

4 Estudo de Casos

I do not know what I may appear to the world; but to myself I seem to have been only like a boy playing on the seashore, whilst the great ocean of truth lay all undiscovered before me.

Isaac Newton

Neste capítulo serão apresentados os resultados de modelos de cargas baseados em medições do sistema de medição de qualidade de energia da CHESF. A Figura 19 ilustra no mapa as subestações de 69kV a serem modeladas com a metodologia proposta.

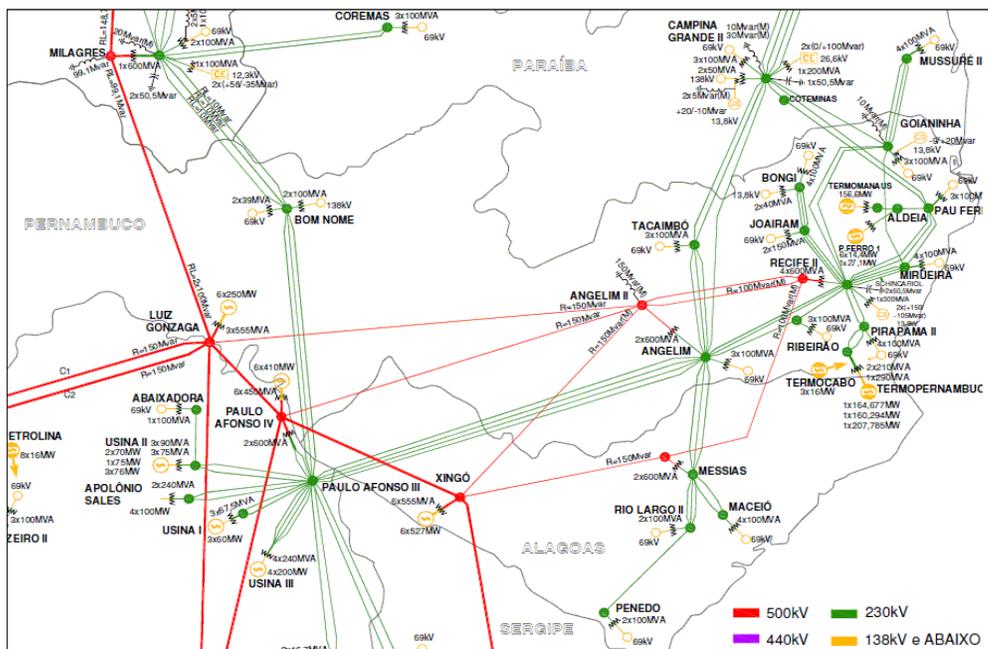


Figura 19 - Fragmento do sistema CHESF (áreas Leste e Centro)

Os resultados gráficos vão comparar curvas de potência ativa e reativa medidas antes, durante e após afundamentos de tensão (VTCD) nos barramentos de 69kV, com as curvas de potência calculadas pelos modelos propostos, sujeitas

às mesmas VTCD das curvas medidas, buscando abrangência e precisão dos modelos estimados com auxílio do AG.

4.1. Visão geral dos dados

De acordo com os critérios de seleção de dados listados na seção 3.2, a Tabela 1 apresenta os registros das subestações de 69 kV (bolinhas amarelas da Figura 19) cobrindo um período de um ano de medição (setembro de 2008 até setembro de 2009), com os totais de VTCD que atenderam às condições para modelagem e associados aos locais (subestações identificadas por suas siglas) que mediram os efeitos de distúrbios oriundos da transmissão (linhas verdes e vermelhas da Figura 19).

Tabela 1 - Sumário de dados de subestações de Set/2008 a Set/2009

Sigla	UF	Região	numVTCD
SE1	BA	Sudoeste	80
SE2	PE	Leste	48
SE3	PE	Leste	45
SE4	AL	Leste	39
SE5	PI	Oeste	39
SE6	BA	Sudoeste	33
SE7	PE	Leste	29
SE8	CE	Norte	29
SE9	PI	Oeste	29
SE10	PI	Oeste	28
SE11	CE	Norte	26
SE12	PB	Leste	22
SE13	PE	Leste	21
SE14	BA	Sudoeste	17
SE15	CE	Norte	16
SE16	PI	Oeste	16
SE17	PI	Oeste	16
SE18	AL	Leste	15
SE19	AL	Leste	15
SE20	RN	Norte	14
SE21	PB	Leste	6

4.2.

Estudo numa das subestações de 69 kV

4.2.1.

Seleção dos dados

A Tabela 2 apresenta um total de 39 registros de VTCD, colhidos na SE4 (Tabela 1) em um período de um ano, cujas causas foram distúrbios no sistema de transmissão, conforme os critérios de seleção de dados discutidos na seção 3.2.

Com os dados já processados, conforme o procedimento da seção 3.3, os campos da Tabela 2 identificam o dia e hora do registro, a tensão característica V_z , o *Tipo* e a duração da VTCD, além do carregamento do sistema, isto é, a potência ativa (P_o) e reativa (Q_o) antes da VTCD (pré-distúrbio).

Tabela 2 - Dados do período Set/08 a Set/09 de MCO69

Data	Hora	Vz (p.u.)	Tipo	Dur (s)	Po (MW)	Qo (Mvar)
03/02/09	06:17:16	0.875	'Cb'	0.349	33.2	-12.9
03/02/09	06:09:14	0.861	'Db'	0.114	34.3	-15.3
25/12/08	15:02:16	0.835	'Ca'	0.051	34.6	-20.9
09/11/08	09:46:18	0.803	'Ca'	0.05	38.1	-15.2
25/01/09	11:28:59	0.853	'Db'	0.078	38.3	-17.0
03/02/09	07:24:40	0.527	'Db'	0.091	38.8	-18.3
09/11/08	12:46:41	0.806	'Dc'	0.091	39.6	-18.4
09/11/08	12:46:47	0.807	'Dc'	0.088	39.7	-18.6
09/11/08	12:46:37	0.819	'Dc'	0.065	40.0	-18.1
30/12/08	03:46:20	0.774	'Cb'	0.057	41.8	-18.4
03/01/09	11:14:37	0.484	'Dc'	0.11	42.7	-22.9
30/12/08	03:46:18	0.738	'Cb'	0.058	42.7	-19.7
24/02/09	19:05:51	0.72	'Db'	0.181	43.8	-19.6
03/02/09	09:05:06	0.669	'Cc'	0.117	44.1	-20.7
24/02/09	19:05:45	0.799	'Ca'	0.199	44.4	-20.1
17/01/09	11:36:06	0.813	'Dc'	0.11	45.2	-20.3
09/08/09	19:26:46	0.841	'Ca'	0.058	45.7	-20.3
14/02/09	01:44:47	0.544	'A'	0.207	46.6	-19.4
16/11/08	11:33:19	0.762	'Db'	0.061	46.7	-22.9
26/12/08	12:00:37	0.881	'Dc'	0.075	47.5	-24.9
16/11/08	11:33:11	0.755	'Db'	0.051	47.7	-23.9
14/02/09	00:33:15	0.737	'Ca'	0.134	48.6	-19.9
05/02/09	15:35:37	0.651	'Cc'	0.057	50.9	-22.4
25/09/08	03:10:19	0.582	'Cb'	0.076	51.5	-21.7
01/02/09	19:04:39	0.797	'Dc'	0.072	51.6	-22.4
14/12/08	13:10:55	0.822	'Cb'	0.05	52.8	-26.8
12/01/09	13:54:34	0.594	'Dc'	0.134	52.9	-25.2
10/11/08	01:44:20	0.542	'Dc'	0.067	54.5	-24.3
28/01/09	10:38:44	0.859	'Db'	0.074	54.6	-27.0
20/09/08	13:29:31	0.872	'Dc'	0.06	54.6	-24.7

Data	Hora	Vz (p.u.)	Tipo	Dur (s)	Po (MW)	Qo (Mvar)
08/01/09	22:02:32	0.795	'Db'	0.059	54.8	-23.7
06/12/08	14:18:23	0.824	'Db'	0.053	56.9	-32.1
06/12/08	14:18:20	0.839	'Db'	0.051	57.6	-32.5
10/10/08	11:48:20	0.643	'Ca'	0.058	66.8	-30.3
10/11/08	20:23:35	0.805	'Cb'	0.052	67.8	-29.0
01/12/08	12:46:04	0.645	'Da'	0.071	69.7	-31.9
23/01/09	21:44:56	0.645	'Db'	0.057	69.8	-26.5
01/12/08	12:45:59	0.632	'Db'	0.057	70.3	-31.3
07/11/08	13:19:47	0.799	'Cc'	0.058	70.6	-32.1

A Tabela 2 está ordenada pelo campo Po e as cores representam três classes distintas do carregamento da barra de carga; esta classificação é inspirada na prática atual do sistema elétrico de fazer simulações com cenários de carga leve, média e pesada.

Essa classificação é uma primeira tentativa de separar o conjunto de medições disponíveis em dois subconjuntos de dados: um de treinamento e outro de validação do modelo. Os dois subconjuntos devem cobrir, da melhor maneira possível, as ocorrências típicas de um ano de medição.

A Tabela 3 apresenta os dados ordenados e segmentados pela severidade da VTCD (Vz). Foi acrescentado mais um campo ($maxQ$) que analisa o maior valor da potência reativa dentro da janela de registro. O campo Tipo foi simplificado para três classes distintas de VTCD: monofásicas (F), bifásicas (FF) e trifásicas (FFF).

Tabela 3 - Dados reordenados pela severidade (Vz) da VTCD

Data	Hora	Vz (p.u.)	Tipo	Dur (s)	Po (MW)	Qo (Mvar)	maxQ (Mvar)
03/01/09	11:14:37	0.484	F	0.11	42.7	-22.9	2.0
03/02/09	07:24:40	0.527	F	0.091	38.8	-18.3	6.6
10/11/08	01:44:20	0.542	F	0.067	54.5	-24.3	2.7
14/02/09	01:44:47	0.544	FFF	0.207	46.6	-19.4	9.2
25/09/08	03:10:19	0.582	FF	0.076	51.5	-21.7	3.1
12/01/09	13:54:34	0.594	F	0.134	52.9	-25.2	-3.7
01/12/08	12:45:59	0.632	F	0.057	70.3	-31.3	-4.3
10/10/08	11:48:20	0.643	FF	0.058	66.8	-30.3	-5.3
01/12/08	12:46:04	0.645	F	0.071	69.7	-31.9	-3.7
23/01/09	21:44:56	0.645	F	0.057	69.8	-26.5	-5.6
05/02/09	15:35:37	0.651	FF	0.057	50.9	-22.4	-3.2
03/02/09	09:05:06	0.669	FF	0.117	44.1	-20.7	-3.9
24/02/09	19:05:51	0.72	F	0.181	43.8	-19.6	-6.7
14/02/09	00:33:15	0.737	FF	0.134	48.6	-19.9	-5.5
30/12/08	03:46:18	0.738	FF	0.058	42.7	-19.7	-5.8

Data	Hora	Vz (p.u.)	Tipo	Dur (s)	Po (MW)	Qo (Mvar)	maxQ (Mvar)
16/11/08	11:33:11	0.755	F	0.051	47.7	-23.9	-8.3
16/11/08	11:33:19	0.762	F	0.061	46.7	-22.9	-7.5
30/12/08	03:46:20	0.774	FF	0.057	41.8	-18.4	-7.2
08/01/09	22:02:32	0.795	FF	0.059	54.8	-23.7	-10.6
01/02/09	19:04:39	0.797	F	0.072	51.6	-22.4	-10.4
24/02/09	19:05:45	0.799	FF	0.199	44.4	-20.1	-9.9
07/11/08	13:19:47	0.799	FF	0.058	70.6	-32.1	-15.9
09/11/08	09:46:18	0.803	FF	0.05	38.1	-15.2	-5.0
10/11/08	20:23:35	0.805	FF	0.052	67.8	-29.0	-15.0
09/11/08	12:46:41	0.806	F	0.091	39.6	-18.4	-7.7
09/11/08	12:46:47	0.807	F	0.088	39.7	-18.6	-7.1
17/01/09	11:36:06	0.813	F	0.11	45.2	-20.3	-10.3
09/11/08	12:46:37	0.819	F	0.065	40.0	-18.1	-7.7
14/12/08	13:10:55	0.822	FF	0.05	52.8	-26.8	-14.5
06/12/08	14:18:23	0.824	F	0.053	56.9	-32.1	-19.3
25/12/08	15:02:16	0.835	FF	0.051	34.6	-20.9	-12.5
06/12/08	14:18:20	0.839	F	0.051	57.6	-32.5	-20.5
09/08/09	19:26:46	0.841	FF	0.058	45.7	-20.3	-11.8
25/01/09	11:28:59	0.853	F	0.078	38.3	-17.0	-9.5
28/01/09	10:38:44	0.859	F	0.074	54.6	-27.0	-17.6
03/02/09	06:09:14	0.861	F	0.114	34.3	-15.3	-5.5
20/09/08	13:29:31	0.872	F	0.06	54.6	-24.7	-18.4
03/02/09	06:17:16	0.875	FF	0.349	33.2	-12.9	-6.3
26/12/08	12:00:37	0.881	F	0.075	47.5	-24.9	-16.9

O campo $maxQ$ mostra que os registros cuja tensão característica Vz foi menor que 0,59 p.u. o sinal original (Qo) do fluxo de potência reativa é invertido, em resposta à perturbações de tal severidade. Esta mudança no sinal do fator de potência da barra é consequência do efeito de bancos de capacitores distribuídos pelo sistema de distribuição 69 e 13,8 kV, durante afundamentos de tensão muito severos, uma vez que sua potência é proporcional ao quadrado da tensão.

Classificando cada um dos campos em três categorias e representando nas Tabelas 4 e 5 as categorias em três cores distintas, pode-se afirmar que a seleção dos dados de treinamento (Tabela 4) e validação (Tabela 5) contém representantes de cada uma das categorias de quase todos os campos, o que é facilmente verificado pelas três cores que classificam cada campo. Simples análises estatísticas, como o cálculo do máximo, mínimo, média e desvio padrão de cada campo podem garantir a mesma diversidade na separação de dados em subconjuntos de treinamento e validação.

Tabela 4 - Dados de Treinamento

Data	Hora	Vz (p.u.)	Tipo	Dur (s)	Po (MW)	Qo (Mvar)
20/09/08	13:29:31	0.872	F	0.06	54.6	-24.7
10/10/08	11:48:20	0.643	FF	0.058	66.8	-30.3
07/11/08	13:19:47	0.799	FF	0.058	70.6	-32.1
09/11/08	09:46:18	0.803	FF	0.05	38.1	-15.2
09/11/08	12:46:41	0.806	F	0.091	39.6	-18.4
09/11/08	12:46:47	0.807	F	0.088	39.7	-18.6
10/11/08	01:44:20	0.542	F	0.067	54.5	-24.3
16/11/08	11:33:11	0.755	F	0.051	47.7	-23.9
01/12/08	12:45:59	0.632	F	0.057	70.3	-31.3
01/12/08	12:46:04	0.645	F	0.071	69.7	-31.9
06/12/08	14:18:20	0.839	F	0.051	57.6	-32.5
06/12/08	14:18:23	0.824	F	0.053	56.9	-32.1
25/12/08	15:02:16	0.835	FF	0.051	34.6	-20.9
26/12/08	12:00:37	0.881	F	0.075	47.5	-24.9
30/12/08	03:46:20	0.774	FF	0.057	41.8	-18.4
03/01/09	11:14:37	0.484	F	0.11	42.7	-22.9
12/01/09	13:54:34	0.594	F	0.134	52.9	-25.2
17/01/09	11:36:06	0.813	F	0.11	45.2	-20.3
01/02/09	19:04:39	0.797	F	0.072	51.6	-22.4
03/02/09	06:17:16	0.875	FF	0.349	33.2	-12.9
05/02/09	15:35:37	0.651	FF	0.057	50.9	-22.4
14/02/09	00:33:15	0.737	FF	0.134	48.6	-19.9
14/02/09	01:44:47	0.544	FFF	0.207	46.6	-19.4
24/02/09	19:05:51	0.72	F	0.181	43.8	-19.6

Tabela 5 - Dados de validação

Data	Hora	Vz (p.u.)	Tipo	Dur (s)	Po (MW)	Qo (Mvar)	maxQ (Mvar)
25/09/08	03:10:19	0.582	FF	0.076	51.5	-21.7	-10.3
09/11/08	12:46:37	0.819	F	0.065	40.0	-18.1	-5.6
10/11/08	20:23:35	0.805	FF	0.052	67.8	-29.0	-9.5
16/11/08	11:33:19	0.762	F	0.061	46.7	-22.9	-17.6
14/12/08	13:10:55	0.822	FF	0.05	52.8	-26.8	-10.4
30/12/08	03:46:18	0.738	FF	0.058	42.7	-19.7	-5.5
08/01/09	22:02:32	0.795	F	0.059	54.8	-23.7	-6.3
23/01/09	21:44:56	0.645	F	0.057	69.8	-26.5	6.6
25/01/09	11:28:59	0.853	F	0.078	38.3	-17.0	-3.9
28/01/09	10:38:44	0.859	F	0.074	54.6	-27.0	-3.2
03/02/09	06:09:14	0.861	F	0.114	34.3	-15.3	-5.5
03/02/09	07:24:40	0.527	F	0.091	38.8	-18.3	9.2
03/02/09	09:05:06	0.669	FF	0.117	44.1	-20.7	-9.9
24/02/09	19:05:45	0.799	FF	0.199	44.4	-20.1	-6.7
09/08/09	19:26:46	0.841	FF	0.058	45.7	-20.3	-11.8

4.2.2. Obtendo um modelo da Potência Ativa

A principal vantagem no AG como técnica de estimação de parâmetros é que, mesmo com uma mudança na estrutura de modelo escolhida, a função objetivo não se altera, nem a heurística de solução do problema.

Utilizando o modelo de carga autorregressivo, descrito em detalhes na seção 3.4, os parâmetros descritos em (3-22) são estimados com o AG e (4-8) mostra que os limites do problema são:

$$\begin{aligned}\theta_p^{INF} &= [0, 0, -5, -5] \\ \theta_p^{SUP} &= [1, 1, 5, 5]\end{aligned}\quad (4-8)$$

A Figura 20 ilustra como definir adequadamente o espaço de busca do problema acelera a sua convergência. A curva preta define os limites dos dois últimos parâmetros de (4-8) em -100 e 100, enquanto a curva preta mostra a convergência para os mesmos limites definidos em (4-8).

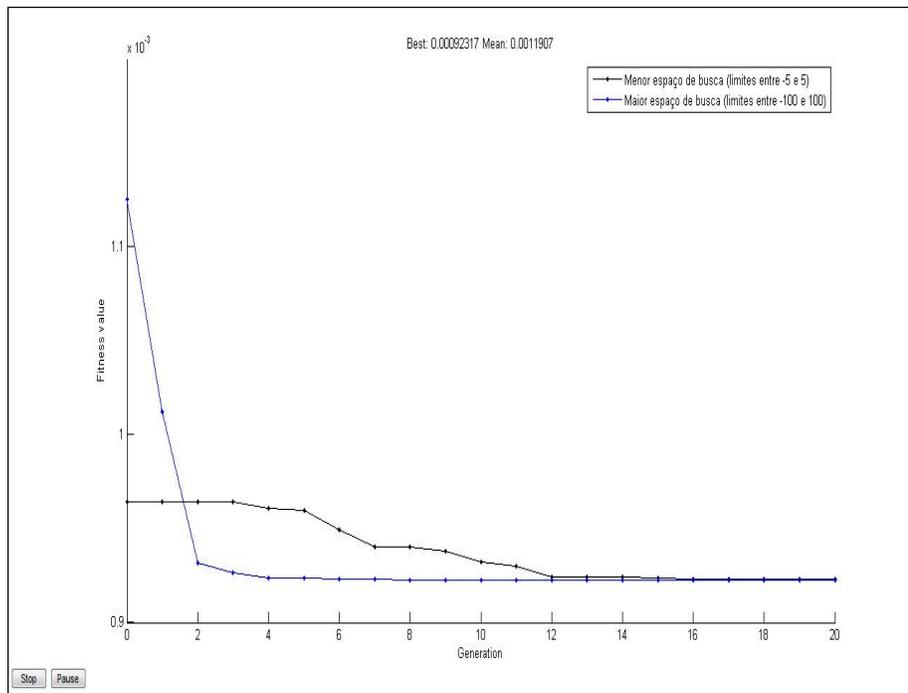


Figura 20 - Função Objetivo em função das gerações

A Figura 21 mostra o desempenho do modelo autorregressivo com o conjunto de parâmetros (4-9) estimados pelo AG após 20 gerações, utilizando os limites (4-8).

$$\theta_p = [0.46, 0.21, 2.94, -2.1] \quad (4-9)$$

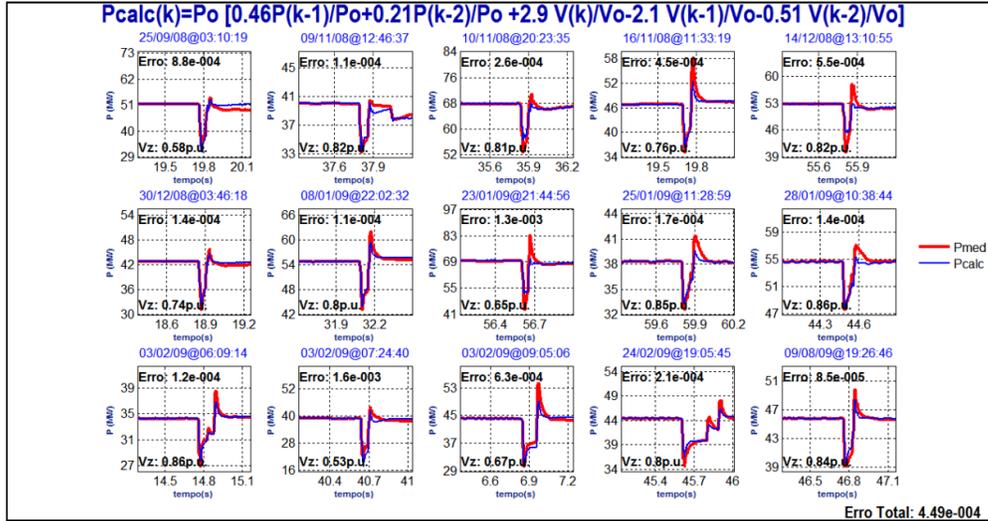


Figura 21 - Resultados modelo autorregressivo para potência ativa

4.2.3. Obtendo um Modelo de Potência Reativa

A Figura 22 mostra a comparação do modelo $Q(k)$ autorregressivo de 2ª ordem, com o conjunto de parâmetros dado por (4-10).

$$\theta_q = [0.46, 0.34, 3.6, 2] \quad (4-10)$$

Os fluxos de potência reativa estão com a convenção de carga. Observa-se que o *Erro Total* é bem maior que o apresentado na Figura 21 para a potência ativa. Foi constatado neste trabalho que há uma dificuldade maior em modelar o fenômeno da variação da potência reativa sob contingências. Como mencionado, a atuação de bancos de capacitores e demais elementos de compensação reativa espalhados no sistema de distribuição influenciam absorvendo ou injetando potência reativa no sistema. No entanto, foi possível representar a maioria das contingências com precisão, como pode ser inspecionado visualmente.

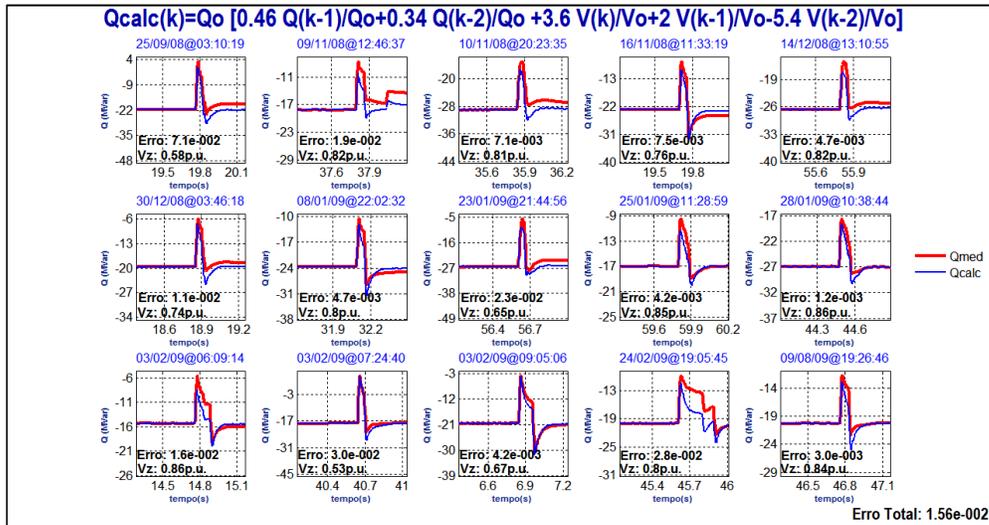


Figura 22 - Resultados para o modelo Q autorregressivo

4.3. Comparação com os modelos ZIP

O ONS disponibiliza em sua página da internet os arquivos com o modelo do SIN para simulações dinâmicas no ANATEM. O conjunto de parâmetros ZIP para o modelo de carga de Maceió é:

$$\theta_p^{ZIP} = [0.6, 0, 0.4] \tag{4-12}$$

$$\theta_q^{ZIP} = [0, 0, 1]$$

Os dois modelos, o ZIP, com o conjunto de parâmetros (4-12), e o autorregressivo proposto, com o conjunto de parâmetros (4-9) para a potência ativa e (4-10) para a potência reativa, serão comparados a seguir na Figura 23, onde estão traçadas as curvas de potência ativa de sequência positiva, e na Figura 24, com as curvas de potência reativa de sequência positiva de uma VTCD medida em 30/12/08, às 03hs46m, numa terça-feira.

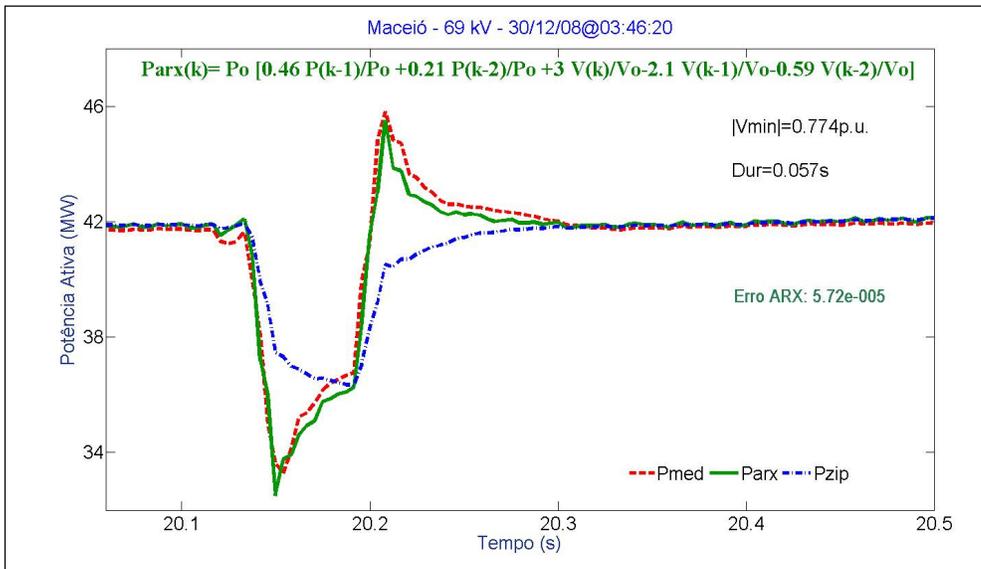


Figura 23 - P_{med} é a potência ativa medida, P_{arx} é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e P_{zip} o modelo do ONS (30/12/08)

Tanto para a modelagem da potência ativa, quanto na modelagem da potência reativa observa-se que o modelo ZIP não representa bem os transitórios das curvas, e não modela precisamente a variação de potência, apresentando uma representação mais otimista do distúrbio do que o modelo dinâmico autorregressivo.

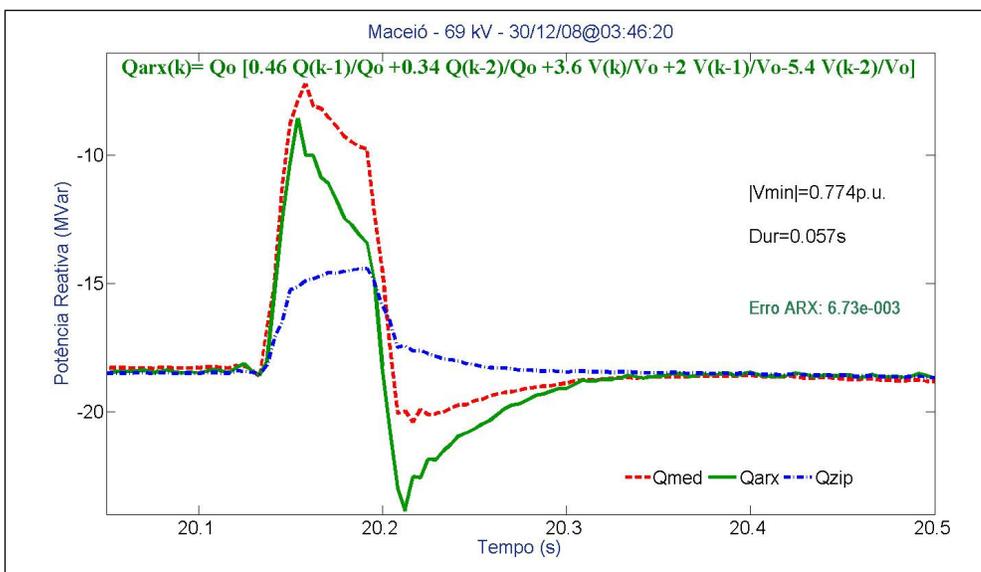


Figura 24 - Q_{med} é a potência reativa medida, Q_{arx} é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e Q_{zip} o modelo do ONS (30/12/08)

A Figura 25 mostra outra ocorrência, registrada no mesmo local em 10/11/08, às 01hs44m, mas com um carregamento P_o bem maior que o anterior (55 MW neste registro, contra 42 MW da Figura 23), respondendo a uma VTCD bem mais severa (tensão característica $|V_{min}| = 0.54$ p.u. contra 0.77 p.u. da anterior) e duração semelhante. O mesmo conjunto de parâmetros (4-9) representou bem esta VTCD com precisão, provando a capacidade de abrangência da estrutura de modelo, enquanto a curva do modelo ZIP continua sendo “mais otimista”.

Um comentário pertinente diz respeito aos ciclos após a eliminação do distúrbio, onde se pode verificar a curva vermelha (P_{med} , a potência medida) abaixo do nível das duas outras curvas. Possivelmente houve perda de um pequeno percentual da carga, dada a severidade da VTCD, resultando numa potência menor fluindo para o barramento de 69 kV.

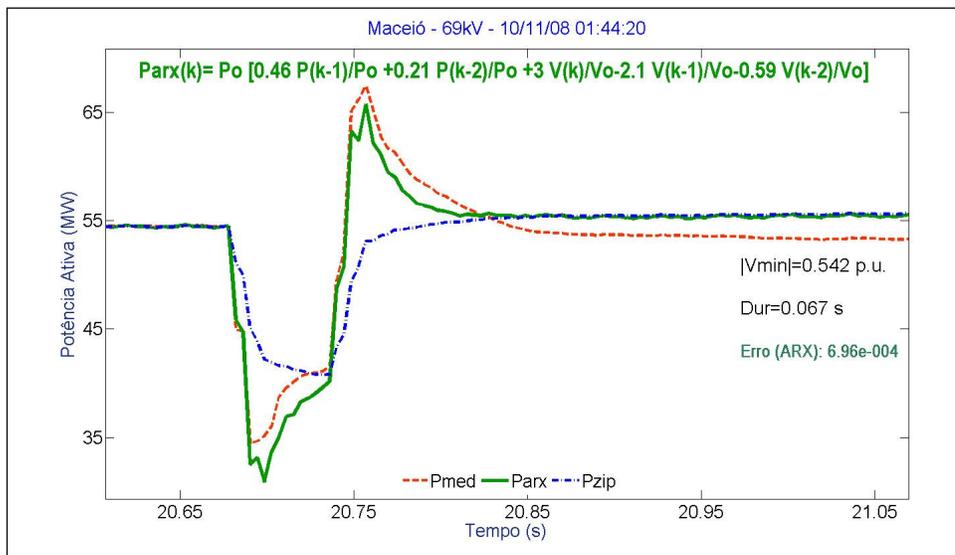


Figura 25 - P_{med} é a potência ativa medida, $Parx$ é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e P_{zip} o modelo do ONS (10/11/08)

A Figura 26 apresenta as curvas de potência reativa de sequência positiva respondendo à mesma VTCD que provocou as curvas mostradas na Figura 25, utilizando o mesmo conjunto de parâmetros (4-10).

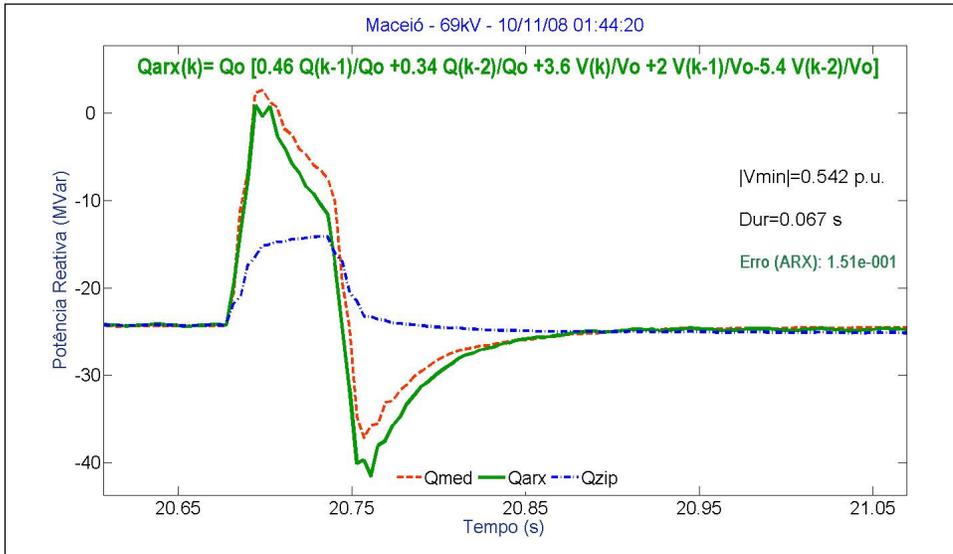


Figura 26 - Qmed é a potência reativa medida, Qarx é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e Qzip o modelo do ONS (10/11/08)

A Figura 27 mostra as curvas de potência ativa de sequência positiva respondendo à VTCD, desta vez com tensão característica intermediária entre as duas outras, mas com duração cerca de duas vezes maior, registradas em 03/12/09 às 09hs05m, um horário bem diferente das outras duas VTCD mostradas que ocorreram na madrugada. A Figura 28 apresenta as curvas de potência reativa de sequência positiva para a mesma VTCD.

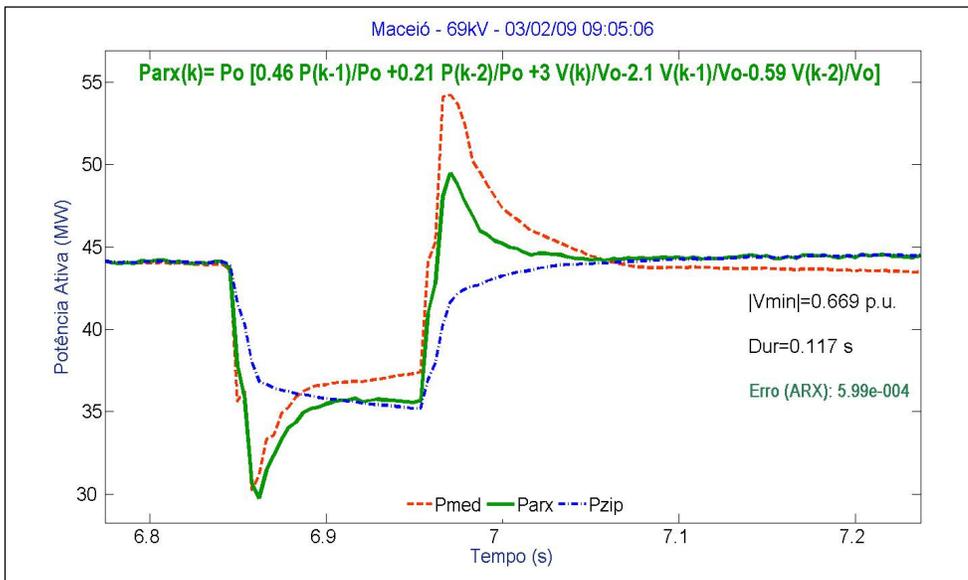


Figura 27 - Pmed é a potência ativa medida, Parx é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e Pzip o modelo do ONS (03/02/09)

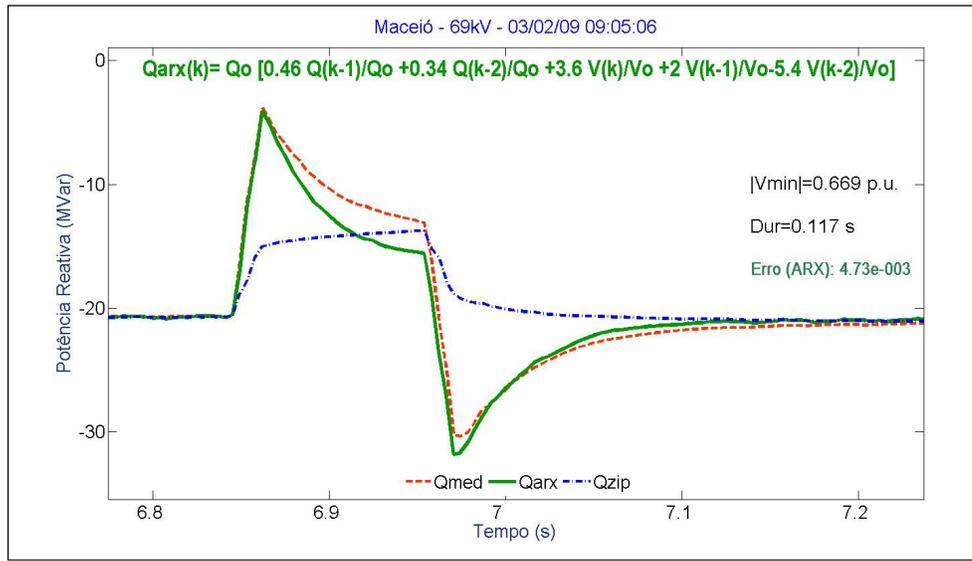


Figura 28 - Qmed é a potência reativa medida, Qarx é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e Qzip o modelo do ONS (03/02/09)

4.4. Sumário do capítulo

A seção 4.1 apresentou um levantamento do valor esperado de VTCD que ocorrem no sistema de transmissão ao longo de um ano, ainda que pese a falta de informações de falhas de envio de dados e erros de medição. Foi escolhida uma das subestações, no caso Maceió, para o estudo de casos.

A seção 4.2 detalhou etapas do procedimento resumido na seção 3.1, onde foram discutidos critérios para separar os dados em dois subconjuntos representativos.

A análise da seção 4.3 confirma publicações que relatam a necessidade de se utilizar modelos dinâmicos para análises transitórias. O modelo ZIP parece sistematicamente mascarar a severidade do efeito no fluxo de potência para a carga durante VTCD em seus barramentos.

Foi constatada também a capacidade de abrangência do modelo autorregressivo proposto, que representou com precisão VTCD com características bem diferentes. A inclusão do ponto de operação pré-distúrbio (dado por P_0 e V_0) na estrutura do modelo autorregressivo parece ser responsável por conseguir representar com um mesmo modelo diferentes condições de carga,

possivelmente eliminando a necessidade de realizar simulações com cenários de carga leve, média e pesada.

O Apêndice III mostra experimentos em algumas subestações e concluiu-se que a maior dificuldade para se modelar a potência reativa é quando o sentido do fluxo de reativo se inverte durante a VTCD. Isso ocorre pela compensação de potência reativa por bancos de capacitores espalhados pelo sistema de distribuição. Em [12] o autor afirma que “a principal desvantagem de bancos de capacitores em derivação é que a potência reativa de saída de seus terminais é proporcional ao quadrado da tensão. Consequentemente, a compensação reativa é reduzida em afundamentos de tensão severos, quando os capacitores seriam mais necessários”.