

3 Metodologia para Modelagem de Carga

The question of nature's susceptibility to mathematical description has some deep philosophical aspects, and in practical terms we have to take a more pragmatic view of models. Our acceptance of models should thus be guided by "usefulness" rather than "truth".

Lennart Ljung

Neste capítulo será apresentada a metodologia para obtenção de modelos de carga baseados em medições de qualidade de energia, a fim de tornar simulações dinâmicas do sistema elétrico de potência mais precisas.

A seção 3.1 resume o procedimento desde a extração de informações de tensões e correntes medidas e armazenadas num banco de dados até o produto final: um modelo compatível com o aplicativo computacional de simulações dinâmicas, o ANATEM.

A seção 3.2 descreve critérios para seleção de dados à estimação de modelos de carga.

A seção 3.3 discute o processamento necessário dos dados brutos de tensão e corrente, de onde se obtêm as curvas de potência de interesse.

A seção 3.4 apresenta a primeira escolha de estrutura de modelo matemático para a investigação.

A seção 3.5 apresenta resumidamente a técnica de estimação de parâmetros escolhida (AG), a representação e estratégia de solução do problema da modelagem de carga, além de resultados gráficos da estimação de parâmetros para diversas contingências registradas no sistema CHESF.

A seção 3.6 apresenta outra escolha de estrutura de modelo matemático, o modelo autorregressivo linear SISO e os resultados gráficos desta modelagem.

A seção 3.7 resume o capítulo.

3.1. Resumo do procedimento

A modelagem de carga é uma tarefa de identificação de sistemas [6]-[11] (APÊNDICE I – Identificação de Sistemas). O seu procedimento consiste em:

- **Selecionar um conjunto de dados de tensões (V) e correntes (I) colhidos em uma subestação** – Os dados de tensões e correntes selecionados devem atender a critérios estabelecidos para modelagem de carga, discutidos adiante.

- **Processamento dos sinais de tensões e correntes, obtendo os sinais de potência ativa (P) e reativa (Q)** – Com a Transformada Discreta de Fourier (TDF) os dados de tensão e corrente assumem a forma de números complexos, e pode ser usada a relação $P + jQ = VI^*$, de onde se obtém as magnitudes de potência ativa e reativa. Através da mudança de base conhecida como *Transformada de Fortescue* obtêm-se os componentes de potência e tensão de sequência positiva, as grandezas utilizadas no aplicativo computacional de simulações dinâmicas, o ANATEM.

- **Escolha de um tipo de modelo** – Dentre um conjunto de modelos candidatos, deve ser escolhida uma estrutura matemática para representar a carga, como os modelos apresentados no capítulo 2. Se necessário, nessa etapa especifica-se a ordem do modelo.

- **Determinação dos parâmetros** – A estimação dos parâmetros dos modelos de carga podem ser realizados com diversas técnicas de otimização, com abordagens que buscam o conjunto de parâmetros que minimizam uma função de erro entre variáveis de saída efetivamente medidas e simuladas pelo modelo. Podem ser citados como exemplos de técnicas de estimação de parâmetros:

- Métodos de mínimos quadrados como Curve-Fitting.
- Métodos baseados em gradientes.
- Simulated Annealing.
- Lógica fuzzy.
- Redes Neurais.
- Algoritmos Genéticos.

- **Implementar o modelo no aplicativo de simulações dinâmicas** – Para tanto, é necessário alterar o arquivo em formato ANATEM, inserindo os

modelos dinâmicos propostos em substituição dos modelos estáticos utilizados atualmente.

A Figura 4 resume este procedimento de forma simplificada.

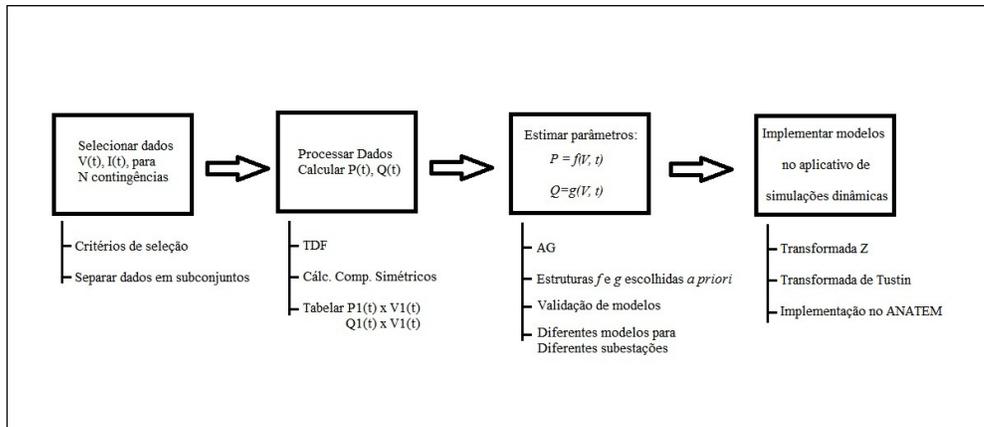


Figura 4 - Diagrama esquemático da modelagem de cargas baseada em medição

A seguir, serão detalhados os passos do resumo do procedimento apresentado nesta seção.

3.2. Seleção de dados

A Figura 5 mostra as subestações, usinas hidrelétricas e Linhas de Transmissão (LT) na área de atuação da CHESF. Há mais de cem medidores (*Intelligent Electronic Devices - IED*) instalados nos barramentos e entradas de linhas de 69, 138, 230 e 500 kV, programados para registrar diversas grandezas elétricas periodicamente, ou orientadas a algum distúrbio no sistema, com capacidade de processamento de informações registradas. Este sistema de monitoração de grande porte (*Wide Area Monitoring System - WAMS*) coleta periodicamente dados de tensão, corrente, potência, frequência.

Este WAMS é chamado na CHESF de “Rede de qualimetria”, pois o foco de suas medições são indicadores de qualidade de energia, como harmônicos, desequilíbrios de tensão, *flicker*, e afundamentos de tensão, também conhecidos como Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD). A Figura 6 ilustra o esquema de envio de dados de diversos medidores conectados por uma rede *ethernet* para o servidor instalado na sede da CHESF em Recife.



Figura 5 - Diagrama da área de atuação da CHESF

VTCD têm especial importância neste trabalho porque a tensão é a variável de perturbação do modelo de carga. O interesse no fenômeno das VTCD surgiu pelo seu impacto em processos industriais automatizados, que podem ser interrompidos com variações na magnitude da tensão em seus terminais. Computadores podem desligar-se com afundamentos momentâneos de tensão, Controladores Lógico Programáveis (CLP) podem ser reiniciados, causando sérios prejuízos a grandes consumidores de energia elétrica.

A definição de VTCD é a redução súbita do valor eficaz de uma das tensões entre fase e neutro para um patamar entre 90% e 10% da tensão nominal pré-falta, durando até o restabelecimento das três fases a um patamar acima de 90% da tensão nominal.

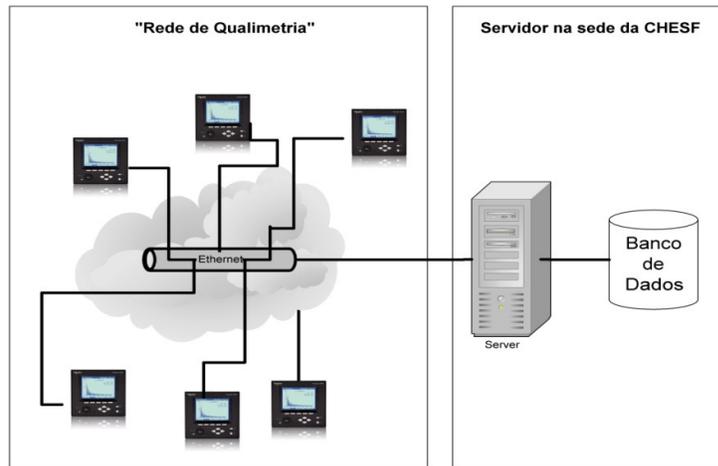


Figura 6 - Esquema de envio de dados dos medidores para o servidor CHESF

A Figura 7 ilustra as diferentes classificações de VTCD [13]. No ciclo de maior afundamento, além do cálculo da tensão característica, o indicador da severidade da VTCD, dado pela menor tensão eficaz durante uma contingência, calcula-se também as componentes de tensão de sequência negativa (V_2), que caracterizam faltas trifásicas, quando o valor de V_2 é “desprezível” (na prática, menor que um limite empírico, $LimV_2$), e de tensão de sequência zero (V_0), que caracterizam faltas envolvendo a terra (quando o valor de V_0 é maior que um limite empírico, $LimV_0$).

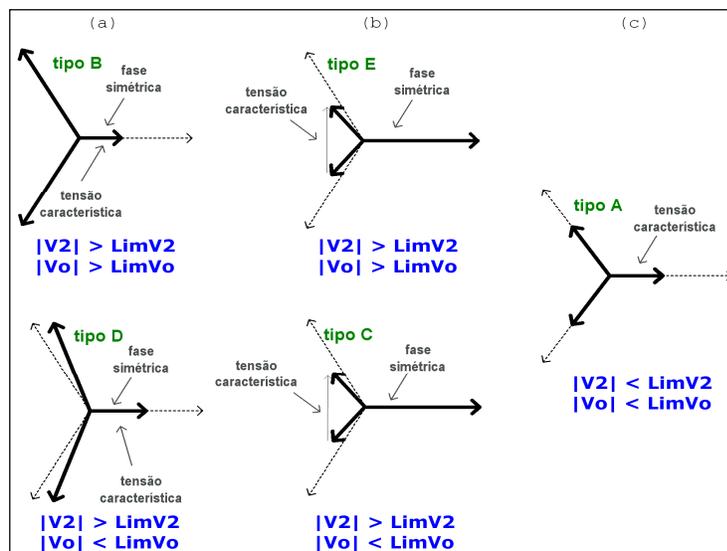


Figura 7 - As 3 principais classes de VTCD: (a) monofásicas, (b) bifásicas e (c) trifásicas

A tensão característica V_z será utilizada ao longo deste trabalho, bem como a duração da VTCD, que varia entre dezenas e centenas de milissegundos, por definição [13]-[14]. Estes serão os dois principais indicadores da severidade das VTCD.

3.2.1.

Critérios de seleção de dados para modelagem de carga

A seguir, são apresentados critérios para seleção de registros de tensão e corrente adequados para modelagem de carga [15]:

- **Os registros de V e I devem ser associados às VTCD registradas em medidores instalados em barramentos de 69 kV, para distúrbios originados no 230 ou 500 kV** – de acordo com o esquema da Figura 1, se o distúrbio for originado no 69 kV ou no 13,8 kV (sistema de distribuição), a carga a modelar seria alterada, seja pela atuação da proteção ou pelo efeito do distúrbio. Com distúrbios originados na transmissão é possível estudar a sensibilidade da carga experimentando variações na tensão do barramento de 69 kV [16]-[17]. Os medidores são programados para gravar formas de ondas de tensões e correntes quando a tensão cair abaixo de um patamar de 0,9 p.u.

- **A tensão característica V_z da VTCD deve ser menor que 80% de seu valor pré-VTCD** – a variação de tensão em relação ao seu valor pré-distúrbio deve ser tal que a tensão residual mínima (tensão característica, Figura 7), durante o distúrbio, deve ser menor que 0,9 p.u. (supondo que a tensão de operação seja 1,0 p.u. no ponto de equilíbrio antes do distúrbio).

- **A duração do distúrbio deve ser temporária, de 50ms até 500ms** – a janela total de registro programada nos medidores da CHESF é de 900ms (incluindo os ciclos pré-distúrbio); durações desta ordem podem ser então totalmente observadas na janela. A duração da VTCD começa a ser contada quando uma das três tensões entre fase e neutro cai abaixo de 0,9 p.u. e termina quando todas as três tensões encontram-se acima de 0,9 p.u.

- **Não deve haver nenhuma interrupção de tensão** – VTCD com tensões características abaixo de 0,1 p.u. são consideradas interrupções, e

introduziriam uma descontinuidade indesejada na variável de perturbação do modelo.

- **A componente de tensão de sequência zero durante a VTCD deve ser desprezível** – A componente de tensão de sequência zero presente num sinal de tensão durante a VTCD caracteriza curtos-circuitos fase-terra e fase-fase-terra; este desequilíbrio se propaga pela rede elétrica, se atenuando à medida que se afasta de sua origem. No entanto, o sistema de transmissão da CHESF é separado da distribuição por transformadores conectados em estrela-delta (Figura 1) e esta configuração bloqueia a propagação de componentes de sequência zero; dessa forma, se o sinal de tensão registrado pelo medidor de 69 kV contiver um nível de sequência zero “significativo (acima de um determinado limite empírico $LimVo$), indica que a origem do distúrbio está dentro do sistema de distribuição. De acordo com a Figura 7, VTCD tipos “B” e “E” estão descartadas, pois caracterizam-se por serem distúrbios ocorridos dentro do 69kV ou do 13,8 kV [13] e [17].

3.3. Processamento de dados

Esta seção descreve as etapas do processamento de dados utilizadas neste trabalho. Embora algumas características dos sinais envolvidos sejam específicas da CHESF, o procedimento é essencialmente o mesmo para sinais com outras características, como, por exemplo, diferentes taxas de amostragem, ou diferentes tamanhos de janelas.

3.3.1. Características dos Sinais de Tensão e Corrente

Medidores de qualidade de energia (IED) sensibilizados pela queda de tensão propagada no sistema causada por um curto-circuito (IED dentro da área de vulnerabilidade [14]) irão registrar as formas de ondas de tensão (Figura 8) e corrente (Figura 9).

Estes medidores estão programados para gravar formas de ondas quando ocorrer uma VTCD no barramento ao qual o mesmo esteja instalado; toda vez que a tensão no barramento cair abaixo de 90% de seu valor nominal, serão gravadas dados instantâneos de tensões e correntes, durante 54 ciclos de 60 Hz, com taxa de

amostragem de 1920 Hz ou 32 pontos por ciclo. Como explicitado nos critérios da seção 3.2.1, somente dados de medidores barramentos de 69 kV serão utilizados.

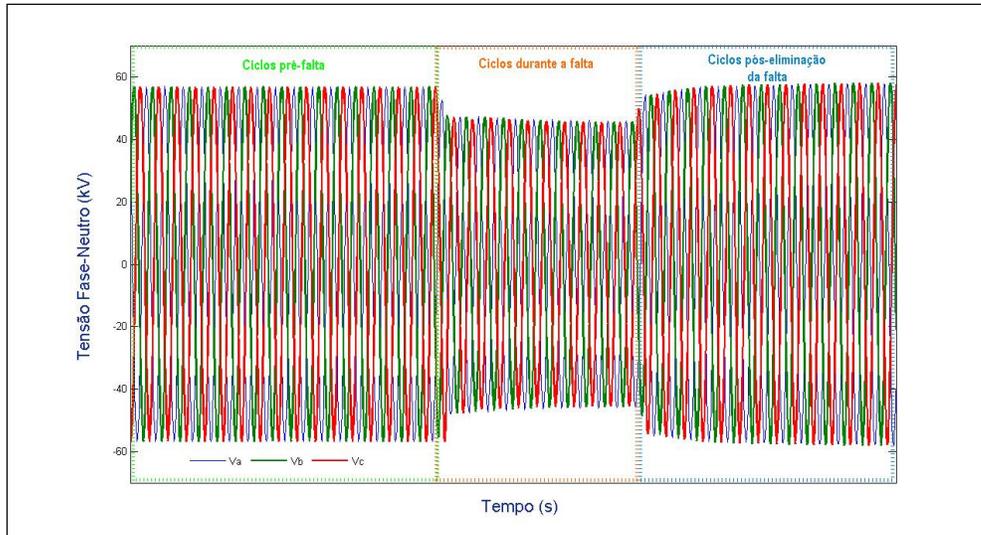


Figura 8 - Exemplo de Formas de Ondas de Tensões entre Fase e Neutro

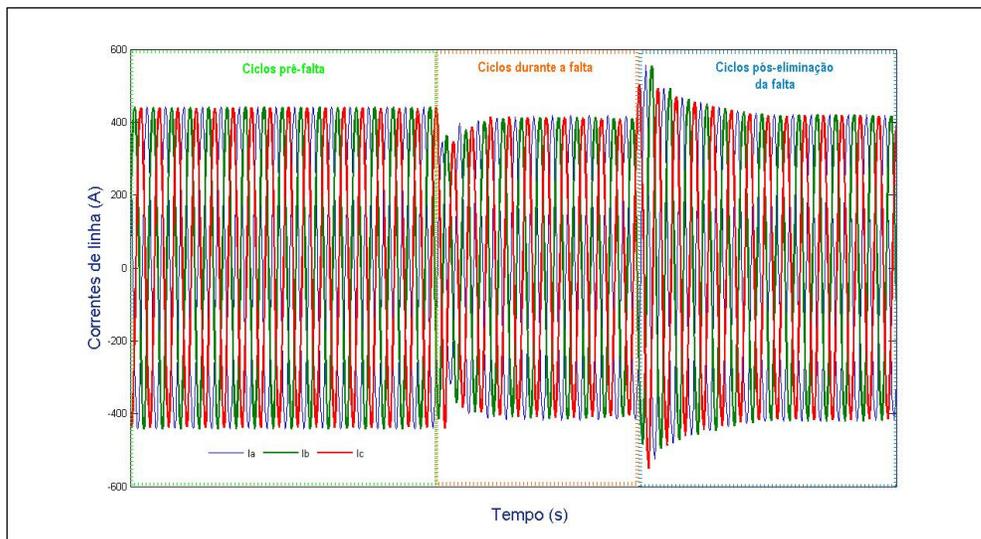


Figura 9 - Exemplo de Formas de Ondas de Correntes de linha

3.3.2. Transformada Discreta de Fourier

“A Transformada Discreta de Fourier (TDF) corresponde a amostras, igualmente espaçadas em frequência, da transformada de Fourier de um sinal discreto” [18]. A relação (3-1) expressa a forma mais geral da TDF numa sequência $X(t)$, onde N corresponde ao tamanho da janela, n é um escalar que varia de $[0, N-1]$ e é conhecido como harmônico.

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(t) e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} \quad (3-1)$$

A Figura 10 e a Figura 11 ilustram o resultado da TDF aplicada em 2 dos 54 ciclos da janela de registro de VTCD. As setas azuis são os fasores antes da VTCD e as setas vermelhas os fasores durante a VTCD, tanto para a ilustração das tensões, quanto para a corrente.

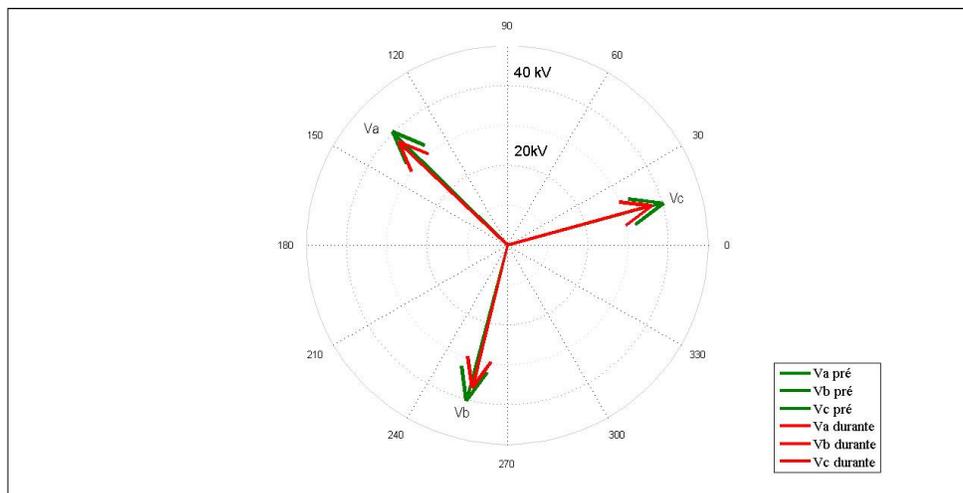


Figura 10 – TDF das tensões em 2 ciclos: antes (azul) e durante (vermelho) a VTCD

Aplica-se a TDF numa janela deslizante ao longo das formas de ondas, a fim de transformar os sinais instantâneos de tensão e corrente em números complexos, conhecidos como fasores.

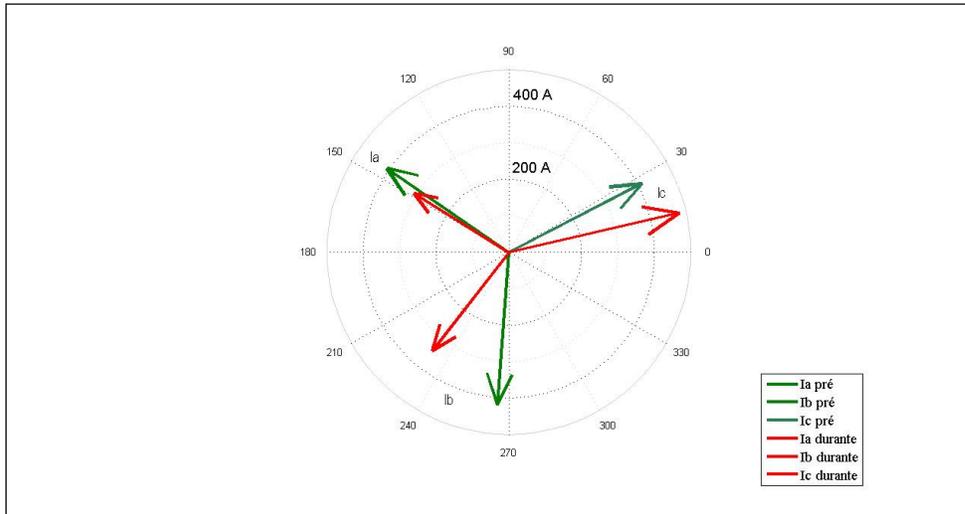


Figura 11 – TDF das correntes, nos mesmos 2 ciclos da figura anterior

A TDF também é importante por filtrar as componentes harmônicas [14] dos sinais de tensões e correntes, resultado apenas na componente fundamental de 60 Hz [18], quando $n=1$.

3.3.3. Componentes Simétricas de Tensão e Corrente

O próximo passo é aplicar a transformação de Fortescue [12] no conjunto de fasores de tensões e correntes, obtendo, assim, as componentes de sequência zero, positiva e negativa.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

Como as simulações dinâmicas nos sistemas de potência usualmente utilizam as componentes de sequência positiva, serão calculadas as componentes de sequência positiva da potência ativa e reativa através da relação (3-4).

$$P_1 + jQ_1 = 3 \cdot (V_1 I_1^*) \tag{3-4}$$

- P_1 – componente de potência ativa de sequência positiva.
- Q_1 – componente de potência reativa de sequência positiva.
- V_1 – fasor componente de tensão de sequência positiva.
- I_1^* – corresponde ao conjugado do fasor I_1 , que por sua vez é a componente de corrente de sequência positiva.

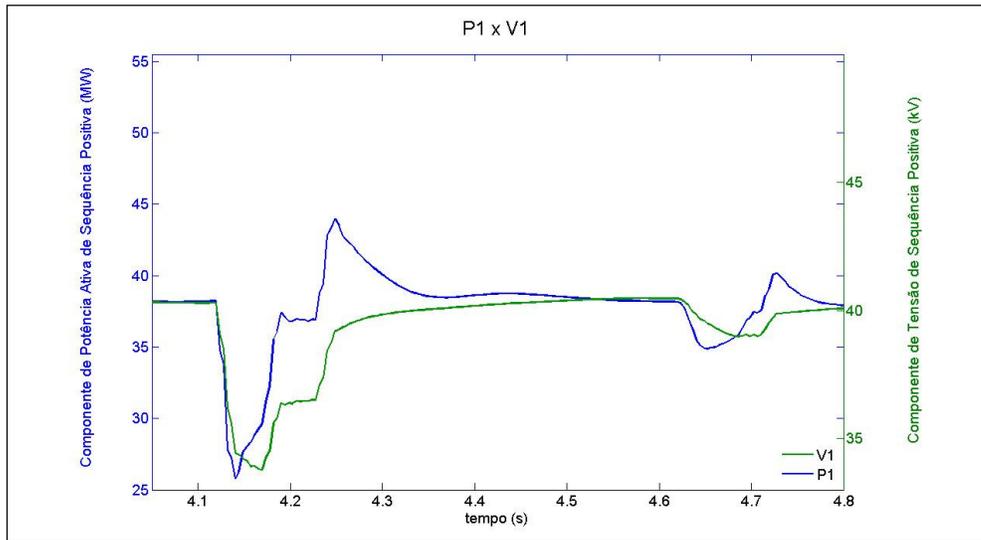


Figura 12 - Curva de Potência Ativa em função da VTCD

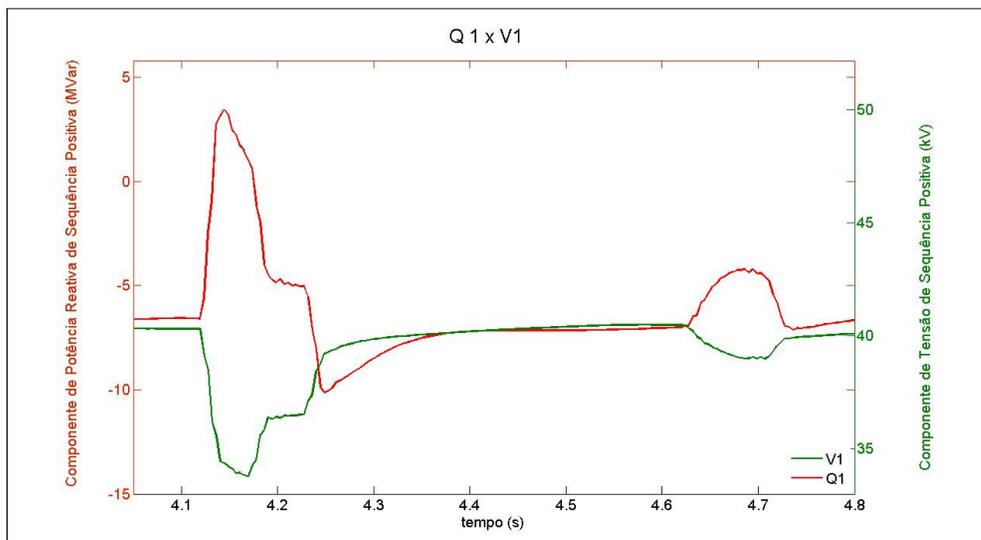


Figura 13 - Curva da Potência Reativa em função da VTCD,

A Figura 12 apresenta o a componente de sequência positiva da potência ativa (curva azul) e a componente de sequência positiva da tensão (curva verde) no eixo secundário, enquanto a Figura 13 apresenta a componente de sequência positiva da potência reativa (curva vermelha) e no eixo secundário a mesma variável de perturbação: o módulo da componente de sequência positiva da tensão (curva verde).

3.4.

Escolha *a priori*: Modelo Dinâmico Híbrido

O primeiro modelo estudado foi o modelo híbrido ZIP + Autorregressivo, como tentativa de representar características estáticas e dinâmicas da carga. A motivação desta escolha partiu de publicações recentes [6], [8] e [10] que apontam uma tendência para se utilizar modelos híbridos em estudos dinâmicos.

A equação resultante (3-5) é uma soma ponderada dos modelos apresentados em (2-4) e (2-17), cujo percentual de cada modelo é dado por μ :

$$P(k) = \mu P_0 \left[\alpha_{zp} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right)^2 + \beta_{lp} \left(\frac{V(k)}{V_0} \right) + (1 - \alpha_{zp} - \beta_{lp}) \right] \dots \quad (3-5)$$

$$+ (1 - \mu) P_0 \left[\frac{\varpi_{1p} P(k-1)}{(1 - \mu) P_0} + \frac{\varpi_{2p} P(k-2)}{(1 - \mu) P_0} + \frac{\varpi_{0pv} V(k)}{V_0} + \frac{\varpi_{1pv} V(k-1)}{V_0} + \frac{\varpi_{2pv} V(k-2)}{V_0} \right]$$

Esta representação da parcela dinâmica do modelo híbrido (modelo autorregressivo) é uma adaptação do modelo apresentado em (2-17). Esta adaptação incorpora o ponto de operação pré-distúrbio, dado por P_0 e V_0 . Estes valores são obtidos, em termos de simulação, do fluxo de potência convergido.

Não foi encontrada na literatura nenhuma representação semelhante. No compêndio de modelos de carga de [4], este modelo é apresentado com as grandezas $P(k)$ e $V(k)$ normalizadas (em p.u.); no entanto, para garantir a condição de contorno (3-6)...

$$P_0 = P(k=0) \quad (3-6)$$

$$Q_0 = Q(k=0)$$

... foi necessário incorporar, tal qual no modelo ZIP, as grandezas P_o e V_o . Esta adaptação possibilita que o modelo represente a sensibilidade de variações de potência em torno de um ponto de operação, com desvios da tensão em relação à tensão pré-falta.

Com isso, garante-se uma flexibilidade para utilizar somente um modelo em cenários de carga leve, média e pesada, pois o carregamento do barramento de carga é dado por P_o e o comportamento da carga responde a desvios de tensão e da dinâmica da potência, dada pelos valores progressos $P(k-1)$ e $P(k-2)$.

O conjunto de parâmetros a ser estimado é:

$$\theta_p = [\mu, \alpha_{z_p}, \beta_{l_p}, \omega_{1_p}, \omega_{2_p}, \omega_{0_{p_v}}, \omega_{1_{p_v}}] \quad (3-7)$$

Lembrando que, por analogia a (2-5), o parâmetro ω_{2_p} pode ser dado por:

$$\omega_{2_p} = 1 - \omega_{1_p} - \omega_{0_{p_v}} - \omega_{1_{p_v}} \quad (3-8)$$

3.5.

Estimação de Parâmetros: Representação do Problema com AG

Algoritmo Genético (AG) é uma estratégia de busca de soluções, inspirada na Teoria da Evolução, que por sua vez teoriza que indivíduos mais aptos sobrevivem pela seleção natural, carregando características genéticas de seus pais e estando sujeitos a variações aleatórias em seus genes.

A ciência da computação adaptou esses conceitos, codificando a solução de um problema em *cromossomas* ou *indivíduos*, que são vetores cujos elementos correspondem à solução da função-objetivo a ser otimizada pelo AG. Como exemplo, (3-9) representa o *cromossoma* do modelo híbrido (ZIP + autorregressivo) da potência ativa e (3-10) representa o *cromossoma* do modelo híbrido ZIP + autorregressivo da potência reativa.

$$\theta_p = [\mu_p, \alpha_{z_p}, \beta_{l_p}, \omega_{1_p}, \omega_{2_p}, \omega_{0_{p_v}}, \omega_{1_{p_v}}] \quad (3-9)$$

$$\theta_q = [\mu_q, \alpha_{z_q}, \beta_{l_q}, \omega_{1_q}, \omega_{2_q}, \omega_{0_{q_v}}, \omega_{1_{q_v}}] \quad (3-10)$$

Assim, os elementos dos *indivíduos* ou *cromossomas* são chamados *genes*. Os limites inferiores e superiores de cada *gene* definem o *espaço de busca* de soluções do problema. Para ilustrar esse conceito, (3-11) apresenta os limites inferiores e superiores de cada um dos genes que formam o cromossoma do modelo de potência ativa, assim como (3-12) para o modelo da potência reativa.

$$\begin{aligned} \theta_p^{INF} &= \left[\mu_p^{INF}, \alpha_{Zp}^{INF}, \beta_{Ip}^{INF}, \omega_{1p}^{INF}, \omega_{2p}^{INF}, \omega_{0pv}^{INF}, \omega_{1pv}^{INF} \right] \\ \theta_p^{SUP} &= \left[\mu_p^{SUP}, \alpha_{Zp}^{SUP}, \beta_{Ip}^{SUP}, \omega_{1p}^{SUP}, \omega_{2p}^{SUP}, \omega_{0pv}^{SUP}, \omega_{1pv}^{SUP} \right] \end{aligned} \quad (3-11)$$

$$\begin{aligned} \theta_q^{INF} &= \left[\mu_q^{INF}, \alpha_{Zq}^{INF}, \beta_{Iq}^{INF}, \omega_{1q}^{INF}, \omega_{2q}^{INF}, \omega_{0qv}^{INF}, \omega_{1qv}^{INF} \right] \\ \theta_q^{SUP} &= \left[\mu_q^{SUP}, \alpha_{Zq}^{SUP}, \beta_{Iq}^{SUP}, \omega_{1q}^{SUP}, \omega_{2q}^{SUP}, \omega_{0qv}^{SUP}, \omega_{1qv}^{SUP} \right] \end{aligned} \quad (3-12)$$

Dá-se o nome de *população* a um conjunto de soluções, geradas aleatoriamente pelo AG, onde cada *indivíduo* corresponde a uma solução válida do problema, o que significa que cada indivíduo contém genes dentro dos seus limites. Deve ser definido o *tamanho da população*, que corresponde ao número total de *indivíduos* que se sucede a cada *geração*.

Cada uma das soluções geradas é avaliada pela *função objetivo*, ou *função de avaliação* que define a aptidão de cada indivíduo. São criadas novas gerações de cromossomas/soluções através de operadores genéticos (seleção, *crossover* ou mutação), que têm uma taxa de probabilidade de ocorrerem entre uma geração e outra. Mais detalhes deste processo no Apêndice II.

A representação do problema da modelagem de carga com o AG é tal que a função-objetivo a ser minimizada é o erro quadrático médio relativo, dado por (3-13) para a potência ativa e de forma análoga (3-14) para a potência reativa:

$$F_{obj_P}(\theta_p) = \min \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{P_{med}^{(k)} - P_{calc}^{(k)}}{P_{med}^{(k)}} \right]^2 \quad (3-13)$$

$$F_{obj_Q}(\theta_q) = \min \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{Q_{med}^{(k)} - Q_{calc}^{(k)}}{Q_{med}^{(k)}} \right]^2 \quad (3-14)$$

Onde:

- N – é o total de amostras do sinal de potência para um determinado registro, em janelas iguais a da Figura 12 e da Figura 13.
- k – é o instante de tempo discreto.
- $P_{med}(k), Q_{med}(k)$ – são respectivamente as amostras de potência ativa e reativa medidas no instante k .
- $P_{calc}(k), Q_{calc}(k)$ – são respectivamente as amostras de potência ativa e reativa calculadas pelo modelo no instante k .

Assim, tanto melhor é a avaliação de uma solução quanto menor forem (3-13) ou (3-14), dependendo de qual dos modelos estiver sendo estimado.

É possível estender (3-13) e (3-14) para muitos eventos obtidos numa mesma subestação, como mostram as relações (3-15) e (3-16):

$$F_{obj_P_vários}(\theta_p) = \min \frac{1}{total_Registros} \sum_{numEv=1}^{total_Registros} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{P_{med}(k) - P_{ARX}(k)}{P_{med}(k)} \right]^2 \quad (3-15)$$

$$F_{obj_Q_vários}(\theta_q) = \min \frac{1}{total_Registros} \sum_{numEv=1}^{total_Registros} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{Q_{med}(k) - Q_{ARX}(k)}{Q_{med}(k)} \right]^2 \quad (3-16)$$

As funções-objetivo (3-15) e (3-16), definidas como as somas dos erros médios quadráticos relativos de cada evento registrado pelo sistema de monitoramento, generalizam (3-13) e (3-14) e serão utilizadas na obtenção de modelos de cargas.

O AG foi implementado no *MatLab* da seguinte maneira (ver Apêndice II):

- Tamanho da População: 100 indivíduos.
- Elitismo: 2 indivíduos (os dois melhores sempre são copiados através das gerações).
- Tipo de Seleção: Roleta.
- Tipo de *crossover*: Heurístico.

- Tipo de mutação: *Adaptive Feasible* (implementação do MatLab semelhante à mutação *creep*).
- Taxa de *crossover*: 0,6.
- Taxa de Mutação: não configurável nesta opção *adaptive feasible*.
- Critérios de parada: 20 gerações, ou função-objetivo menor que 10^{-4} .

Esta implementação do AG vai ser utilizada em outros experimentos, salvo alguma retificação, a ser mencionada especificamente. Em relação aos critérios de parada, após vários experimentos determinou-se um limite empírico para os erros dados por (3-15) e (3-16):

- Para os modelos da potência ativa, um erro, calculado pela (3-15) da ordem de 10^{-5} (valor empírico, considerado suficiente para aproximar uma curva de potência com outra) e um erro da ordem de 10^{-3} calculado pela (3-16) para a potência reativa.

3.5.1. Obtenção de um modelo híbrido de potência ativa

Os limites inferiores e superiores de θ_p definidos em (3-11) são apresentados em (3-17). Observe que estes limites foram definidos para que mais da metade do modelo seja composto pela parcela estática. Isto corresponde a definir os limites inferior e superior entre 0.5 e 0.85 do primeiro *gene* do cromossoma θ_p , definido em (3-5) e (3-9) como o parâmetro μ_p .

$$\begin{aligned}\theta_p^{INF} &= [0.5, 0.1, 0.1, -10, -10, -10, -10] \\ \theta_p^{SUP} &= [0.85, 1.0, 1.0, 10, 10, 10, 10]\end{aligned}\tag{3-17}$$

Após 20 gerações, o cromossoma obtido é dado por (3-18):

$$\theta_p = [0.628, 0.405, 0.296, -0.177, 0.188, 8.133, 0.719]\tag{3-18}$$

A Figura 14 apresenta os resultados do modelo híbrido (3-5) com os parâmetros (3-18), sendo as curvas azuis as componentes de sequência positiva da

potência ativa respondendo às perturbações das componentes de sequência positiva de tensão efetivamente medidas.

Como explicado na seção 3.5, a função-objetivo foi a minimização do erro relativo médio quadrático, dado por (3-15), entre o modelo híbrido e as curvas de potência medidas dos dados de validação. Este valor aparece na Figura 14 como *Erro total* no canto inferior direito, enquanto os erros calculados por (3-13) são os erros que aparecem individualmente nos gráficos.

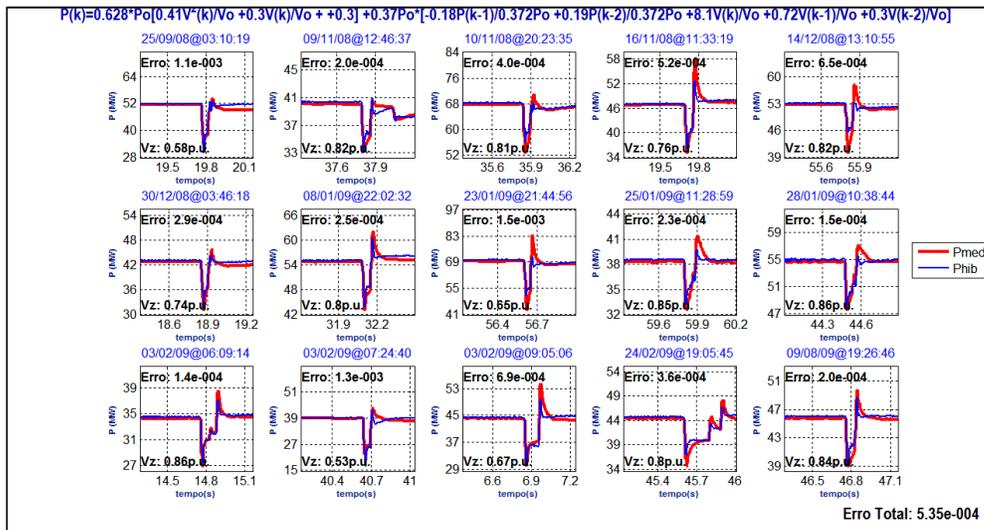


Figura 14 - Dados de validação com o modelo híbrido (azul) e a medição (vermelho)

No entanto, liberando os limites (3-11) para:

$$\theta_p^{INF} = [0, 0.1, 0.1, -10, -10, -10, -10] \tag{3-19}$$

$$\theta_p^{SUP} = [1, 1.0, 1.0, 10, 10, 10, 10]$$

Permite que o percentual da parcela estática possa assumir qualquer valor. O resultado foi:

$$\theta_p = [0.013, 0.13, 0.1, -0.268, 0.66, 3.05, 0.295] \tag{3-20}$$

A Figura 15 apresenta o modelo híbrido (3-5) com os parâmetros (3-20). Observa-se que visualmente o modelo aproxima bem as curvas de diversas contingências, praticamente zerando a parcela estática.

O modelo híbrido ZIP + autorregressivo foi testado, inclusive aumentando a parcela autorregressiva para um modelo de 3ª ordem, mas não houve melhora significativa no resultado.

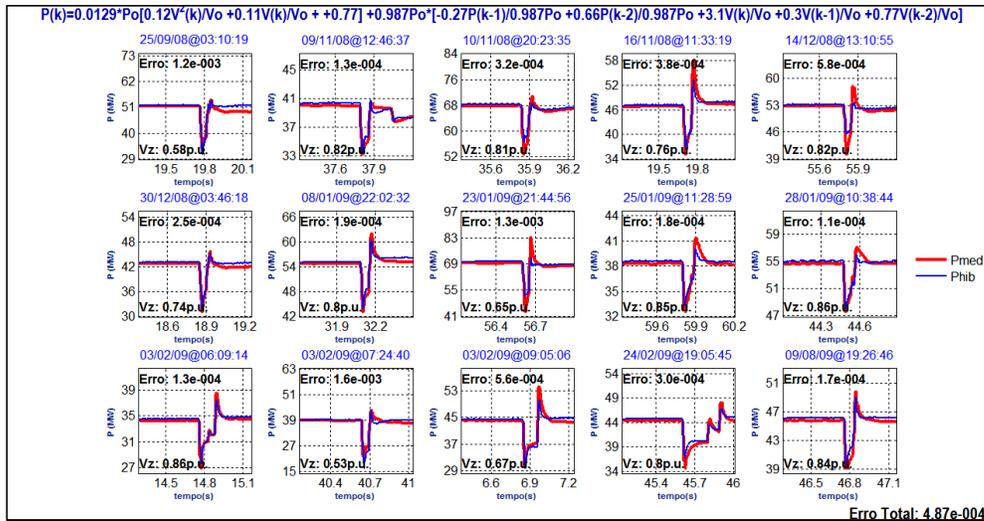


Figura 15 – Modelo Híbrido predominantemente autorregressivo

3.5.2. Obtenção de um modelo híbrido de potência reativa

A Figura 16 mostra o resultado de um experimento onde o espaço de busca de soluções foi definido por (3-21).

$$\theta_q^{INF} = [0, 0, 0, -10, -10, -10, -10] \tag{3-21}$$

$$\theta_q^{SUP} = [1, 1, 1, 10, 10, 10, 10]$$

O número de gerações foi aumentado para 100, o modelo tornou-se predominantemente autorregressivo (Figura 16), embora com erro calculado por (3-16) bem maior, motivando o critério diferenciado para avaliação dos modelos de potência ativa e reativa.

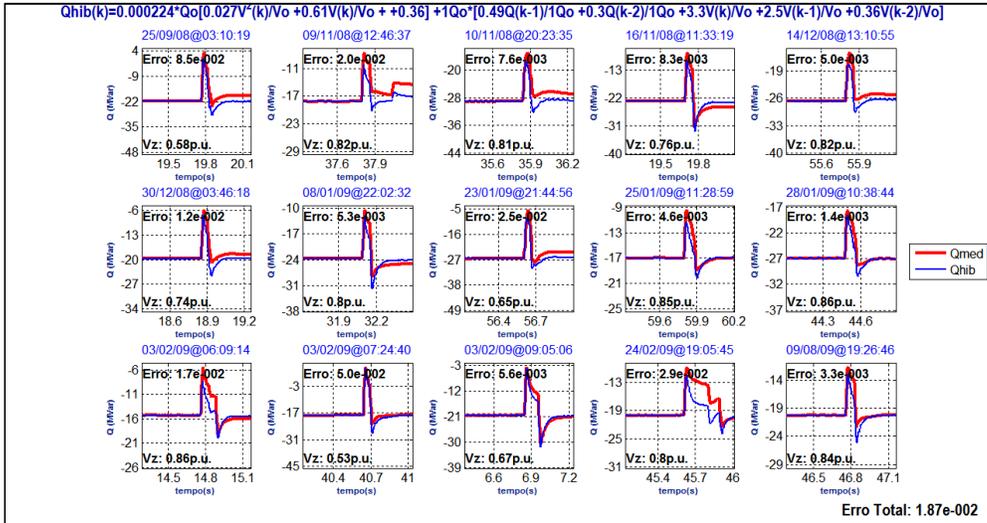


Figura 16 - Modelo Híbrido para Q(k) predominantemente autorregressivo

3.6. Escolha *a priori*: Modelo Autorregressivo Linear

Os resultados apresentados nas Figuras 16 e 17 indicam que simplificar a modelagem híbrida em um modelo autorregressivo linear (puramente dinâmico) pode representar a variação das cargas com abrangência e precisão. Constatou-se que há uma dificuldade maior quanto à modelagem da potência reativa, especialmente pela atuação de bancos de capacitores distribuídos pelo sistema de distribuição, instalados para compensação reativa, que atuam durante os distúrbios no sistema. Visualmente, entretanto, percebe-se que a aproximação da maioria dos casos foi razoável e a seguir serão apresentados outros testes com essa redução de parâmetros a serem estimados pelo AG.

3.6.1. Obtenção de modelo autorregressivo para potência ativa

Adaptando as equações (2-16), com a incorporação dos pontos de operação propostas em (3-5), as relações (3-21) apresentam o modelo autorregressivo de 2ª ordem:

$$P_{ARX}(k) = P_o \left[\sum_{m=1}^n \omega_{mp} \frac{P_{ARX}(k-m)}{P_o} + \sum_{m=0}^n \omega_{mvp} \frac{V(k-m)}{V_o} \right] \quad (3-21)$$

$$Q_{ARX}(k) = Q_o \left[\sum_{m=1}^n \omega_{mq} \frac{Q_{ARX}(k-m)}{Q_o} + \sum_{m=0}^n \omega_{mvq} \frac{V(k-m)}{V_o} \right]$$

O conjunto de parâmetros a ser estimado pelo AG é:

$$\theta_p = [\omega_{1p}, \omega_{2p}, \omega_{0pv}, \omega_{1pv}] \quad (3-22)$$

A Figura 17 apresenta resultado obtido com o AG para uma única curva de potência ativa obtida na subestação de Barreiras – BA, respondendo a uma VTCD bifásica (tipo C, conforme a Figura 7), onde o erro total (função objetivo a ser minimizada), calculado por (3-13), é da ordem de 10^{-4} . Pode-se constatar visualmente que a aproximação obtida pelo modelo parametrizado é muito boa.

A figura mostra outros detalhes como o valor da tensão característica $|V_{min}| = 0.786 \text{ p.u.}$, e da duração de 139ms; ao contrário da Figura 12, a curva de tensão não é mostrada, mas simplesmente caracterizada por seus indicadores, como será feito ao longo desta dissertação.

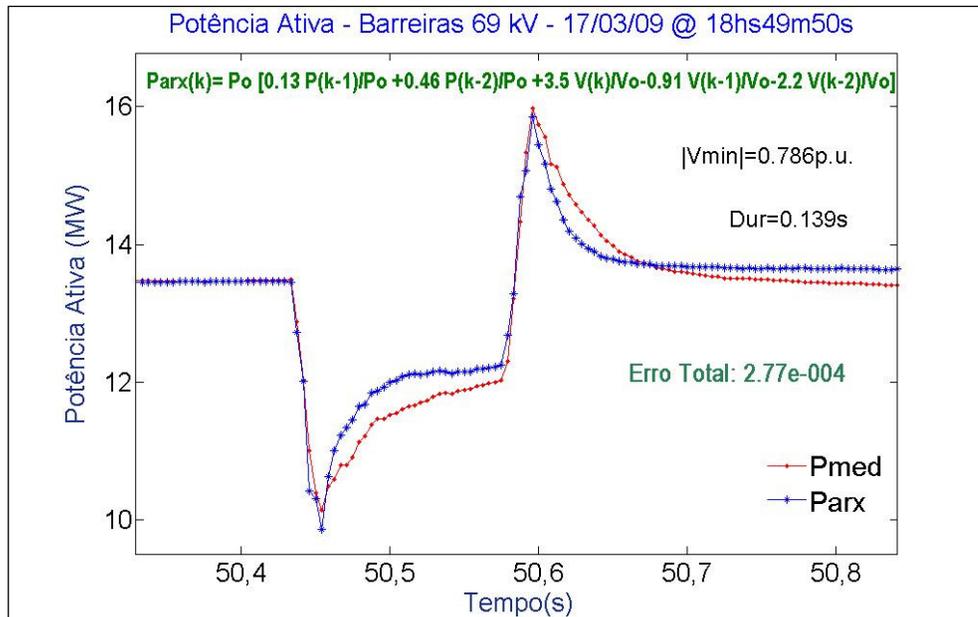


Figura 17 - Curvas medida e calculada de Potência Ativa em uma subestação

O modelo autorregressivo da potência ativa $Parx(k)$ dado pela equação (3-21), com o conjunto de parâmetros (3-22) obtido pelo AG após 20 gerações $\theta_p = [0.13, 0.46, 3.5, -0.91]$.

A Figura 18 apresenta um conjunto de medições de 16 distúrbios medidos no 69 kV de Fortaleza – CE. O modelo parametrizado pelo AG está mostrado no alto da figura. O erro calculado por (3-15) foi de 0.00179 e os erros individuais de cada um dos distúrbios, que aparecem no canto superior esquerdo de cada gráfico foram calculados pela equação (3-13).

Como todas as curvas em azul foram calculadas pelo mesmo modelo do alto da figura, isto é, com o mesmo conjunto de parâmetros, observa-se que é possível representar ocorrências que foram registradas ao longo de um ano (as datas aparecem no alto de cada gráfico) com um mesmo modelo, mostrando a abrangência do modelo autorregressivo de 2ª ordem.

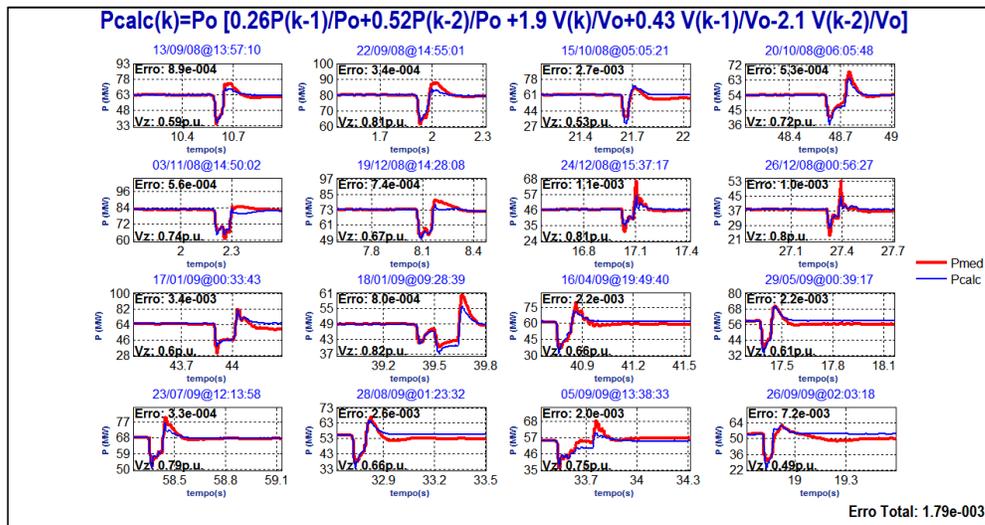


Figura 18 - Curvas medidas (vermelhas) e calculadas (azuis) de potência ativa

Embora não estejam mostradas nas figuras, as durações, os tipos de afundamentos (monofásicos, bifásicos, trifásicos, multi-estágio) e os carregamentos do barramento (P_o) são bem diferentes entre si.

3.7. Sumário do Capítulo

Neste capítulo foram detalhados todos os passos da Metodologia de modelagem de carga baseada em medições de qualidade de energia, desde a lista de critérios para seleção de dados, passando pelo processamento de sinais de tensões e correntes, transformações lineares utilizando a TDF e a mudança de base para as componentes de sequência, até a representação da estimação de parâmetros como um problema de minimização do erro entre a medição e o modelo.

Foi feita uma pequena investigação com o modelo híbrido ZIP + Autorregressivo, que apresentou bons resultados. Porém, ao verificar o desempenho do modelo dinâmico puramente autorregressivo, de acordo com resultados experimentais em que o AG praticamente zerava a parcela estática, foram obtidos excelentes resultados e decidiu-se investir no modelo puramente dinâmico, dado a redução dos parâmetros a serem estimados e a aceleração da busca de soluções pelo AG.

O próximo capítulo será dedicado ao estudo de casos, demonstrando a aplicação de todas as técnicas discutidas neste capítulo com dados reais colhidos pela rede de qualimetria da CHESF. Os resultados serão apresentados em gráficos e no Apêndice III estão apresentados todos os estudo realizados nesta dissertação.