Capítulo 2

Estimação Estática de Estados em Sistemas de Potência

2.1 Introdução

A avaliação da segurança da operação de sistemas de potência é feita através de duas funções básicas, que são Monitoração da Segurança e Análise da Segurança. O desempenho dessas funções depende da disponibilidade de informações confiáveis a respeito do ponto de operação atual do sistema, sendo portanto essencial a atualização em tempo real do banco de dados do sistema. A função encarregada de desempenhar este papel é a *Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP).*

Este capítulo descreve inicialmente a função da EESP na Operação em Tempo Real de Sistemas de Potência e os diversos sub-problemas que a compõem. Em seguida é apresentada uma classificação dos estimadores de estado segundo diversas perspectivas. Segue-se o desenvolvimento do modelo de medição utilizado e a formulação da EESP como um problema de Mínimos Quadrados Ponderados (MQP). Embora o método MQP seja sem dúvida o mais utilizado na solução da EESP, esta não é a única abordagem do problema. O capítulo encerra com uma breve descrição do método do Mínimos Valores Absolutos Ponderados (MVAP), que se constitui em uma alternativa para a formulação MQP.

2.2 A Estimação de Estados na Operação em Tempo Real

A função da Estimação de Estados em Sistemas de Potência é fornecer uma base de dados em tempo real confiável a partir de telemedidas redundantes (geralmente magnitude da tensão nas barras, injeções de potência nas barras, fluxos de potência nas linhas de transmissão, e eventualmente magnitude da corrente nas linhas de transmissão) e corrompidas por erros de várias espécies. O estimador de estados processa essas medidas de forma a estimar valores para a tensão complexa em todas as barras (considerada o *estado do sistema em regime permanente*). À partir dos estados é possível determinar as outras variáveis (fluxo de potência nas linhas de transmissão, injeções de potência nas barras etc) necessárias para a análise e monitoração da segurança do sistema. Além das telemedidas tomadas ao longo do sistema, outras quantidades não medidas diretamente mas que também contém informações relevantes sobre o estado do sistema podem ser processadas pelo estimador. Essas quantidades, cujos valores podem ser estimados sem a utilização de instrumentos de medição (injeções de potência em barras de transferência, por exemplo), são chamadas *pseudomedidas*.

Dentre as principais aplicações dos resultados fornecidos pelo estimador de estados, os seguintes três são da maior relevância [1]:

- Monitoração da Segurança, cujo objetivo é observar a condição corrente de operação do sistema (normal, de emergência, ou restaurativa);
- Análise da Segurança, cuja função é avaliar os efeitos de eventuais contingências no sistema;
- Previsão de carga, cujo objetivo é estimar a demanda futura das barras do sistema.

2.2.1 Monitoração de Sistemas de Potência

Diferentes alternativas foram propostas no passado para processar dados em tempo real a fim de monitorar o sistema de potência. Uma das primeiras tentativas consistia em supervisionar o sistema com base na medição de quantidades diretamente relacionadas às variáveis consideradas básicas da rede elétrica e associadas a certas instalações-chave do sistema. Esta prática mostrou-se incompleta além de entrar em conflito com o planejamento do sistema de potência, pois nestes estudos qualquer instalação pode se tornar *chave*, dependendo da coordenação da operação.

Posteriormente, propôs-se a utilização direta dos dados oriundos do sistema *SCADA (Sistema Supervisório e de Aquisição de Dados)*. Este procedimento também foi considerado incompleto porque apenas medidas *brutas* eram apresentadas ao operador e, adicionalmente não são fornecidas informações sobre variáveis não-monitoradas.

Sugeriu-se ainda o uso do Fluxo de Potência *on-line*, apenas com medidas de injeção de potência e magnitude da tensão. Apesar de superior aos procedimentos descritos anteriormente, esta estratégia apresentava diversas limitações. A principal delas é que as medidas utilizadas devem se restringir àquelas cuja especificação é requerida no problema de fluxo de potência, isto é injeções de potência nas barras de carga e injeções de potência ativa e magnitude da tensão nas barras de tensão controlada. Além disso, a perda de uma medida implica na impossibilidade de solução, e a presença de uma medida incorreta tem um impacto direto na qualidade dos resultados.

Essas deficiências levaram ao desenvolvimento de metodologias de monitoração do sistema de potência baseadas na estimação de estados, que permite o processamento de diversos tipos de medidas e considera a existência dos erros inerentes à mesmas. Adicionalmente, a redundância das quantidades medidas possibilita estimar o estado do sistema mesmo quando algumas delas são perdidas. A extensão dos resultados da EESP torna possível detectar a presença de erros grosseiros, identificar sua localização e determinar quantidades não monitoradas. Essas características destacam as vantagens desse procedimento de monitoração em relação às abordagens referidas anteriormente.

2.2.2 Subproblemas da EESP

Os seguintes subproblemas estão associados ao problema de Estimação de Estados em Sistemas de Potência:

- *Observabilidade*: subproblema que consiste em verificar se o número e a localização das medidas a serem processadas pelo estimador permite a determinação do estado do sistema;
- *Estimação de estados*: processo que consiste no cálculo de estimativas para os estados a partir do conhecimento da estrutura e dos dados do sistema e de telemedidas tomadas ao longo do mesmo;
- *Detecção de erros grosseiros*: subproblema que trata da verificação da existência de erros estruturais e/ou medidas espúrias (isto é, aquelas que são mais imprecisas do que é suposto no modelo de medição);
- *Identificação de erros grosseiros*: procedimento para se determinar quais são as medidas portadoras de erros grosseiros, ou que parte da topologia não está corretamente modelada;
- *Recuperação de medidas portadoras de erros grosseiros*: processo que consiste no tratamento de medidas espúrias, tal que elas possam ser utilizadas na estimação de estados.

Além destes, outros problemas ligados à modelagem em tempo real de sistemas de potência são a Pré-filtragem de medidas e o Configurador da rede elétrica:

- *Pré-filtragem*: consiste num pré-processamento no qual as medidas são submetidas a uma seleção tal que aquelas mais claramente portadoras de erros grosseiros são descartadas;
- *Configurador*: determina um modelo barra-ramo para a rede elétrica a partir do processamento das posições ("status") de disjuntores e chaves de subestações.

O encadeamento de todas as funções acima está representado na Fig. 2.1.

2.2.3 Classificação dos Estimadores de Estado

As principais diferenças entre os métodos de estimação de estados se originam nos seguintes pontos: a modelagem do problema de EESP, a maneira como os dados são processados e o algoritmo utilizado para resolver o problema formulado.

A formulação analítica do problema de EESP mais utilizada é baseada na minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos (estimadores do tipo *mínimos quadrados ponderados, MQP*). Porém, modelagens alternativas baseadas na minimização da soma dos valores absolutos dos resíduos (estimadores do tipo *mínimos valores absolutos ponderados, MVAP*) também são encontradas na literatura.

Quanto ao modo de processar os dados, os estimadores de estado podem ser de dois tipos: *"batch"*, no qual as medidas disponíveis são processadas simultaneamente e *seqüenciais*, no qual as quantidades medidas são processadas uma por vez.

O problema de *mínimos quadrados ponderados* que modela a EESP pode ser resolvido por uma variedade de algoritmos de otimização. Entretanto, devido às características particulares deste problema, o processo iterativo para a determinação do estado em geral se baseia:

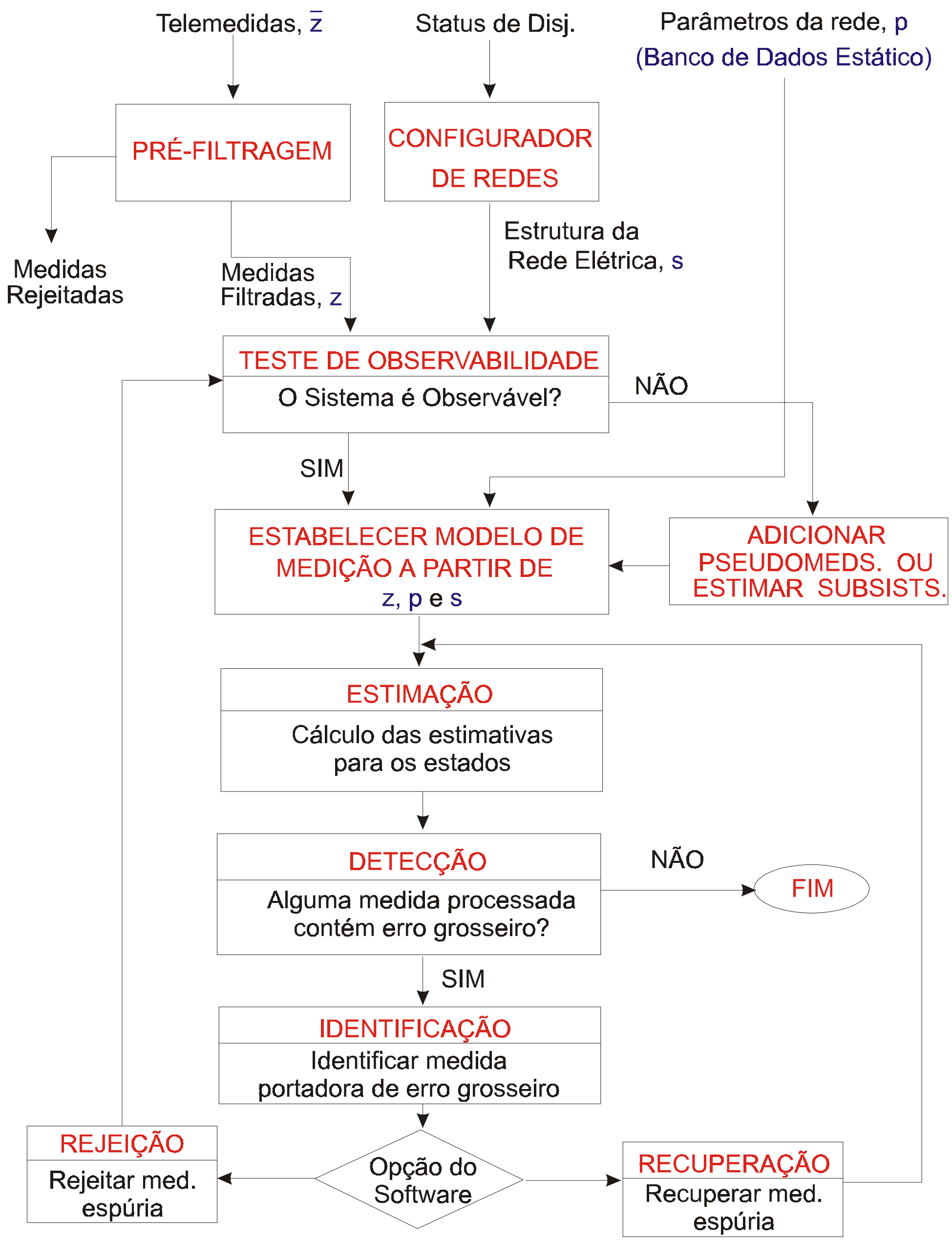


Figura 2.1: Funções que compõem a Estimação de Estados.

- na solução via Equação Normal (*método clássico*);
- no uso de *métodos ortogonais* (reflexões de Householder, rotações de Givens, etc);
- na aplicação de *métodos híbridos* (fatoração ortogonal combinada a solução do sistema linear não-ortogonal);
- na solução através do *método de Hachtel* (denominado alternativamente método da Matriz Aumentada ou do *Tableau* esparso);
- na exploração do desacoplamento $P\delta - QV$ (*estimadores desacoplados*).

Os *estimadores seqüenciais*, por sua vez, fornecem a solução de um problema de mínimos quadrados recursivos, podendo ser baseados no *Filtro de Kalman* ou em métodos ortogonais baseados nas rotações de Givens.

2.3 O Modelo de Medição

Considere um sistema de potência com N barras, no qual m quantidades são medidas. Suponha ainda, que a topologia e os parâmetros da rede elétrica são conhecidos. Sob estas condições, é possível determinar os fluxos de potência em qualquer linha de transmissão e/ou a injeção de potência em qualquer barra, a partir do conhecimento das tensões complexas nas barras do sistema. Esta é a razão pela qual as tensões complexas nas barras são chamadas **variáveis de estado** do sistema de potência.

O conjunto de m medidas tomadas ao longo da rede elétrica e os erros de medição estão relacionados através do seguinte modelo [1]:

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}_0 + \boldsymbol{\eta} \tag{2.1}$$

onde, $\mathbf{z}$ é o vetor de ordem $(m \times 1)$ das quantidades medidas (isto é, magnitude da tensão nas barras, injeções de potência ativa e reativa, fluxos de potência ativa e reativa, corrente etc); $\mathbf{z}_0$ é o vetor de ordem $(m \times 1)$ com os valores *verdadeiros* das quantidades medidas, o qual é função do estado *verdadeiro* e $\boldsymbol{\eta}$ é o vetor de ordem $(m \times 1)$ aleatório que modela os erros de medição (imprecisão dos medidores, erros de transformadores como instrumentos, erros de comunicação, efeitos de conversão analógico-digital, etc).

Os valores verdadeiros das variáveis de estado do sistema, e conseqüentemente das quantidades medidas, são desconhecidos. Para estimá-los, é necessário fazer certas suposições sobre o modelo de medição e utilizar a relação entre as quantidades medidas e os estados. No que segue, será suposto que o vetor dos erros de medição $\boldsymbol{\eta}$ apresenta distribuição normal, com média zero ($E(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{0}$) e matriz de covariância $\mathbf{R}$, e que os erros de medição são não-correlacionados; ou seja,

$$E(\boldsymbol{\eta}) = 0; \qquad E(\boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\eta}^{\mathbf{T}}) = \mathbf{R}$$

onde $\mathbf{R}$ é uma matriz *diagonal*. Os elementos diagonais dessa matriz são as variâncias dos erros de medição, os quais usualmente são expressos como uma função do valor do fundo de escala dos instrumentos de medição. Com essas suposições, o modelo de medição da Eq. 2.1 é re-escrito como

$$\begin{gathered} \mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\eta} \\ E(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{0}; \quad E(\boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\eta}^{\mathbf{t}}) = \mathbf{R} \end{gathered} \tag{2.2}$$

O vetor com os valores verdadeiros das quantidades medidas, $\mathbf{z}_0$, pode ser expresso em termos do vetor de estados como

$$\mathbf{z}_0 = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \tag{2.3}$$

onde $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ é um vetor composto por m funções não-lineares do estado do sistema, resultantes da aplicação das leis de Kirchhoff e Ohm, e $\mathbf{x}$ é o vetor de estados do sistema. Note que o número de estados de um sistema de potência com N barras é $n = 2N - 1$ (apenas o ângulo da barra de referência não é incluído no vetor de estados do sistema).

As quantidades medidas normalmente incluem fluxos de potência ativa e reativa nos ramos da rede e injeções de potência ativa e reativa nas barras, além de magnitudes de tensão. Deve ser mencionado que as correntes nas linhas de transmissão também poderiam ser monitoradas, porém esta prática não é a usual em sistemas de transmissão a alta tensão.

Outro aspecto importante refere-se ao número e à localização das medidas na rede elétrica. O grau de redundância global entre as medidas tomadas na rede elétrica, denotado por ρ, é definido como

$$\rho \triangleq \frac{m}{n} = \frac{m}{2N-1}$$

Observa-se que uma condição necessária (mas não suficiente) para se estimar o estado do sistema é que: $m \geq n$, ou $\rho \geq 1,0$. Além de uma boa redundância ($\rho > 1,5$), na prática exige-se que as medidas sejam distribuidas adequadamente pela rede elétrica, pois isto propicia tanto a estimação como a detecção e a identificação de erros grosseiros.

Finalmente, além das telemedidas efetivas que compõem o conjunto de medidas obtidas via sistema *SCADA*, alguns componentes do vetor das quantidades medidas $\mathbf{z}$ podem ser *pseudo-medidas*, isto é, informações oriundas de outras fontes de informação (estudos de previsão de carga ou resultados de estimações anteriores, por exemplo). As variâncias dessas grandezas devem refletir o grau de incerteza associado às mesmas, o qual sob circunstâncias normais é maior do que aquele associado às medidas normais. É portanto usual que as variâncias das pseudo-medidas seja maior do que a das quantidades telemedidas, obtidas via *SCADA*.

2.4 Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

No método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) uma estimativa $\hat{\mathbf{x}}$ para os estados é calculada de forma a minimizar uma função custo baseada no modelo de medição dado pelas Eqs. 2.2. O problema a ser resolvido consiste portanto na minimização da função de custo

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] \tag{2.4}$$

com relação a $\hat{\mathbf{x}}$. Ou seja, deseja-se minimizar o índice representado pelo somatório dos quadrados dos resíduos ponderados pelos inversos das variâncias dos erros de medição. A utilização da matriz de ponderação $\mathbf{R}$ implica em que as medidas de menor variância recebem maior peso do que aquelas que apresentam maior incerteza, e portanto tenham maior influência na solução da estimação de estados.

No problema expresso pela Eq. 2.4, a quantidade $\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$ representa o *vetor dos resíduos de estimação,* dado pela diferença entre o valor efetivamente medido e o valor obtido em função do estado estimado. Deseja-se portanto calcular o vetor $\hat{\mathbf{x}}$ que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos de estimação, ponderados pelo inverso das variâncias dos erros de medição.

Nos próximos três capítulos serão apresentados três métodos distintos para a solução do problema de estimação de estados baseado na formulação dos mínimos quadrados ponderados.

2.5 Método dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados

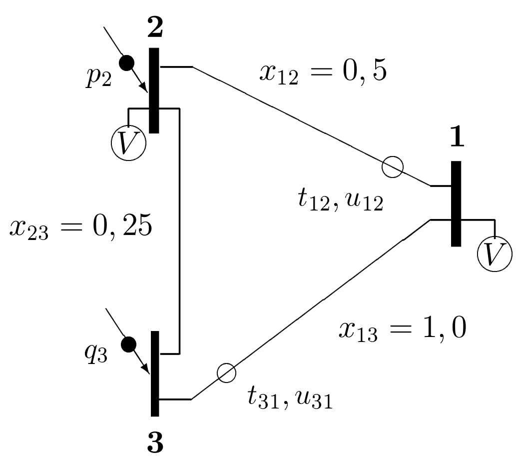
Outra abordagem para a solução do problema de EESP consiste na minimização da soma dos valores absolutos dos resíduos de estimação ponderados (MVAP) pelos inversos das variâncias das medidas, isto é:

$$\min_{\hat{\mathbf{x}}} \sum_{i=1}^{m} \sigma_i^{-2} \left| z_i - h_i(\hat{\mathbf{x}}) \right| \tag{2.5}$$

Após a introdução de uma mudança de variáveis, este problema pode ser transformado em um problema de programação linear com restrições [2],[3]. Alguns autores consideram o método MVAP como uma alternativa atraente em relação ao método MQP devido às suas propriedades inerentes de rejeição de erros. Entretanto, é fato que os estimadores MVAP encontram bem menos aceitação na prática do que os baseados nos mínimos quadrados ponderados.

2.6 Exercício

Considere o sistema de potência e o plano de medição associado representados abaixo, onde t e u representam medidas de fluxo de potência ativa e reativa, respectivamente, p e q são medidas de injeção de potência ativa e reativa e V representa medida de magnitude de tensão.



As resistências dos ramos da rede são desprezadas. As variâncias das medidas são iguais a $0,001$ *pu* para as medidas de tensão , $0,02$ *pu* para as medidas de potência ativa e $0,025$ para as medidas de potência reativa.

Escreva o modelo de medição não-linear para o sistema com o plano de medição dado. Explicite cada elemento do vetor de funções $\mathbf{h}(\boldsymbol{\delta})$ substituindo valores numéricos para os parâmetros da rede e determine a matriz de covariância dos erros de medição $\mathbf{R}$.

(*Lembrete:* desprezando-se as resistências dos ramos, os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos e as injeções nas barras são dados por:

$$
\begin{array}{ll}
t_{ij} = \frac{V_i\ V_j}{x_{ij}} \operatorname{sen}(\delta_i - \delta_j) & u_{ij} = \frac{V_i^2}{x_{ij}} - \frac{V_i\ V_j}{x_{ij}} \cos(\delta_i - \delta_j) \\
p_i = \sum\limits_{k \in \Phi_i} t_{ik} & q_i = \sum\limits_{k \in \Phi_i} u_{ik}
\end{array}
$$

onde Φ_i representa o conjunto de barras adjacentes à barra i sem incluir esta barra).

Referências Bibliográficas

[1] A. J. A. Simões Costa. *Power System State Estimation: Orthogonal Methods for Estimation and Bad Data Processing, and Techniques for Topological Observability.* PhD thesis, University of Waterloo - Canada, 1981.

[2] Bagchi, A.; Clements, K.A.; Davis, P.W.; Maurais, F.H., "A comparison of algorithms for least absolute value state estimation electric power networks", 1994 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Vol. 6, pp. 53-56.

[3] Singh, H.; Alvarado, F.L., "Weighted Least Absolute Value state estimation using interior point methods", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, Aug. 1994, pp. 1478 -1484.