios em sistemas elétricos.

A obtenção dos dados necessários ao cálculo dos parâmetros, foi realizada utilizando um modelo de motor de indução. Nesta situação, os valores encontrados reproduziram com fidelidade as respostas de um motor de indução frente às mesmas variações de tensão.

Da mesma forma, utilizou-se a corrente em uma barra de carga de um pequeno sistema elétrico de potência, obtida a partir da simulação de defeito no mesmo, como dados de entrada e saída para obtenção de novos parâmetros do modelo. Com



estes parâmetros, foram feitos vários estudos e os resultados, segundo os autores, mostraram que o modelo de carga proposto pode modelar de forma satisfatória a dinâmica da carga.

Em 1993, Hill [29] apresenta variações do modelo acima considerando como cargas os motores de indução, a ação de comutadores de tapes e cargas de aquecimento, nas quais foram consideradas apenas modelos de primeira ordem. Os modelos não lineares de carga propostos neste trabalho foram usados em estudos de estabilidade de tensão.

Seguindo a mesma linha de raciocínio de Meyer [51], em 1994, Karlsson [43] propõe o modelo de carga dinâmico a seguir, denominado modelo dinâmico não linear (GNLD).

$$T_p \dot{x}_p = P_s (V) - P_d \quad (\text{equação 58})$$

$$x_p = P_d - P_t (V) \quad (\text{equação 59})$$

sendo:

$$P_s (V) = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{as} \quad (\text{equação 60})$$

$$P_t (V) = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{at} \quad (\text{equação 61})$$

onde:

- **P_o (V)** → Resposta da potência inicial consumida;
- **P_t (V)** → Valor da potência final;
- **V_o** → Tensão nominal da carga nas condições iniciais;
- **P_o** → Potência ativa consumida pela carga nas condições iniciais;
- **T_p** → Constante de tempo de recuperação da potência ativa da carga;
- **as** → Expoente da tensão em regime permanente;
- **at** → expoente da tensão no período transitório.

Para potência reativa, expressões semelhantes podem ser definidas com os respectivos índices (**Q_o**, **bs**, **bt** e **Tq**).



Neste trabalho também são apresentadas comparações entre as respostas obtidas com o modelo e medições realizadas em campo para cargas de inverno e verão, dia e noite, de duas subestações do sistemas elétrico do sul da Suécia.

Em 1995, Milanovic [52] realiza uma série de simulações com um modelo de carga semelhante ao desenvolvido por Karlsson [43]. Os resultados obtidos mostraram que, dependendo dos parâmetros da carga e do sistema, a representação de uma carga dinâmica pode provocar um pior ou melhor amortecimento nas respostas do sistema. Observa-se também que as respostas dinâmicas da carga às variações de tensão têm influência no amortecimento das oscilações eletromecânicas.

Neste mesmo ano, Hiskens [30] também analisa o modelo desenvolvido por Karlsson [43] a fim de se investigar a influência da dinâmica das potências ativa e reativa no amortecimento de um sistema multi-máquinas. Foram consideradas as incertezas da modelagem de carga, variando-se aleatoriamente os parâmetros da carga e determinando o amortecimento para cada conjunto de parâmetros. A influência do fator de potência também foi explorada e dependendo das condições sistêmicas, o comportamento dinâmico da carga reativa será mais significativo que o da carga ativa.

Ainda neste trabalho, Hiskens [30] apresenta as seguintes faixas normais dos parâmetros para o referido modelo:

$$0 \leq a_s \leq 3,0 \qquad 1,5 \leq a_t \leq 2,5 \qquad \text{(equação 62)}$$

$$0 \leq b_s \leq 7,0 \qquad 4,0 \leq b_t \leq 7,0 \qquad \text{(equação 63)}$$

Já as constantes de tempo T_p e T_q variaram de acordo com a carga a ser modelada. Para cargas industriais, agrícolas e de ar condicionado, que são praticamente compostas por motores de indução T_p e T_q ficam na faixa de 0,02 até os primeiros segundos, dependendo da proporção de motores de indução na carga composta total. Para sistemas auxiliares de usinas de força ou indústrias de fundição de alumínio, as constantes de tempo estão na faixa de 0,1 a 0,5 segundos. Para comutadores de tape e outros dispositivos de controle os autores definem as constantes de tempo na faixa de minutos e, para carga de aquecimento na faixa de horas.

Em 1997, Borghetti [5] utiliza dados de um sistema elétrico no sudoeste da Inglaterra para realizar um estudo comparativo entre um modelo dinâmico genérico não-linear de primeira ordem (GNLD) e um modelo agregado composto por um modelo de carga estática exponencial mais um modelo dinâmico de motor de indução de 1ª e 3ª ordens. Os resultados das simulações mostraram que o desempenho do modelo GNLD



não foi o esperado, sendo apenas o modelo composto de 3ª ordem capaz de prever um colapso de tensão. Desta forma, os autores recomendaram um refinamento no modelo GNLD quando da representação dinâmica de cargas que apresentem altas porcentagens de motores de indução.

II.3.2.5 MODELO DINÂMICO LINEAR (MODELO AUSTRALIANO)

Em 1987, Dovan [18] desenvolveu um modelo de carga que além de considerar a influência da tensão e da frequência no comportamento dinâmico da carga também leva em conta fatores externos, como por exemplo: horas do dia, estações do ano, localização geográfica, temperatura e etc.

Os diversos fatores externos considerados tornam as características das cargas variáveis, e por consequência, a estrutura do modelo também acaba sendo variável. O modelo proposto pelos autores apresenta variações nos seus parâmetros, além de permitir modificações na sua estrutura. Para que isso aconteça uma monitoração do desempenho do modelo deve ser incluída paralelamente à estimativa dos parâmetros, de forma que sua estrutura possa ser adequadamente modificada de acordo com o erro do modelo.

O modelo apresentado pelo autor é conhecido na literatura como Modelo Dinâmico Linear ou Modelo Australiano, e apresenta a seguinte estrutura básica:

$$P_k = \sum_{i=1}^{n_p} a_i P_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} b_i V_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_f} c_i f_{k-i} + \varepsilon_k \quad (\text{equação 64})$$

$$Q_k = \sum_{i=1}^{n_q} d_i Q_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} e_i V_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_f} g_i f_{k-i} + \varepsilon_k \quad (\text{equação 65})$$

onde:

- P_k e Q_k → Resposta da carga;
- V_k → Sinal de entrada observado na tensão;
- f_k → Sinal de entrada observado na frequência;
- ε_k → Erro de modelagem;
- a_i → Coeficiente de regressão da potência ativa;
- b_i → Coeficiente de regressão da tensão para a potência ativa;
- c_i → Coeficiente de regressão da frequência para a potência ativa;



- $d_i \rightarrow$ Coeficiente de regressão da potência reativa;
- $e_i \rightarrow$ Coeficiente de regressão da tensão para a potência reativa;
- $g_i \rightarrow$ Coeficiente de regressão da frequência para a potência reativa;
- n_p e $n_q \rightarrow$ Ordem de regressão da potência ativa e reativa;
- $n_v \rightarrow$ Ordem de regressão da tensão;
- $n_f \rightarrow$ Ordem de regressão da frequência.

O número de parâmetros a ser estimado para o modelo proposto é dado pela equação a seguir.

$$n = n_p + n_v + n_f + 2 \quad (\text{equação 66})$$

$$n = n_q + n_v + n_f + 2 \quad (\text{equação 67})$$

Os parâmetros em questão devem ser definidos a partir do método dos mínimos quadrados, para uma série de N observações.

A equação a seguir avalia o desempenho do modelo proposto e é denominada como função custo.

$$J = \frac{N}{N-n} \sum_{i=1}^N [P(k) - \hat{P}(k)]^2 \quad (\text{equação 68})$$

$$J = \frac{N}{N-n} \sum_{i=1}^N [Q(k) - \hat{Q}(k)]^2 \quad (\text{equação 69})$$

onde:

- $\hat{P}(k)$ e $\hat{Q}(k) \rightarrow$ É a saída do modelo usando os parâmetros estimados no instante anterior.

O fator $\frac{N}{N-n}$ favorece o modelo de ordem baixa. Entre modelos com desempenho similar deve-se escolher o de menor ordem, pois este geralmente apresenta melhor capacidade de generalização.

A estrutura do modelo é selecionada levando-se em conta algumas estruturas previamente definidas em função do tipo de carga, horas do dia e estações do ano. Estas estruturas são determinadas “off-line” e são atualizadas de forma progressiva à medida que novas informações são recebidas.



Através da função custo pode-se avaliar o erro do modelo. Quando este valor for elevado, uma nova estrutura deve ser escolhida dentre as que foram previamente selecionadas.

Uma das vantagens do modelo proposto é que este não é limitado em 1ª ordem. O fato deste apresentar ordem variável permite que, em alguns casos, a carga seja melhor representada. Entretanto, a maior dificuldade, que cabe ao usuário, está justamente na definição da ordem do sistema que melhor se adapte a representação dinâmica da carga. Ferreira [19], em 1997, afirma que a seleção da ordem apropriada para este tipo de modelo não é uma tarefa fácil.

Dovan [18] realiza testes com os modelos que ele propôs e conclui que estes são válidos apenas para pequenas perturbações, ou seja, para variações de tensão em torno de 10% e de frequência de 0,1%.

Valgas [81], em 1994, realiza um estudo comparativo entre o modelo estático ZIP e os modelos dinâmicos Canadense [63] e Australiano [18]. A escolha dos modelos canadense e australiano deve-se a semelhança de seus sistemas com o sistema elétrico brasileiro. Tal estudo foi realizado a partir de dados de uma subestação industrial no 138kV da CEMIG. Para o modelo dinâmico de Dovan [18], os autores observaram um erro da ordem de 1% para a potência ativa e de 2,5% para a potência reativa, sendo os erros máximos da ordem de 5,0% e 25,3% respectivamente. Os resultados dos estudos também mostram que o modelo Australiano [18] apresenta um desempenho superior ao modelo Canadense [63] e que ambos apresentam um desempenho bem melhor que o modelo estático ZIP.

Em 2003, o ONS em parceria com a UNIFEI, [67] - [78], iniciou um projeto de medições de carga em oito subestações do SIN. Os dados obtidos foram usados para estimar os parâmetros dos modelos de carga ZIP e Linear. Em 2007, [26], é publicado um trabalho com os resultados preliminares das medições realizadas e os parâmetros estimados a partir das mesmas. O modelo Linear apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo. Apesar dos resultados otimistas, a aplicação do modelo Linear nos estudos de elétricos esbarrava na dificuldade da sua implantação no programa Anatem.



II.3.2.6 MODELO DINÂMICO DESENVOLVIDO POR LIN

Em 1993, Lin [49] segue a mesma linha de Srinivasan [63] e propõe um modelo linearizado de primeira ordem, baseando-se em medidas obtidas do sistema elétrico da Taiwan Power Company, conforme apresentado a seguir.

$$\Delta P(t) = c_1 \Delta P(t-1) + c_2 \Delta f(t) + c_3 \Delta f(t-1) + c_4 \Delta V(t) + c_5 \Delta V(t-1) \quad (\text{equação 70})$$

$$\Delta Q(t) = c_1 \Delta Q(t-1) + c_6 \Delta f(t) + c_7 \Delta f(t-1) + c_8 \Delta V(t) + c_9 \Delta V(t-1) \quad (\text{equação 71})$$

onde:

- $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8$ e $c_9 \rightarrow$ Parâmetros a serem estimados.

No artigo apresentado estes parâmetros foram estimados através do método dos mínimos quadrados.

Os autores realizaram simulações com o modelo obtido e comparam os resultados com dados de eventos ocorridos no 161kV da Taiwan Power Company. O modelo de primeira ordem mostrou-se inadequado para o sistema em questão, principalmente no que se diz respeito ao desempenho da resposta da potência reativa da carga.

Diante desses resultados, os autores resolveram desenvolver outros dois modelos de carga, um de segunda e outro de terceira ordem. Estes modelos mostraram uma melhora considerável no seu desempenho, havendo inclusive, uma diminuição significativa nos erros entre as medidas de campo e os modelos, principalmente no que se refere à potência reativa.

A validação dos modelos propostos mostrou que o modelo de terceira ordem é o mais adequado para o sistema da Taiwan Power Company, apresentado um erro de 1,22% e 0,50% para as potências ativa e reativa, respectivamente.

II.3.2.7 MODELO DINÂMICO SIMPLIFICADO NÃO-LINEAR DE PRIMEIRA ORDEM

Em 1993, Pal [54] utilizou um modelo, denominado modelo dinâmico simplificado não-linear de primeira ordem, para uma representação aproximada dos motores de indução. As duas equações apresentadas a seguir definem a forma básica do modelo utilizado.



$$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{T_g} \left[P(V) - V_0^2 \cdot G \left(\frac{V}{V_0} \right)^n \right] \quad (\text{equação 72})$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{T_b} \left[Q(V) - V_0^2 \cdot B \left(\frac{V}{V_0} \right)^m \right] \quad (\text{equação 73})$$

onde:

- **G e B** → Condutância e susceptância da carga, respectivamente;
- **T_g** → Constante de tempo da carga associada à condutância;
- **T_b** → Constante de tempo da carga associada à susceptância;
- **P(V)** → Componente estática da potência ativa da carga;
- **Q(V)** → Componente estática da potência reativa da carga;
- **n** → Parâmetro do modelo associado à potência ativa da carga;
- **m** → Parâmetro do modelo associado à potência reativa da carga.

Este modelo é recomendado apenas para as condições em que os parâmetros **m** e **n** são maiores ou iguais a 1. Para determinadas condições operativa, o uso de parâmetros menores do que 1 pode levar o modelo proposto a reproduzir resultados contrários aos encontrados na prática.

No ano seguinte, Taylor [66] utiliza o modelo em questão para realizar controles termostático em cargas do tipo energia constante.

II.3.2.8 MODELO DINÂMICO PROPOSTO POR HONGBIN

Em 2002, Hongbin [31], com base em valores obtidos para uma falta ocorrida numa subestação de 220kV do sistema elétrico da China, propõe o modelo dinâmico de carga a seguir:

$$\frac{P(t) - P_0}{P_0} = m_{P1}P(t-1) + m_{P2}P(t-2) + a_{V0} \frac{V(t) - V_0}{V_0} + a_{V1}V(t-1) + a_{V2}V(t-2) \quad (\text{equação 74})$$

$$\frac{Q(t) - Q_0}{Q_0} = m_{Q1}Q(t-1) + m_{Q2}Q(t-2) + b_{V0} \frac{V(t) - V_0}{V_0} + b_{V1}V(t-1) + b_{V2}V(t-2) \quad (\text{equação 75})$$

onde:

- **P₀ e Q₀** → Potência ativa e reativa antes do distúrbio, respectivamente;



- V_o → Tensão antes do distúrbio;
- (t) , $(t - 1)$ e $(t - 2)$ → Instantes de tempo consecutivos;
- m_{P1} , m_{P2} , a_{V0} , a_{V1} e a_{V2} → Parâmetros da potência ativa da carga a serem determinados;
- m_{Q1} , m_{Q2} , b_{V0} , b_{V1} e b_{V2} → Parâmetros da potência reativa da carga a serem determinados.

Nesse artigo também foram apresentados valores para os parâmetros acima. Estes foram determinados através de métodos computacionais, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa da carga.

Os autores realizam ainda um estudo comparativo entre este modelo e o modelo estático polinomial. Foram feitas simulações com os dois modelos e ambos os resultados foram confrontados com dados medidos da corrente de curto circuito. De acordo com as respostas obtidas, pode-se observar que o modelo estático não mostrou um desempenho satisfatório para representação da corrente de curto-circuito, enquanto que o modelo dinâmico proposto apresentou valores mais próximos da realidade.



Capítulo III

PROJETO DE MEDIÇÃO DE CARGAS

Este capítulo dedica-se à apresentação do projeto de medição de cargas, desenvolvido pelo ONS em parceria com a UNIFEI, a partir do qual foram extraídos os dados de medição de campo usados nessa dissertação.

III.1 INTRODUÇÃO

Com objetivo de aprimorar a representação das cargas do sistema elétrico brasileiro, em 2003, o ONS iniciou um projeto de medição de cargas em parceria com a UNIFEI. Na primeira etapa deste projeto foi feita uma análise detalhada dos modelos de carga existentes e utilizados nos programas de transitórios eletromecânicos, bem como foram desenvolvidos três equipamentos de medição, específicos para colher dados de campo sobre o comportamento da carga durante perturbações. A segunda etapa do projeto aconteceu entre os anos de 2004 e 2006, quando foram monitorados e armazenados dados de eventos ocorridos em diferentes tipos de ramais alimentadores de carga, de oito subestações do sistema elétrico brasileiro.

Nos itens III.2 e III.3 são apresentados detalhes técnicos dos equipamentos de medição que foram desenvolvidos para o projeto, assim como informações das subestações e ramais de carga monitorados.

III.2 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

Os três equipamentos de medição foram desenvolvidos com o fim específico de colher dados de campo sobre o comportamento da carga, durante a ocorrência de perturbações no sistema. A Figura 10 mostra a vista frontal de um deles.



Figura 10 Vista frontal do equipamento de medição.

Cada equipamento é capaz de medir as seguintes grandezas elétricas:

- tensões U_{AN} , U_{BN} e U_{CN} ;
- tensões U_{AB} , U_{BC} e U_{CA} ;
- correntes I_A , I_B e I_C ;
- fator de potência das fases A, B e C;
- potência ativa das fases A, B e C;
- potência reativa das fases A, B e C;
- potência aparente das fases A, B e C; e
- frequência do sistema.

Os equipamentos foram desenvolvidos e configurados para trabalhar em tempo real. Uma vez que o medidor é instalado em um ramal de carga, são ajustados valores de disparo para variações de tensão, frequência e potência ativa. Normalmente não se configura valor de disparo para potência reativa, pois a mesma atinge valores muito baixos durante as madrugadas e oscila entre valores positivos e negativos, provocando sucessivos disparos no equipamento.

Durante as medições realizadas foram ajustados os seguintes valores de disparo:

$$\Delta f = 0,3 \text{ Hz} \qquad \Delta U = 2,5\% \qquad \Delta P = 20\%.$$

Cada aparelho mede e digitaliza as ondas de tensão e corrente do ramal de carga monitorado. O processo de digitalização inclui o cálculo dos valores eficazes de tensão, corrente, frequência, potências ativa, reativa e aparente. Entre um ciclo e outro,



são calculadas as variações dessas grandezas e as mesmas são comparadas com os valores de disparo ajustados.

Havendo alguma perturbação que provoque o disparo do aparelho, registram-se em um arquivo os valores eficazes tensão, corrente, potências ativa e reativa e também a frequência, por 20 ciclos anteriores e 1200 ciclos (20s) posteriores ao ocorrido

Cada aparelho tem em seu interior, um micro computador industrial, com disco rígido estático capaz de armazenar aproximadamente 1000 eventos.

Esse tipo de equipamento de medição facilita a aquisição de dados de distúrbios no sistema, não sendo necessária a realização de testes, que além de depender da liberação de um pedido de intervenção, demandam tempo, manobras de equipamentos e mobilização de pessoal.

III.3 MEDIÇÕES REALIZADAS EM CAMPO

Entre os anos de 2004 e 2006, foram monitorados e armazenados dados de eventos ocorridos em ramais alimentadores de oito subestações do sistema elétrico brasileiro. Em cada subestação monitorada, procurou-se instalar os equipamentos de medição em alimentadores com diferentes classes de consumidores. Convém destacar que os aparelhos foram instalados apenas em ramais de carga que operavam em configuração radial.

Na Tabela 7 encontra-se um resumo das subestações e respectivos ramais de carga monitorados.

Tabela 7 Subestações e respectivos alimentadores onde foram realizadas as medições.

SUBESTAÇÕES	EMPRESA	TEMPO MONITORADO	ALIMENTADOR	CLASSE	Nº EVENTOS
SE ITAJUBÁ 138kV	CEMIG	74 dias	Itajubá 138kV	Carga Mista	35
SE RAMON REBERT FILHO 88kV	CTEEP	97 dias	Silvestre 4 - 88kV	Carga Mista	25
			Adelino 2 - 88kV	Carga Mista	49
			Carrão 1 - 88kV	Carga Mista	26
SE TAQUARIL 138kV	CEMIG	98 dias	Santa Efigênia 138kV	Residencial	71
			Nova Lima 138kV	Carga Mista	82
			Ouro Preto 138kV	Industrial *	---



SUBESTAÇÕES	EMPRESA	TEMPO MONITORADO	ALIMENTADOR	CLASSE	Nº EVENTOS
SE FORTALEZA 69kV	CHESF	84 dias	Distrito Industrial II - 69kV	Industrial + Residencial	37
			Mondubim 69kV	Industrial + Residencial	49
			Messejana 69kV	Residencial + Comercial	71
SE BARREIRAS 138/69kV	CHESF	48 dias	Rio Branco 138kV	Carga Mista	22
			Angical 69kV	Carga Mista	34
			Rio Grande 69kV	Carga Mista	24
SE GRAVATAÍ II - 230/69kV	CEEE	41 dias	Viamão2 - 69kV	Residencial	22
			Gravataí 1 - 69kV	Industrial + Residencial	10
			CIAG 230kV	Industrial	04
SE JOINVILLE IV - 138kV	CELESC	42 dias	Compartilhada 138kV	Industrial	12
			Iriirú 138kV	Carga Mista	22
			Geral BT 13,8kV	Residencial	15
SE UMBARÁ 230/69kV	COPEL	44 dias	Pinheirinho 69kV	Comercial + Residencial	18
			Tatuaquara 69kV	Residencial + Industrial	21
			Siderúrgica Guaíra 230kV	Industrial (Siderúrgica)	20

* Os eventos registrados para este alimentador foram desprezados devido a problemas de medição.

A enorme massa de dados obtida através dessas medições permite uma análise detalhada sobre o comportamento das cargas monitoradas, sendo possível estimar modelos estáticos e dinâmicos através de métodos de identificação de sistemas e aprimorar a representação das mesmas.



Capítulo IV

METODOLOGIA ADOTADA PARA ANÁLISE DOS DADOS DE MEDIÇÃO

Este capítulo da dissertação dedica-se à apresentação da metodologia adotada para estimar modelos de carga a partir de dados reais de medição e ao detalhamento da formulação matemática implantada no programa computacional desenvolvido para obtenção dos modelos de carga ZIP e Linear.

IV.1 METODOLOGIA ADOTADA

Duas abordagens têm sido usadas para se obter uma modelagem de carga. A primeira delas é baseada no conhecimento dos componentes individuais e o modelo é obtido através da combinação de modelos dos diferentes componentes da carga. A segunda abordagem não requer o conhecimento das características físicas da carga. Ela 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.

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, é necessária uma quantidade significativa de dados relacionados a testes programados e a distúrbios naturais que afetam o sistema e a carga.

A enorme massa de dados obtidas através do projeto de medição de cargas permite uma análise detalhada sobre o comportamento das cargas monitoradas, sendo



possível estimar modelos estáticos e dinâmicos através de métodos de identificação de sistemas e aprimorar a representação das mesmas.

Os métodos de identificação de sistemas são classificados como “paramétricos” ou “não-paramétricos”. A metodologia não-paramétrica consiste na determinação de uma função de transferência sem que haja a seleção de um conjunto de modelos candidatos, ou seja, a estrutura do modelo não é pré-especificada. Na metodologia paramétrica há um conhecimento prévio da estrutura do modelo, porém os seus parâmetros são desconhecidos. A essência do método paramétrico é justamente estimar os parâmetros do modelo escolhido.

Este trabalho de dissertação foi desenvolvido dentro da linha paramétrica de identificação de sistemas. A estrutura de modelagem de carga adotada foi a do modelo ZIP e a do modelo Linear (Australiano). O modelo ZIP foi escolhido por ser um modelo de uso tradicional no setor elétrico, estando implantado em quase todos os programas de análise de sistemas. Já o modelo Linear foi escolhido por apresentar algumas características importantes, como flexibilidade e robustez, e também por poder ser implementado on-line. Outro fator é a similaridade entre o sistema de potência brasileiro e o australiano, conhecidos por possuírem centros de geração remotos e linhas de transmissão longas. Nesta abordagem, os dados das medições de campo foram usados como entradas e saídas dos modelos de carga escolhidos, e os parâmetros dos mesmos foram estimados através do método dos mínimos quadrados.

Para se estimar os parâmetros dos modelos escolhidos foram empregadas técnicas de algoritmos genéticos. Primeiramente, realizou-se uma triagem dos eventos registrados, sendo descartados os que não representavam a resposta da carga em função de um distúrbio de tensão. Em seguida, selecionou-se os eventos cujas variações de tensão, potência ativa ou potência reativa eram mais significativas. Os eventos selecionados foram divididos em dois conjuntos. O primeiro conjunto, com 10 eventos, foi usado para “treino”, ou seja, para estimar os parâmetros dos modelos ZIP e Linear. O segundo conjunto, contendo 2 eventos que não fizeram parte do conjunto de treino, foi usado como “teste”, ou seja, foi utilizado para avaliar o desempenho dos modelos obtidos a partir dos dados de treino.

Para que essa metodologia pudesse ser empregada, foi desenvolvida uma rotina de simulação no Matlab, capaz de estimar os parâmetros dos modelos escolhidos usando o método dos mínimos quadrados. Também foi desenvolvida uma macro, em Visual Basic, com a capacidade de capturar os dados dos eventos escolhidos para



”treino” e ”teste”, fazer todas as conversões de base e formatações necessárias e ainda gerar as matrizes com os dados de entrada para a rotina de simulação desenvolvida no Matlab.

IV.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO ESTÁTICO ZIP

Como dito anteriormente, o modelo estático ZIP foi escolhido por ser um modelo de uso tradicional de uso no setor elétrico, estando implantado em quase todos os programas de análise de sistemas. Este item dedica-se ao detalhamento da formulação matemática implantada na rotina de simulação desenvolvida no Matlab.

O modelo estático ZIP é representado como uma função polinomial da tensão em um determinado barramento. Este modelo pode ser formulado em função da tensão normalizada ou ainda do desvio de tensão, sendo composto pela combinação de parcelas da carga representadas como impedância (Z), corrente (I) e potência (P ou Q) constante, como mostrado nas seguintes equações:

$$P(\bar{V}) = P_o \left(a + b\bar{V} + c\bar{V}^2 \right) \quad (\text{equação 76})$$

$$Q(\bar{V}) = Q_o \left(d + e\bar{V} + g\bar{V}^2 \right) \quad (\text{equação 77})$$

onde:

- V_o , P_o e Q_o → Condições iniciais da tensão e das potências ativa e reativa, respectivamente;
- $\bar{V} = \frac{V}{V_o}$ → Tensão normalizada. Alguns autores usam o desvio de tensão $\Delta V = V(k+1) - V(k)$, onde k é o instante de tempo.
- a e d → Coeficientes da parcela da carga representada como potência constante (em pu);
- b e e → Coeficientes da parcela da carga representada como corrente constante (em pu);
- c e g → Coeficientes da parcela da carga representada como impedância constante (em pu);
- **Observação:** como os coeficientes a , b , c , d , e , e g representam valores percentuais, as seguintes restrições devem ser observadas: $a + b + c = 1$ e $d + e + g = 1$.

A dependência da carga com a frequência é usualmente representada pela multiplicação dessas equações pelo fator:

$$1 + k.\Delta f \quad (\text{equação 78})$$

onde:



- $\Delta f = f - f_0$;
- $f \rightarrow$ frequência do barramento;
- $f_0 \rightarrow$ frequência inicial [46] ou nominal [35];
- $k \rightarrow$ Parâmetros de sensibilidade da frequência.

Entretanto, a dependência da carga com a frequência não foi considerada na rotina de simulação desenvolvida.

A partir de um conjunto de N observações coletadas no sistema ou em um barramento de interesse, a *equação 76* pode ser escrita na forma do seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned}\frac{P_1}{P_0} &= a + b \frac{V_1}{V_0} + c \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^2 \\ \frac{P_2}{P_0} &= a + b \frac{V_2}{V_0} + c \left(\frac{V_2}{V_0} \right)^2 \\ &\vdots \\ \frac{P_{N-1}}{P_0} &= a + b \frac{V_{N-1}}{V_0} + c \left(\frac{V_{N-1}}{V_0} \right)^2\end{aligned}\tag{equação 79}$$

Toda vez que um novo distúrbio for processado, as condições iniciais do sistema (P_0 e V_0) são trocadas.

Para a potência reativa um conjunto de equações idêntico pode ser obtido, apenas substituindo P por Q e os coeficientes a, b, c por d, e, g respectivamente.

O conjunto de *equações 79* pode ser escrito na seguinte forma matricial:

$$[z] = [A][x]\tag{equação 80}$$

onde:

- $[z] \rightarrow$ vetor de potência (variável dependente), com dimensão igual ao número de equações (N_E);



$$[z] = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_0 \\ P_2 \\ P_0 \\ \vdots \\ P_{N-1} \\ P_0 \end{bmatrix} \quad (\text{equação 81})$$

- $[A]$ → matriz de medidas (variáveis independentes), com dimensão $N_E \times 3$;

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{V_1}{V_0} & \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^2 \\ 1 & \frac{V_2}{V_0} & \left(\frac{V_2}{V_0}\right)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{V_{N-1}}{V_0} & \left(\frac{V_{N-1}}{V_0}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (\text{equação 82})$$

- $[x]$ → vetor dos coeficientes de regressão a serem determinados, com dimensão 3.

$$[x] = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (\text{equação 83})$$

IV.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO DINÂMICO LINEAR

O Modelo Dinâmico Linear também é conhecido na literatura como “Modelo Australiano”. Conforme mencionado anteriormente, esta estrutura foi escolhida por apresentar algumas características importantes como flexibilidade e robustez e também por poder ser implementada “on-line”. Outro fator que também contribuiu para a sua escolha foi a similaridade entre o sistema de potência brasileiro e o australiano, conhecidos por possuírem centros de geração remotos e linhas de transmissão longas.

Este item dedica-se à apresentação da formulação matemática básica do modelo dinâmico Linear, implantada na rotina de simulação desenvolvida no Matlab.

O Modelo Linear apresenta a seguinte estrutura básica:

$$P_k = \sum_{i=1}^{n_p} a_i P_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} b_i V_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_f} c_i f_{k-i} \quad (\text{equação 84})$$

$$Q_k = \sum_{i=1}^{n_q} d_i Q_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} e_i V_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_f} g_i f_{k-i} \quad (\text{equação 85})$$



onde:

- P_k e $Q_k \rightarrow$ Resposta da carga;
- $V_k \rightarrow$ Sinal de entrada observado na tensão;
- $f_k \rightarrow$ Sinal de entrada observado na frequência;
- $a_i \rightarrow$ Coeficiente de regressão da potência ativa;
- $b_i \rightarrow$ Coeficiente de regressão da tensão para a potência ativa;
- $c_i \rightarrow$ Coeficiente de regressão da frequência para a potência ativa;
- $d_i \rightarrow$ Coeficiente de regressão da potência reativa;
- $e_i \rightarrow$ Coeficiente de regressão da tensão para a potência reativa;
- $g_i \rightarrow$ Coeficiente de regressão da frequência para a potência reativa;
- n_p e $n_q \rightarrow$ Ordem de regressão das potências ativa e reativa;
- $n_v \rightarrow$ Ordem de regressão da tensão;
- $n_f \rightarrow$ Ordem de regressão da frequência.

O número de parâmetros a ser estimado para o modelo proposto é dado pela equação a seguir.

$$n = n_p + n_v + n_f + 2 \quad (\text{equação 86})$$

$$n = n_q + n_v + n_f + 2 \quad (\text{equação 87})$$

Assim como no modelo ZIP, a rotina de simulação desenvolvida para o modelo Linear não considerou a dependência da carga com a frequência. Desta forma, as equações 84 e 85 assumem o seguinte formato:

$$P_k = \sum_{i=1}^{n_p} a_i P_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} b_i V_{k-i} \quad (\text{equação 88})$$

$$Q_k = \sum_{i=1}^{n_q} d_i Q_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} e_i V_{k-i} \quad (\text{equação 89})$$

A partir de um conjunto de N medidas coletadas no barramento de interesse, a equação 88 pode ser escrita na forma do seguinte sistema de equações lineares:



$$P_k = a_1 P_{k-1} + a_2 P_{k-2} + \dots + a_{n_p} P_{k-n_p} + b_0 V_k + b_1 V_{k-1} + \dots + b_{n_v} V_{k-n_v}$$

$$P_{k-1} = a_1 P_{k-2} + a_2 P_{k-3} + \dots + a_{n_p} P_{k-n_p-1} + b_0 V_{k-1} + b_1 V_{k-2} + \dots + b_{n_v} V_{k-n_v-1}$$

(equação 90)

⋮

$$P_{k-N+1} = a_1 P_{k-N} + a_2 P_{k-N-1} + \dots + a_{n_p} P_{k-n_p-N+1} + b_0 V_{k-N+1} + b_1 V_{k-N} + \dots + b_{n_v} V_{k-n_v-N+1}$$

Toda vez que um novo distúrbio for processado, as condições iniciais do sistema (P_0 e V_0) são trocadas e uma nova série de equações é iniciada.

Para a potência reativa pode-se escrever um conjunto de equações similares, bastando substituir P por Q e os coeficientes a , b , c por d , e , g respectivamente.

Analogamente ao modelo ZIP, o conjunto de equações 90 pode ser escrito na seguinte forma matricial:

$$[z] = [A][x] \quad \text{(equação 91)}$$

onde:

- $[z]$ → vetor de potência (variável dependente), com dimensão igual ao número de equações (N_E);

$$[z] = \begin{bmatrix} P_k \\ P_{k-1} \\ \vdots \\ P_{k-N+1} \end{bmatrix} \quad \text{(equação 92)}$$

- $[A]$ → matriz de medidas (variáveis independentes), com dimensão $N_E \times N_C$ (número de coeficientes a serem estimados);

$$[A] = \begin{bmatrix} P_{k-1} & \dots & P_{k-n_p} & V_k & \dots & V_{k-n_v} \\ P_{k-2} & \dots & P_{k-n_p-1} & V_{k-1} & \dots & V_{k-n_v-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{k-N} & \dots & P_{k-n_p-N+1} & V_{k-N+1} & \dots & V_{k-n_v-N+1} \end{bmatrix} \quad \text{(equação 93)}$$

- $[x]$ → vetor dos coeficientes de regressão a serem determinados, com dimensão N_C .



$$[\mathbf{x}] = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_{n_p} \\ \mathbf{b}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{n_v} \end{bmatrix} \quad (\text{equação 94})$$

IV.4 OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DOS MODELOS ZIP E LINEAR

Neste item é desenvolvida a metodologia para obtenção dos coeficientes dos modelos ZIP e Linear, implantada na rotina de simulação desenvolvida no Matlab.

Nos itens anteriores as equações do modelo estático ZIP e do Modelo Dinâmico Linear foram colocadas na forma matricial a seguir:

$$[\mathbf{z}_p] = [\mathbf{A}_p][\mathbf{x}_p] \quad (\text{equação 95})$$

$$[\mathbf{z}_q] = [\mathbf{A}_q][\mathbf{x}_q] \quad (\text{equação 96})$$

onde:

- $[\mathbf{z}_p]$ e $[\mathbf{z}_q]$ → são os vetores de potência ativa e reativa (variáveis dependentes);
- $[\mathbf{A}_p]$ e $[\mathbf{A}_q]$ → são as matrizes de medidas (variáveis independentes da parte ativa e reativa);
- $[\mathbf{x}_p]$ e $[\mathbf{x}_q]$ → os vetores dos coeficientes da potência ativa e reativa a serem determinados.

As equações 95 e 96 podem ser expressas em uma única matriz, conforme segue:

$$[\mathbf{Y}] = [\mathbf{X}][\mathbf{T}] \quad (\text{equação 97})$$

onde:

- $[\mathbf{Y}]$ → é o vetor correspondente a uma matriz coluna, sendo composto pelos valores das variáveis dependentes, no caso as potências ativa e reativa. A dimensão desse vetor é igual ao número total de equações (N_E) em $[\mathbf{z}_p]$ e $[\mathbf{z}_q]$;

$$[\mathbf{Y}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{z}_p] \\ [\mathbf{z}_q] \end{bmatrix} \quad (\text{equação 98})$$

- $[\mathbf{X}]$ → é a matriz com o valor das variáveis independentes. Para o modelo ZIP essa matriz tem dimensão $N_E \times 6$ e no modelo Linear $N_E \times N_C$ (número de coeficientes a ser estimado);



$$[\mathbf{X}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}_p] & [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] & [\mathbf{A}_q] \end{bmatrix} \quad (\text{equação 99})$$

- $[\mathbf{0}] \rightarrow$ é uma submatriz com todos os seu elementos nulos;
- $[\mathbf{T}] \rightarrow$ é uma matriz coluna com os valores dos coeficientes a serem determinados. Para o modelo ZIP este vetor tem dimensão 6 e para o modelo Linear tem dimensão N_C .

$$[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{x}_p] \\ [\mathbf{x}_q] \end{bmatrix} \quad (\text{equação 100})$$

Como o número de equações disponíveis (N_E) é maior que o número de coeficientes a serem determinados (6 para o modelo ZIP e N_C para o modelo LINEAR), tem-se um sistema de equações sobre-determinado, não existindo portanto uma solução única que satisfaça a todos os dados.

Desta maneira, o vetor $[\mathbf{T}]$ é uma estimativa dos coeficientes do modelo, existindo para cada equação um erro (ε_k) entre o valor medido (y_k) e a saída do modelo calculado com os parâmetros estimados (\hat{y}), ou seja:

$$\varepsilon_k = y_k - \hat{y}_k \quad (\text{equação 101})$$

onde:

$$\hat{y}_k = t_1 x_1 + t_2 x_2 + \dots + t_m x_m \quad (\text{equação 102})$$

sendo:

- $m \rightarrow$ a dimensão do vetor $[\mathbf{T}]$.

Com isso, pode-se então definir um vetor de erros:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \\ \vdots \\ \varepsilon_{N_E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - \hat{y}_1 \\ \vdots \\ y_k - \hat{y}_k \\ \vdots \\ y_{N_E} - \hat{y}_{N_E} \end{bmatrix} \quad (\text{equação 103})$$

Logo:

$$[\varepsilon] = [\mathbf{Y}] - [\hat{\mathbf{Y}}] = [\mathbf{Y}] - [\mathbf{X}][\mathbf{T}] \quad (\text{equação 104})$$



Um dos métodos existentes para a solução deste sistema é a minimização dos erros de observação através do método dos mínimos quadrados. A soma dos quadrados dos erros é dada pela seguinte função de custo:

$$\mathbf{F}_C = \sum_{i=1}^{N_E} \varepsilon_i^2 = [\varepsilon]^t [\varepsilon] \quad (\text{equação 105})$$

Assim:

$$\mathbf{F}_C = ([\mathbf{Y}] - [\mathbf{X}][\mathbf{T}])^t ([\mathbf{Y}] - [\mathbf{X}][\mathbf{T}]) \quad (\text{equação 106})$$

Da álgebra matricial sabe-se que:

$$([\mathbf{L}] - [\mathbf{M}])^t = [\mathbf{L}]^t - [\mathbf{M}]^t \quad (\text{equação 107})$$

$$([\mathbf{L}][\mathbf{M}])^t = [\mathbf{M}]^t [\mathbf{L}]^t \quad (\text{equação 108})$$

Logo, a expressão anterior da função de custo, pode ser desenvolvida para:

$$\mathbf{F}_C = ([\mathbf{Y}]^t - [\mathbf{T}]^t [\mathbf{X}]^t) ([\mathbf{Y}] - [\mathbf{X}][\mathbf{T}]) \quad (\text{equação 109})$$

$$\mathbf{F}_C = [\mathbf{Y}]^t [\mathbf{Y}] - [\mathbf{Y}]^t [\mathbf{X}][\mathbf{T}] - [\mathbf{T}]^t [\mathbf{X}]^t [\mathbf{Y}] + [\mathbf{T}]^t [\mathbf{X}]^t [\mathbf{X}][\mathbf{T}] \quad (\text{equação 110})$$

Visto que uma matriz é a transposta de outra, pode-se dizer que:

$$[\mathbf{Y}]^t [\mathbf{X}][\mathbf{T}] = [\mathbf{T}]^t [\mathbf{X}]^t [\mathbf{Y}] \quad (\text{equação 111})$$

Com isso, a expressão do erro quadrático resulta em:

$$\mathbf{F}_C = [\mathbf{Y}]^t [\mathbf{Y}] - 2[\mathbf{T}]^t [\mathbf{X}]^t [\mathbf{Y}] + [\mathbf{T}]^t [\mathbf{X}]^t [\mathbf{X}][\mathbf{T}] \quad (\text{equação 112})$$

Para se obter um erro mínimo é preciso derivar a função de custo em função dos valores de $[\mathbf{T}]$ e igualar esta derivada a zero, ou seja:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_C}{\partial [\mathbf{T}]} = \mathbf{0} \quad (\text{equação 113})$$

Da álgebra matricial sabe-se também que:

$$\frac{\partial [\mathbf{L}(\mathbf{x})][\mathbf{M}(\mathbf{x})]}{\partial [\mathbf{N}(\mathbf{x})]} = \frac{\partial [\mathbf{L}(\mathbf{x})]}{\partial [\mathbf{N}(\mathbf{x})]} [\mathbf{M}(\mathbf{x})] + [\mathbf{L}(\mathbf{x})] \frac{\partial [\mathbf{M}(\mathbf{x})]}{\partial [\mathbf{N}(\mathbf{x})]} \quad (\text{equação 114})$$

$$\frac{\partial [\mathbf{L}(\mathbf{y})]}{\partial [\mathbf{N}(\mathbf{x})]} = \mathbf{0} \quad (\text{equação 115})$$



$$\left(\frac{\partial[\mathbf{L}(\mathbf{x})]}{\partial[\mathbf{N}(\mathbf{x})]} \right)^t = \frac{\partial[\mathbf{L}(\mathbf{x})]^t}{\partial[\mathbf{N}(\mathbf{x})]} \quad (\text{equação 116})$$

Logo:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_C}{\partial [\mathbf{T}]} = \frac{\partial([\mathbf{Y}]^t[\mathbf{Y}] - 2[\mathbf{T}]^t[\mathbf{X}]^t[\mathbf{Y}] + [\mathbf{T}]^t[\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}][\mathbf{T}])}{\partial [\mathbf{T}]} \quad (\text{equação 117})$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_C}{\partial [\mathbf{T}]} = \frac{\partial([\mathbf{Y}]^t[\mathbf{Y}])}{\partial [\mathbf{T}]} - \frac{\partial(2[\mathbf{T}]^t[\mathbf{X}]^t[\mathbf{Y}])}{\partial [\mathbf{T}]} + \frac{\partial([\mathbf{T}]^t[\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}][\mathbf{T}])}{\partial [\mathbf{T}]} \quad (\text{equação 118})$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_C}{\partial [\mathbf{T}]} = \mathbf{0} - 2 \left(\frac{\partial[\mathbf{T}]^t}{\partial [\mathbf{T}]} [\mathbf{X}]^t[\mathbf{Y}] + \mathbf{0} + \mathbf{0} \right) + \left(\frac{\partial[\mathbf{T}]^t}{\partial [\mathbf{T}]} [\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}][\mathbf{T}] + \mathbf{0} + \mathbf{0} + [\mathbf{T}]^t[\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}] \frac{\partial[\mathbf{T}]}{\partial [\mathbf{T}]} \right) \quad (\text{equação 119})$$

Por matriz ser a transposta da outra, tem-se que:

$$[\mathbf{T}]^t[\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}] \frac{\partial[\mathbf{T}]}{\partial [\mathbf{T}]} = \frac{\partial[\mathbf{T}]^t}{\partial [\mathbf{T}]} [\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}][\mathbf{T}] \quad (\text{equação 120})$$

Finalmente:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_C}{\partial [\mathbf{T}]} = -2 \frac{\partial[\mathbf{T}]^t}{\partial [\mathbf{T}]} [\mathbf{X}]^t[\mathbf{Y}] + \frac{\partial[\mathbf{T}]^t}{\partial [\mathbf{T}]} [\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}][\mathbf{T}] + [\mathbf{T}]^t[\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}] \frac{\partial[\mathbf{T}]}{\partial [\mathbf{T}]} \quad (\text{equação 121})$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_C}{\partial [\mathbf{T}]} = -2 \frac{\partial[\mathbf{T}]^t}{\partial [\mathbf{T}]} [\mathbf{X}]^t[\mathbf{Y}] + 2 \frac{\partial[\mathbf{T}]^t}{\partial [\mathbf{T}]} [\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}][\mathbf{T}] \quad (\text{equação 122})$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_C}{\partial [\mathbf{T}]} = -2 \frac{\partial[\mathbf{T}]^t}{\partial [\mathbf{T}]} ([\mathbf{X}]^t[\mathbf{Y}] - [\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}][\mathbf{T}]) = \mathbf{0} \quad (\text{equação 123})$$

A derivada será idênticamente nula se:

$$[\mathbf{X}]^t[\mathbf{Y}] - [\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}][\mathbf{T}] = \mathbf{0} \quad (\text{equação 124})$$

Ou seja:

$$[\mathbf{X}]^t[\mathbf{Y}] = [\mathbf{X}]^t[\mathbf{X}][\mathbf{T}] \quad (\text{equação 125})$$



Se $[X]^t[X]$ é não singular, existe a matriz inversa $([X]^t[X])^{-1}$. Multiplicando os dois membros da equação acima por esta inversa, tem-se:

$$[T] = ([X]^t[X])^{-1}[X]^t[Y] \quad (\text{equação 126})$$

Onde o termo $([X]^t[X])^{-1}[X]^t$ é denominado de matriz pseudo-inversa de $[X]$.

Desta forma, determina-se o vetor de coeficientes de regressão $[T]$.



Capítulo V

RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo dedica-se à apresentação dos modelos estimados a partir dos dados de medição, seguida de um estudo comparativo que avalia o desempenho do atual modelo ZIP implantado no Anatem e dos modelos ZIP e Linear estimados a partir dos dados de campo. Adicionalmente, é detalhada a implementação do modelo Linear via CDU no Anatem e são apresentados alguns resultados de simulações do Anatem, com o atual modelo ZIP e com o modelo Linear estimado.

V.1 MODELOS ESTIMADOS E DESEMPENHO DOS MESMOS

Após uma triagem dos eventos registrados em cada ramal de carga monitorado, sendo descartados os que não representavam a resposta da carga a um distúrbio de tensão, foram selecionados os eventos com as variações de tensão, potência ativa ou potência reativa mais significativas. Os eventos selecionados foram divididos em dois conjuntos. O primeiro conjunto, com 10 eventos, foi usado para “treino”, ou seja, para estimar os parâmetros do modelo ZIP e do modelo Linear. O segundo conjunto, contendo 2 eventos que não fizeram parte do conjunto de treino, foi usado como “teste”, ou seja, para avaliar o desempenho dos modelos obtidos a partir dos dados de treino.

Os parâmetros dos modelos foram estimados através da rotina de simulações desenvolvida no Matlab. Para o modelo Linear a ordem de regressão considerada para tensão, potência ativa e potência reativa foi igual a 5.

A seguir são apresentados, para cada ramal de carga monitorado, os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e em seguida os respectivos desempenhos são comparados ao desempenho do atual modelo ZIP do Anatem.



V.1.1 SE ITAJUBÁ 138kV

A SE Itajubá 138kV, de propriedade da CEMIG, foi monitorada entre 06 de dezembro de 2004 e 17 de fevereiro de 2005. Durante esse período 35 eventos foram registrados no *Alimentador Itajubá 138kV*.

V.1.1.1 ALIMENTADOR ITAJUBÁ 138kV:

Dos eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos estão apresentados na Figura 11 e são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas.

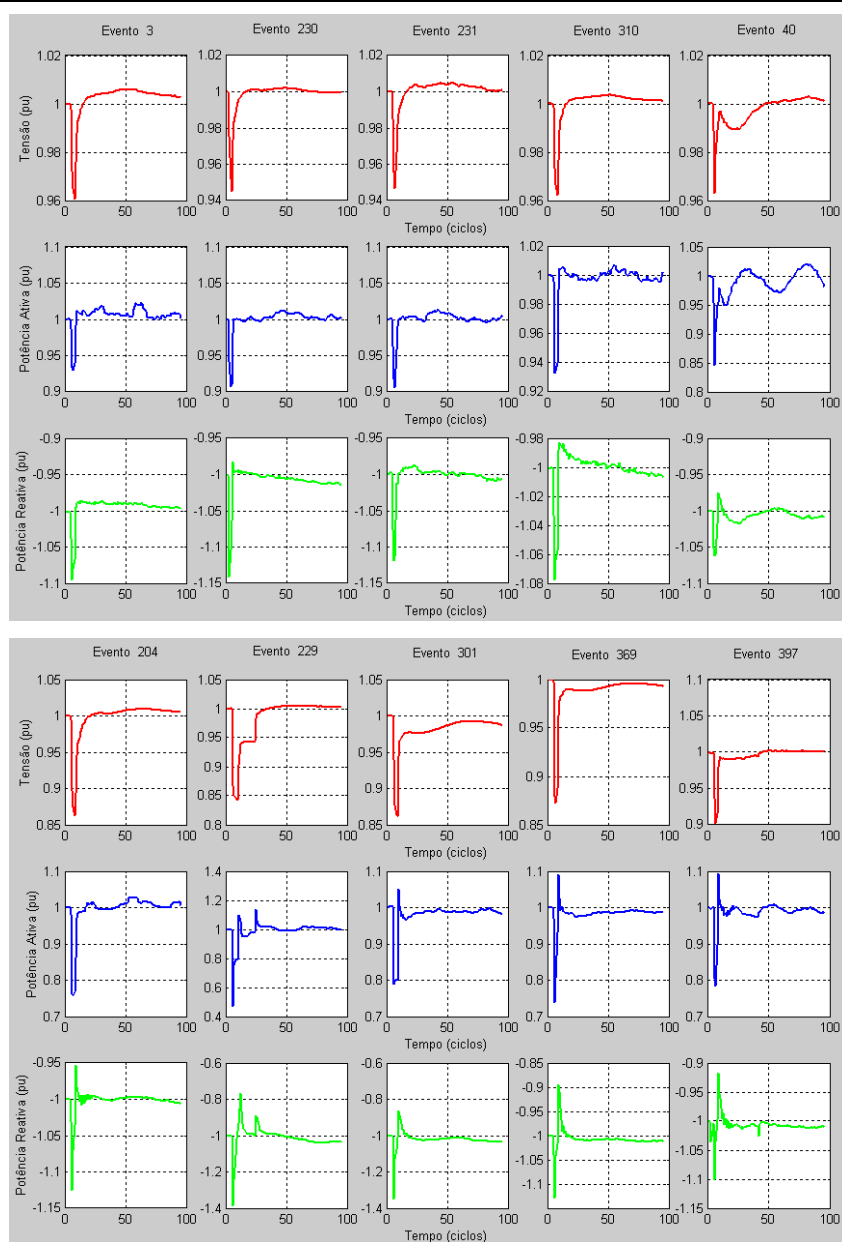


Figura 11 Eventos de Treino – Alimentador Itajubá 138kV



A Tabela 8 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 8 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,4171	c1 =	0,8150
b =	0,5523	e =	0,0000	a2 =	0,2369	c2 =	0,2564
c =	0,4477	g =	1,0000	a3 =	0,0558	c3 =	0,0643
				a4 =	0,1677	c4 =	0,2065
				a5 =	-0,1268	c5 =	-0,0144
				b0 =	2,9749	d0 =	2,8560
				b1 =	-2,7841	d1 =	-3,3538
				b2 =	-0,2681	d2 =	-0,0134
				b3 =	0,3745	d3 =	-0,1523
				b4 =	-0,4850	d4 =	-0,0185
				b5 =	0,4371	d5 =	0,3543

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,5000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,5000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 8 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. As curvas apresentadas na Figura 12 representam a resposta fornecida pelos modelos estimados, a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

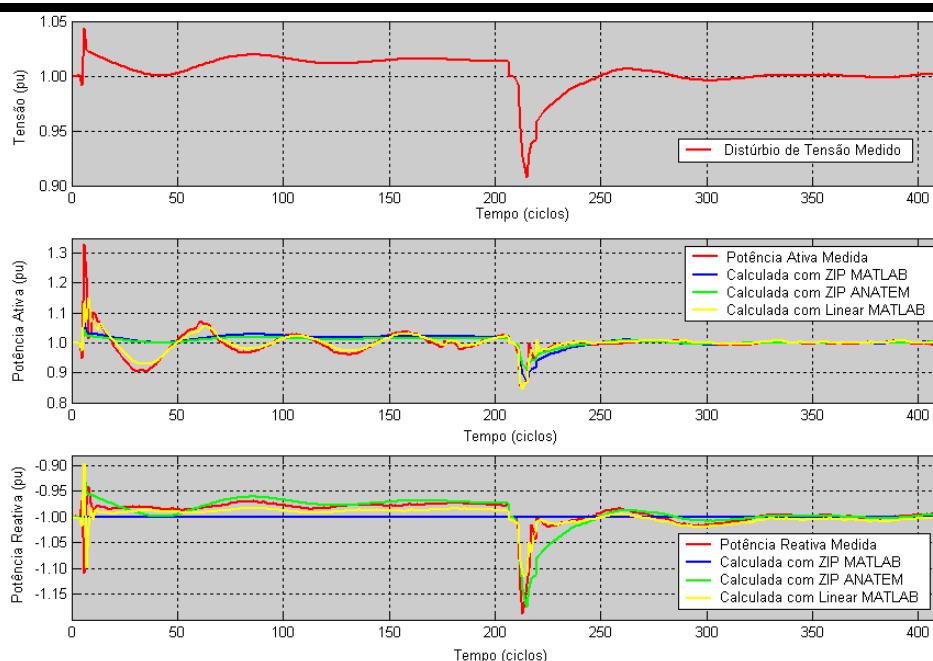


Figura 12 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Itajubá 138kV

Como pode ser observado, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.



V.1.2 SE RAMON REBERTE FILHO 88kV

A SE Ramon Reberte Filho 88kV, de propriedade da CTEEP, foi monitorada entre 08 de junho e 12 de setembro de 2005. Durante esse período foram registrados 25 eventos no *Alimentador Silvestre 4 - 88kV*, 49 eventos no *Alimentador Adelino 2 - 88kV* e 26 eventos no *Alimentador Carrão 1 - 88kV*.

V.1.2.1 ALIMENTADOR SILVESTRE 4 - 88kV:

Dos 25 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 13.

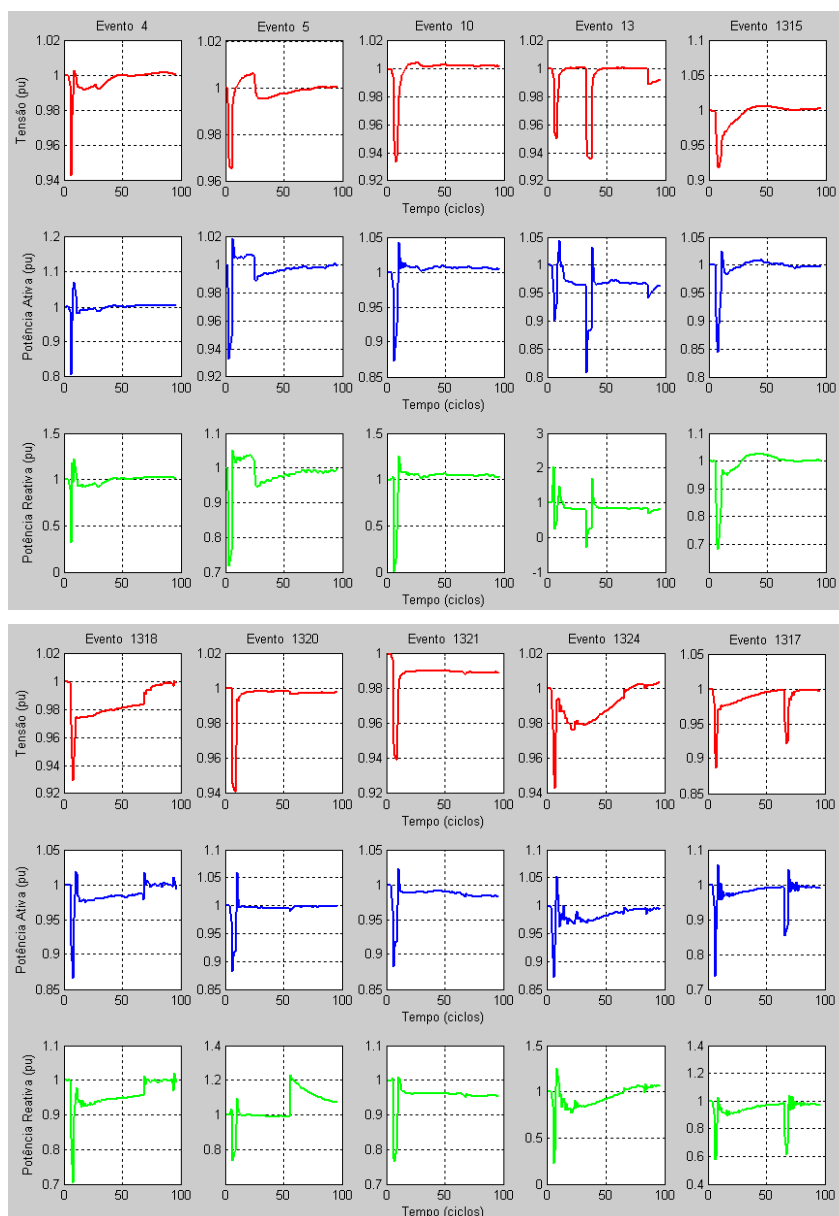


Figura 13 Eventos de Treino – Alimentador Silvestre 4 - 88kV



A Tabela 9 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 9 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,3084	c1 =	0,5297
b =	0,5599	e =	0,0000	a2 =	0,3707	c2 =	0,0756
c =	0,4401	g =	1,0000	a3 =	-0,0043	c3 =	0,0346
<hr/>				a4 =	0,2479	c4 =	0,0321
				a5 =	-0,1268	c5 =	-0,0144
				b0 =	2,6309	d0 =	11,1843
				b1 =	-2,7841	d1 =	-3,3538
				b2 =	-0,9644	d2 =	1,7453
				b3 =	0,3353	d3 =	-1,1611
				b4 =	-0,5120	d4 =	-0,3192
				b5 =	0,4908	d5 =	-0,5490

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,5000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,5000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 9 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. As curvas da Figura 14 representam a resposta fornecida pelos modelos estimados, a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

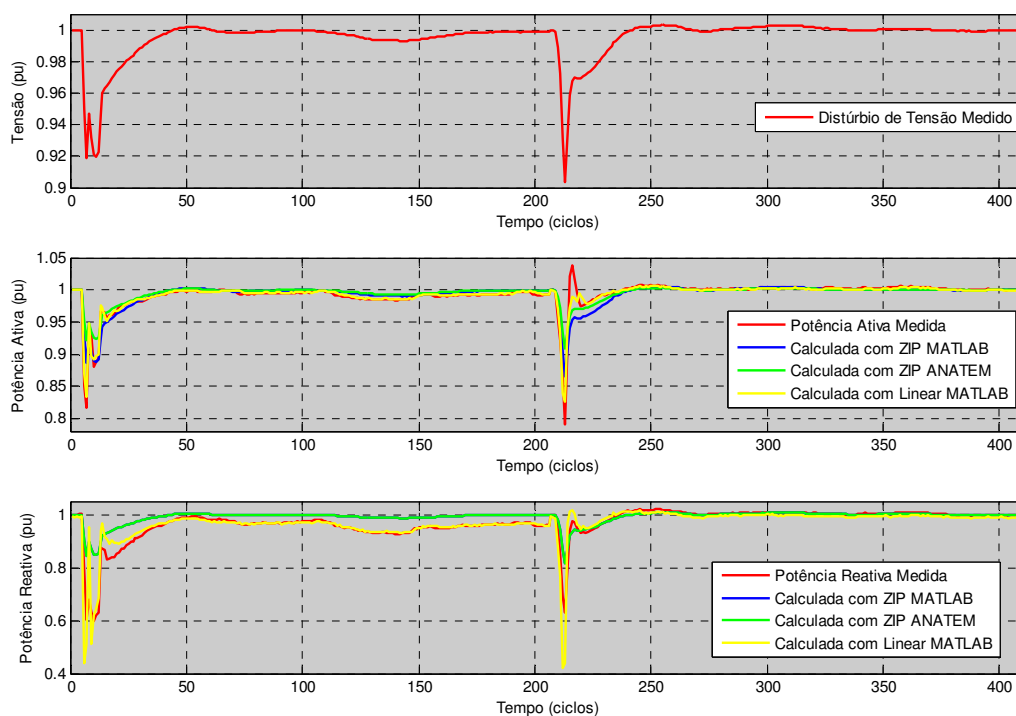


Figura 14 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Silvestre 4 - 88kV



Como pode ser observado, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.2.2 ALIMENTADOR ADELINO 2 - 88kV:

Dos 49 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 15.

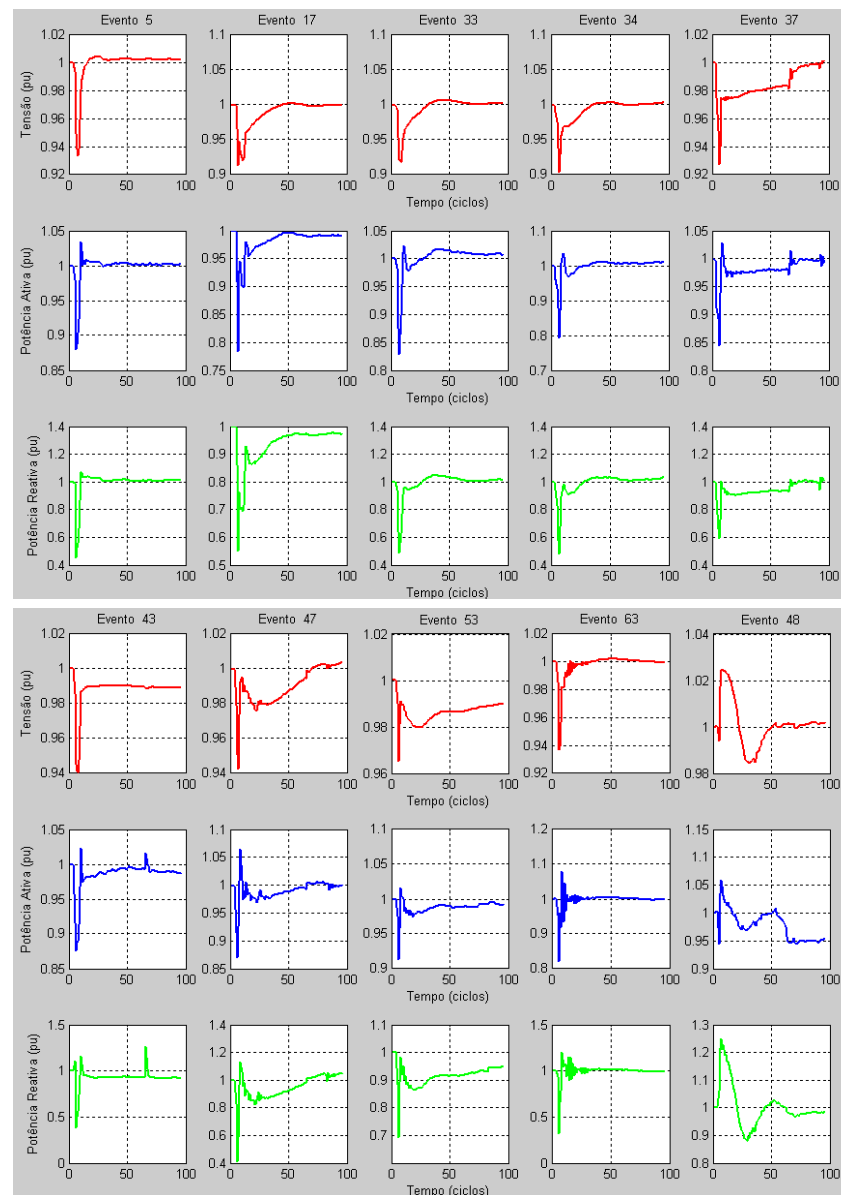


Figura 15 Eventos de Treino – Alimentador Adelino 2 - 88kV

A Tabela 10 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.



Tabela 10 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,2749	c1 =	0,3868
b =	0,6769	e =	0,0000	a2 =	0,6073	c2 =	0,3112
c =	0,3231	g =	1,0000	a3 =	-0,1128	c3 =	0,0117
				a4 =	0,1167	c4 =	0,1401
				a5 =	-0,1268	c5 =	-0,0144
				b0 =	2,5548	d0 =	8,8476
Parâmetros do Modelo ZIP Anatem				b1 =	-2,7841	d1 =	-3,3538
a =	0,5000	d =	0,0000	b2 =	-1,7358	d2 =	-2,3967
b =	0,0000	e =	0,0000	b3 =	0,2793	d3 =	-0,5059
c =	0,5000	g =	1,0000	b4 =	0,1064	d4 =	-1,0460
				b5 =	0,2496	d5 =	0,8000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 10 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. As curvas apresentadas na Figura 16 representam a resposta fornecida pelos modelos estimados, a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

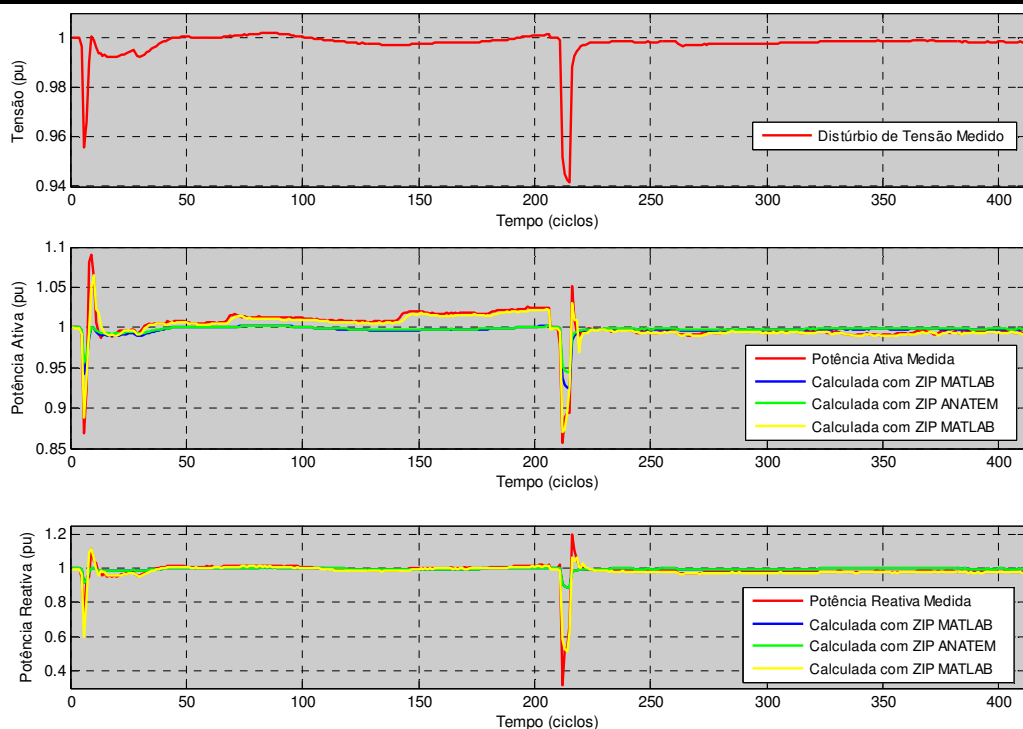


Figura 16 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Adelino 2 - 88kV

Mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.



V.1.2.3 ALIMENTADOR CARRÃO 1 - 88KV:

Dos 26 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 17.

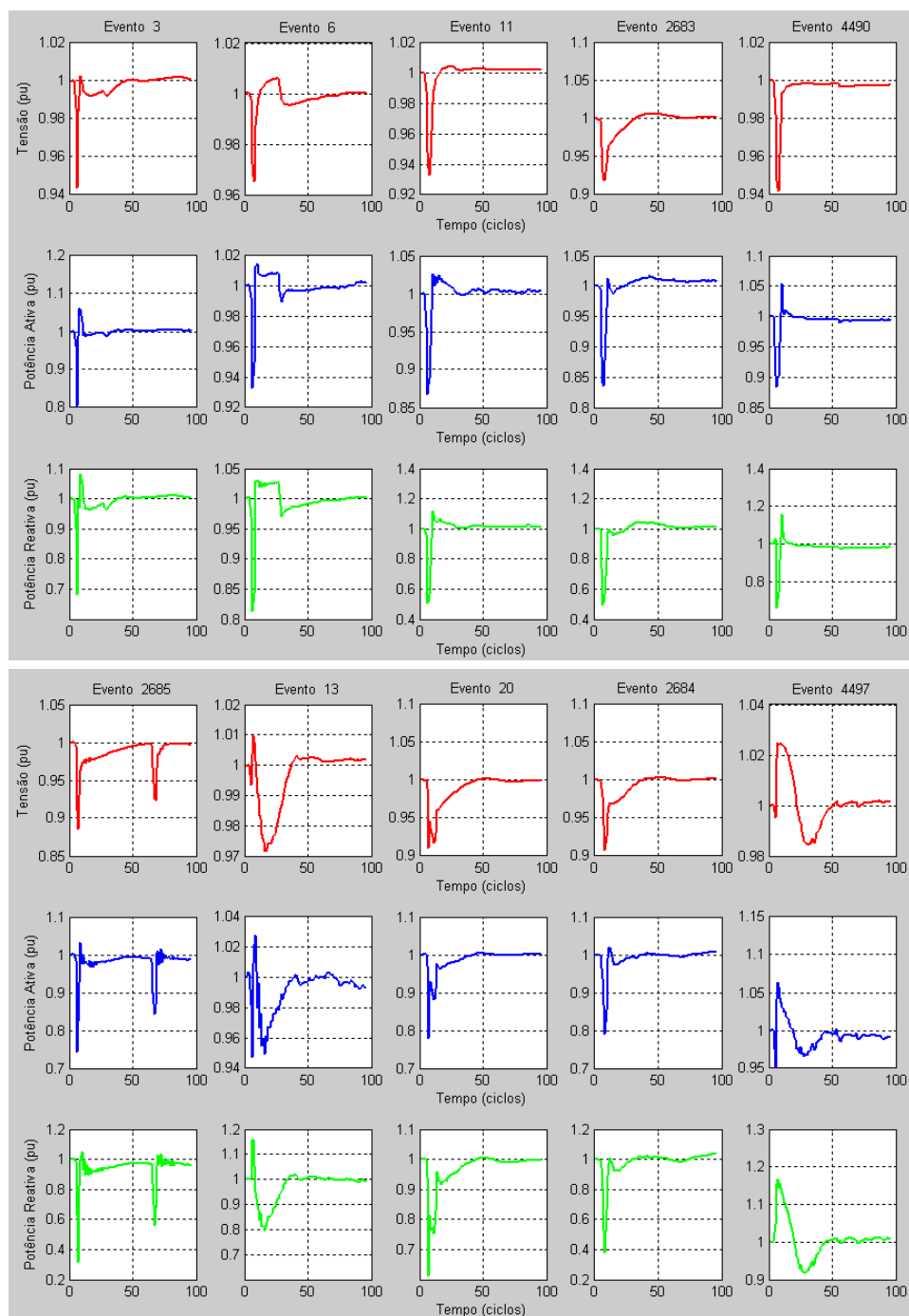


Figura 17 Eventos de Treino – Alimentador Carrão 1 - 88kV

A Tabela 11 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.



Tabela 11 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,3975	c1 =	0,5749
b =	0,4335	e =	0,0000	a2 =	0,1638	c2 =	0,2610
c =	0,5665	g =	1,0000	a3 =	-0,1537	c3 =	-0,0754
<hr/>				a4 =	0,2217	c4 =	0,0726
				a5 =	-0,1268	c5 =	-0,0144
				b0 =	2,6094	d0 =	6,3401
				b1 =	-2,7841	d1 =	-3,3538
				b2 =	-0,6262	d2 =	-2,2554
				b3 =	0,5318	d3 =	0,6545
				b4 =	-0,6406	d4 =	-0,6224
				b5 =	0,2216	d5 =	0,4178

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,5000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,5000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 11 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. As curvas da Figura 18 apresentam a resposta fornecida pelos modelos estimados, a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

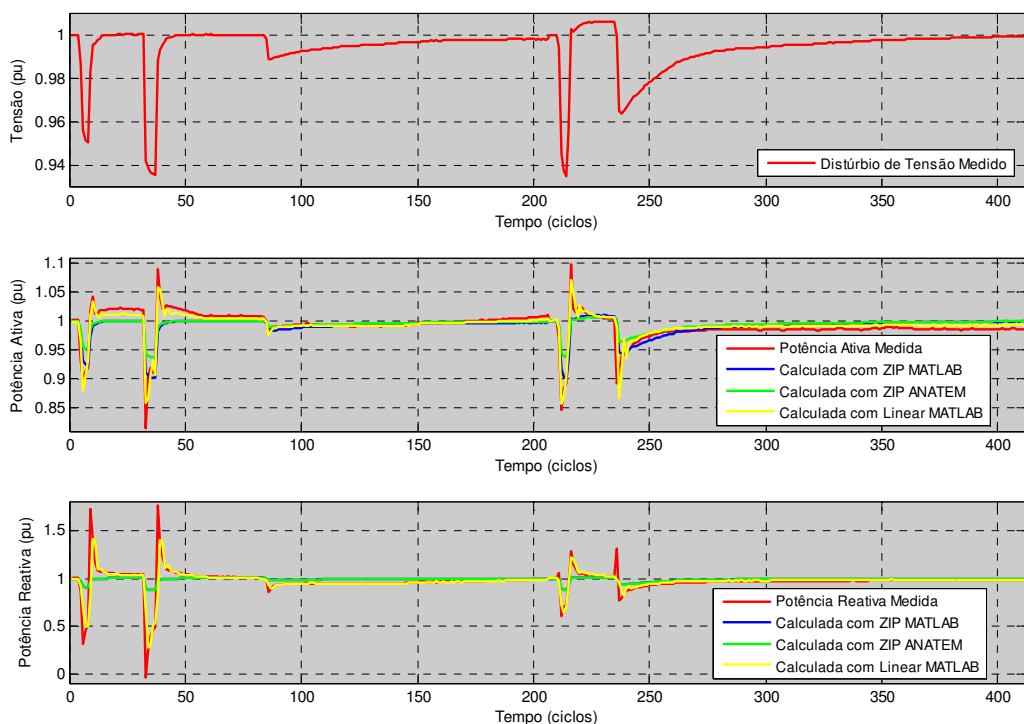


Figura 18 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Carrão 1 - 88kV

Mais uma vez, o modelo Linear estimado no Matlab foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.



V.1.3 SE TAQUARIL 138kV

A SE Taquaril 138 kV, de propriedade da CEMIG, foi monitorada entre 17 de novembro de 2005 e 22 de fevereiro de 2006. Durante esse período foram registrados 71 eventos no *Alimentador Santa Efigênia 138 kV* e 72 eventos no *Alimentador Nova Lima 138 kV*. Os eventos registrados no *Alimentador Ouro Preto 138 kV* foram descartados devido a problemas no aparelho durante o período das medições.

V.1.3.1 ALIMENTADOR SANTA EFIGÊNIA 138kV:

Dos 71 eventos registrados nesse ramal, 2 conjuntos de 10 eventos distintos foram selecionados para “treino” dos modelos. Assim como nos demais alimentadores, os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas. Na Figura 19 são apresentados os eventos selecionados para o primeiro “treino”.

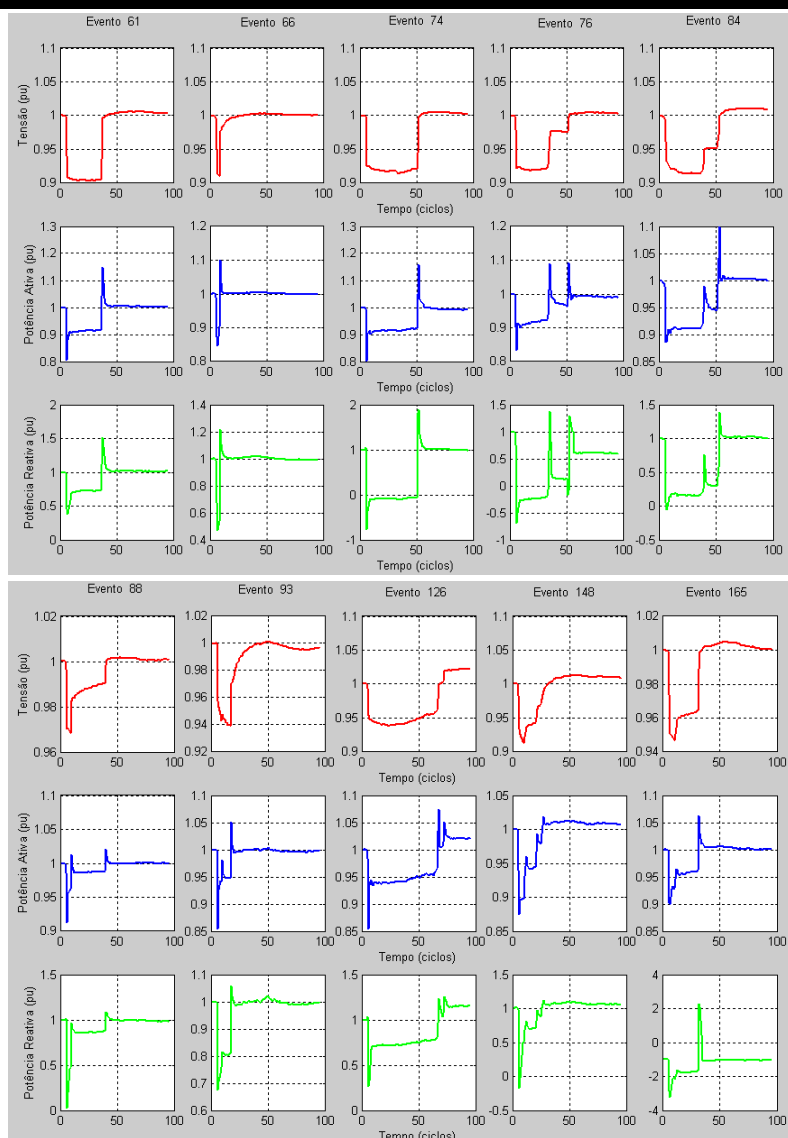


Figura 19 Eventos usados no 1º Treino – Alimentador Santa Efigênia 138kV



A Tabela 12 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no primeiro “treino” e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 12 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,4033	c1 =	0,9477
b =	0,9685	e =	0,0000	a2 =	0,0833	c2 =	-0,2243
c =	0,0315	g =	1,0000	a3 =	0,0814	c3 =	0,0741
				a4 =	0,1495	c4 =	0,1219
				a5 =	-0,1268	c5 =	-0,0144
				b0 =	3,0492	d0 =	20,2035
				b1 =	-2,7841	d1 =	-3,3538
				b2 =	0,3394	d2 =	6,4557
				b3 =	-0,0127	d3 =	-0,5057
				b4 =	-0,3789	d4 =	-2,8385
				b5 =	0,3726	d5 =	1,9018

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,5000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,5000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 12 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. Na Figura 20 é apresentada a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

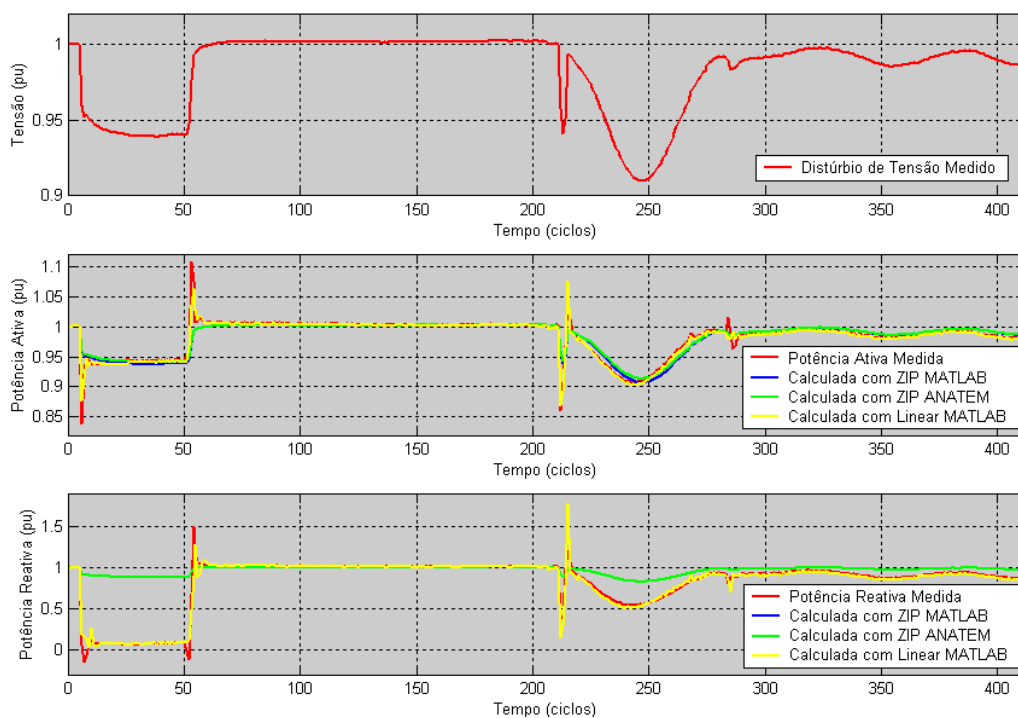


Figura 20 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Santa Efigênia 138kV



Como pode ser observado, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado no primeiro “treino” apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

Os eventos selecionados para o segundo “treino” dos modelos ZIP e Linear estão apresentados na Figura 21.

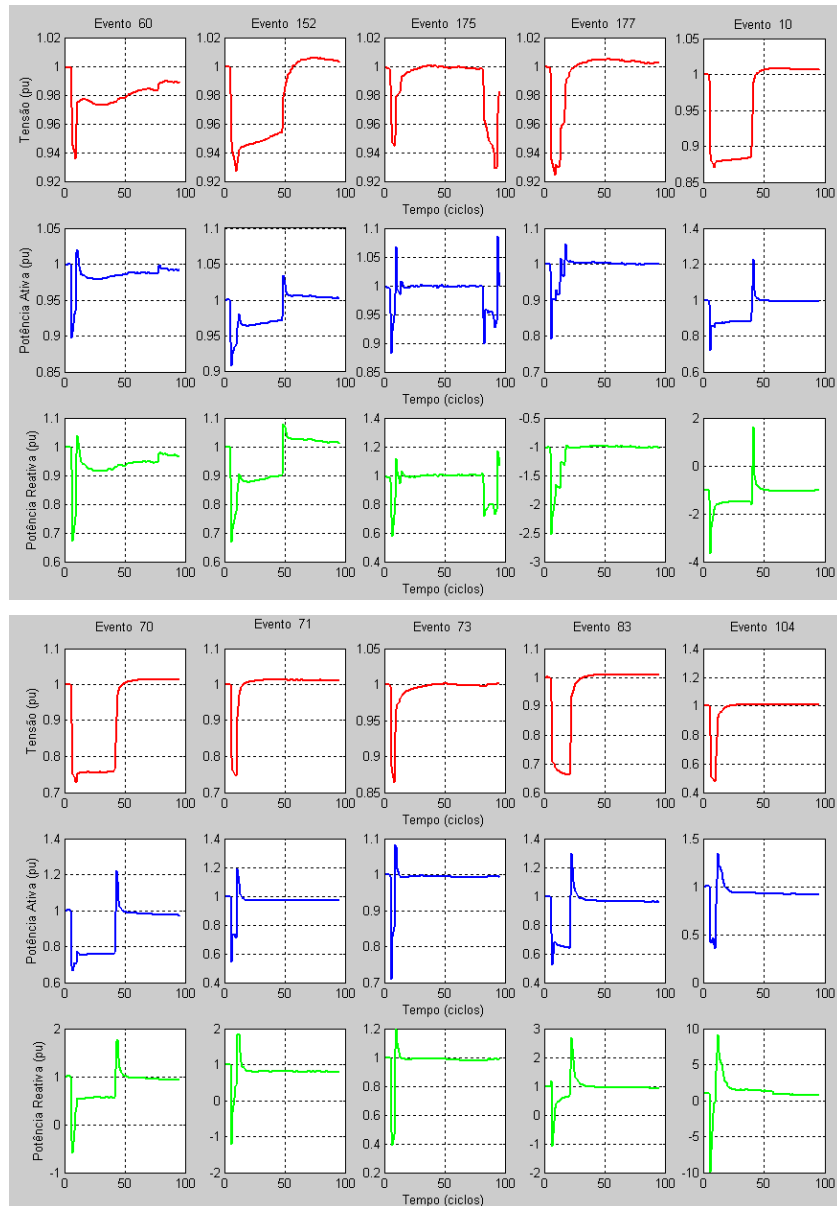


Figura 21 Eventos usados no 2º Treino – Alimentador Santa Efigênia 138kV

A Tabela 13 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no segundo “treino” e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.



Tabela 13 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0296	d =	0,0000	a1 =	0,6117	c1 =	0,7026
b =	0,9704	e =	0,0000	a2 =	0,1794	c2 =	0,1269
c =	0,0000	g =	1,0000	a3 =	-0,0952	c3 =	0,1008
<hr/>				a4 =	0,1978	c4 =	0,1886
				a5 =	-0,1268	c5 =	-0,1453
				b0 =	2,2967	d0 =	16,8198
				b1 =	-2,7841	d1 =	-22,7730
				b2 =	0,6204	d2 =	4,0215
				b3 =	0,1326	d3 =	-1,1043
				b4 =	-0,5569	d4 =	-0,7292
				b5 =	0,3314	d5 =	3,7915

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,5000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,5000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 13 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. Na Figura 22 é apresentada a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

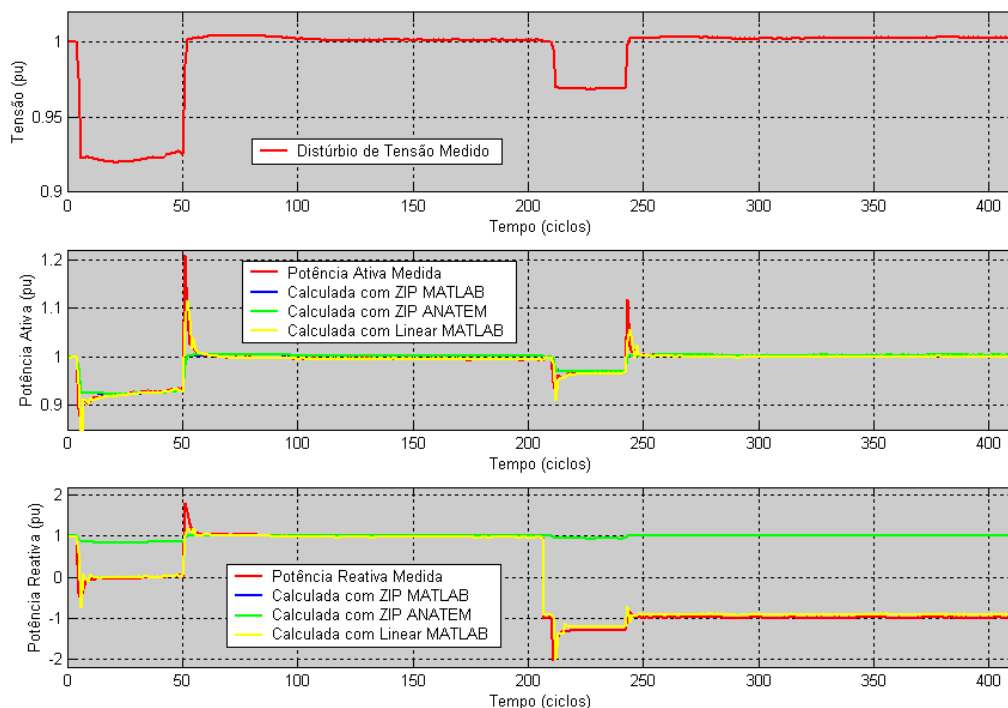


Figura 22 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Santa Efigênia 138kV

Mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.



V.1.3.2 ALIMENTADOR OURO PRETO 138kV:

Os eventos registrados no *Alimentador Ouro Preto 138kV* foram descartados devido a problemas no aparelho durante o período das medições.

V.1.3.3 ALIMENTADOR NOVA LIMA 138kV:

Dos 72 eventos registrados nesse ramal, 2 conjuntos de 10 eventos distintos foram selecionados para “treino” dos modelos. Assim como nos demais alimentadores, os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas. Na Figura 23 são apresentados os eventos selecionados para o primeiro “treino”.

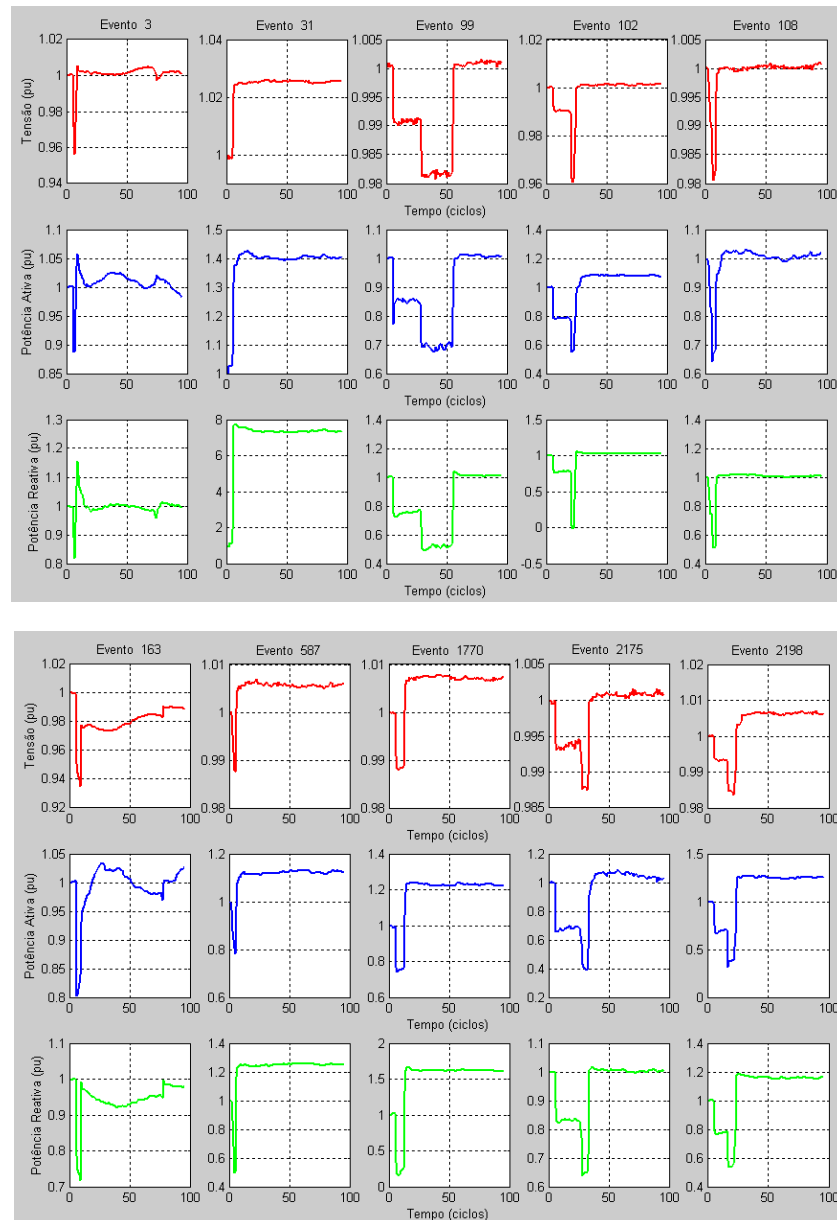


Figura 23 Eventos usados no 1º Treino – Alimentador Nova Lima 138kV



A Tabela 14 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no primeiro “treino” e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 14 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	1,1865	c1 =	1,1332
b =	0,0000	e =	0,0000	a2 =	-0,1669	c2 =	-0,1905
c =	1,0000	g =	1,0000	a3 =	-0,1164	c3 =	0,0750
				a4 =	0,0755	c4 =	-0,0729
				a5 =	-0,0047	c5 =	0,0468
				b0 =	7,5683	d0 =	24,1289
				b1 =	-8,5441	d1 =	-26,0996
				b2 =	1,3252	d2 =	4,0158
				b3 =	-0,0989	d3 =	-2,9447
				b4 =	1,0644	d4 =	5,0786
				b5 =	-1,2890	d5 =	-4,1705

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,5000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,5000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 14 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. A Figura 24 apresenta a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

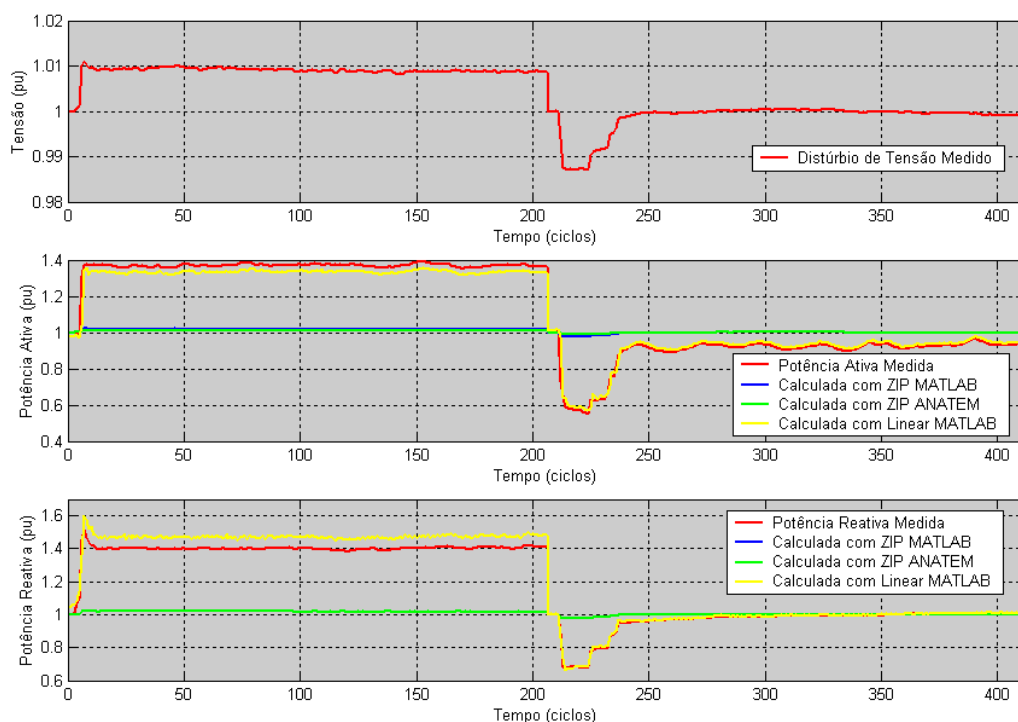


Figura 24 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Nova Lima 138kV



Como pode ser observado, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

Os eventos selecionados para o segundo “treino” dos modelos ZIP e Linear estão apresentados na Figura 25.

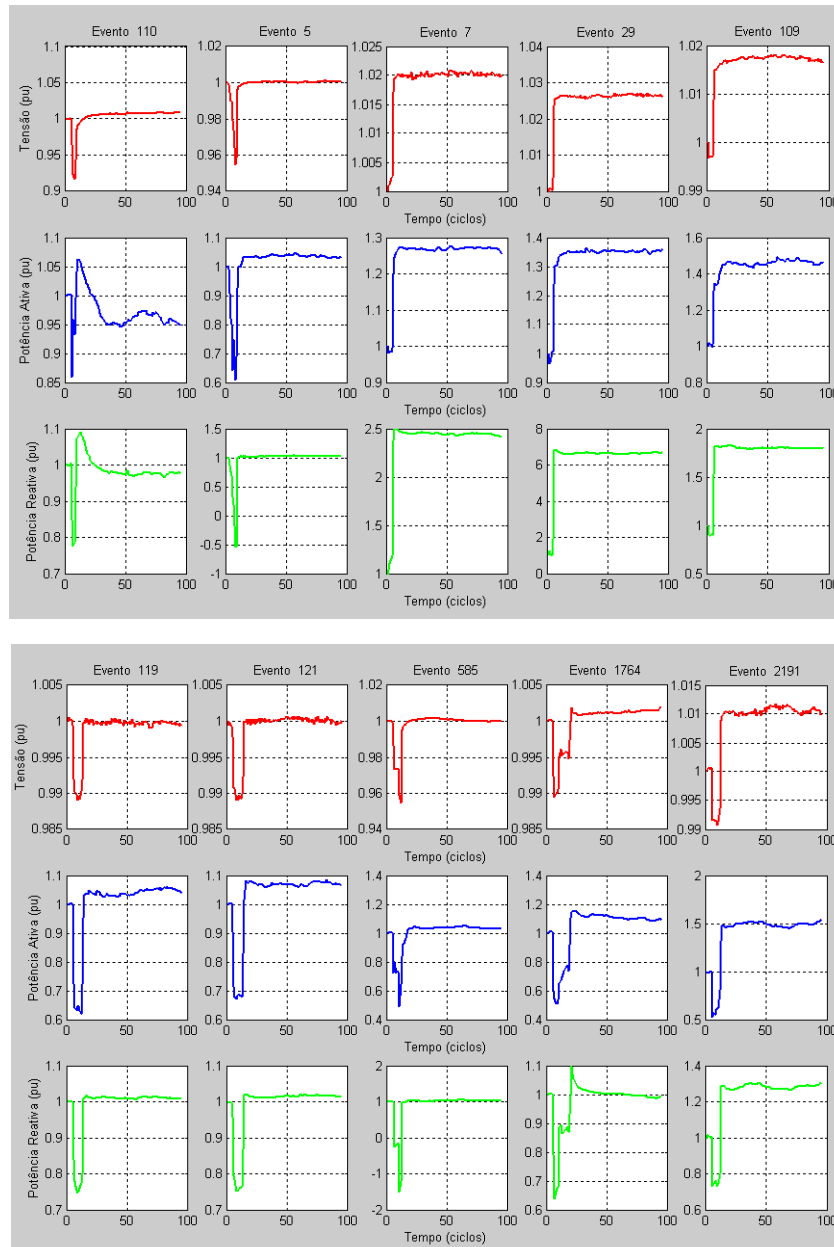


Figura 25 Eventos usados no 2º Treino – Alimentador Nova Lima 138kV

A Tabela 15 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.



Tabela 15 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	1,1391	c1 =	1,2238
b =	0,0000	e =	0,0000	a2 =	-0,0795	c2 =	-0,3273
c =	1,0000	g =	1,0000	a3 =	-0,2154	c3 =	-0,0017
<hr/>				a4 =	0,1901	c4 =	0,1613
				a5 =	-0,0604	c5 =	-0,0634
				b0 =	6,7767	d0 =	36,9344
				b1 =	-9,2671	d1 =	-53,0318
				b2 =	3,6485	d2 =	21,7236
				b3 =	-0,3821	d3 =	2,8614
				b4 =	-0,5633	d4 =	-11,0608
				b5 =	-0,1866	d5 =	2,5804

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,5000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,5000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 15 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. Nesse caso, os eventos de “teste” do primeiro e do segundo “treino” são os mesmos. Na Figura 26 é apresentada a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

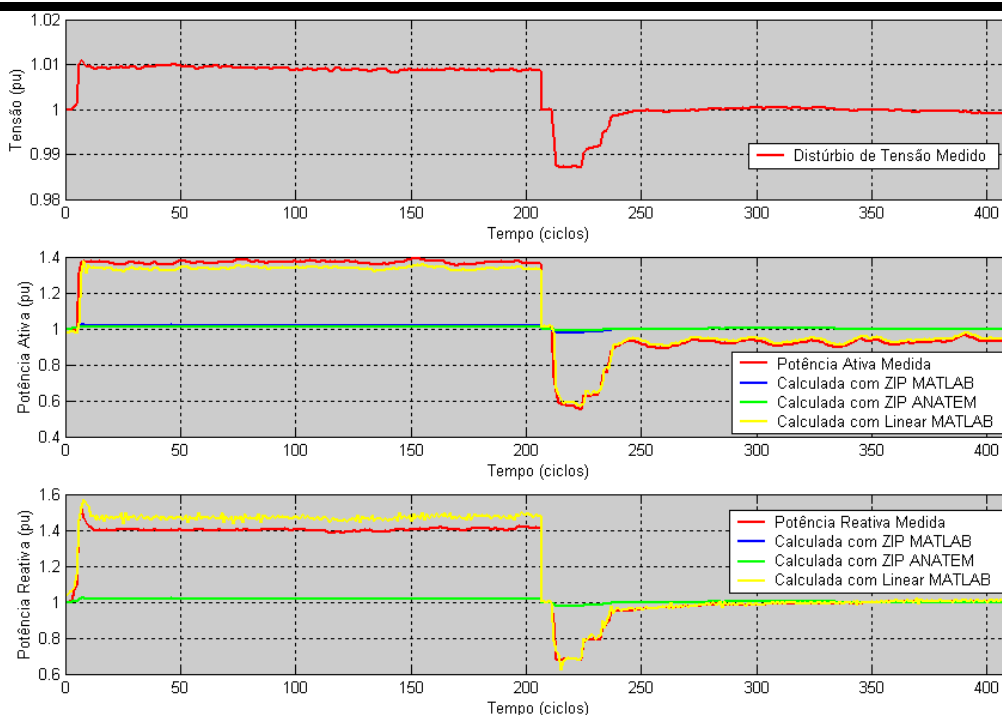


Figura 26 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Nova Lima 138kV

Mais uma vez, o modelo Linear foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.



V.1.4 SE FORTALEZA 69KV

A SE Fortaleza 69kV, de propriedade da CHESF, foi monitorada entre 07 de abril e 29 de junho de 2006. Durante esse período foram registrados 37 eventos no *Alimentador Distrito Industrial II - 69kV*, 49 eventos no *Alimentador Mondubim 69kV* e 71 eventos no *Alimentador Messejana 69kV*.

V.1.4.1 ALIMENTADOR DISTRITO INDUSTRIAL II - 69KV

Dos 37 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 27.

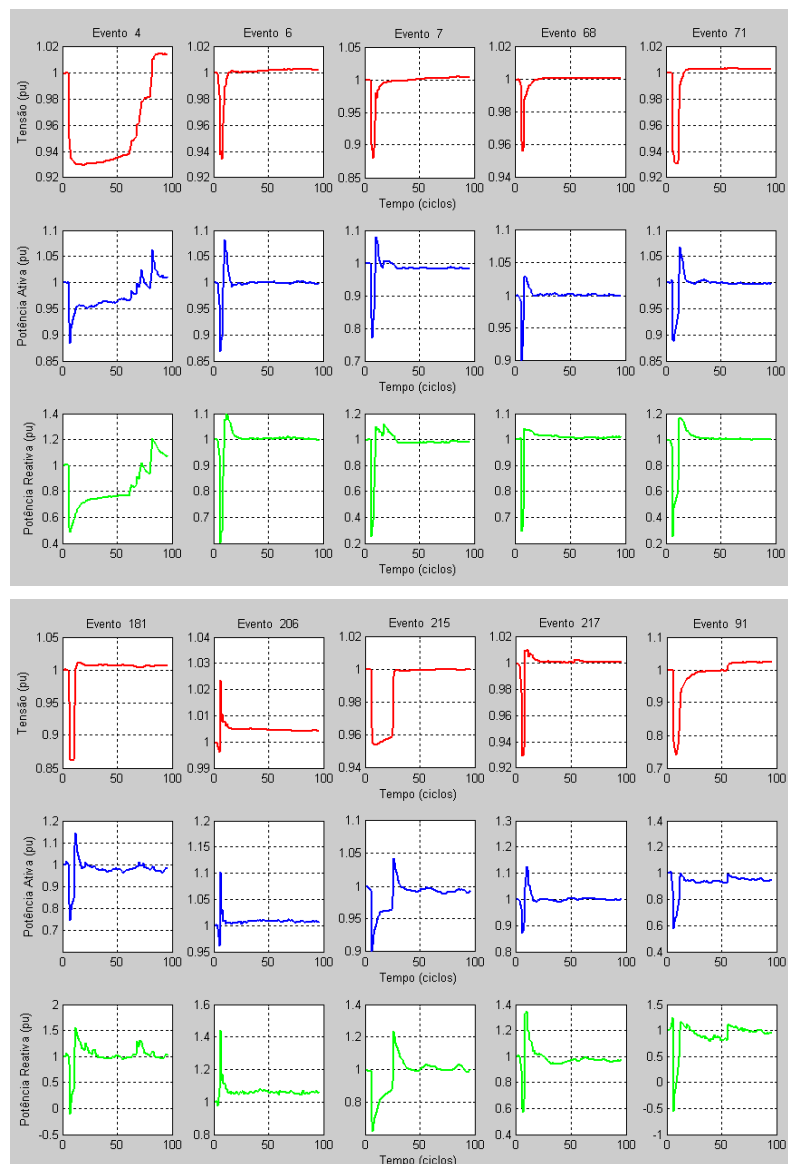


Figura 27 Eventos de Treino – Alimentador Distrito Industrial II - 69KV



A Tabela 16 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 16 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0061	d =	0,0000	a1 =	0,6636	c1 =	0,7199
b =	0,9939	e =	0,0000	a2 =	0,1746	c2 =	0,2208
c =	0,0000	g =	1,0000	a3 =	0,0855	c3 =	0,0377
				a4 =	0,0542	c4 =	-0,0633
				a5 =	-0,0442	c5 =	0,0122
				b0 =	1,8036	d0 =	8,1137
				b1 =	-1,3481	d1 =	-7,4554
				b2 =	-0,5583	d2 =	-1,6217
				b3 =	-0,0964	d3 =	0,0120
				b4 =	-0,2059	d4 =	1,0469
				b5 =	0,4714	d5 =	-0,0227

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,4000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,6000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 16 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. A Figura 28 apresenta a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

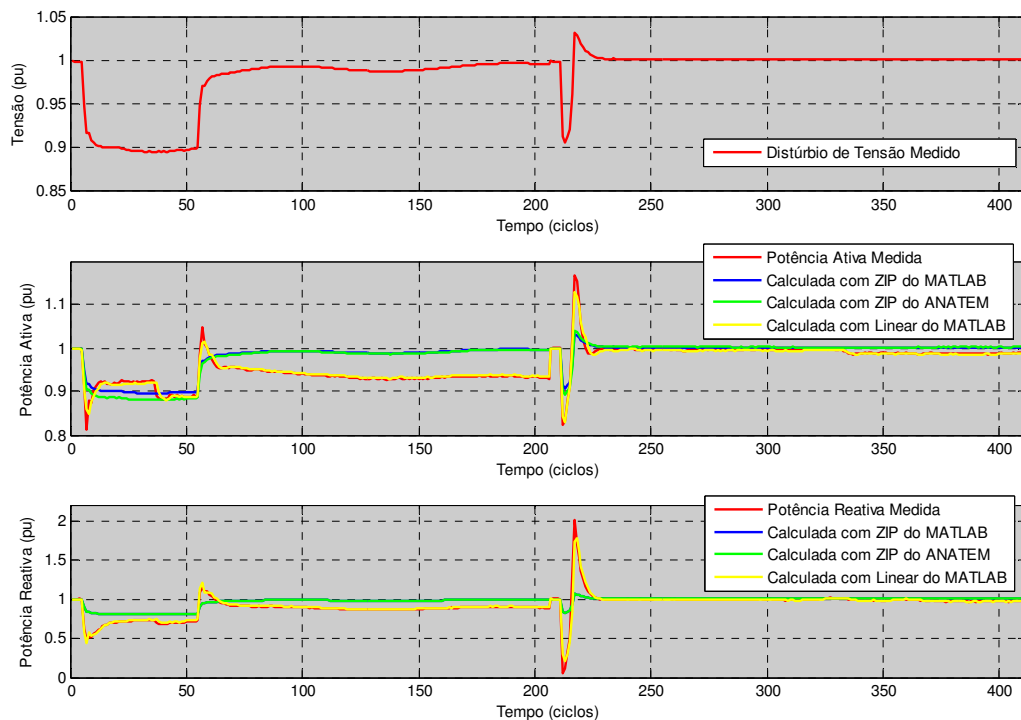


Figura 28 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Distrito Industrial II 69kV



Mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.4.2 ALIMENTADOR MONDUBIM 69kV:

Dos 49 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 29.

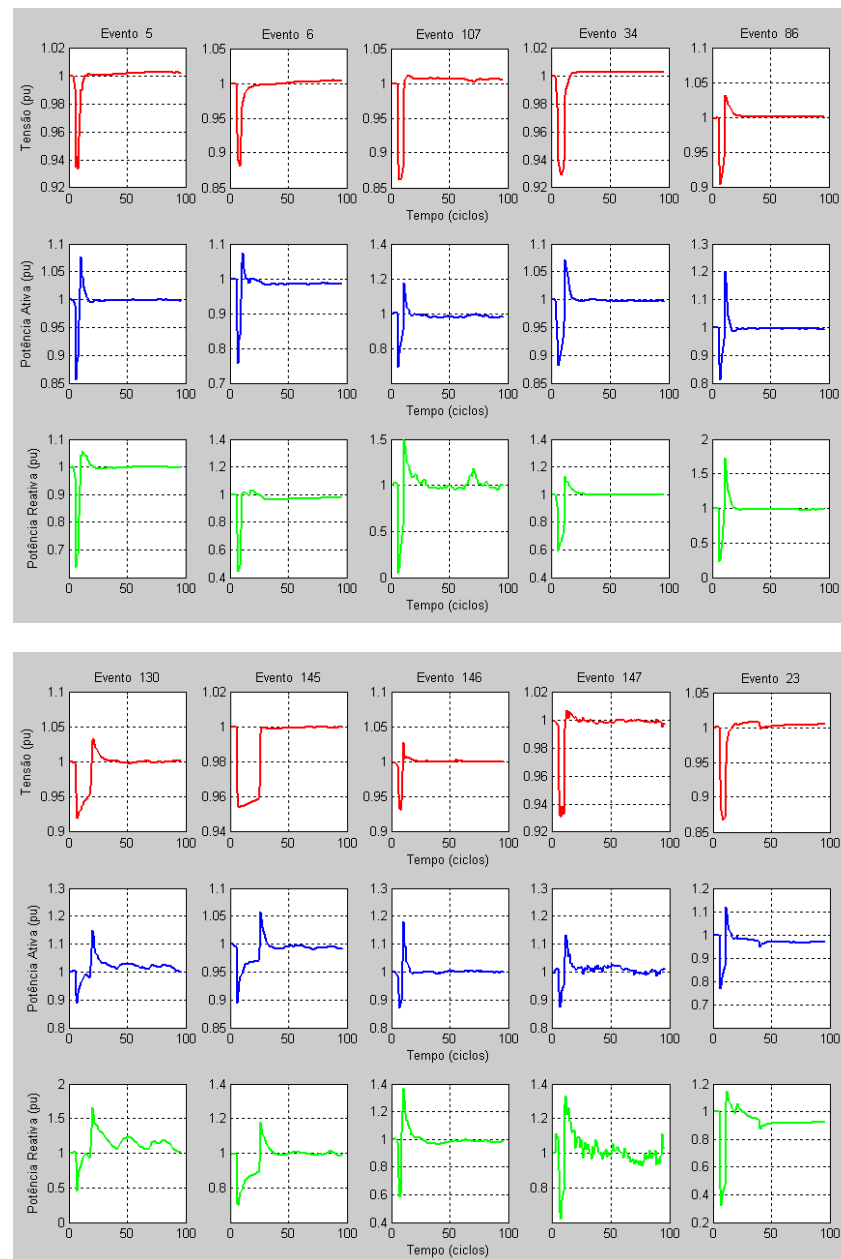


Figura 29 Eventos de Treino – Alimentador Mondubim 69kV



A Tabela 17 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 17 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,5574	c1 =	0,6623
b =	0,6777	e =	0,0000	a2 =	0,2740	c2 =	0,3000
c =	0,3223	g =	1,0000	a3 =	0,1316	c3 =	-0,0093
<hr/>				a4 =	0,0530	c4 =	-0,1277
<hr/>				a5 =	-0,1241	c5 =	0,0647
<hr/>				b0 =	2,3785	d0 =	7,3049
Parâmetros do Modelo ZIP Anatem				b1 =	-1,8490	d1 =	-5,9911
a =	0,4000	d =	0,0000	b2 =	-0,7678	d2 =	-2,5394
b =	0,0000	e =	0,0000	b3 =	-0,1757	d3 =	0,6335
c =	0,6000	g =	1,0000	b4 =	-0,0639	d4 =	0,9697
<hr/>				b5 =	0,5861	d5 =	-0,2676
<hr/>				<hr/>			

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 17 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. As curvas da Figura 30 representam a resposta fornecida pelos modelos estimados, a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

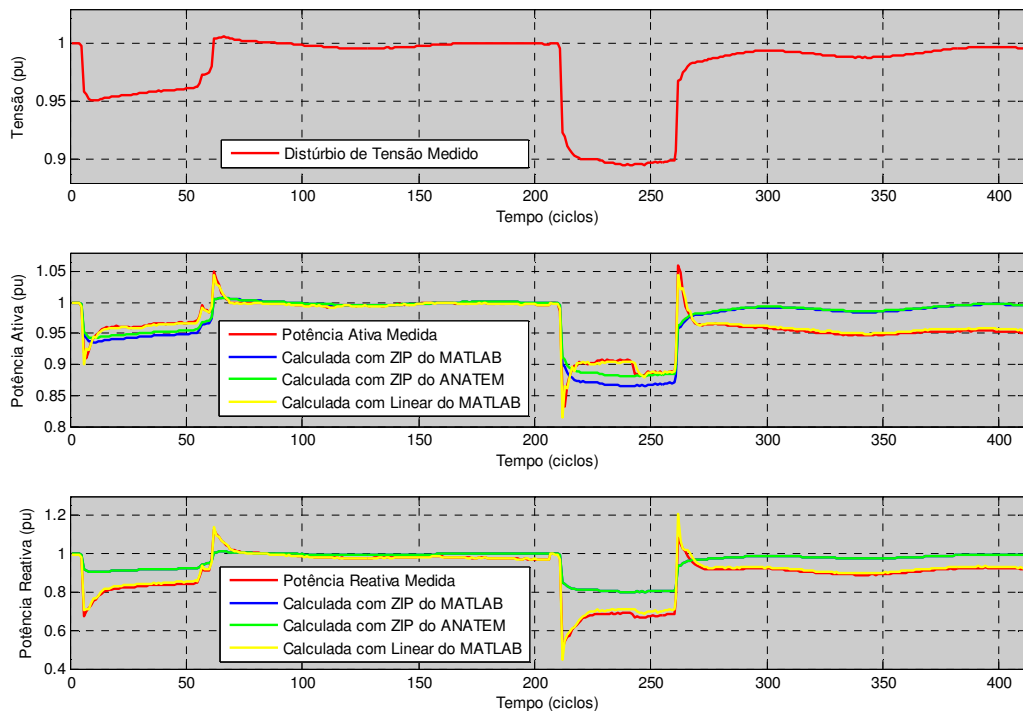


Figura 30 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Mondubim 69kV



Mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.4.3 ALIMENTADOR MESSEJANA 69kV:

Dos 71 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 31.

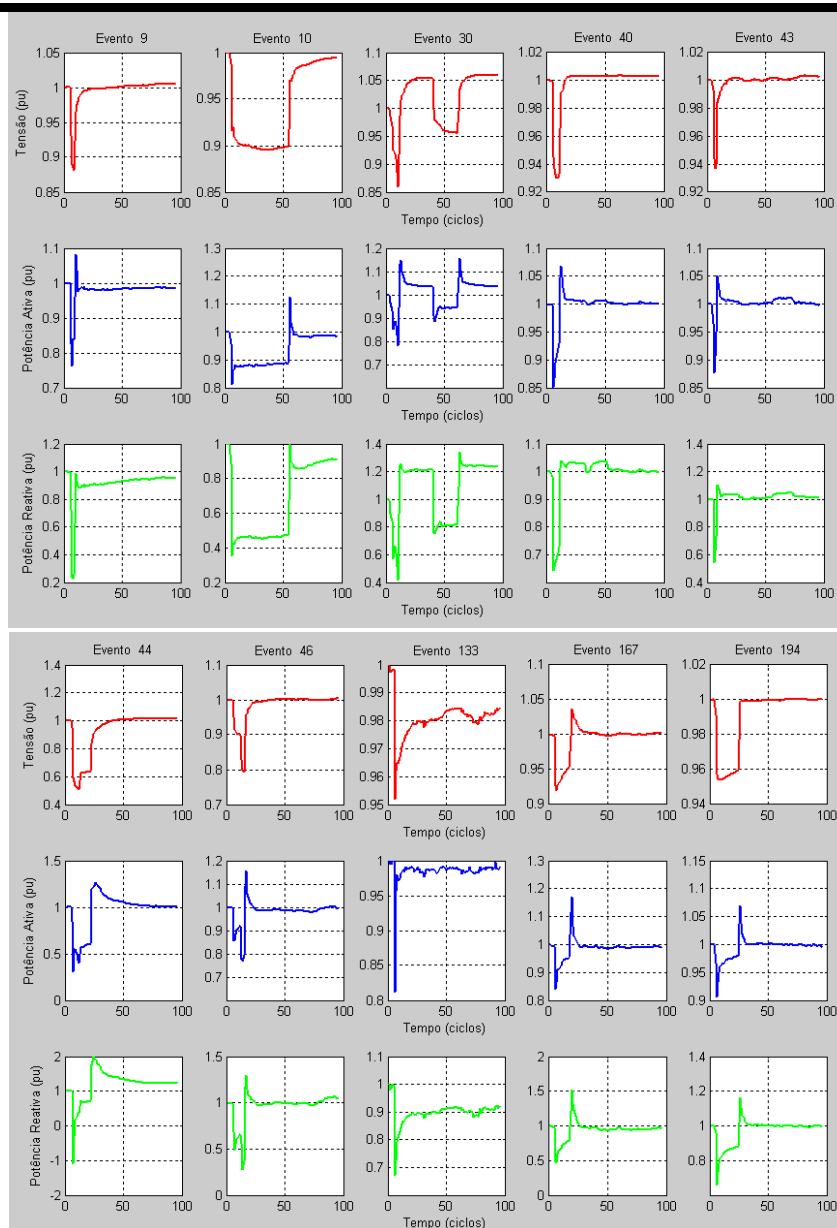


Figura 31 Eventos de Treino – Alimentador Messejana 69kV

A Tabela 18 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.



Tabela 18 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	1,0152	c1 =	1,0852
b =	0,9276	e =	0,0000	a2 =	-0,0788	c2 =	-0,0600
c =	0,0724	g =	1,0000	a3 =	-0,0711	c3 =	-0,0431
<hr/>				a4 =	-0,0539	c4 =	-0,0666
				a5 =	0,0680	c5 =	0,0541
				b0 =	2,1449	d0 =	6,1159
Parâmetros do Modelo ZIP Anatem				b1 =	-2,9591	d1 =	-8,3894
a =	0,4000	d =	0,0000	b2 =	0,7898	d2 =	1,2189
b =	0,0000	e =	0,0000	b3 =	0,2905	d3 =	0,9515
c =	0,6000	g =	1,0000	b4 =	0,0252	d4 =	0,3650
				b5 =	-0,1708	d5 =	-0,2315

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 18 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. A Figura 32 apresenta a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

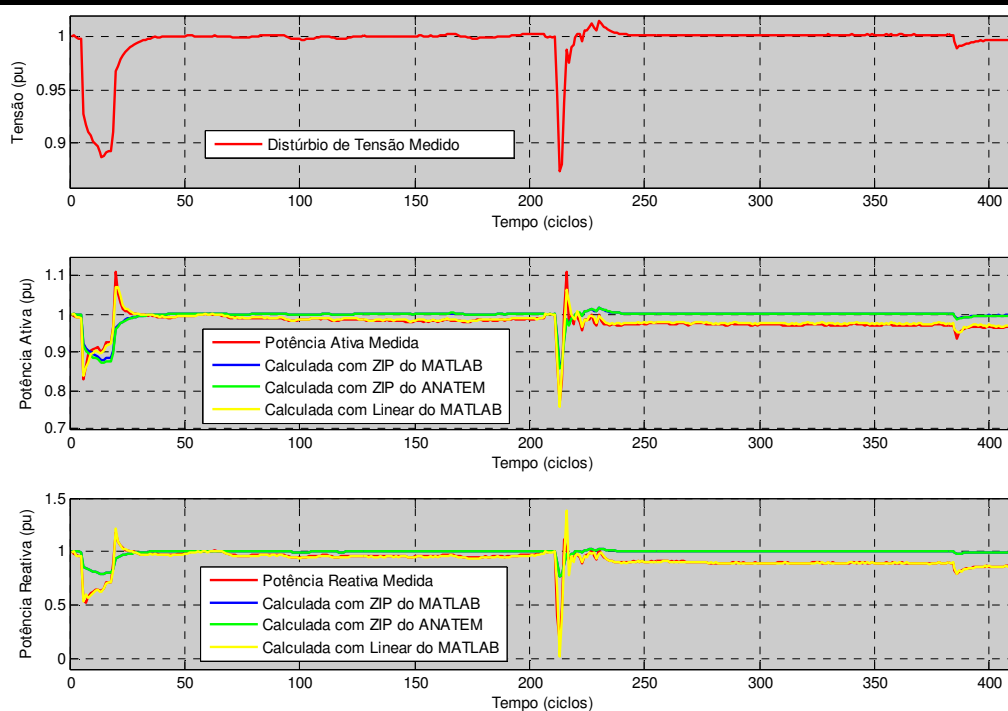


Figura 32 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Messejana 69kV

Da mesma forma que nos demais alimentadores, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado no Matlab foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.



V.1.5 SE BARREIRAS 138/69KV

A SE Barreiras 138/69kV, de propriedade da CHESF, foi monitorada entre 13 de julho e 29 de agosto de 2006. Durante esse período foram registrados 22 eventos no *Alimentador Rio Branco 138kV*, 34 eventos no *Alimentador Angical 69kV* e 24 eventos no *Alimentador Rio Grande 69kV*.

V.1.5.1 ALIMENTADOR RIO BRANCO 138kV:

Dos 22 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 33.

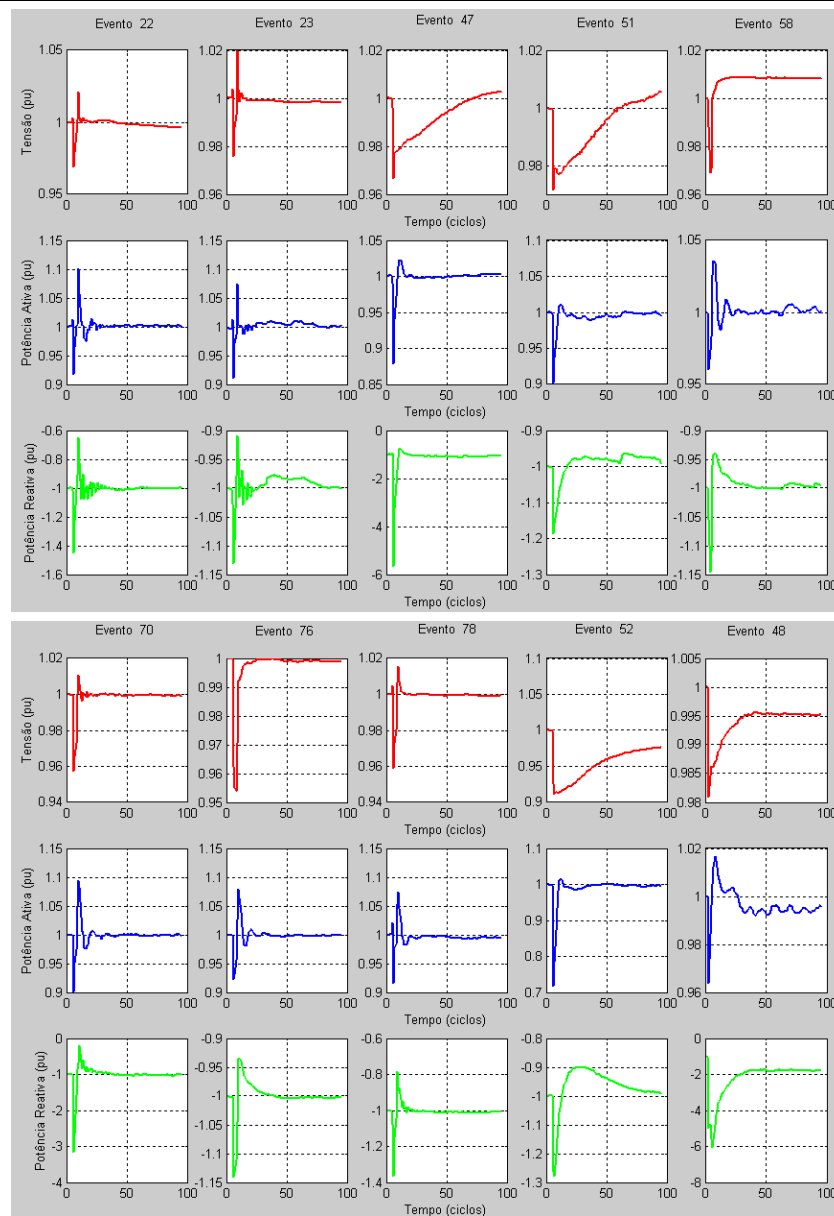


Figura 33 Eventos de Treino – Alimentador Rio Branco 138kV



A Tabela 19 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 19 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	1,1289	c1 =	0,9722
b =	0,7820	e =	0,0000	a2 =	-0,3174	c2 =	0,0685
c =	0,2180	g =	1,0000	a3 =	0,1768	c3 =	0,1786
				a4 =	-0,0762	c4 =	-0,0730
				a5 =	-0,0168	c5 =	0,0206
				b0 =	2,8786	d0 =	23,7331
				b1 =	-4,0925	d1 =	-21,8281
				b2 =	1,4444	d2 =	-2,8025
				b3 =	-0,7705	d3 =	0,6689
				b4 =	0,1899	d4 =	0,7566
				b5 =	0,4545	d5 =	-0,6949

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,3000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,7000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 19 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. A Figura 34 apresenta a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

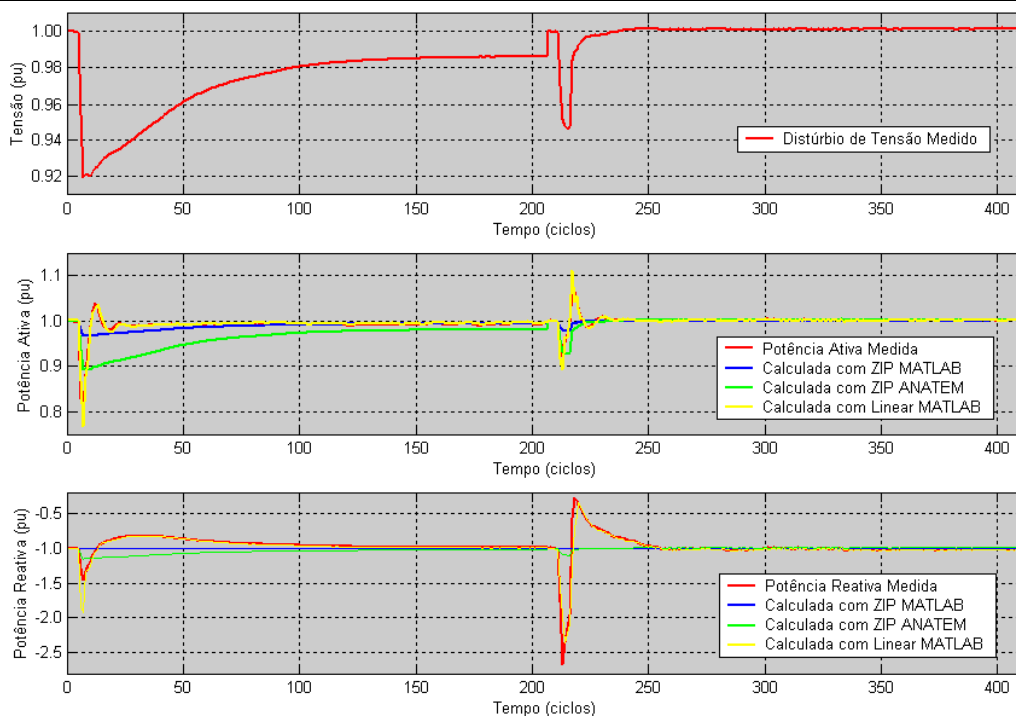


Figura 34 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Rio Branco 138kV



Mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.5.2 ALIMENTADOR ANGICAL 69kV

Dos 34 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 35.

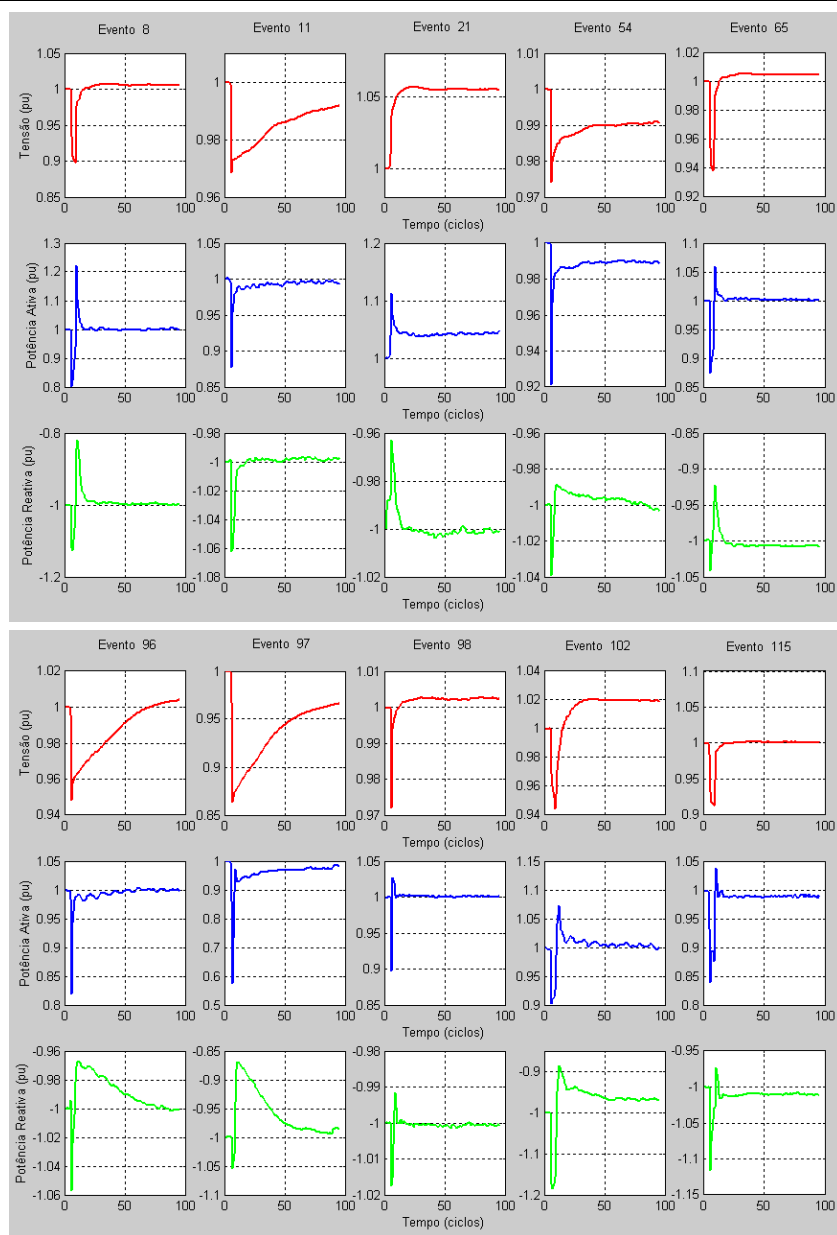


Figura 35 Eventos de Treino – Alimentador Angical 69kV



A Tabela 20 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 20 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,2594	d =	0,7883	a1 =	1,1601	c1 =	1,2970
b =	0,7406	e =	0,2117	a2 =	-0,4927	c2 =	-0,1590
c =	0,0000	g =	0,0000	a3 =	0,2850	c3 =	-0,0949
				a4 =	-0,0086	c4 =	-0,0821
				a5 =	-0,0052	c5 =	0,0878
				b0 =	3,2544	d0 =	1,3349
				b1 =	-5,6315	d1 =	-1,7796
				b2 =	3,1097	d2 =	-0,3002
				b3 =	-1,1383	d3 =	0,3978
				b4 =	0,3284	d4 =	0,4073
				b5 =	0,1388	d5 =	-0,1090

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,3000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,7000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 20 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. A Figura 36 apresenta a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

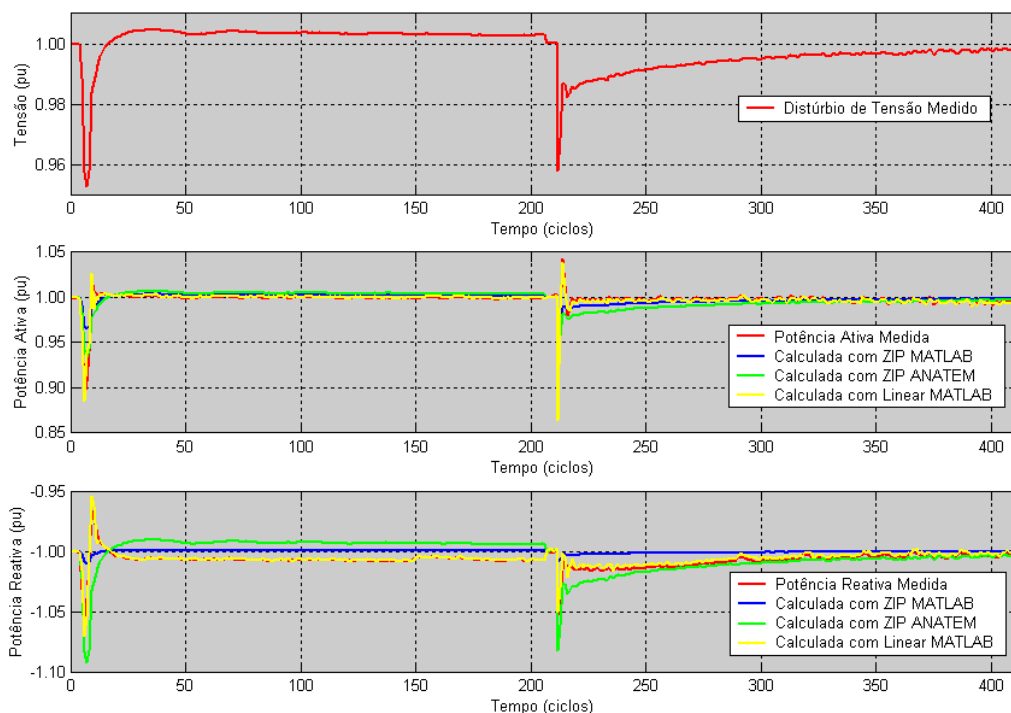


Figura 36 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Angical 69kV



Mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.5.3 ALIMENTADOR RIO GRANDE 69kV

Dos 24 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 37.

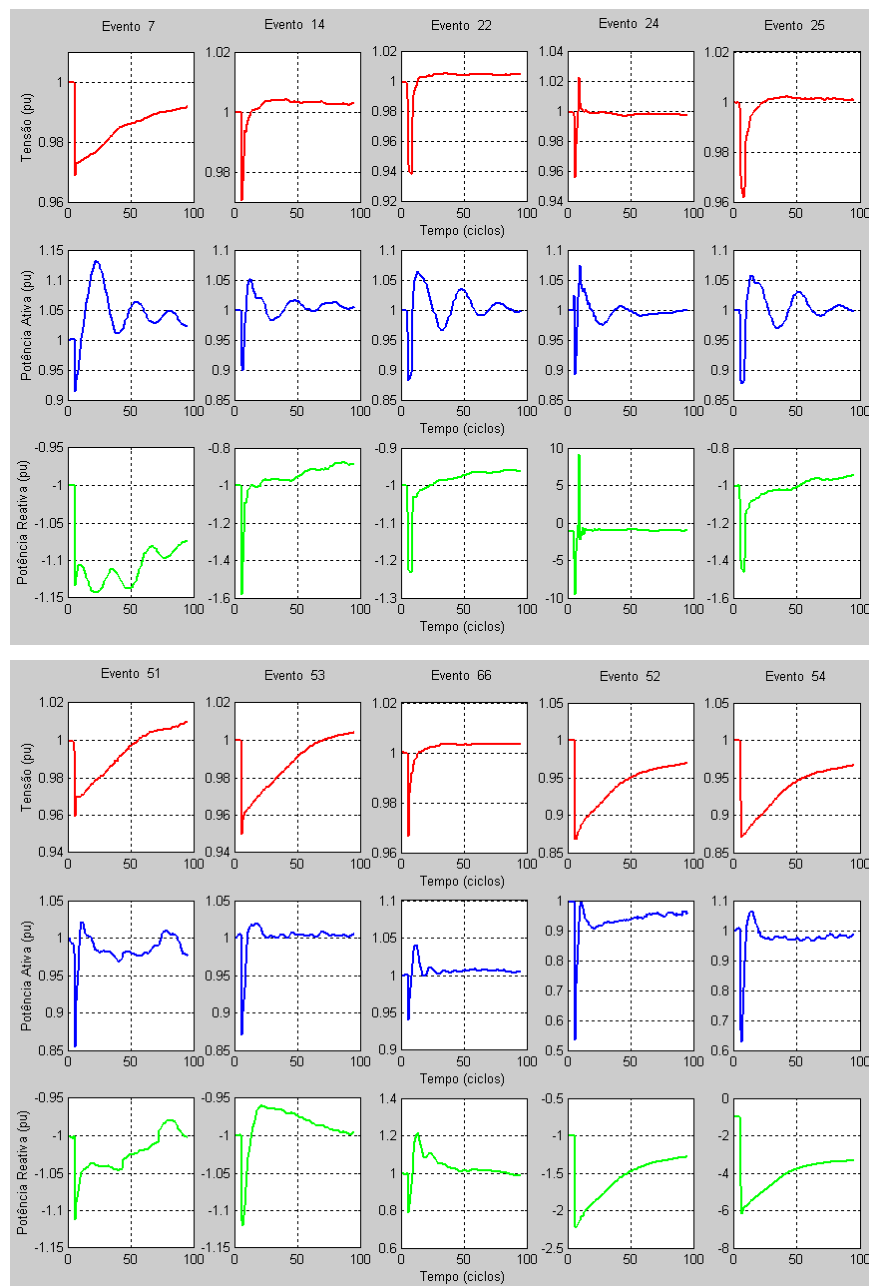


Figura 37 Eventos de Treino – Alimentador Rio Grande 69kV



A Tabela 21 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 21 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,2661	d =	1,0000	a1 =	1,0299	c1 =	0,5775
b =	0,7339	E =	0,0000	a2 =	0,0442	c2 =	0,1186
c =	0,0000	g =	0,0000	a3 =	-0,1707	c3 =	-0,1346
				a4 =	0,1040	c4 =	0,1878
				a5 =	-0,0729	c5 =	0,2782
				b0 =	3,1765	d0 =	32,8139
				b1 =	-4,1808	d1 =	-24,4939
				b2 =	0,0820	d2 =	0,8418
				b3 =	0,8849	d3 =	-8,8594
				b4 =	-0,5459	d4 =	12,5389
				b5 =	0,6488	d5 =	-12,8687

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,3000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,7000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 21 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. As curvas da Figura 38 representam a resposta fornecida pelos modelos estimados, a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

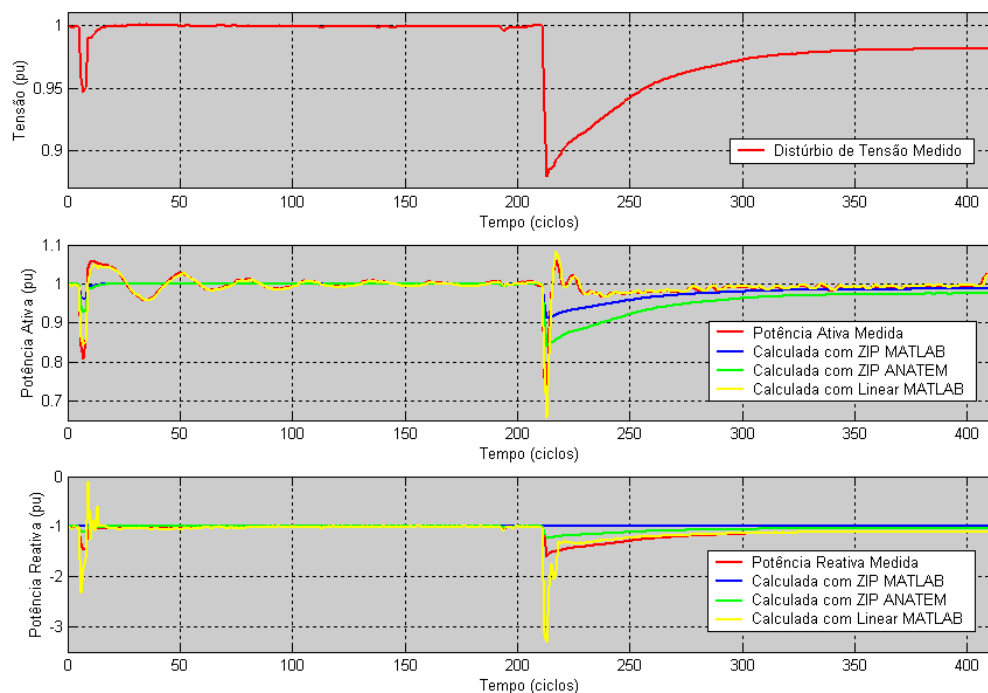


Figura 38 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Rio Grande 69kV

Mais uma vez, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.



V.1.6 SE GRAVATAÍ II - 230/69kV

A SE Gravataí II - 230/69kV, de propriedade da CEEE, foi monitorada entre 30 de agosto e 09 de outubro de 2006. Durante esse período foram registrados 22 eventos no *Alimentador Viamão 2 - 69kV*, 10 eventos no *Alimentador Gravataí 1 - 69kV* e 04 eventos no *Alimentador CIAG 230kV*.

V.1.6.1 ALIMENTADOR VIAMÃO 2 - 69KV

Dos 22 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 39.

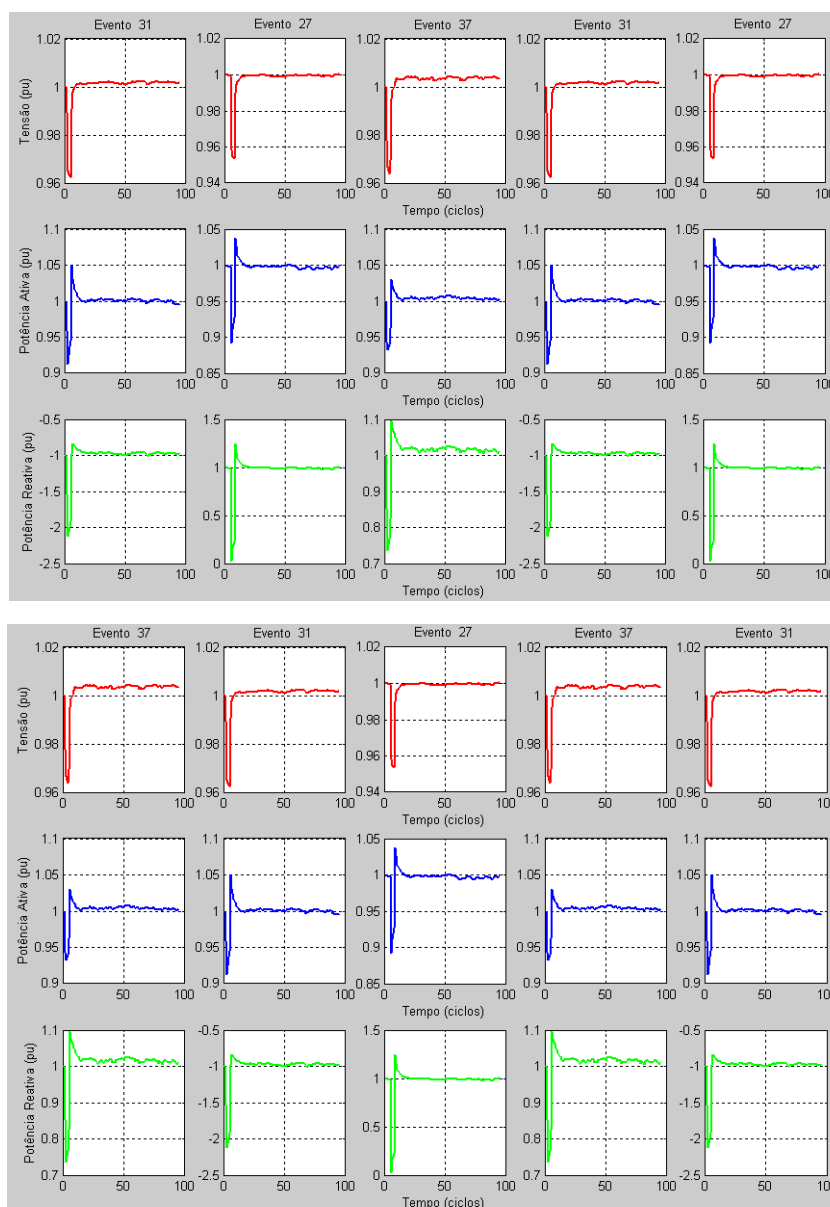


Figura 39 Eventos de Treino – Alimentador Viamão 2 - 69kV



A Tabela 22 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 22 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,4727	c1 =	1,2138
b =	0,2580	e =	0,0000	a2 =	0,2185	c2 =	-0,2074
c =	0,7420	g =	1,0000	a3 =	0,2038	c3 =	0,1247
				a4 =	-0,2915	c4 =	-0,4193
				a5 =	0,0812	c5 =	0,2883
				b0 =	2,7366	d0 =	23,9081
				b1 =	-2,1163	d1 =	-33,1859
				b2 =	-0,6434	d2 =	9,3379
				b3 =	-0,4575	d3 =	-5,0318
				b4 =	1,2231	d4 =	13,2385
				b5 =	-0,4272	d5 =	-8,2670

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,6000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,4000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 22 foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. A Figura 40 apresenta a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

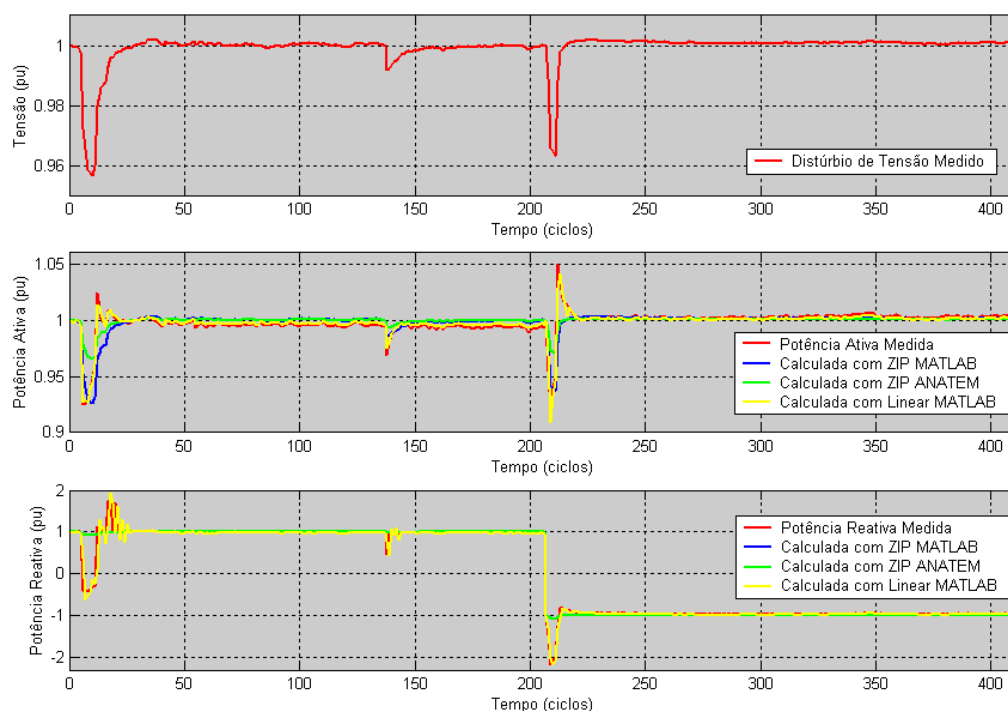


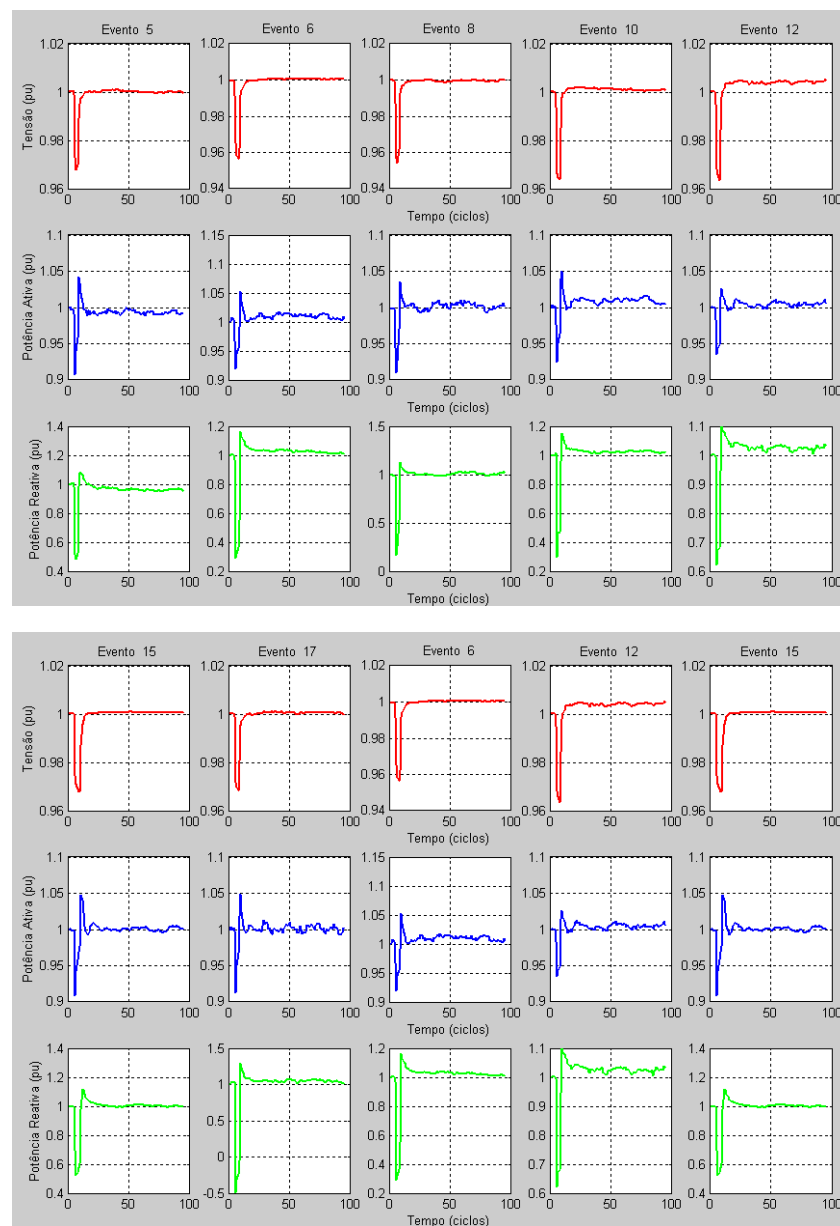
Figura 40 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Viamão 2 - 69kV



Como pode ser observado, mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.6.2 ALIMENTADOR GRAVATAÍ 1 - 69kV

Como houve o registro de apenas 10 eventos nesse ramal, o “treino” dos modelos ZIP e Linear foi realizado somente com 7 eventos. A Figura 41 apresenta os eventos selecionados para “treino”.



Observação: os eventos 06, 12 e 15 foram repetidos uma vez de modo a completar 10 eventos de “treino”.

Figura 41 Eventos de Treino – Alimentador Gravataí 1 - 69kV



A Tabela 23 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 23 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,6191	c1 =	0,7640
b =	0,6291	e =	0,0000	a2 =	0,2704	c2 =	0,1024
c =	0,3709	g =	1,0000	a3 =	-0,0335	c3 =	0,0175
				a4 =	0,0054	c4 =	-0,3647
				a5 =	-0,0325	c5 =	0,3302
				b0 =	2,6487	d0 =	20,9250
				b1 =	-2,8786	d1 =	-19,3639
				b2 =	-0,2910	d2 =	-2,0657
				b3 =	0,2776	d3 =	0,8329
				b4 =	0,1751	d4 =	5,9603
				b5 =	0,2393	d5 =	-6,1379

Parâmetros do Modelo ZIP Anatem			
a =	0,6000	d =	0,0000
b =	0,0000	e =	0,0000
c =	0,4000	g =	1,0000

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 23 foi testado em um evento que não fez parte do conjunto de “treino”. As curvas da Figura 42 representam a resposta fornecida pelos modelos estimados, a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

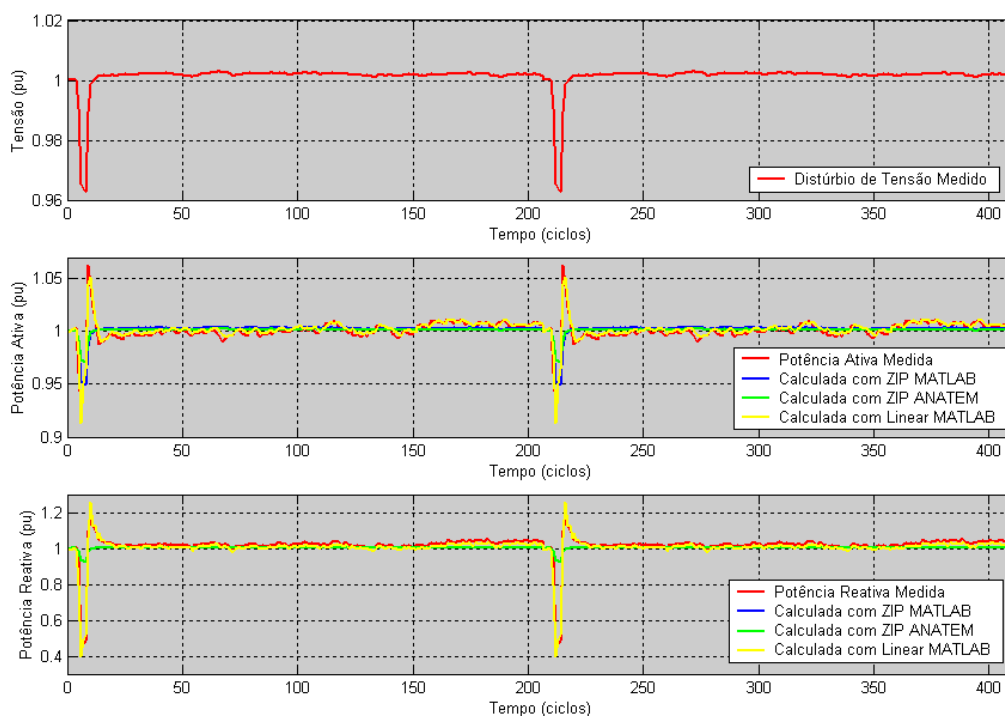


Figura 42 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Gravataí 1 - 69kV



Mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.6.3 ALIMENTADOR COMPLEXO AUTOMOTIVO INDUSTRIAL DE GRAVATAÍ (GIAG) 230kV:

Dos 4 eventos registrados no *Alimentador CIAG 230kV*, é possível observar a resposta da carga ao distúrbio de tensão em apenas um deles. Os demais eventos retratam a resposta do sistema frente uma variação de potência, não sendo ideais para estimar os parâmetros dos modelos. Diante dessa escassez de dados não foi possível estimar os modelos desse alimentador.

V.1.7 SE JOINVILLE IV

A SE Joinville IV, de propriedade da CELESC, foi monitorada entre 10 de outubro e 20 de novembro de 2006. Durante esse período foram registrados 12 eventos no *Alimentador Compartilhada 138kV*, 22 eventos no *Alimentador Iririu 138kV* e 15 eventos no *Alimentador Geral BT 13,8kV*.

V.1.7.1 ALIMENTADOR COMPARTILHADA 138kV

Dos 12 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 43 e na Figura 44.

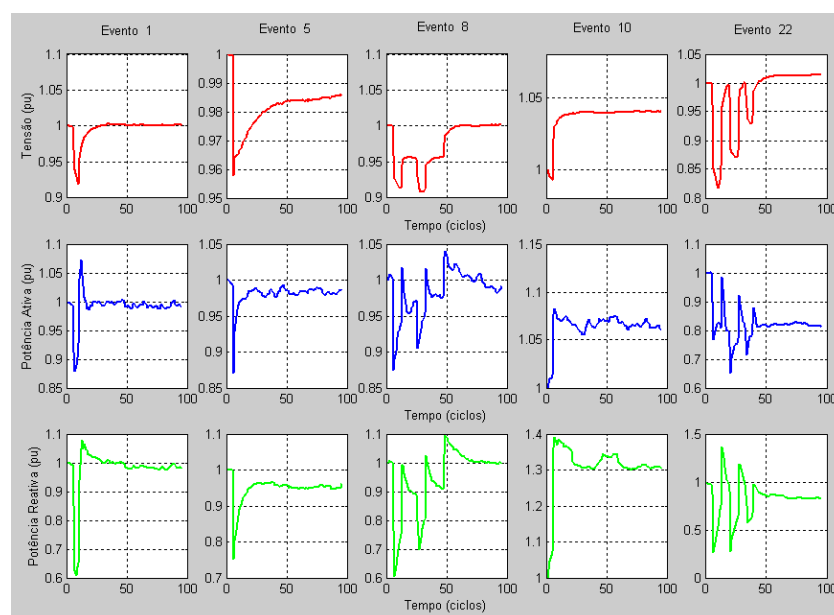


Figura 43 Eventos de Treino – Alimentador Compartilhada 138kV

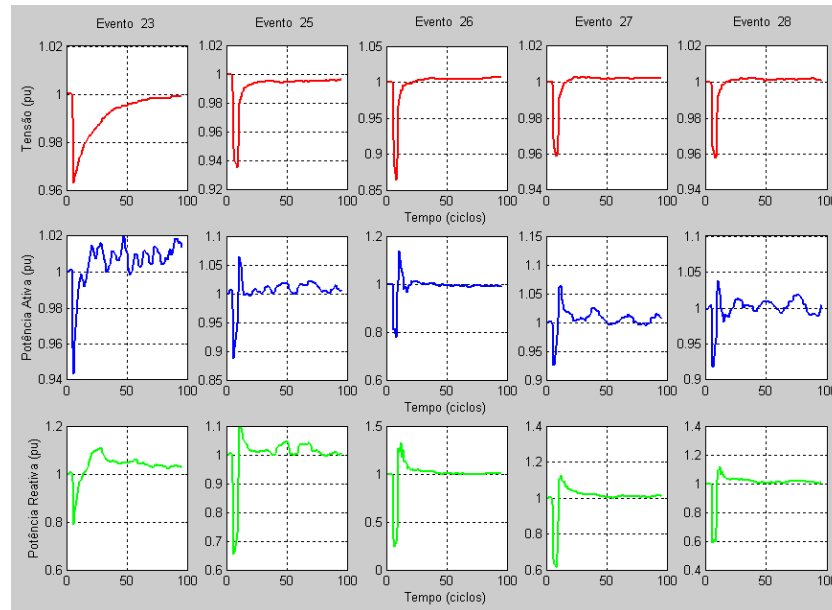


Figura 44 Eventos de Treino – Alimentador Compartilhada 138kV

A Tabela 16 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 24 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,6764	c1 =	0,9041
b =	0,8228	e =	0,0000	a2 =	0,6342	c2 =	0,2678
c =	0,1772	g =	1,0000	a3 =	-0,3235	c3 =	-0,1690
<hr/>				a4 =	-0,0930	c4 =	-0,0921
<hr/>				a5 =	0,0983	c5 =	0,0750
<hr/>				b0 =	1,8795	d0 =	6,6164
<hr/>				b1 =	-2,0018	d1 =	-7,0995
<hr/>				b2 =	-0,9108	d2 =	-1,6022
<hr/>				b3 =	0,8040	d3 =	1,5921
<hr/>				b4 =	0,3347	d4 =	0,2861
<hr/>				b5 =	-0,0981	d5 =	0,2213

Da mesma forma que nos demais alimentadores, o desempenho desses parâmetros foi testado em dois eventos que não fizeram parte do conjunto de “treino”. Na Figura 45 é apresentada a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

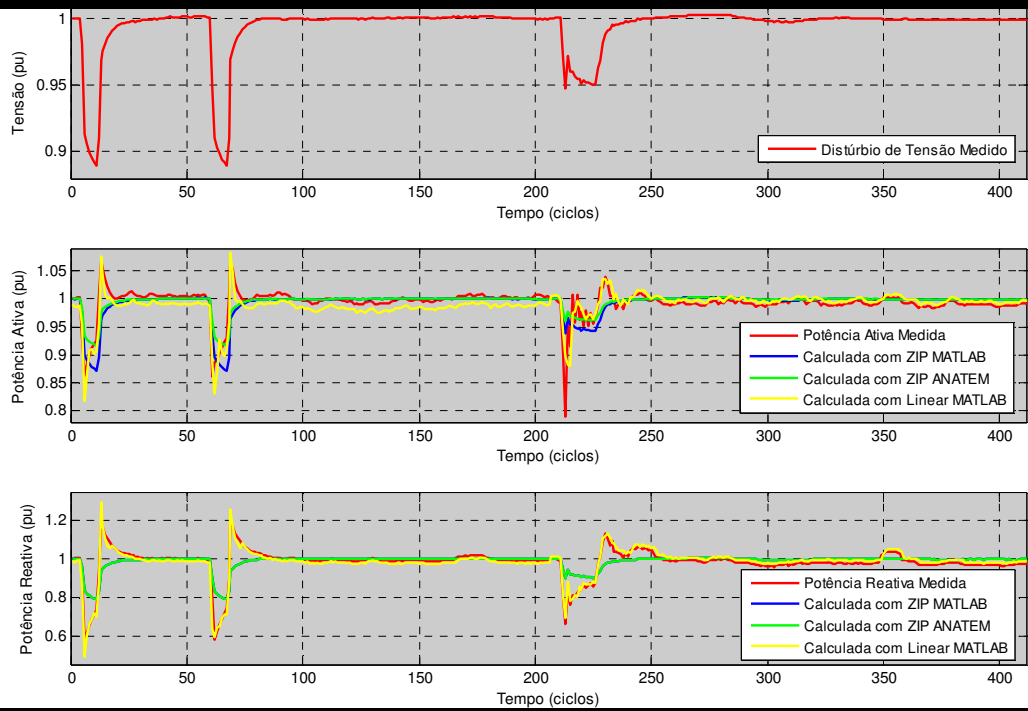


Figura 45 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Compartilhada 138kV

Como pode ser observado, mais uma vez, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.7.2 ALIMENTADOR IRIRU 138kV

Dos 22 eventos registrados nesse ramal, 10 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 46 e na Figura 47.

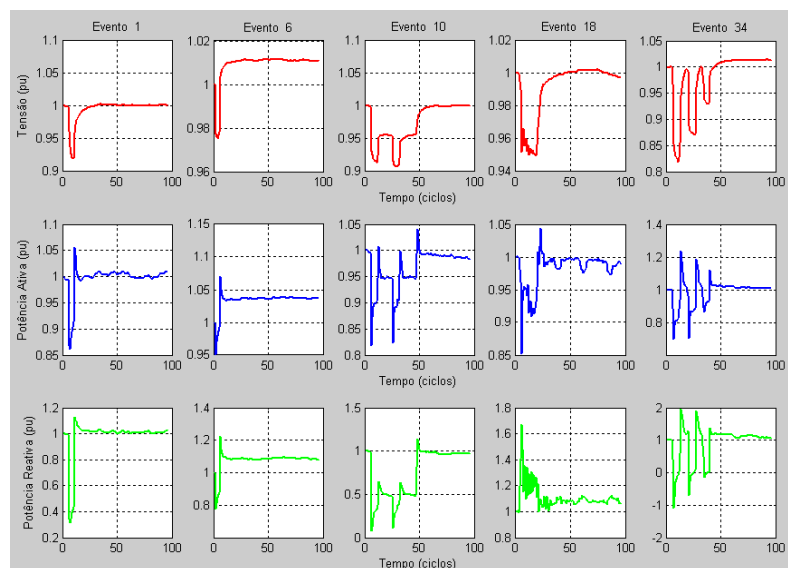


Figura 46 Eventos de Treino – Alimentador Iriuru 138kV

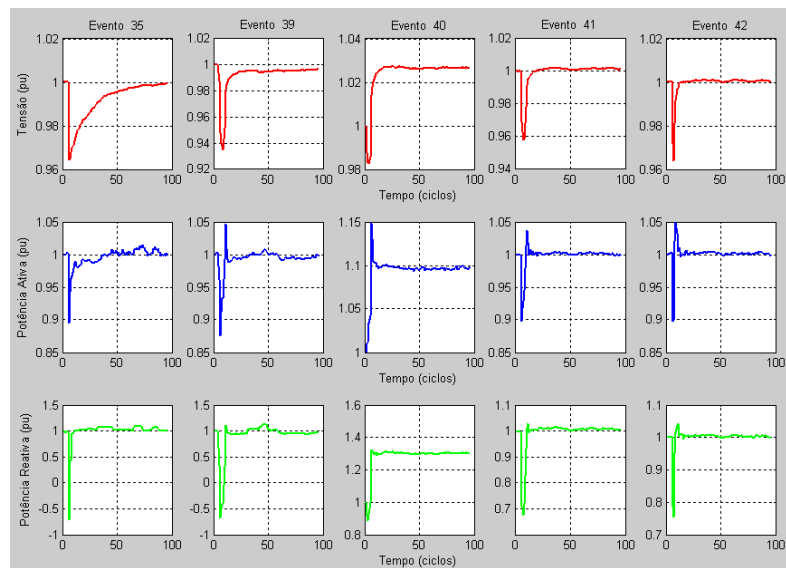


Figura 47 Eventos de Treino – Alimentador Iririu 138kV

A Tabela 25 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 25 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,2328	d =	0,0000	a1 =	0,5687	c1 =	0,7323
b =	0,0000	e =	0,0000	a2 =	0,2617	c2 =	0,2209
c =	0,7672	g =	1,0000	a3 =	0,0853	c3 =	-0,1021
				a4 =	0,1403	c4 =	0,0877
				a5 =	-0,0808	c5 =	-0,0164
				b0 =	2,9927	d0 =	16,7063
				b1 =	-3,2030	d1 =	-18,0413
				b2 =	-0,3275	d2 =	-1,4726
				b3 =	0,2190	d3 =	2,7729
				b4 =	-0,1277	d4 =	-0,9347
				b5 =	0,4713	d5 =	1,0469

O desempenho desses parâmetros foi testado em um evento que não fez parte do conjunto de “treino”. As curvas da Figura 48 representam a resposta fornecida pelos modelos estimados, a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

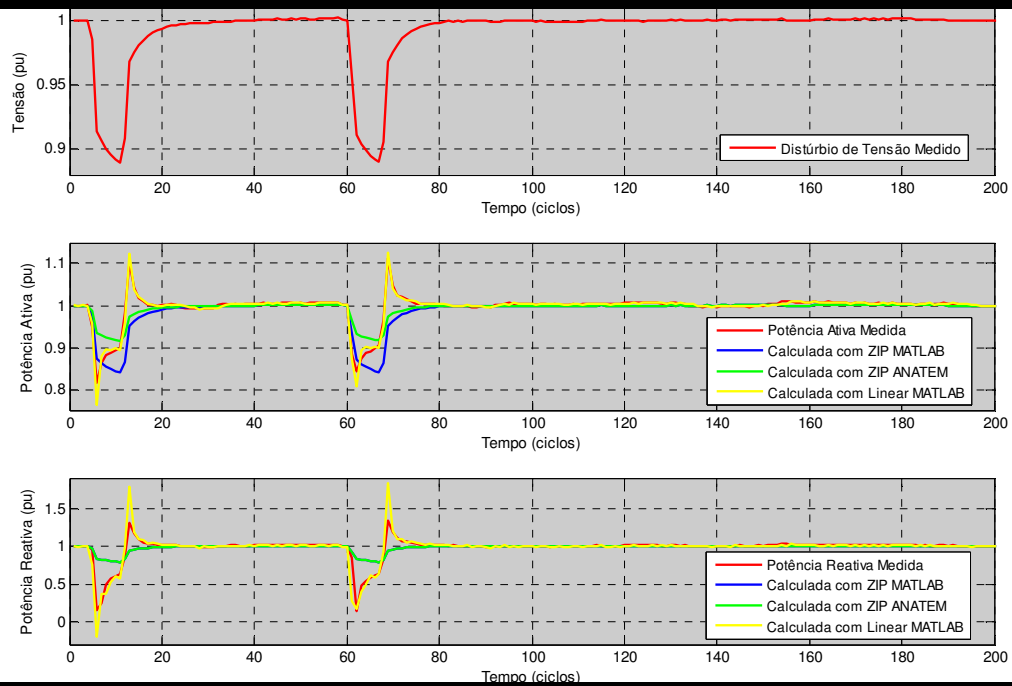


Figura 48 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Iririu 138kV

Mais uma vez, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.7.3 ALIMENTADOR GERAL BT 13,8kV (TRANSFORMADOR TT1)

Dos 15 eventos registrados nesse ramal, apenas 3 puderam ser aproveitados para “treino” dos modelos. Os demais eventos retratavam a resposta do sistema à variação de potência, não sendo ideais para estimar os parâmetros dos modelos. Os eventos selecionados para “treino” estão apresentados na Figura 49 e na Figura 50.

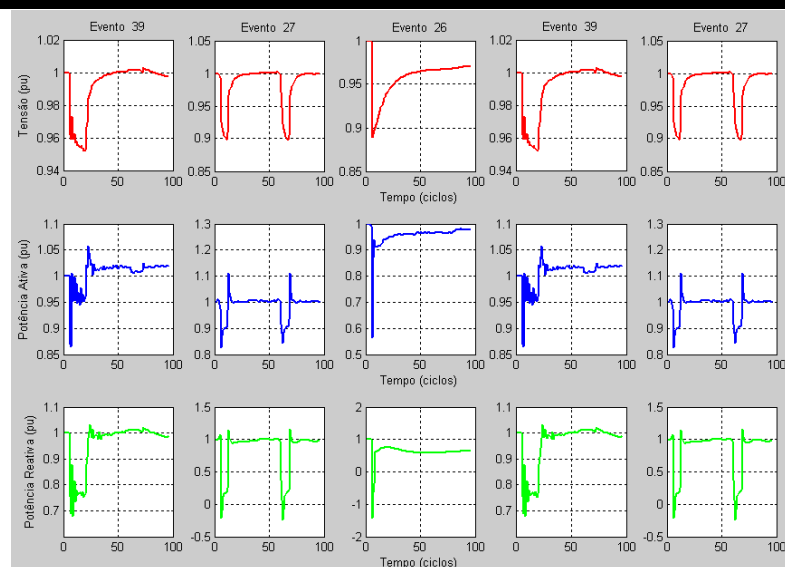


Figura 49 Eventos de Treino – Alimentador Geral BT 13,8kV (Transformador TT1)

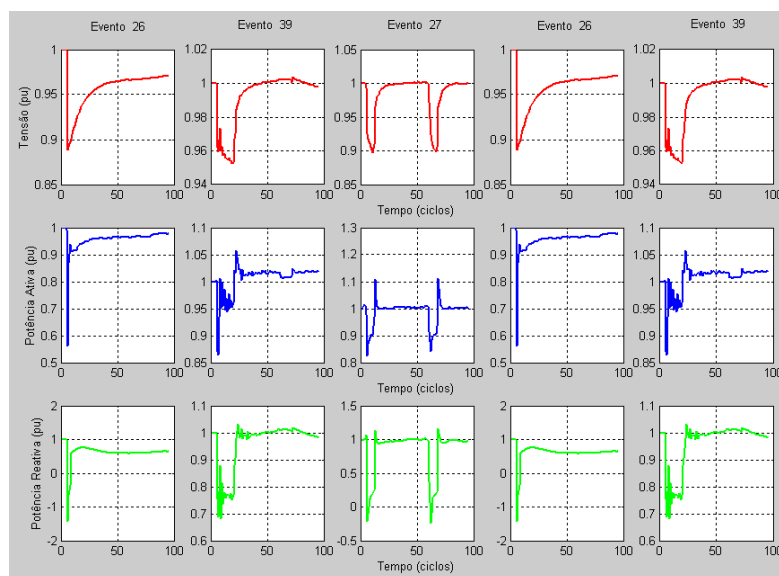


Figura 50 Eventos de Treino – Alimentador Geral BT 13,8kV (Transformador TT1)

Deve-se esclarecer que os 3 eventos selecionados foram repetidos para completar os 10 eventos de “treino” e assim atender a configuração da rotina desenvolvida no Matlab.

A Tabela 26 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.

Tabela 26 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,3270	c1 =	0,7721
b =	0,7213	e =	0,0000	a2 =	0,1535	c2 =	0,2241
c =	0,2787	g =	1,0000	a3 =	0,0336	c3 =	-0,1882
<hr/>				a4 =	0,2277	c4 =	0,0634
Parâmetros do Modelo ZIP Anatem				a5 =	-0,0356	c5 =	0,0978
a =	0,6000	d =	0,0000	b0 =	3,4119	d0 =	18,1302
b =	0,0000	e =	0,0000	b1 =	-3,0486	d1 =	-18,8362
c =	0,4000	g =	1,0000	b2 =	-0,4305	d2 =	-2,3372
				b3 =	0,3454	d3 =	1,4155
				b4 =	-0,6236	d4 =	2,2242
				b5 =	0,6393	d5 =	-0,5657

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 26 foi testado em um evento que não fez parte do conjunto de “treino”. Na Figura 51 é apresentada a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

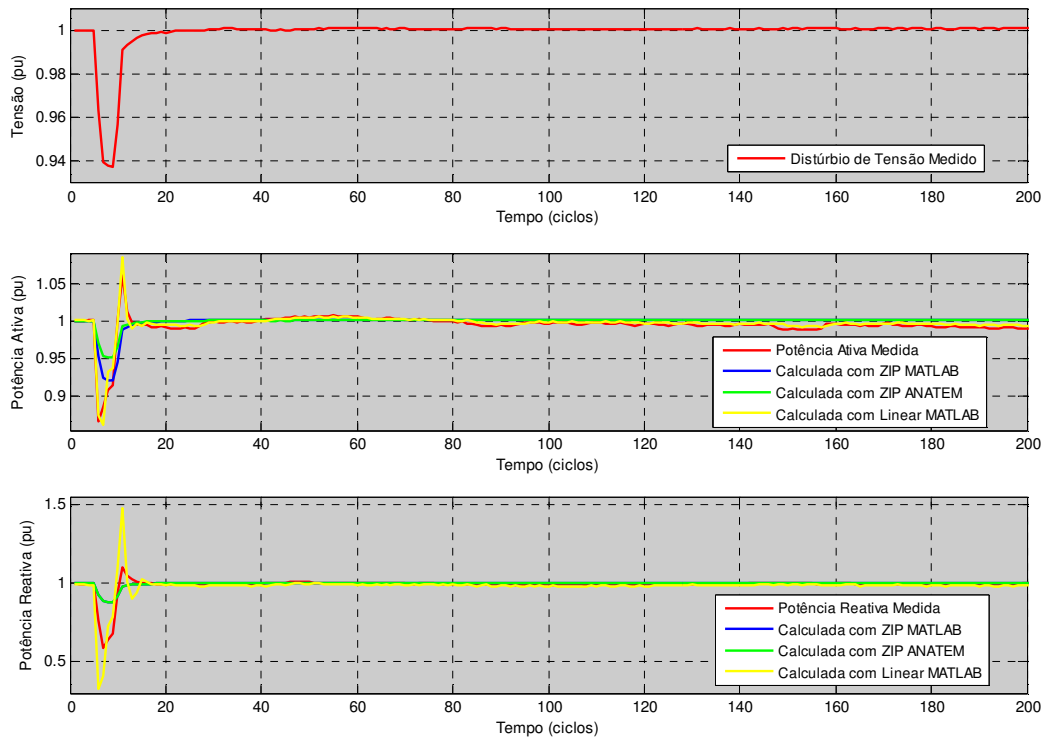


Figura 51 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Geral BT 13,8kV

Mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.1.8 SE UMBARÁ 230/69kV

A SE Umbará 230/69kV, de propriedade da COPEL, foi monitorada entre 21 de novembro de 2006 e 03 de janeiro de 2007. Durante esse período foram registrados 20 eventos no *Alimentador Siderúrgica Guairá 230kV*, 18 eventos no *Alimentador Pinheirinho 69kV* e 21 eventos no *Alimentador Tatuquara 69kV*.

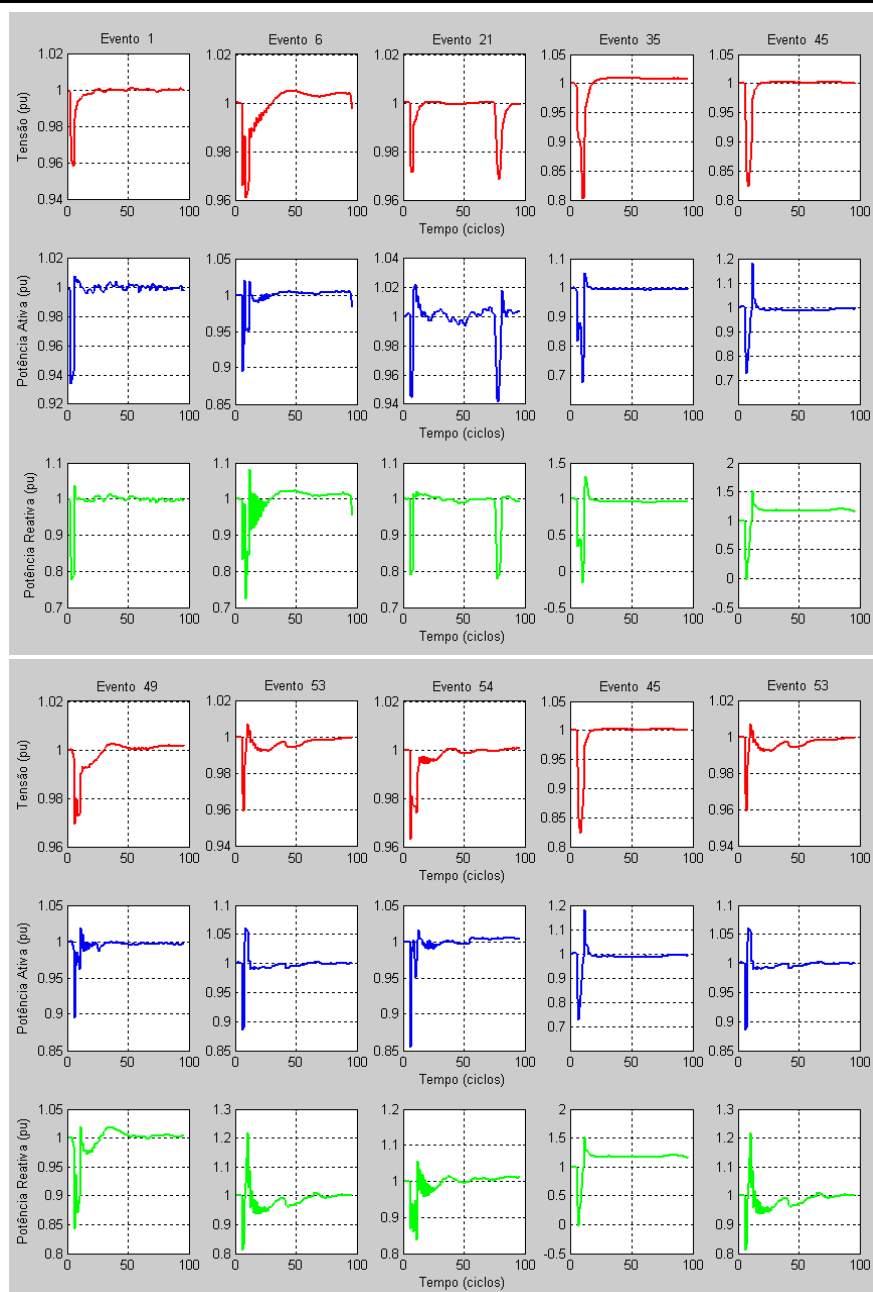
V.1.8.1 ALIMENTADOR SIDERÚRGICA GUAÍRA 230kV

Nesse alimentador somente foram registrados eventos por variação de potência, cujas variações de tensão são inferiores a 0,8%. Os eventos por variação de potência não são ideais para se fazer a simulação pois os parâmetros são estimados em função da resposta do sistema à variação da carga, e não da resposta da carga em função da variação de tensão. Desta forma não foi possível estimar os modelos para este ramal de carga.



V.1.8.2 ALIMENTADOR PINHEIRINHO 69kV

Dos 18 eventos registrados nesse ramal, 08 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 52.



Observação: os eventos 45 e 53 foram repetidos uma vez de forma completa para completar 10 eventos de “treino”.

Figura 52 Eventos de Treino – Alimentador Pinheirinho 69kV

A Tabela 27 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.



Tabela 27 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,4994	c1 =	0,4558
b =	0,8615	e =	0,0000	a2 =	0,0849	c2 =	0,4000
c =	0,1385	g =	1,0000	a3 =	-0,0719	c3 =	0,0265
<hr/>				a4 =	0,3421	c4 =	0,1468
				a5 =	-0,1102	c5 =	-0,0662
				b0 =	2,6382	d0 =	8,2093
Parâmetros do Modelo ZIP Anatem				b1 =	-2,6138	d1 =	-7,1930
a =	0,6000	d =	0,0000	b2 =	0,1919	d2 =	-2,4839
b =	0,0000	e =	0,0000	b3 =	0,1618	d3 =	0,6125
c =	0,4000	g =	1,0000	b4 =	-0,7666	d4 =	-0,6705
				b5 =	0,6440	d5 =	1,5627

O desempenho dos parâmetros apresentados foi testado em um evento que não fez parte do conjunto de “treino”. A Figura 53 apresenta a resposta fornecida pelos modelos estimados, assim como a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

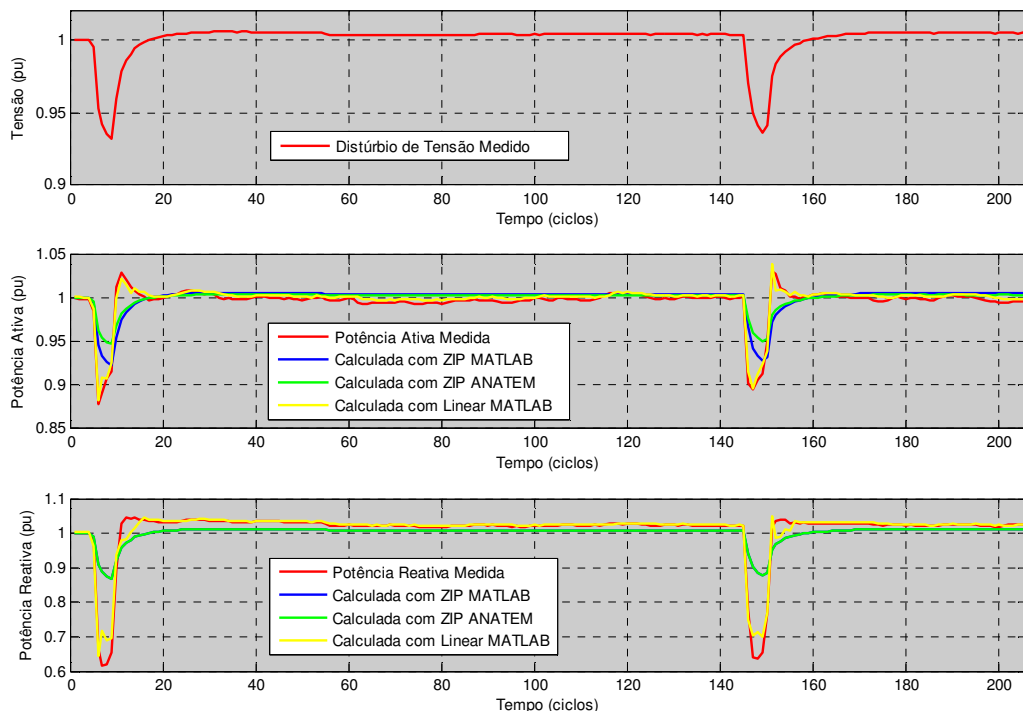


Figura 53 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Pinheirinho 69kV

Da mesma forma que nos outros ramais de carga, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.



V.1.8.3 ALIMENTADOR TATUAQUARA 69KV

Dos 21 eventos registrados nesse ramal, 08 foram selecionados para “treino” dos modelos ZIP e Linear. Os eventos escolhidos são os que apresentaram as variações de tensão mais significativas e estão apresentados na Figura 54.

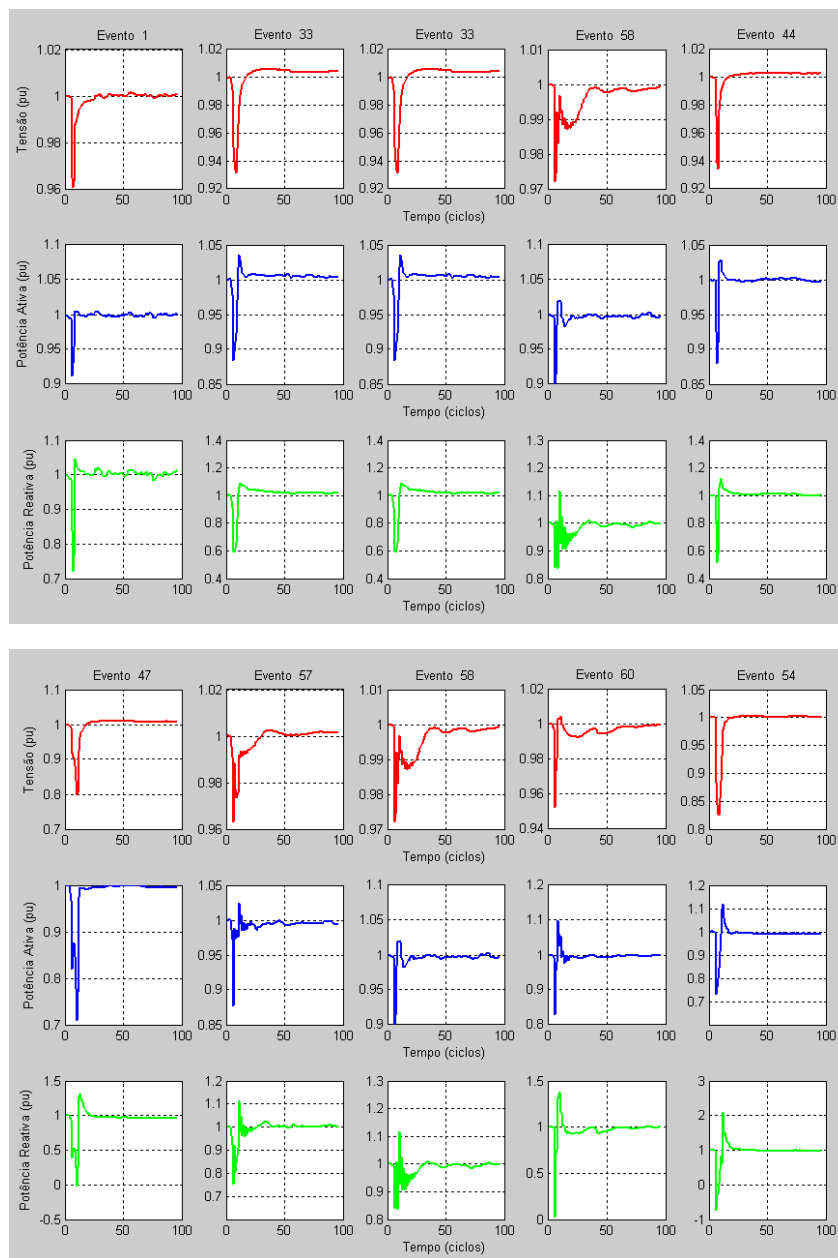


Figura 54 Eventos de Treino – Alimentador Tatuquara 69kV

A Tabela 28 apresenta os parâmetros dos modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e os parâmetros do atual modelo ZIP implantado no Anatem.



Tabela 28 Parâmetros dos Modelos ZIP e Linear estimados no Matlab e do atual Modelo ZIP do Anatem

Parâmetros Estimados para o Modelo ZIP				Parâmetros Estimados para o Modelo Linear			
a =	0,0000	d =	0,0000	a1 =	0,7191	c1 =	0,2947
b =	0,7905	e =	0,0000	a2 =	0,0797	c2 =	0,2644
c =	0,2095	g =	1,0000	a3 =	-0,3713	c3 =	-0,0392
<hr/>				a4 =	0,4327	c4 =	-0,0831
				a5 =	-0,1886	c5 =	0,1629
				b0 =	2,1892	d0 =	10,1564
Parâmetros do Modelo ZIP Anatem				b1 =	-2,2992	d1 =	-7,6909
a =	0,6000	d =	0,0000	b2 =	0,1358	d2 =	-0,0915
b =	0,0000	e =	0,0000	b3 =	0,7034	d3 =	-1,4854
c =	0,4000	g =	1,0000	b4 =	-0,9664	d4 =	0,6675
				b5 =	0,5657	d5 =	-1,1557

O desempenho dos parâmetros apresentados na Tabela 28 foi testado em um evento que não fez parte do conjunto de “treino”. As curvas da Figura 55 representam a resposta fornecida pelos modelos estimados, a resposta do atual modelo ZIP implantado no Anatem e os dados registrados em campo.

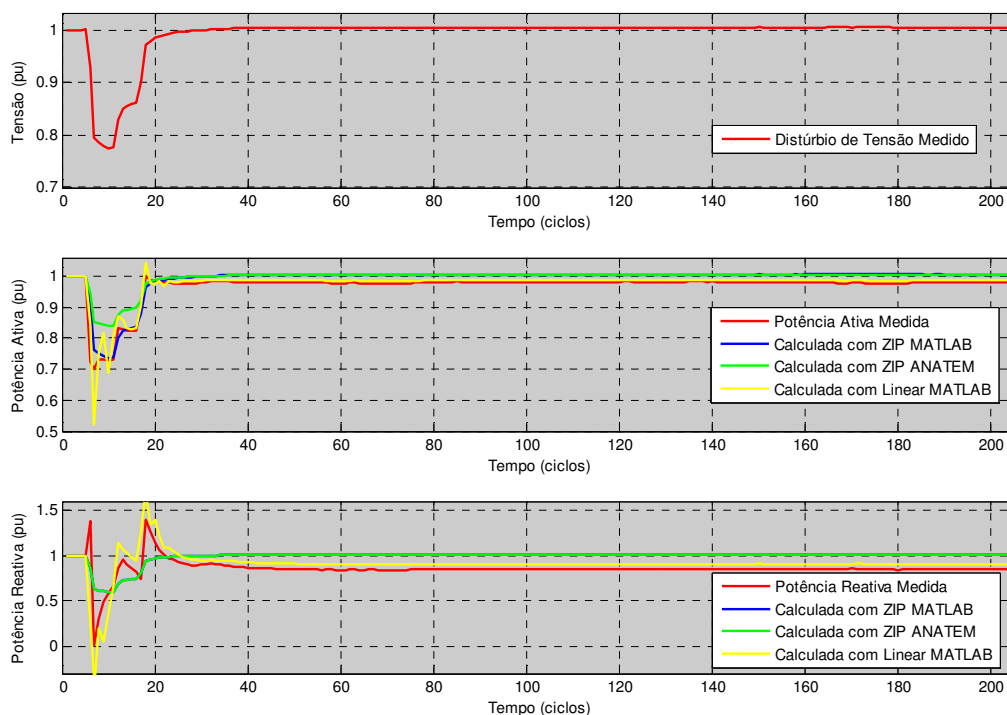


Figura 55 Desempenho dos Modelos Estimados no Matlab e do Modelo ZIP do Anatem – Tatuáquara 69kV

Mais uma vez, tanto para a potência ativa quanto para a potência reativa, o modelo Linear estimado foi o que apresentou desempenho mais próximo dos dados registrados em campo.

V.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DINÂMICO LINEAR NO ANATEM

No estudo comparativo do item anterior ficou evidente o desempenho superior do **Modelo Dinâmico Linear**. Em todos os ramais de carga estudados, a resposta desse modelo esteve bem aderente ao comportamento observado no campo.

A utilização do **Modelo Dinâmico Linear** nos estudos de estabilidade esbarrava na dificuldade da sua representação no Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos do CEPEL, o Anatem. Como a estrutura do modelo é regressiva no tempo a sua implementação não é trivial.

A implantação desse modelo no Anatem foi feita através de CDU (*Controlador Definido pelo Usuário*), onde a regressão no tempo foi representada por meio do bloco "DELAY", que está apresentado na Figura 56.


	Tipo do Bloco	Descrição
<i>DELAY</i>		$V_{sai}(t) = V_{ent}(t - \Delta t)$ <p>onde Δt é o passo de integração</p>

Figura 56 Bloco Delay

O bloco "DELAY" permite ao modelo a utilização de valores de variável no instante de tempo anterior ($t - \Delta t$) do processo de integração, onde Δt é o passo de integração do programa. Desta forma, quando associado, em cascata, pode-se obter valores passados de tensão e potência de acordo com a ordem de regressão (n) escolhida (neste caso, $n = 5$).

O modelo implementado apresenta a seguinte formulação matemática:

$$P_k = \sum_{i=1}^{n_p} a_i P_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} b_i V_{k-i} \quad (\text{equação 127})$$

$$Q_k = \sum_{i=1}^{n_q} d_i Q_{k-i} + \sum_{i=0}^{n_v} e_i V_{k-i} \quad (\text{equação 128})$$

Dentro deste conceito, o CDU para representação do **Modelo Dinâmico Linear** foi desenvolvido e a sua estrutura básica está apresentada na Figura 57.

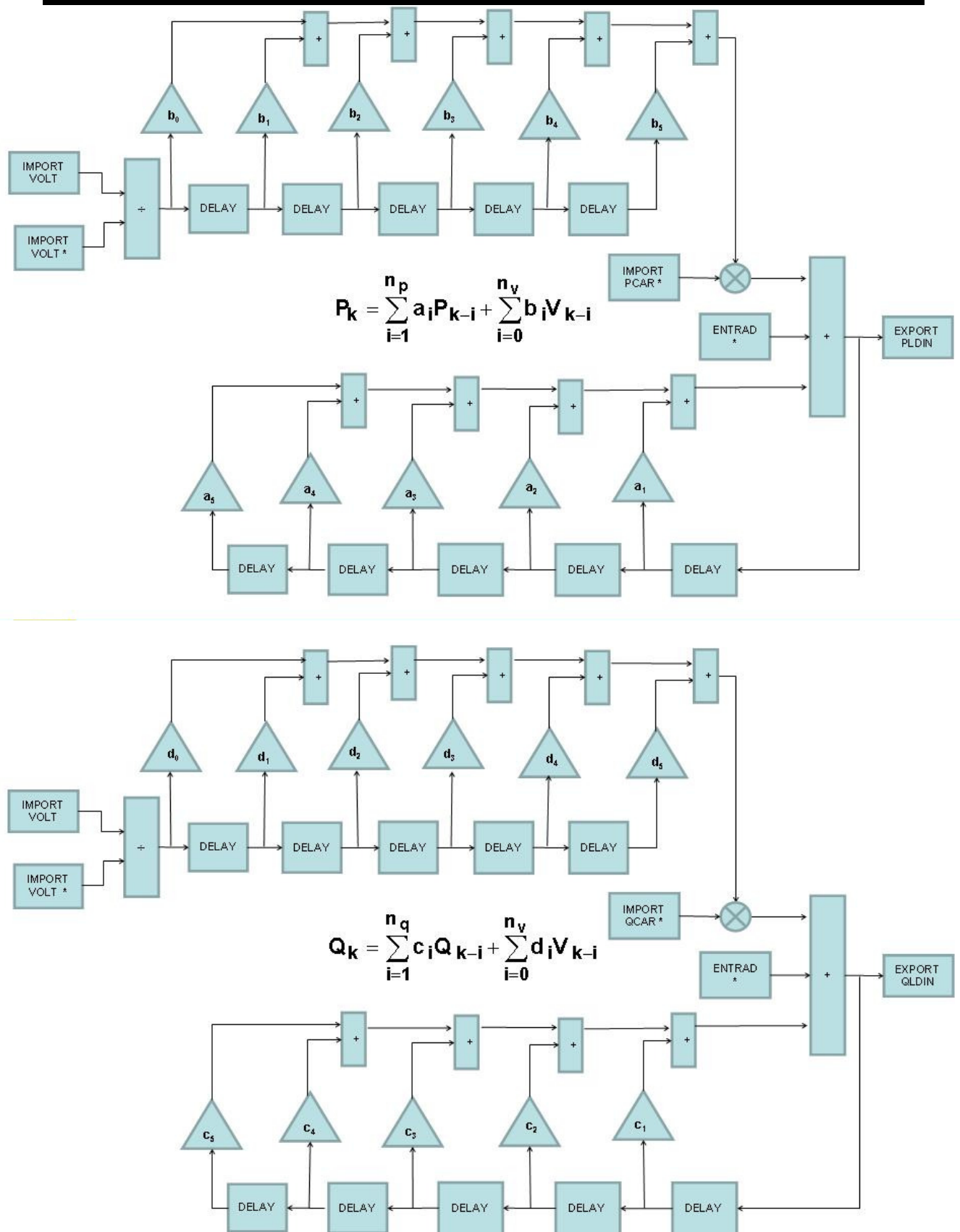


Figura 57 CDU para Representação do Modelo Linear no Anatem (Potência Ativa e Potência Reativa)



V.3 SIMULAÇÕES NO ANATEM

Apenas para ilustrar a viabilidade de implementação do modelo Linear no Anatem, são apresentados neste item resultados de simulações do Anatem usando o atual modelo ZIP da sua base de dados e o modelo Linear estimado a partir dos dados de medição.

O ramal de carga escolhido para as simulações foi o *Alimentador Tatuaquara 69kV*, conectado na SE Umbará 69kV. Foram simulados no Anatem dois eventos na malha de 525kV próxima a SE Umbará e um evento no 69kV da SE Tatuaquara. O primeiro evento simulado foi a perda de três unidades geradoras da UHE Governador Ney Braga (GNB), o equivalente a uma geração de 880MW. O segundo evento foi a manobra de energização da LT 525kV Areia – Curitiba a partir do terminal de Areia. E o terceiro evento foi a aplicação de um curto-circuito no 69kV da SE Tatuaquara (100ms) seguida da eliminação do mesmo (150ms). Na Figura 58 é possível visualizar a rede em questão.

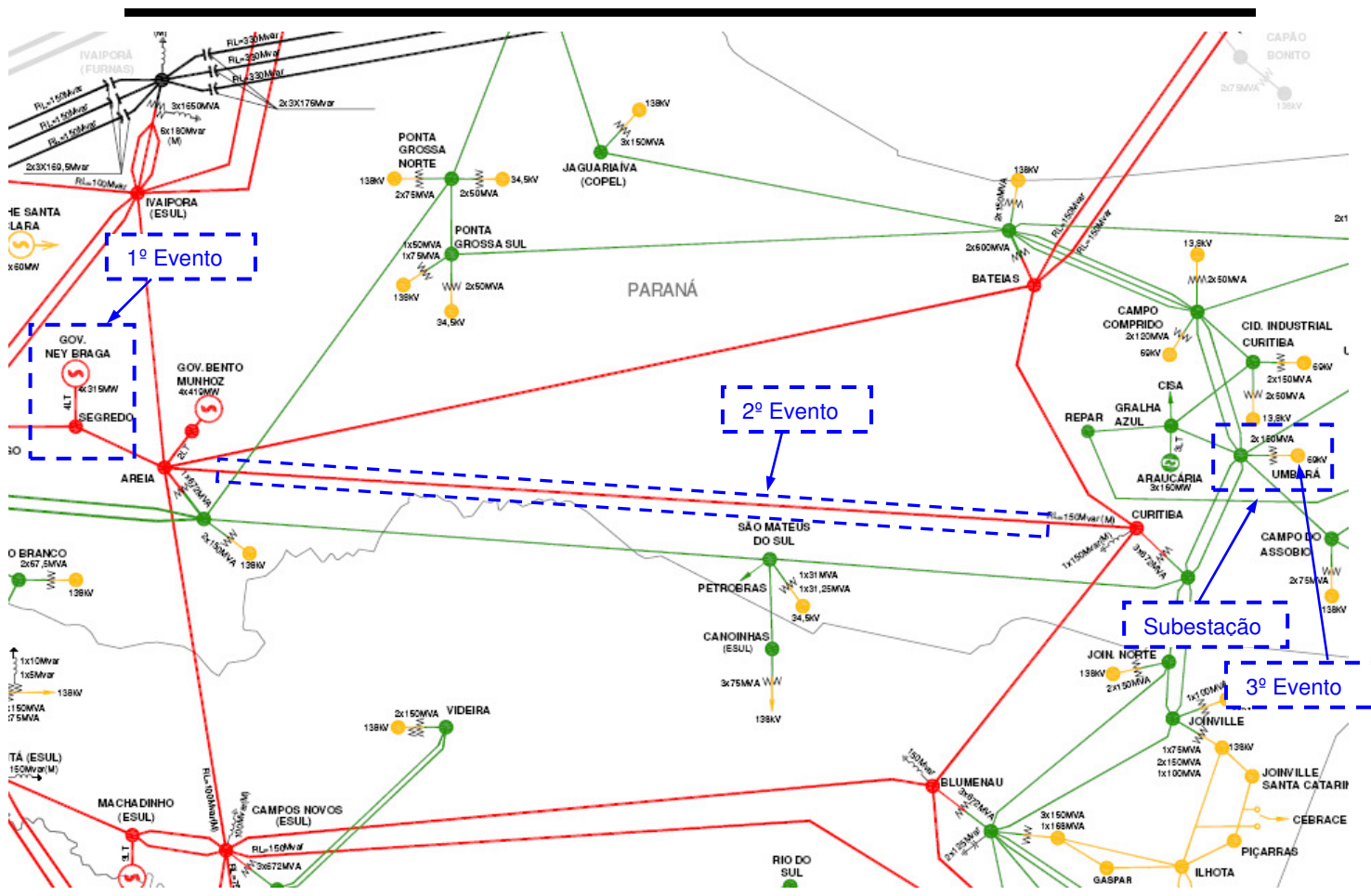


Figura 58 Diagrama Unifilar da Área



Da Figura 59 a Figura 61 a resposta do modelo Linear aos referidos eventos é comparada a resposta do atual modelo ZIP do banco de dados do Anatem.

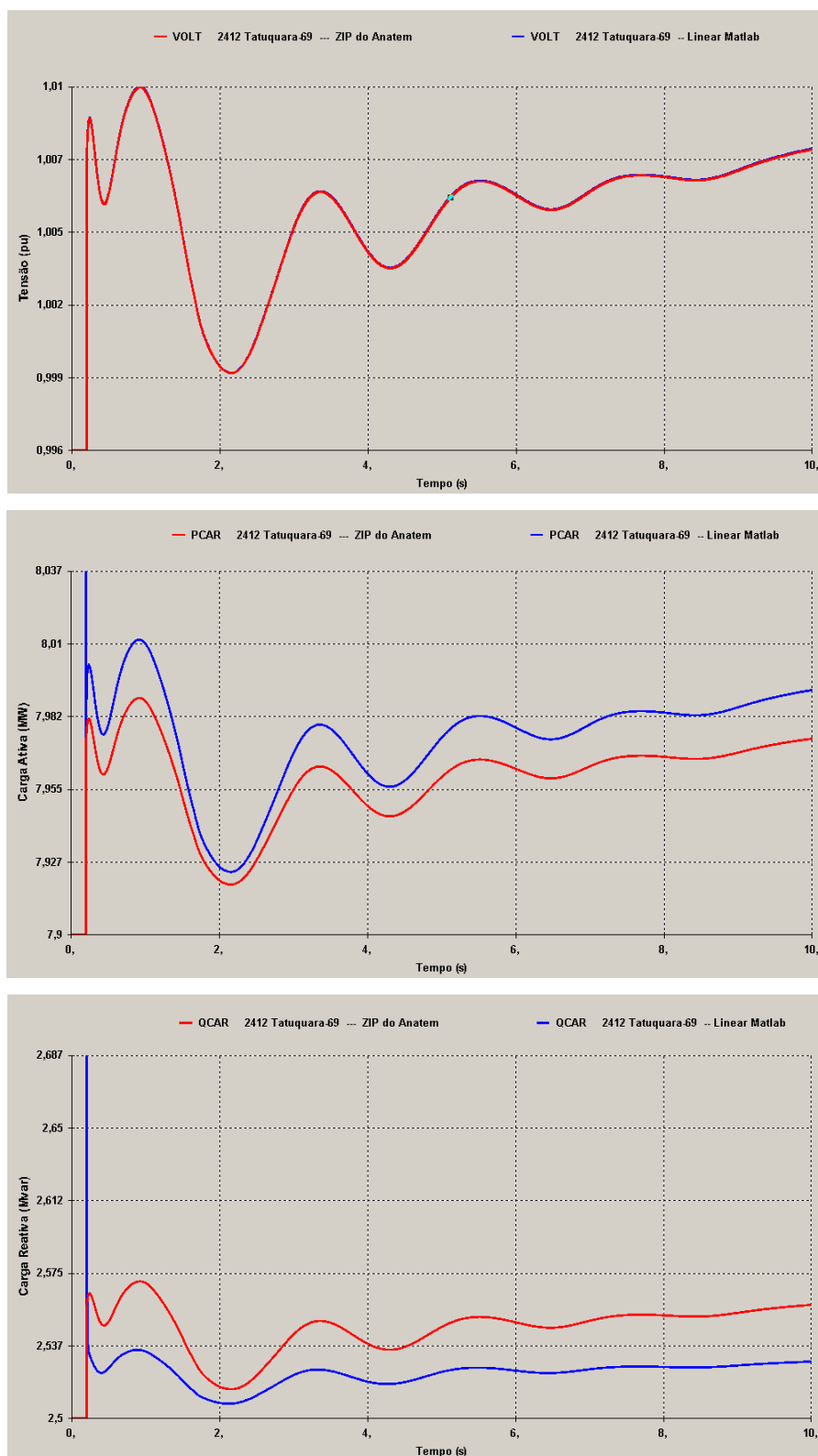


Figura 59 Perda de 3 unidades geradoras da UHE GNB

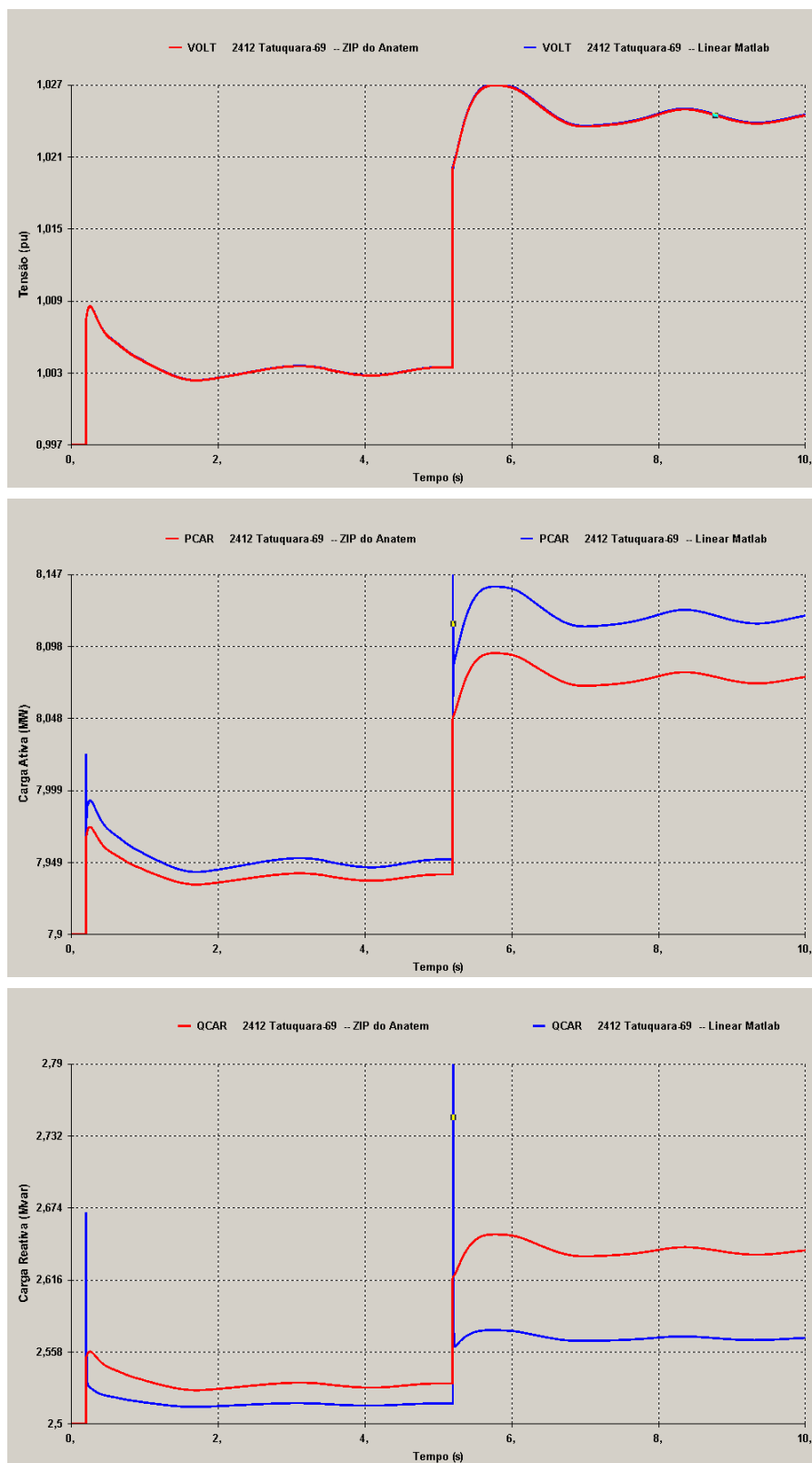


Figura 60 Energização da LT 525kV Areia – Curitiba a partir do Terminal de Areia.

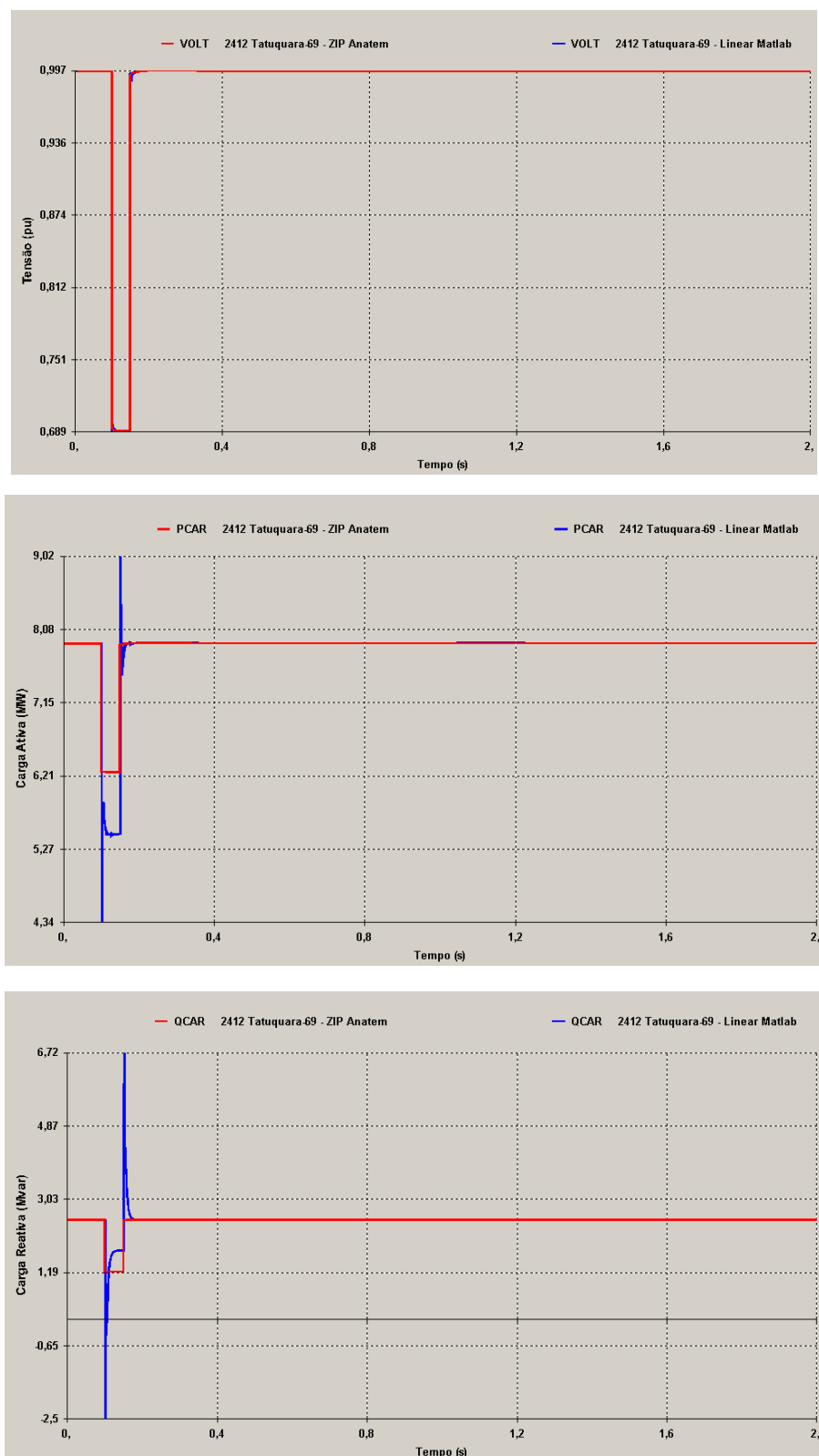


Figura 61 Aplicação de um curto-circuito no 69kV da SE Tatuquara (100ms) e eliminação do mesmo (150ms).



Os resultados apresentados na Figura 59, na Figura 60 e na Figura 61 têm caráter apenas ilustrativo. É possível observar que há uma diferença de desempenho entre o modelo ZIP da base de dados do Anatem e do modelo Linear implementado. Porém, não é possível extrair dessas simulações conclusões sobre impacto do modelo de carga Linear nos estudos elétricos, pois durante as mesmas apenas o *Alimentador Tatuquara 69kV* estava representado através do Modelo Linear. Para se obter resultados conclusivos sobre os impactos dessa representação, como aumento ou redução dos limites de intercâmbio entre determinadas regiões ou redução do montante de carga a ser cortado em determinado esquema, seria necessária a representação de uma parcela significativa das cargas do SIN através do Modelo Linear.

Na Figura 59, na Figura 60 e na Figura 61 observa-se um pico nos resultados das simulações com o modelo Linear. Esse modelo foi implementado na Anatem através da função DLDN que é o bloco que viabiliza a representação do modelo de carga dinâmico. Durante o desenvolvimento do bloco DLDN do programa Anatem, foi acrescentado intencionalmente um bloco de atraso (DELAY) para facilitar a convergência da rede elétrica como um todo. Isso explica a existência dos referidos picos nos resultados das simulações, onde é usado o modelo Linear. Essa questão já foi discutida com o CEPEL e em uma versão futura do programa haverá a opção do usuário retirar o atraso no bloco do modelo de carga dinâmica.



Capítulo VI

CONCLUSÕES

A atual representação das cargas utilizada pelo ONS nas simulações dinâmicas baseia-se em critérios da década de 1980 e merece ser revista para o contexto atual. O resultado de imprecisões na modelagem de carga pode mascarar informações preciosas durante as simulações. Se o resultado das simulações dinâmicas forem otimistas corre-se o risco de determinar margens de estabilidade que podem comprometer a segurança do sistema. Já se os resultados forem pessimistas a capacidade de transferência de potência entre regiões pode ser subutilizada.

VI.1 CONCLUSÕES GERAIS

Esse trabalho apresenta uma metodologia que permite aprimorar a representação das cargas nos estudos de estabilidade transitória e de regime permanente, sendo possível estimar modelos estáticos e dinâmicos a partir de dados registrados em campo, usando métodos de identificação de sistemas.

A quantidade de eventos registrados é de fundamental importância para se obter um modelo com maior robustez e conseqüentemente melhorar o desempenho do mesmo. Os equipamentos desenvolvidos no projeto de modelagem de carga, do ONS em parceria com a UNIFEI, facilitam a aquisição de dados de distúrbios no sistema, não sendo necessária a realização de testes, que além de depender da liberação de um pedido de intervenção, demandam tempo, manobras de equipamentos e mobilização de pessoal.



A rotina de simulação desenvolvida no Matlab, associada à macro criada no Visual Basic, viabilizou a análise da enorme massa de dados obtidas no projeto de medições de cargas do ONS em parceria com a UNIFEI. Assim, foram estimados os parâmetros do Modelo Estático ZIP e do Modelo Dinâmico Linear de alimentadores de carga de oito subestações do sistema elétrico brasileiro.

No Capítulo V, foi apresentado um estudo comparativo que avalia o desempenho dos modelos ZIP e Linear estimados a partir dos dados de medição em campo e o desempenho do atual modelo ZIP da base de dados do Anatem. Nessa análise ficou evidente que o *Modelo Dinâmico Linear* apresenta desempenho superior aos demais. Em todos os ramais de carga estudados, a resposta desse modelo esteve bem aderente ao comportamento observado no campo.

Conforme apresentado no Capítulo II, outros autores também chegaram à conclusão que o Modelo Dinâmico Linear apresenta um desempenho melhor que o modelo estático ZIP. Entretanto, a sua representação nos estudos de estabilidade esbarrava na dificuldade da sua representação nos programas para análise de transitórios eletromecânicos. Como a estrutura do modelo é regressiva no tempo a sua implementação não é trivial.

Sem dúvida, um dos ganhos desse trabalho é a implantação do Modelo Dinâmico Linear no Anatem, o que viabiliza a sua representação nos estudos de estabilidade. A implementação desse modelo foi feita através de CDU (*Controlador Definido pelo Usuário*), onde a regressão no tempo foi representada por meio do bloco "DELAY" e o modelo dinâmico de carga através do bloco "DLDN".

Para se obter resultados conclusivos sobre os impactos do modelo de carga Linear nos estudos elétricos, como aumento ou redução dos limites de intercâmbio ou redução do montante de carga a ser cortado em um esquema de controle de emergência, é necessária a representação de uma parcela significativa das cargas do SIN através desse modelo.

Como a carga apresenta natureza aleatória e o perfil dos consumidores muda ao longo dos anos, é interessante que as medições em campo sejam feitas com maior periodicidade e abranja outras subestações do sistema elétrico brasileiro.



VI.2 ETAPAS FUTURAS

Seguindo a linha de pesquisa desenvolvida nessa dissertação e os resultados obtidos, ficam algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar novas baterias de medições de campo, de forma que as principais subestações de uma região sejam monitoradas na mesma época, viabilizando assim atualização dos modelos ZIP da base de dados do Anatem e a implantação dos modelos dinâmicos linear de forma abrangente, gradativa e por região;
- Em função da mudança de hábitos dos consumidores e do crescimento do país, após atualização dos modelos de carga de todo SIN, revisar os mesmos de tempos em tempos.
- Modernizar os três equipamentos de medição existentes no que diz respeito à memória e desenvolver novos equipamentos de forma a aumentar o número de pontos da rede a ser monitorados;
- Melhorar a interface da rotina de simulação desenvolvida no Matlab e da macro criada no Visual Basic, tornando-as ferramentas comerciais;
- Estudar o uso de dados obtidos a partir de Unidades de Medição Fasorial (PMU) para estimar os parâmetros dos modelos de carga;
- Usar dados de medição de campo associado ao método de identificação de sistemas para validar os modelos de carga estimados pelas empresas através de métodos de composição.
- Realizaer simulações diversas com o modelo de carga Linear desenvolvido no Anatem.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **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.
- [2] **Adler, R.B.**, C.C. Mosher, **1970**. "Steady-State Characteristics for Power System Loads", IEEE Paper 70 CP 706-PWR.
- [3] **Araújo, A.**, **1974**. Modelos Representativos da Carga em Estudos de Estabilidade, Tese de Livre Docência, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Maio.
- [4] **Balanathan, R.**, N.C. Pahalawaththa, U.D. Annakkage, **1999**. "Undervoltage Load Shedding for Induction Motor Dominant Loads Considering P, Q Coupling", Proc IEE, Vol. 146, nº 4, July, 337-342.
- [5] **Borghetti, 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, 293-303.
- [6] **Berg, G.J.**, **1972**. "System and Load Behaviour Following Loss of Generation, Experimental Results and Evaluation", Proc IEE, Vol. 119, nº 10, October, 1483-1486.
- [7] **Berg, G.J.**, **1973**. "Power-system Load Representation", Proc IEE, Vol. 120, nº 3, March, 344-348.
- [8] **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.
- [9] **Capasso, A.**, W. Grattieri, R. Lamedica, A. Prudenzi, **1994**. "A Bottom-up Approach to Residential Load Modeling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 2, May, 957-964.
- [10] **CEPEL** – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, **1999**. "Manual do Usuário – Programa de Programa de Análise de Redes ANAREDE V07", Agosto.



-
- [11] **CEPEL** – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. “Manual do Usuário – Programa de Programa de Análise de Transitórios Eletromagnéticos ANATEM”.
- [12] **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.
- [13] **Chiou, C.-Y.**, C.-H. Huang, A.-S. Liu, Y.-T. Chen, T.-H. Li, C.-J. Lin, H.-D. Chiang, J.-L. Yuan, **1993**. “Development of a Micro-Processor-Based Transient Data Recording System for Load Behavior Analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, nº 1, February, 16-22.
- [14] **Coker, M.L.**, H. Kgasoane, **1999**. “Load Modeling”, *IEEE*.
- [15] **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.
- [16] **Corrêa, W. B. M.**, M. T. Schilling, M. B. Coutto Filho, **2003**. “Modelagem de Carga em Empresas de Distribuição para Estudos Dinâmicos” – Dissertação de Mestrado, UFF, fevereiro, 178-184.
- [17] **Dai, F.T.**, J.V. Milanovic, N. Jenkins, V. Roberts, **2001**. “Development of a Dynamic Power System Load Model”, presented at the IEE Conference AC-DC Power Transmission, November, 344-349.
- [18] **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.
- [19] **Ferreira, C.**, A.P. Alves da Silva, 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
- [20] **Ferreira, C.**, Modelagem Dinâmica de Cargas Elétricas Utilizando Redes Neurais Plásticas – Tese de Doutorado, EFEI, **1998**.



-
- [21] **Ferreira, C.**, G. Lambert-Torres, A.P. Alves da Silva, **1999**. "MITZIP: uma Abordagem Alternativa para a Modelagem Dinâmica da Carga", XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz de Iguaçu, Outubro.
- [22] **Franklin, D.C.**, A. Morelato, **1994**. "Improving Dynamic Aggregation of Induction Motor Models", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 4, November, 1934-1941.
- [23] **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.
- [24] **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.
- [25] **Frowd, R. J.**, Podmore, R. Waldron, M. Synthesis, **1982**. "Dynamic Load Models for Stability Studies" – IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems, February, Vol. PAS-101, n.º1, p. 127 – 135.
- [26] **Gomes, P.**, A. P. Guarini, M. M. P. Souza, A. G. Massaud, C. Ferreira, J. M. E. Vicente, P. P. C. Mendes e A. M. C. Ribeiro, **2007**. "Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos", SNPTEE, Outubro.
- [27] **GTEE, SCEL, GCOI, 1989**. Modelos de Carga para Estudos de Estabilidade, Relatório SCEL-GTEE-001/89, Novembro.
- [28] **Haque, M. H.**, **1996**. "Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration" – Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings – Volume 143, Issue 1, January, Page(s):33 – 38.
- [29] **Hill, D.J.**, **1993**. "Nonlinear Dynamic Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, nº 1, February, 166-176.
- [30] **Hiskens, I. A.**, J.V. Milanovic, **1995**. "Load Modelling in Studies of Power System Damping", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, nº 4, November, 1781-1788.



-
- [31] **Hongbin, Z.**, H.R.L.L.Z. Jian, **2002**. "Application of Different Load Models for the Transient Stability Calculation", IEEE.
- [32] **IEEE** Committee Report, **1973**. "System Load Dynamics – Simulation Effects and Determination of Load Constants" – IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems, Vol.PAS-92, March /April, p. 600 – 609.
- [33] **IEEE** Task Force on Terms & Definitions, **1982**. "Proposed Terms & Definitions for Power System Stability" – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 7, July, p.1894 – 1898.
- [34] **IEEE** Task Force on Instrumentation for System Dynamic Performance, **1987**. "Power System Disturbance Monitoring" – IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, n.º1, February, p. 134 – 148.
- [35] **IEEE** Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, **1993**. "Load Representation for Dynamic Performance Analysis" – IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, Nº 2, May, 472-482.
- [36] **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, Feb., Vol.10, p. 523 – 538.
- [37] **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.
- [38] **Ihara, S.**, M. Tani, K. Tomiyama, **1994**. "Residential Load Characteristics Observed at Kepco Power System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 2, May, 1092-1101.
- [39] **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.
- [40] **Iliceto, F.**, Capasso, A., **1974**. "Dynamic Equivalents of Assynchronous Motor Loads in Systems Stability Studies" – IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems, Vol.PAS-93, Sep/Oct, p. 1650 – 1659.



-
- [41] **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.
- [42] **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.
- [43] **Karlsson, D.**, D.J. Hill, **1994**. "Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 1, February, 157-166.
- [44] **Kent, M.H.**, W.R. Schmus, F.A. McCrackin, 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.
- [45] **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, nº 4, November, 1868-1874.
- [46] **Kundur, P.**, **1993**. Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc, Chapter 7, 271-313.
- [47] **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.
- [48] **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.
- [49] **Lin, C.-J.**, Y.-T. Chen, C.-Y. Chiou, C.-H. Huang, H.-D. Chiang, J.-C. Wang, L. Fekih-Ahmed, **1993**. "Dynamic Load Models in Power Systems Using the Measurement Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, nº 1, February, 309-315.
- [50] **Maurício, W.**, A. Semlyen, **1972**. "Effect of Load Characteristics on the Dynamic Stability of Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, November/December, 2295-2304.



-
- [51] **Meyer, F.J.**, K.Y. 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.
- [52] **Milanovic, 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.
- [53] **Ohyama, T.**, A. Watanabe, K. Nishimura, S. Tsuruta, **1985**. "Voltage Dependence of Composite Loads in Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, nº 11, November, 3064-3073.
- [54] **Pal, M.K.**, **1993**. "Voltage Stability: Analysis Needs, Modelling Requirement, and Modelling Adequacy", IEE Proceedings-C, Vol. 140, nº 4, July, 279-286.
- [55] **Power System Engineering Committee**, **1972**. "System Load Dynamics - Simulation Effects and Determination of Load Constants", presented at the IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, July, 600-609.
- [56] **Price, W.W.**, K.A. Wirgau, A. Murdoch, J.V. Mitsche, E. Vaahedi, 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.
- [57] **Quan, G.R.**, M.Z. Tarnawecy, **1975**. "Load Representation for Transient Stability Studies - Digital Modeling", presented at the IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, July, Paper nº A 75 583-5.
- [58] **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.
- [59] **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, 683-690.
- [60] **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.



-
- [61] **Roelofs, G.P.T., 1989.** "Effects of Load Modelling on the Behaviour of Power Systems", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 11, nº 4, October, 289-292.
- [62] **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.
- [63] **Srinivasan, K., C.T. Nguyen, Y. Robichaud, 1979.** "Closed Loop Response to Random Perturbations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, nº 5, September/October, 1591-1595.
- [64] **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.
- [65] **Taleb, M., M. Akbaba, E.A. Abdullah, 1994.** "Aggregation of Induction Machines for Power System Dynamic Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, nº 4, November, 2042-2048.
- [66] **Taylor, C.W., 1994.** *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill.
- [67] **UNIFEI, 2003.** RT-01A – Estado da Arte em Modelagem Dinâmica de Carga, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [68] **UNIFEI, 2004.** RT-02 – Análise dos Elementos Influentes na Modelagem Dinâmica de Carga, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [69] **UNIFEI, 2004.** RT-04 – Desenvolvimento de Modelos Dinâmicos de Carga, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [70] **UNIFEI, 2004.** RT-05 – Programa Computacional para a Obtenção dos Modelos de Carga, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [71] **UNIFEI, 2005.** RT-06 – Medição em Campo e Análise de Dados, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.



-
- [72] **UNIFEI, 2005.** RT-09 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na SE Ramon Reberte Filho 88Kv, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [73] **UNIFEI, 2006.** RT -11- Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na SE Taquaril 69 kV, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [74] **UNIFEI, 2006.** RT-02 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação FTZ – Fortaleza 69 kV, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [75] **UNIFEI, 2006.** RT-04 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação BRA – Barreiras 138/69kV, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [76] **UNIFEI, 2006.** RT-06 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação Gravataí II 230/69 kV, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [77] **UNIFEI, 2006.** RT-08 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação Joinville IV, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [78] **UNIFEI, 2006.** RT-10 - Modelos Dinâmicos de Carga com os Dados Registrados em Campo na Subestação Umbará, Projeto “Modelagem de Carga para Estudos Dinâmicos” – GESIS.
- [79] **Vaahedi, E.,** M.A. El-Kady, J.A. Libaque-Esaine, V.F. Carvalho, **1987.** "Load Models for Large-Scale Stability Studies From End-User Consumption", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, nº 4, November, 864-872
- [80] **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, 1039-1045
- [81] **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.



- [82] **Venikov, V.A., 1977.** Transient Processes in Electrical Power Systems, Mir Publishers, Moscou.
- [83] **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.