

## ESTIMAÇÃO E PREVISÃO DO ESTADO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO SUA DINÂMICA LENTA

Djalma Mosqueira Falcão

COPPE-EE/Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Caixa Postal 68504 - 21945 - Rio de Janeiro - RJ

### Resumo

Este artigo apresenta uma revisão de diversas abordagens para os problemas de estimação e previsão do estado de operação de sistemas de energia elétrica considerando sua dinâmica lenta, isto é, variações nas tensões, fluxos de potência, gerações, etc., decorrentes do ciclo normal de variação da carga. O trabalho é orientado no sentido de ressaltar as vantagens do tratamento unificado dos dois problemas. Inicialmente são revistos os princípios básicos de funcionamento do sistema, do ponto de vista da sua dinâmica lenta e, posteriormente, apresentadas e discutidas as abordagens convencional e alternativas recentemente propostas para solução dos problemas. O artigo não tem a pretensão de apresentar uma revisão exaustiva do assunto e sim de tentar estabelecer estruturas básicas a partir das quais trabalhos futuros possam ser desenvolvidos.

### Abstract

This paper presents a review of the several approaches available for the problems of the electrical energy system operating state estimation and forecasting in its slow dynamic context, i.e., the changes in voltages, power flows, generations, etc., resulting from the normal load variation cycle. The work is oriented in order to emphasize the advantages of a unified treatment of both problems. Initially, the basic system working principles from the point of view of its slow dynamic are presented and latter the conventional and recently proposed approaches for the problem are reviewed. The paper does not pretend to review exhaustively the subject but to attempt the establishment of basic structures upon which future works may be developed.

### 1. INTRODUÇÃO

A implantação generalizada de centros de supervisão e controle em tempo real de Sistemas de Energia Elétrica (SEE) nesta década (Dy Liacco, 1986), tem proporcionado a oportunidade para introdução de técnicas de controle de processos por computador na operação de tais sistemas com possibilidades de grandes ganhos em termos de eficiência e confiabilidade. Para a utilização de tais técnicas, se faz necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos caracterizando o funcionamento do sistema. Modelos matemáticos para estudos "off-line" em SEE, tais como fluxo de potência, estabilidade, curto-circuito, etc, existem em grande variedade com diversos níveis de sofisticação. Observa-se, entretanto, uma carência de modelos específicos para determinadas aplicações em controle e supervisão. Esta situação é perfeitamente explicável dada a ainda muito recente disponibilidade de dos citados centros de supervisão e controle.

Os modelos matemáticos necessários a aplicações em controle e supervisão de SEE acima referidos se dirigem, principalmente, à representação da variação do estado de operação do sistema, caracterizado por valores

instantâneos de tensões nodais, fluxos e injeções de potência, etc., em relação à variação normal da carga. Este aspecto do funcionamento de um SEE difere bastante de outros tais como aqueles relacionados aos transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos causados por faltas, curto-circuitos, chaveamento, etc., no que diz respeito à ordem de grandeza das constantes de tempo envolvidas e a existência de fatores tais como a possibilidade de intervenção do operador e a aleatoriedade das cargas. Para caracterizar este aspecto do funcionamento de um SEE, relacionando basicamente o estado de operação do sistema à variação normal da carga, será utilizado neste artigo a expressão *Dinâmica Lenta* em contraposição a outros fenômenos mais rápidos existentes no sistema.

Intimamente relacionados ao desenvolvimento de modelos matemáticos caracterizando a dinâmica lenta de um SEE, encontram-se os problemas de estimação e previsão do estado de operação do SEE. Este relacionamento advém do fato de que tanto para a previsão quanto para a estimação do estado de um SEE, é necessário o processamento de dados telemetrados de um conjunto redundante de grandezas importantes do sistema em intervalos regulares. Estes da-

dos certamente formam um conjunto rico de informações necessárias ao desenvolvimento de um modelo dinâmico. Mais ainda, a solução dos problemas de estimação e previsão do estado de operação requerem, no mínimo, hipótese a respeito da estrutura do modelo dinâmico do sistema quando não o conhecimento de um modelo completo.

Neste artigo apresenta-se uma revisão de métodos de estimação e previsão do estado de operação de um SEE com ênfase nas abordagens que, de uma forma ou de outra, contenham alguma hipótese sobre o modelo dinâmico do sistema. O trabalho é orientado no sentido de ressaltar as vantagens de um tratamento unificado dos dois problemas. Inicialmente são revisados os princípios básicos de funcionamento de um SEE, do ponto de vista de sua dinâmica lenta, e posteriormente apresentadas e discutidas as abordagens convencional e alternativas recentemente propostas para a solução dos problemas. O artigo não tem a pretensão de apresentar uma revisão exaustiva do assunto e sim de tentar estabelecer estruturas básicas a partir das quais trabalhos futuros possam ser desenvolvidos.

## 2. A NATUREZA DA DINÂMICA DO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA

Os principais componentes de um SEE são:

- i. Unidades geradoras
- ii. Rede de transmissão, subtransmissão e distribuição (linhas e transformadores)
- iii. Equipamento de suporte de reativos (compensadores síncronos, compensadores estáticos, bancos de capacitores e reatores)
- iv. Cargas

O objetivo principal do sistema é atender à carga com as seguintes restrições:

- i. Manter a tensão e frequência dentro de limites
- ii. Assegurar um índice de confiabilidade de suprimento mínimo.
- iii. Custo mínimo.

Para satisfazer os objetivos descritos acima, um complexo sistema de supervisão e controle atuando de forma hierarquizada se faz necessário.

A seguir é apresentada uma breve descrição das características dos componentes e sua forma de atuação no que diz respeito à dinâmica lenta do sistema.

A carga é composta de duas parcelas: a) *Carga Ativa* (MW) representa a demanda efetiva de potência dos consumidores e perdas do próprio sistema. Seu comportamento médio é previsível em horizontes de curto, médio e longo prazos (minutos-anos) o mesmo ocorrendo com as estatísticas das variações aleatórias em torno desse comportamento médio. Só pode ser suprida pelas unidades geradoras através da rede de transmissão. b) *Carga Reativa* (MVAR) representa uma demanda "virtual" de energia do sistema que, ao nível do consumidor, segue aproximadamente a carga ativa. Existe, porém, uma componente criada pela própria rede que depende da configuração desta e do perfil de tensões. Por não demandar fonte de energia ativa pode ser satisfeita localmente evitando

com isto necessidade de transmissão pela rede. Este suprimento local é realizado pelo equipamento de suporte de reativo.

A rede de transmissão, subtransmissão e distribuição é projetada de modo a permitir o trânsito da potência ativa entre as fontes e a carga. Devido à eventual saída forçada ou programada de seus componentes, a estrutura da rede é variável e representa uma componente aleatória de modelagem difícil. Seus elementos possuem capacidade limitada de condução de potência, o que acrescenta restrições à operação do sistema.

A geração ativa é programada de modo a satisfazer *instantaneamente* a carga e perdas na rede. A alocação da carga entre as várias unidades geradoras do SEE é obtida por um sistema superposto de pelo menos duas malhas de controle:

- i. Controle Carga-Frequência: executa o controle rápido (poucos segundos) da frequência e intercâmbios.
- ii. Despacho: tem um tempo de resposta mais longo (alguns minutos). O objetivo é garantir que a alocação de potência ativa entre geradores apresente desvio mínimo em relação a uma programação da geração efetuada previamente (sistemas hidrotérmicos) ou obtida "on-line" (sistemas térmicos). Considerações relativas à segurança da operação podem ser incorporadas neste estágio ou na forma de despacho sempre que a possibilidade de uma emergência imediata for identificada.

A "geração" de reativos, como já referido anteriormente, é obtida tanto nos geradores propriamente ditos como nos dispositivos de suporte de reativos. Em geral são comandados por uma estratégia local de controle de tensão de uma determinada barra. Trabalhos mais recentes advogam a necessidade de um segundo nível (centralizado) de controle de tensão/fluxo de reativos. A razão alegada é que esse procedimento poderia evitar ações conflitantes dos controles locais em situações de emergência as quais, eventualmente, podem produzir situações de colapso do perfil de tensões do sistema agravando a emergência.

## 3. OBJETIVOS DA PREVISÃO E ESTIMAÇÃO DO ESTADO

Observa-se atualmente uma tendência generalizada na implantação de sistemas de supervisão e controle por computador nos SEE. Estes sistemas em geral apresentam uma estrutura hierarquizada que no caso brasileiro, tomado aqui como exemplo, apresenta os seguintes níveis (Kameyama e outros, 1984).

- i. Centro Nacional de Supervisão e Coordenação - CSC (Supervisão dos sistemas das regiões Sul-Sudeste e Norte-Nordeste. Localizado em Brasília e a ser operado pela Eletrobrás).
- ii. Centros de Operação de Sistemas - COS (Supervisão e controle dos sistemas de cada concessionária: Furnas, Cesp, Chesf, etc.)
- iii. Centros de Operação Regional - COR (Aquisição de dados e supervisão de áreas do

- sistema de uma concessionária).
- iv. Centros de Operação da Distribuição- COD (Supervisão de redes de distribuição).

Os COD's e COR's possuem apenas facilidades para aquisição de dados e supervisão do sistema, ou seja, o sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition System) enquanto os COS's e o CSC estão equipados com as chamadas *funções avançadas* as quais são rígidas para a implementação do chamado *Controle de Segurança* (Dy Liacco, 1974; Ribbens-Pavella, 1985).

A filosofia do Controle de Segurança é eminentemente preventiva e baseada nas três etapas seguintes:

- i. Avaliar se o estado atual de operação é normal (Monitoração da Segurança).
- ii. Avaliar se estados futuros, com horizonte de alguns minutos a poucas horas, é seguro no sentido de que caso ocorra uma contingência previsível o sistema continuará em operação normal (Análise da Segurança).
- iii. Caso as avaliações efetuadas em i. ou ii. sejam negativas, indicar maneiras de reconduzir o sistema para a região normal-segura (Reprogramação Corretiva ou Preventiva).

Da descrição acima conclui-se que a implantação do Controle de Segurança requer o conhecimento do estado atual e futuro da operação do SEE.

O estado atual de operação do SEE pode ser obtido da combinação de informações fornecidas pelo SCADA através de processamento estatístico. Esta operação recebe o nome de *Estimação de Estado* e pode ser realizada através de duas abordagens diferentes:

- i. Estimação Estática: quando apenas dados telemídidos correspondentes a um único instante de tempo são utilizados
- ii. Estimação Dinâmica: quando uma seqüência de dados telemídidos correspondentes a instantes passados e presentes são utilizados.

A previsão do estado futuro é realizada projetando-se as informações disponíveis até o momento presente através do tratamento estatístico desta informação e de hipóteses sobre o comportamento dinâmico do sistema.

Os problemas de estimação e previsão do estado de operação de um SEE são intimamente relacionados no que diz respeito ao tipo de informação a ser processada, aos critérios e objetivos do processamento e à metodologia empregada. Em algumas abordagens, por exemplo quando se utiliza a estimação dinâmica do estado, esses problemas se tornam inseparáveis.

#### 4. MODELAGEM

Como descrito anteriormente, o funcionamento de um SEE, do ponto de vista de sua dinâmica lenta, envolve procedimentos com tempos de resposta relativamente curtos (controle carga-freqüência e controle local de tensão) e outros mais lentos (despacho econômico e de segurança e controle centralizado da tensão). Os controles mais rápidos são executados auto-

maticamente enquanto que os mais lentos requerem a supervisão, e em muitos casos ainda, a intervenção do operador.

Em estudos voltados para aplicações em supervisão e controle, uma aproximação aceitável para efeito da modelagem dos fenômenos e controles descritos anteriormente é obtida assumindo-se uma operação instantânea do controle carga-freqüência e controle local de tensão. Desta maneira, imagina-se que o sistema opera de modo discreto evoluindo de um intervalo de tempo para outro sob a ação do nível superior na hierarquia de controle (despacho econômico e controle centralizado da tensão).

Adotando-se a hipótese acima, obtém-se um modelo dinâmico do SEE com as seguintes características:

- i. A rede elétrica é considerada em regime permanente e, portanto, modelada pelas equações algébricas do fluxo de potência.
- ii. Despreza-se a dinâmica das máquinas, de seus reguladores, do controle carga-freqüência, dos dispositivos de controle da tensão e das cargas.
- iii. A transição entre estados é governada unicamente por:
  - variações nas cargas
  - estratégia (algoritmo) de despacho econômico-segurança e controle centralizado da tensão
  - variações estruturais na rede
  - ações do operador.

Com esta abordagem, o estado de operação do SEE, em cada instante de tempo considerado, é definido pelos valores das cargas, gerações, fluxos de potência nos ramos da rede e tensões nas barras. Estas variáveis constituem um conjunto redundante de informações desde que estão interrelacionadas pelas equações do fluxo de potência. Deste conjunto pode-se extrair um subconjunto não-redundante que constituem, então, as chamadas *variáveis de estado*. Dois subconjuntos têm sido utilizados em estudos de estimação e previsão:

- i. Tensões nodais (módulo e ângulo de fase)
- ii. Injeções nodais (diferença entre os valores das potências ativas e reativas geradas e consumidas em cada nó ou barra.

Nas seções seguintes deste artigo serão discutidas abordagens para os problemas de estimação e previsão que utilizam as duas escolhas acima descritas.

A modelagem da transição entre estados é bastante complexa devido principalmente à possibilidade de variações estruturais na rede e ações do operador as quais não podem ser descritas facilmente em um modelo matemático.

Para efeito de sistematização e nomenclatura, os elementos do modelo da dinâmica lenta do SEE, segundo as hipóteses descritas anteriormente, serão reunidos na representação seguinte:

$$x_{k+1} = f(x_k, p_{k+1}, u_{k+1}, c_{k+1}) \quad (1)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (2)$$

k: intervalo de tempo  
 x: vetor de estado  
 p: vetor das cargas ativas e reativas  
 c: vetor contendo informações sobre a configuração da rede  
 z: vetor de variáveis medidas  
 v: erro de medição  
 h: função relacionando as variáveis medidas com as variáveis de estado  
 f: função representando a lei de transição entre estados.

A função  $f(\cdot)$  em (1) representa de forma genérica os algoritmos de despacho econômico-segurança e controle centralizado das tensões e ações do operador.

### 5. ABORDAGEM CONVENCIONAL

O problema de estimação do estado de operação de um SEE tem sido estudado desde o final da década de sessenta. Schweppe e Handschin (1974) apresentam uma excelente revisão dos fundamentos da aplicação de técnicas de estimação de estado ao caso de SEE. Desde então, aperfeiçoamentos diversos têm sido introduzidos nos métodos de estimação porém com muito poucas mudanças nas idéias fundamentais. Uma dessas poucas propostas consiste justamente na vinculação do problema de estimação ao da previsão do estado, objeto principal deste artigo. O problema de previsão do estado tem recebido tratamento completamente isolado daquele reservado à estimação e limitado à previsão de carga ativa do sistema. Galiana (1975) apresenta uma revisão bastante completa de métodos de previsão de carga.

Nas seções seguintes serão descritas técnicas utilizadas na estimação e previsão do estado de operação do SEE denominadas neste artigo de abordagem convencional em oposição a abordagens mais recentes descritas na próxima seção. As tensões nodais têm sido universalmente escolhidas como variáveis de estado nos problemas de estimação nesta abordagem.

#### 5.1 - Estimação Estática

A abordagem que tem recebido maior aceitação para aplicação prática ao problema de estimação de estado em SEE é a chamada estimação estática, na qual a equação (1) é completamente ignorada e o vetor de estado obtido de um conjunto de medidas correspondentes a um único instante de tempo. Este procedimento produz resultados adequados devido ao valor geralmente elevado de redundância existente nos sistemas de telemedição encontrados na prática. Outra razão que justifica a estimação estática é que, devido à variação lenta do vetor de estado, atualizações da estimativa deste vetor são necessárias em intervalos relativamente longos (5 a 30 minutos), o que torna aceitável o tempo de resposta desse tipo de processamento.

O problema de estimação a ser resolvido consiste em obter uma estimativa  $\hat{x}$  do vetor de estado correspondente a um determinado instante de tempo no qual foram colhidas informações (medidas), isto é, obter uma solução da

equação

$$z = h(x) + v \quad (3)$$

obtida de (2) ignorando-se o índice k. Uma hipótese usualmente assumida no problema acima é que

$$v = N(0, R) \quad (4)$$

onde R é uma matriz diagonal.

O problema é geralmente resolvido pelo método dos mínimos quadrados ponderados em sua versão não-linear e a solução obtida pelo processo iterativo

$$x^{i+1} = x^i + [H^t W H]^{-1} H^t W [z - h(x^i)] \quad (5)$$

onde

$$i = 0, 1, \dots \text{ (contador de iterações)}$$

$$H = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x^i}$$

$$W = R^{-1}$$

Vários aperfeiçoamentos têm sido propostos para o algoritmo acima no sentido de torná-lo mais eficiente computacionalmente. Dentre estes destaca-se a aplicação de técnicas de desacoplamento entre variáveis diretamente relacionadas aos fluxos de potência ativa e reativa (Garcia e outros, 1979).

Um problema bastante complexo na estimação estática, que tem recebido muita atenção dos pesquisadores da área, resulta da possibilidade prática da ocorrência de erros nas medidas não satisfazendo as condições expressas em (4). Isto caracteriza o que se convencionou chamar de *Erro Grosseiro* ("Bad Data") e faz com que a estimativa obtida usando-se (5) apresente erro não aceitável. Problema similar, embora menos abordado na literatura, resulta de informações errôneas sobre a configuração da rede, o que provoca uma composição incorreta da função  $h(\cdot)$ .

A abordagem convencional para os problemas de erros grosseiros e erros na configuração é através da análise dos resultados da estimação particularmente do vetor de resíduos normalizados (Handschin e outros, 1975 e Monticelli e Garcia, 1983), os quais são definidos como:

$$r^N = D^{-1} r \quad (6)$$

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (7)$$

onde D é uma matriz diagonal cujos elementos são as raízes quadradas dos elementos diagonais da matriz de covariância dos resíduos. Pode-se mostrar que as componentes de  $r^N$  seguem aproximadamente uma distribuição de probabilidades normal padrão, isto é, são  $N(0, 1)$ . Baseado no valor dos componentes de  $r^N$ , inicialmente certas medidas são consideradas *suspeitas* de conter erro grosseiro e eliminadas do conjunto de medidas. Nova estimativa do estado é obtida usando-se (5) e os novos resíduos testados até que se obtenha um conjunto de resíduos normalizados satisfazendo

a condição de variáveis aleatórias  $N(0,1)$ . Caso isso não aconteça, passa-se a suspeitar de um possível erro na configuração e repete-se o processo alterando-se o estado de chaves e disjuntores localizados em barras próximas àquelas onde os resíduos normalizados ultrapassaram os limites fixados.

O procedimento descrito acima para detecção e identificação de erros grosseiros e erros na configuração apresenta resultados adequados em situações onde a redundância local é relativamente elevada ( $>2,5$ ). Nos casos onde isso não se verifica, existe a possibilidade de buscas muito longas ou, até mesmo, de impossibilidade total de identificação do erro grosseiro ou erro na configuração.

### 5.2 - Estimação Rastreadora

Neste caso a abordagem continua intrinsecamente estática desde que uma definição explícita do modelo dinâmico expresso em (1) não é utilizada (Massiello e Schweppe, 1971; Falcão e outros, 1982; Falcão, 1985). Porém, mediante certos artifícios, parte da informação contida em estimativas passadas é incorporada à estimativa presente com a finalidade de melhoras de dois tipos:

- i. Desempenho computacional
- ii. Detecção e identificação de erros grosseiros e na topologia.

O estimador utiliza basicamente o algoritmo dado em (5) tomando como condição inicial ( $i=0$ ) a estimativa do estado obtida no instante anterior. Em casos onde o intervalo entre estimações consecutivas do estado é pequeno, uma iteração do processo em geral é suficiente e o estimador assume a forma recursiva

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + K H^t W [z_{k+1} - h(\hat{x}_k)] \quad (8)$$

onde  $K$  é escolhida a partir de considerações heurísticas sobre a dinâmica do sistema.

Com o objetivo de contornar o problema de identificação de erros grosseiros e na configuração em áreas de baixa redundância local, Falcão e outros (1982), Sakr (1986) e Abur (1987) propõem a utilização de previsão dos valores medidos a partir da modelagem desses valores como séries temporais independentes. Neste procedimento, sempre que a diferença entre o valor previsto e o valor medido de uma variável exceder limiares pre-estabelecidos, a correspondente medida torna-se suspeita de conter erros grosseiros. A confirmação dessa suspeita exige procedimentos para diferenciar erros grosseiros de mudanças bruscas no ponto de operação do sistema causados por variações estruturais ou na carga. Debs e outros (1972) e Falcão e outros (1982) apresentam propostas para a solução deste problema baseado em buscas espaciais.

Os estimadores rastreadores representam uma tentativa de incluir alguma informação sobre o comportamento dinâmico do SEE nos modelos estáticos evitando porém os trabalhosos processos de estimação de parâmetros requeridos

pelos estimadores dinâmicos.

### 5.3 - Estimação Dinâmica

Desde os primeiros trabalhos publicados em estimação de estado em SEE, a opção de se utilizar estimadores dinâmicos baseados no filtro de Kalman tem sido objeto de estudo (Debs e Larson, 1970; Srivanasen e Robichaud, 1978; Mahalanabis e outros, 1978; Do Coutto Filho e outros, 1982). Os resultados obtidos, porém, nunca foram considerados satisfatórios quando comparados com a abordagem estática. Esse desempenho alcançado dos estimadores dinâmicos, nas aplicações em supervisão e controle de SEE, deve-se a duas razões principais:

- i. Dificuldades na modelagem da dinâmica lenta do SEE tanto no que diz respeito a um desconhecimento da estrutura do modelo quanto a dificuldades computacionais na estimação "on-line" dos parâmetros.
- ii. Interpretação errônea dos objetivos da estimação dinâmica: na maioria dos trabalhos publicados esta abordagem é oferecida apenas como uma alternativa para a estimação estática, em relação à qual não oferece nenhuma vantagem em termos de precisão e apresenta desvantagens em termos computacionais. Pouco se explorou, entretanto, a grande vantagem da estimação dinâmica em relação à estática, qual seja, a capacidade de previsão do estado de operação.

Os primeiros trabalhos de aplicação da estimação dinâmica optaram pela utilização de um modelo extremamente simplificado da dinâmica do SEE. Neste modelo a equação (1) assume a forma

$$x_{k+1} = x_k + \omega_k \quad (9)$$

onde  $\omega_k$  é um ruído gaussiano branco com valor esperado nulo e covariância  $Q$ . Estimativas de  $Q$  são obtidas por processamento "off-line" de dados indicando a variação do vetor de estado. A partir do modelo acima aplica-se diretamente as equações do filtro de Kalman estendido obtendo-se:

$$\tilde{P}_k = P_{k-1} + Q \quad (10)$$

$$K_k = \tilde{P}_k H_k^t [H_k \tilde{P}_k H_k^t + R_k]^{-1} \quad (11)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k [z_k - h(\hat{x}_{k-1})] \quad (12)$$

$$P_k = [I - K_k H_k] \tilde{P}_k \quad (13)$$

Nishiya e outros (1982) propõem uma técnica de detecção e identificação de erros grosseiros e na configuração baseada na análise estatística dos processos de inovação definidos como

$$v_k = z_k - h(\hat{x}_{k-1}) \quad (14)$$

Este mesmo método foi recentemente aplicado ao algoritmo rastreador utilizando previsões de medidas (Falcão e De Paula, 1987).

Trabalhos mais recentes em estimação dinâmica de SEE (Do Coutto Filho, Leite da Silva e outros, 1984 e 1985) utilizam modelos mais realistas da dinâmica do SEE cujos parâmetros são estimados "on-line". Esses trabalhos, juntamente com extensões adaptadas à detecção e identificação de erros grosseiros e na configuração, serão comentados na seção seguinte deste artigo.

#### 5.4 - Previsão de Carga Ativa a Curto-Prazo

A previsão da carga ativa a curto-prazo (minutos - horas) é um passo inicial para a previsão do estado de operação do SEE. A partir dessa previsão, e considerações adicionais a respeito da carga reativa, da geração e da configuração da rede, é possível calcular qualquer variável do sistema ou seja está caracterizado seu estado de operação.

A literatura apresenta inúmeras publicações a respeito do assunto a maioria das quais é revisada por Galiana (1975). O problema estudado é geralmente o da previsão da carga ativa total do sistema em suas várias formas (pico diário, energia horária, energia semanal ou valores instantâneos em intervalos regulares). As várias formulações têm origem na diversidade dos efeitos modelados, na estrutura dos modelos e nos métodos de previsão e identificação.

Recentemente surgiu a preocupação de se obter a previsão da carga ativa por barra adotando-se uma formulação multivariável do problema (El-Magd e Sinha, 1981; Falcão e Bezerra, 1986 a e b): Este procedimento tem aplicação prevista principalmente na análise de segurança onde a detecção antecipada de situações vulneráveis pode auxiliar na diminuição do risco de emergências. Esta formulação é também importante na construção de uma estratégia de previsão do estado de operação como discutido na próxima seção.

### 6. ABORDAGEM ALTERNATIVAS

Como citado anteriormente, o estado de operação de um SEE, em um instante de tempo particular, pode ser caracterizado pelo conhecimento de suas tensões nodais ou das injeções nodais líquidas de potência ativa e reativa. Esta afirmação é verdadeira desde que se assuma que a configuração da rede é conhecida. Os trabalhos de estimação de estado, como visto na seção anterior, utilizam as tensões nodais como variáveis de estado. Teoricamente nada impede que os métodos de estimação fossem formulados usando o conjunto de injeções nodais como variáveis de estado. A escolha utilizada neste caso, entretanto, tem sua razão de ser: é mais conveniente utilizar-se as tensões nodais como variáveis de estado pois a partir destas as demais variáveis do sistema, assim como suas estatísticas, podem ser calculadas por funções explícitas das variáveis de estado (equações do fluxo de potência). O mesmo não ocorre na situação inversa: conhecida uma estimativa das injeções nodais, a estimativa das tensões, por exemplo, requer a utilização do método conhecido como fluxo de potência probabilístico. Esta vantagem é ainda mais evidente no

caso estático onde um modelo dinâmico não precisa ser obtido.

Na previsão do estado, entretanto, as vantagens na escolha das tensões nodais como variáveis de estado citadas anteriormente se contrapõem desvantagens quando se trata da morosidade da dinâmica do sistema. Como descrito na Seção 4 deste artigo, a transição entre estados de operação é influenciada por quatro tipos de ações ou perturbações nenhuma das quais é função explícita das tensões nodais. Consequentemente, caso as tensões nodais sejam usadas como variáveis de estado, na fase de conceitualização do modelo dinâmico dado em (1), só é possível utilizar-se uma estrutura genérica onde nenhuma informação específica sobre o funcionamento real do sistema é levada em consideração. Mais ainda, o comportamento passado das tensões nodais (horas, semanas, meses) contém pouca informação utilizável para efeitos de previsão devido ao fato de que estas variáveis são na realidade dependentes das cargas e da configuração da rede.

Do exposto acima verifica-se um impasse: do ponto de vista da estimação de estado, a escolha das tensões nodais como variáveis de estado é mais conveniente; para a previsão, entretanto, vantagens são encontradas escolhendo-se o conjunto de injeções nodais como variáveis de estado. Como também é conveniente um tratamento unificado de ambos os problemas, qual é a melhor escolha? Uma resposta definitiva para esta questão ainda não existe. A seguir são apresentadas brevemente duas abordagens para o problema com diferentes escolhas de conjuntos de variáveis de estado.

#### 6.1 - Abordagem Alternativa I

Leite da Silva, Do Coutto Filho e outros (1983 e 1985) apresentam um estimador dinâmico para SEE onde, pela primeira vez, a previsão do estado é colocada como objetivo principal e o problema da modelagem da dinâmica do problema é atacado de forma mais efetiva.

O modelo dinâmico utiliza como variáveis de estado as tensões nodais e uma estrutura genérica dada por

$$x_{k+1} = F_k x_k + G_k + w_k \quad (15)$$

onde

$F_k$  e  $G_k$ : matriz diagonal e vetor de parâmetros a serem estimados

$w_k$ : ruído branco

Os parâmetros do modelo acima são estimados "on-line" sempre que um novo vetor de medidas se torna disponível usando técnicas de Amortecimento Exponencial. O método de estimação e previsão utilizado é o filtro de Kalman estendido e o algoritmo utilizado é similar à quele dado em (10)-(13) levando-se em conta o modelo definido em (15).

Em publicações recentes Leite da Silva, e outros (1986-1987) propõem um novo estimador dinâmico, denominado estimador híbrido, no qual a etapa de filtragem é substituída por um processo similar ao usado nos estimadores rastreadores. Com isto, segundo os autores, o

estimador resultante passa a ter a vantagem da previsão do estado associada à rapidez computacional e melhor desempenho transitório do estimador rastreador. Nesse trabalho é também proposto uma técnica de detecção e identificação de erros grosseiros e na topologia utilizando a previsão do estado.

#### 6,2 - Abordagem Alternativa II

Recentemente dois desenvolvimentos independentes, estudando o problema de estimação e previsão do estado de operação de SEE, foram propostos por Bezerra e Falcão (1985), Malieu e outros (1986) e Rosseaux e outros (1986). Ambos decompõem o problema em uma fase de previsão e outra de estimação e, embora tratem os dois problemas de forma unificada, utilizam modelos diferentes nas duas fases. A fase de estimação ou filtragem é similar ao procedimento convencional estático (Falcão e Bezerra, 1986 a e 1986 b) ou convencional dinâmico (Malieu e outros, 1986; Rousseaux e outros, 1986) usando as tensões nodais como variáveis de estado. Na fase de previsão as injeções nodais são utilizadas como variáveis de estado. A parcela das injeções correspondentes às cargas é prevista utilizando técnicas de previsão de carga a curto prazo e a parcela correspondente à geração é obtida da primeira utilizando-se a regra ou algoritmo de despacho do sistema.

Falcão e Bezerra (1986 a, 1986 b) utilizam uma versão multivariável do método de Box e Jenkins para previsão da carga ativa e um filtro de Kalman adaptativo para a previsão dos fatores de potência ou da carga reativa. O acoplamento do resultado da previsão com a estimação ou filtragem se dá na disponibilidade de uma melhor condição inicial para o algoritmo e na geração de pseudo-medidas para efeito de detecção e identificação de erros grosseiros e na configuração e observabilidade da rede.

Malieu e outros (1986) e Rosseaux e outros (1986) utilizam um modelo autoregressivo para previsão individual de cargas ativas e reativas por barra e um método de substituição alternativa das variáveis de estado (tensões e injeções) para acoplar a previsão à estimação realizada através do filtro de Kalman estendido.

#### 7. COMPARAÇÃO ENTRE AS ABORDAGENS

A abordagem convencional apresenta, no que diz respeito à estimação, a vantagem de algoritmos robustos e eficientes computacionais, porém dificuldades na detecção e identificação de erros grosseiros e na configuração em sistemas com baixa redundância local. Do ponto de vista da previsão, se resume a métodos de previsão da carga ativa, o que não garante, por si só, uma previsão efetiva do estado de operação do sistema. Sua maior deficiência é não aproveitar as vantagens da vinculação entre os processos de estimação e previsão.

A abordagem alternativa I representa um passo à frente no sentido da unificação dos problemas de previsão e estimação. Tem como grande vantagem a simplicidade de sua formu-

lação em termos de um conjunto único de variáveis de estado e um modelo compacto da dinâmica do sistema. Um inconveniente desta formulação, como já citado, é a dificuldade de se incluir no estágio de modelagem características particulares da operação do SEE que podem ajudar bastante o desempenho dos métodos de estimação e, principalmente, previsão.

A abordagem alternativa II é uma tentativa de modelar com maior precisão a dinâmica lenta do SEE baseando-se nos elementos principais que influenciam a transição entre estados. Suas principais desvantagens são uma formulação mais complexa e, provavelmente, requisitos computacionais mais elevados. A questão dos requisitos computacionais deve ser analisada com cuidado, entretanto, pois boa parte dos cálculos nesta abordagem pode ser realizada "off-line".

#### 8. CONCLUSÕES

A grande contribuição obtida da instalação de centros modernos de supervisão e controle em tempo real de sistemas de energia elétrica reside na capacidade que esta nova tecnologia pode oferecer no aumento da confiabilidade do suprimento ao mesmo tempo em que propicia um retardo em novos investimentos por proporcionar uma operação do sistema elétrico mais próxima de seus limites.

Para atingir os objetivos referidos acima, os centros de supervisão e controle precisam dispor de modelos matemáticos capazes de, ao processarem informações obtidas em tempo real do sistema, produzir estimativas confiáveis do estado de operação atual e futuro do sistema. Esses modelos tomam a forma de algoritmos de estimação e previsão do estado.

Neste artigo foram discutidas algumas idéias básicas a respeito de como esses problemas devem ser tratados para um melhor resultado prático. Basicamente foram apresentadas uma visão convencional, no sentido de ser aquela há mais tempo posta em discussão e operação, em relação a abordagens mais recentes propostas por pesquisadores da área. O objetivo principal do artigo foi estabelecer as bases para uma discussão mais profunda do assunto.

#### 8. REFERÊNCIAS

- Abur, A., Keyhani, A. & Bakhtiari, H. (1987). "Autoregressive Filters for the Identification and Replacement of Bad Data in Power System State Estimation", Apresentado no 1987 IEEE PES Winter Meeting, paper no. 87WM014-4.
- Bezerra, U.H. & Falcão, D.M. (1985). "A Strategy for On-Line Forecasting of Nodal Active and Reactive Power Injections in Electric Power Systems", Proc. of 24th IEEE-CDC, Ft. Lauderdale: 824-829.
- Bezerra, U.H. & Falcão, D.M. (1986). "Previsão Multinodal da Demanda Ativa em Sistemas de Potência usando Técnicas de Box e Jenkins", Anais do 6º CBA, 799-804.
- Debs, A.S. & Larson, R.E. (1970). "A Dynamic Estimator for Tracking the State of a Power System", IEEE Trans. Power App. Sys.

- vol. PAS-89: 1670-1678.
- Debs, A.S., Larson, R.E. & Hajdu, L.P. (1972). "On Line Sequential State Estimation for Power Systems", Proc. of 24th PSCC.
- Dy Liacco, T.E. (1974). "Real-Time Computer Control of Power Systems", Proceedings of IEEE, vol. 62: 884-891.
- Dy Liacco, T.E. & Rosa, D.L. (1986). "Survey of Control Centers for Generation-Transmission Systems", Edição particular dos Autores.
- Do Coutto Filho, M.B., Leite da Silva, A.M. & Queiroz, J.F. (1982). "Aplicação do Filtro de Kalman na Estimção Dinâmica do Estado em Sistemas de Energia Elétrica". Anais do 4º CBA, Campinas-SP: 152-157.
- Do Coutto Filho, M.B. & Leite da Silva, A.M. (1984). "Estimção Dinâmica de Estado em Sistemas de Potência", Anais do 5º CBA, Campina Grande-PB: 195-200.
- El-Magd, A. & Sinha, N.K. (1981). "Two New Algorithms for On-Line Modelling and Forecasting of the Load Demand of a Multinode Power System", IEEE Trans. Power App. Sys. vol. PAS-100: 3246-3252.
- Falcão, D.M., Cooke, P.A. & Brameller, A. (1982). "Power System Tracking State Estimation and Bad Data Processing", IEEE Trans. Power App. Sys., vol. PAS-101: 325-333.
- Falcão, D.M. (1985). "An Efficient Power System Tracking State Estimator Using Linear Programming", Proc. IFAC-SPOEES, Rio de Janeiro: 65-70.
- Falcão, D.M. & Bezerra, U.H. (1986a). "Previsão a Curto-Prazo de Injeções de Potência Ativa e Reativa por Barra para Aplicação em Análise de Segurança", Anais do VIII SNPTEE, São Paulo-SP.
- Falcão, D.M. & Bezerra, U.H. (1986b). "Short-Term Forecasting of Nodal Active and Reactive Power Injections in Electric Power Systems", Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Power System Monitoring and Control, Durham-UK: 18-22.
- Falcão, D.M. & De Paula, A.A. (1987). "Detecção e Identificação de Erros Grosseiros e Erros na Configuração em Estimção de Estado usando Previsões e Medidas", Aceito para apresentação no IX SNPTEE, Belo Horizonte, MG.
- Galiana, F.D. (1975). "Short-Term Load Forecasting", Proc. Eng. Foundation Conference, Henniker: 17-22.
- Garcia, A., Monticelli, A. & Abreu, P.A. (1979). "Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing", IEEE Trans. Power App. Sys., vol. PAS-98: 1645-1652.
- Handschin, E., Schweppe, F.C., Kohlas, J. & Fitcher, A. (1975). "Bad Data Analysis for Power System State", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-94: 329-337.
- Kameiama, L., Ribeiro, S., Salim, C.S., Almeida, P.A.L. (1984). "Funções do Centro Nacional de Supervisão e Coordenação para Programação e Supervisão da Operação", IV SILA CC, Rio de Janeiro, artigo no. 1-04.
- Leite da Silva, A.M., Do Coutto Filho, M.B. & Queiroz, J.F. (1983). "State Forecasting in Electric Power System", IEE Proceedings Part C, vol. 130: 237-244.
- Leite da Silva, A.M., Do Coutto Filho, M.B. & Diogo de Siqueira, M.D. (1985). "Hierarchical Dynamic State Estimation in Electric Power Systems", Proc. IFAC-SPOEES, Rio de Janeiro: 71-77.
- Leite da Silva, A.M., Do Coutto Filho, M.B. & Cantera, J.M.C. (1987). "An Efficient Dynamic State Estimation Algorithm Including Bad Data Processing", Apresentado no 1987 IEEE PES Summer Meeting, paper no. 87 WM065-6.
- Mahalanabis, A.K., Biswas, K.K. & Singh, G. (1978). "An Algorithm for Decoupled Dynamic State Estimation of Power Systems". IEEE PES Summer Meeting, paper no. A78573-8.
- Massiello, R.D. & Schweppe, F.C. (1971). "A Tracking Static State Estimator", IEEE Trans. Power App. Sys., vol. PAS-90: 1025-1033.
- Monticelli, A. & Garcia, A. (1983). "Reliable Bad Data Processing for Real-Time State Estimation", IEEE Trans. Power App. Sys., vol. PAS-102: 1126-1139.
- Nishiya, K., Hasegawa, J. & Koike, T. (1982). "Dynamic State Estimation Including Anomaly Detection and Identification for Power Systems", IEE Proceedings-Part C, vol. 129: 192-198.
- Sakr, M.M.F., Bahgat, A. & El-Shafei, A.R. (1986). "Improvement of the Dynamic Estimator Performance Based on Measurement Prediction and Tracking Techniques", Proc. 2nd IEE Conf. Power System Monitoring and Control, Durham-UK: 130-134.
- Ribbens-Pavella, M., Van Cutsem, T. & Rousseaux, P. (1985). "On-Line Stability and Dynamic Security Assessment of Electric Power Systems", Proc. IFAC-SPOEES, Rio de Janeiro: 23-33.
- Rousseaux, P., Van Cutsem, T., Mallieu, D. & Ribbens-Pavella, M. (1986). "Dynamic State Prediction and Hierarchical Filtering for Power System Estimation", Proc. 4th IFAC Sym. Large Scale Systems, Zurich.
- Mallieu, D., Van Cutsem, T., Rousseaux, P. & Ribbens-Pavella, M. (1986). "Dynamic Multi-level Filtering for Real-Time Estimation of Electric Power Systems", Control Theory and Advanced Technology (C-TAT).