

SEL – 5717 Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

Prof. João Bosco A. London Junior
Departamento de Engenharia Elétrica - EESC - USP
E-mails: jbali@sc.usp.br

Aula 1

Visão Geral da Disciplina

**SEL – 5717 Estimação de Estado em
Sistemas Elétricos de Potência**

Aula 1 - Estrutura

✓ Introdução à Operação em Tempo Real de SEP

- Evolução na Operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)
- Estados de operação; Transições de estados de operação; Determinação do Estado operativo corrente do SEP

✓ Estimação de Estado em SEP

- Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

Introdução à Operação em Tempo Real de SEP

1. Evoluções na Operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

■ Em meados da década de 1960

Necessidade de um controle central para todo o sistema sob jurisdição de uma dada empresa



• Sistemas de controle e telecomando

- Controle Automático de geração
- Controle Supervisório

1. Evoluções na Operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

■ Controle Automático de geração

- Inicialmente: Destinado a controlar a geração das principais usinas do sistema de modo a manter a frequência constante e igual a seu valor nominal
(Desenvolvido significativamente na década de 1950)
- Aumento das interligações dos sistemas
 - ✓ Controlar o fluxo de potência nas linhas de interligações
 - ✓ Despacho econômico - otimizar o custo de geração (alocação ótima da geração entre as unidades geradoras disponíveis)

1. Evoluções na Operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

■ Controle Supervisório (Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA)

- Tradicionalmente este controle incorpora funções como o controle remoto de abertura e fechamento de disjuntores e de dispositivos para regulação de tensão (taps de trafo, capacitores, etc.)
- Evolui de uma atuação no nível regional/distrital para abranger todo o sistema
 - Informações lógicas e analógicas sobre o estado atual do sistema, obtidas por meio de estações remotas, são transferidas ao centro de controle onde são processadas por computador e apresentadas ao operador

1. Evoluções na Operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

■ Final da década de 1960

- Mudanças significativas na filosofia da Operação de SEP – “Black-outs” ocorridos na costa leste americana mostraram a relevância de questões relacionadas à segurança da operação dos SEP

Aumento da dificuldade para a operação dos SEP (cada vez mais interligados)

Desenvolvimentos tecnológicos em computação e telecomunicação

Monitoração e análise de segurança



Controle de segurança – Operação em tempo real

1. Evoluções na Operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

- Controle de Segurança – Operação em Tempo Real
 - Extensão do sistema SCADA
 - Objetivo é manter o sistema operando sem sobrecarga de equipamento e atendendo a todos os consumidores, em qualquer condição de operação

1. Evoluções na Operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

- Funções de um Centro de Controle
 - Controle de Geração
 - Controle Supervisório
 - Operação em Tempo Real

1. Evoluções na Operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

- Funções de um Centro de Controle
 - Controle de Geração
 - Controle Supervisório
 - Operação em Tempo Real

1. Evoluções na Operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

- Operação em Tempo Real SEP
 - Objetivo é manter o SEP operando sem sobrecarga de equipamento e atendendo a todos os consumidores, em qualquer condição de operação
 - Determinar o Estado operativo corrente do SEP

2. Estados de operação

2. Estados de operação

■ Conjuntos de restrições

- Restrições de Carga ($g(x) = 0$)
- Restrições de Operação ($h(x) \leq 0$)
- Restrições de segurança ($s(x) \leq 0$)

➤ g , h e s são funções vetoriais das variáveis de estado x

■ Estado Norma - Seguro ($g(x) = 0$; $h(x) \leq 0$; $s(x) \leq 0$)

■ Estado Normal - Alerta ($g(x) = 0$; $h(x) \leq 0$; $s(x) \leq 0$)

■ Estado de Emergência ($g(x) = 0$; $h(x) \leq 0$)

■ Estado Restaurativo ($g(x) = 0$; $h(x) \leq 0$)

2. Estados de operação

■ Conjuntos de restrições

- Restrições de Carga ($g(x) = 0$)
- Restrições de Operação ($h(x) \leq 0$)
- Restrições de segurança ($s(x) \leq 0$)

➤ g , h e s são funções vetoriais das variáveis de estado x

■ Estado Norma - Seguro ($g(x) = 0$; $h(x) \leq 0$; $s(x) \leq 0$)

■ Estado Normal - Alerta ($g(x) = 0$; $h(x) \leq 0$; $s(x) \leq 0$)

■ Estado de Emergência ($g(x) = 0$; ~~$h(x) \leq 0$~~)

■ Estado Restaurativo ($g(x) = 0$; $h(x) \leq 0$)

2. Estados de operação

■ Conjuntos de restrições

- Restrições de Carga ($g(x) = 0$)
- Restrições de Operação ($h(x) \leq 0$)
- Restrições de segurança ($s(x) \leq 0$)

➤ g , h e s são funções vetoriais das variáveis de estado x

■ Estado Norma - Seguro ($g(x) = 0$; $h(x) \leq 0$; $s(x) \leq 0$)

■ Estado Normal - Alerta ($g(x) = 0$; $h(x) \leq 0$; $s(x) \leq 0$)

■ Estado de Emergência ($g(x) = 0$; ~~$h(x) \leq 0$~~)

■ Estado Restaurativo (~~$g(x) = 0$~~ ; $h(x) \leq 0$)

2. Estados de operação

■ Conjuntos de restrições

- Restrições de Carga ($g(x) = 0$)
- Restrições de Operação ($h(x) \leq 0$)
- Restrições de segurança ($s(x) \leq 0$)
- g, h e s são funções vetoriais das variáveis de estado x

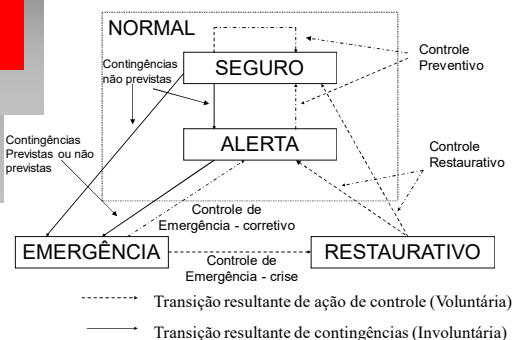
■ Estado Norma - Seguro ($g(x) = 0; h(x) \leq 0; s(x) \leq 0$)

■ Estado Normal - Alerta ($g(x) = 0; h(x) \leq 0; s(x) < 0$)

■ Estado de Emergência ($g(x) = 0; h(x) < 0$)

■ Estado Restaurativo ($g(x) < 0; h(x) \leq 0$)

3. Transições de estados de operação



4. Determinação do Estado operativo corrente do SEP

■ Os Estados de Operação são definidos pelas seguintes restrições

- Restrições de Carga ($g(x) = 0$)
- Restrições de Operação ($h(x) \leq 0$)
- Restrições de segurança ($s(x) \leq 0$)

■ $x \rightarrow$ As magnitudes e os ângulos de fase das tensões nodais

➢ Variáveis de estado do sistema (estado do sistema)

■ Determinar x para todo o sistema (todas as barras do sistema)

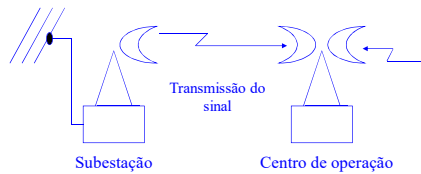
4. Determinação do Estado operativo corrente do SEP

■ Medidas no SEP

- Fluxo de potência ativa e reativa nas linhas
- Injeção de potência ativa e reativa em barramentos
- Magnitude de tensão em barramentos
- Magnitude de corrente
- Medidas Fasoriais Sincronizadas (Unidade de Medição Fasorial)
- Medidores Inteligentes

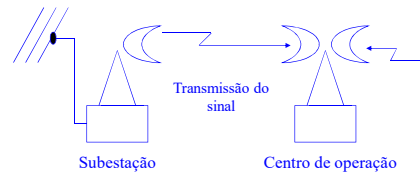
4. Determinação do Estado operativo corrente do SEP

■ Sistemas de Telemedicação



4. Determinação do Estado operativo corrente do SEP

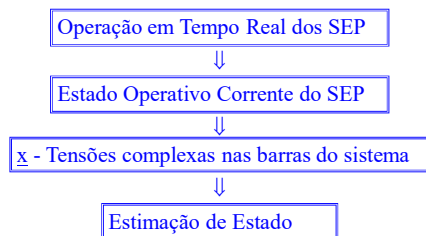
■ Sistemas de Telemedicação



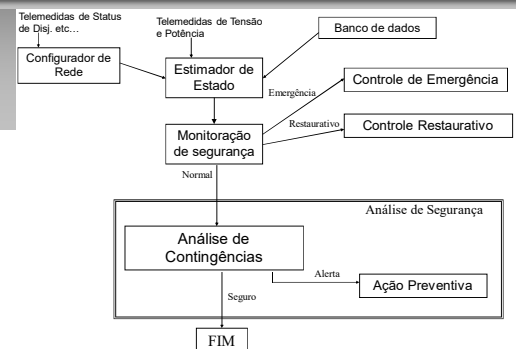
■ Estimador de Estado

5. Estimação de Estado em SEP

→ Consiste na obtenção, em tempo real, das variáveis de estado de um SEP (tensões complexas nodais), através do processamento de um conjunto redundante de medidas com ruído



6. Principais aplicativos da Operação em Tempo Real



6. Principais aplicativos da Operação em Tempo Real

➤ Submódulo 18 – Procedimentos de Rede - ONS

4.6.1.1 As atividades relacionadas à tomada de decisões em tempo real se apoiam em Sistemas de Supervisão e Controle – SSC, compostos por aplicativos com as seguintes finalidades:

- (a) configuração topológica do modelo barra-circuito da rede elétrica baseada nas telessinalizações recebidas em tempo real, com a utilização dos programas configuradores dos SSC;
- (b) estimação de estado a partir das telemédidas recebidas em tempo real e consequente geração de modelo da rede elétrica para o instante corrente, para uso em análises de regime permanente, com a utilização dos programas de estimação de estados dos SSC;
- (c) análise de contingências para regime permanente por meio de simulações de perda de equipamentos no modelo corrente da rede elétrica, obtido do Estimador de estados para um dado conjunto de telessinalizações e telemédidas. Para essa análise, utilizam-se os programas de análise de contingências dos SSC;
- (d) redespacho dos recursos de potência ativa/reactiva, por meio de simulações, visando a indicar todos os controles ótimos a serem implementados para a eliminação de violações detectadas. Essas simulações são realizadas com o uso de programas de fluxo de potência ótimo dos SSC; e
- (e) análise da segurança dinâmica em tempo real por meio de estudos de estabilidade eletromecânica com simulação de variação de intercâmbios e simulação de perda de equipamentos.

6. Principais aplicativos da Operação em Tempo Real

➤ Submódulo 18 – Procedimentos de Rede - ONS

4.6.1.1 As atividades relacionadas à tomada de decisões em tempo real se apoiam em Sistemas de Supervisão e Controle – SSC, compostos por aplicativos com as seguintes finalidades:

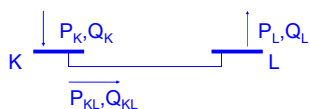
- (a) configuração topológica do modelo barra-circuito da rede elétrica baseada nas telessinalizações recebidas em tempo real, com a utilização dos programas configuradores dos SSC;
- (b) estimação de estado a partir das telemédidas recebidas em tempo real e consequente geração de modelo da rede elétrica para o instante corrente, para uso em análises de regime permanente, com a utilização dos programas de estimação de estados dos SSC;
- (c) análise de contingências para regime permanente por meio de simulações de perda de equipamentos no modelo corrente da rede elétrica, obtido do Estimador de estados para um dado conjunto de telessinalizações e telemédidas. Para essa análise, utilizam-se os programas de análise de contingências dos SSC;
- (d) redespacho dos recursos de potência ativa/reactiva, por meio de simulações, visando a indicar todos os controles ótimos a serem implementados para a eliminação de violações detectadas. Essas simulações são realizadas com o uso de programas de fluxo de potência ótimo dos SSC; e
- (e) análise da segurança dinâmica em tempo real por meio de estudos de estabilidade eletromecânica com simulação de variação de intercâmbios e simulação de perda de equipamentos.

Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado Convencional

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

1º Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha (isto é, o diagrama unifilar do SEP), com a correspondente configuração de medidores

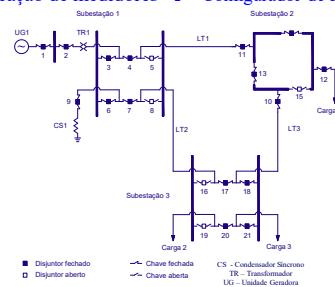
Modelo Barra-Linha



- Barra – Usinas e subestações (barras fictícias)
- Linha (ou ramo) – linhas de transmissão e transformadores
- Geradores e cargas são considerados parte externa da rede elétrica e são modelados através de injeções de potência nas barras do sistema

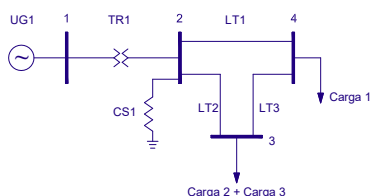
7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

1º Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha (isto é, o diagrama unifilar do SEP), com a correspondente configuração de medidores → Configurador de Rede



7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

1º Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha (isto é, o diagrama unifilar do SEP), com a correspondente configuração de medidores → Configurador de Rede



7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

1º Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha (isto é, o diagrama unifilar do SEP), com a correspondente configuração de medidores
2º Análise e restauração da observabilidade

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

- 1° Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha (isto é, o diagrama unifilar do SEP), com a correspondente configuração de medidores
- 2° Análise e restauração da observabilidade
- 3° Estimação de estado

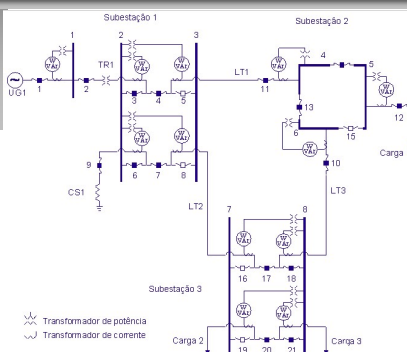
7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

- 1° Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha (isto é, o diagrama unifilar do SEP), com a correspondente configuração de medidores
- 2° Análise e restauração da observabilidade
- 3° Estimação de estado
- 4° Processamento de erros grosseiros em medidas analógicas

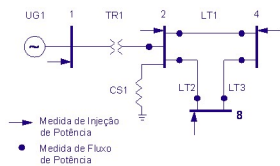
7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

- 1° Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha, com a correspondente configuração de medidores
(Configurador de rede)
 - Medidas lógicas , topologia, informações quanto ao tipo e localização dos medidores instalados no sistema (seção de barra)

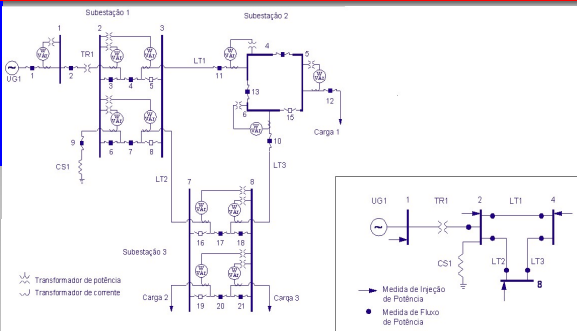
7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado



7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado



7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado



7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

1° Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha, com a correspondente configuração de medidores

(Configurador de rede)

- Medidas lógicas, topologia, informações quanto ao tipo e localização dos medidores instalados no sistema (seção de barra)

2° Análise e restauração da observabilidade

- Medidas analógicas → todas as variáveis de estado do sistema
 - Sim - Observável
 - Não Observável
- Restauração da observabilidade (pseudo-medidas)

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

2° Análise e restauração da observabilidade

➤ Estimador de Estado

➤ Mínimos Quadrados Ponderados

$$Ax = b$$

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

2ª Análise e restauração da observabilidade

➤ Estimador de Estado

➤ Mínimos Quadrados Ponderados

$$\underline{A}\underline{x} = \underline{b}$$

↓
Vetor de medidas

↑
Vetor de variáveis de estado
(tensões complexas)

↑
Matriz Jacobiana (relaciona as medidas com as variáveis de estado)

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

2ª Análise e restauração da observabilidade

➤ Estimador de Estado

➤ Mínimos Quadrados Ponderados

$$\underline{A}\underline{x} = \underline{b}$$

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

2ª Análise e restauração da observabilidade

➤ Estimador de Estado

➤ Mínimos Quadrados Ponderados

$$\begin{aligned}\underline{A}\underline{x} &= \underline{b} \\ \underline{A}^{-1}\underline{A}\underline{x} &= \underline{A}^{-1}\underline{b} \\ \underline{x} &= \underline{A}^{-1}\underline{b}\end{aligned}$$

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

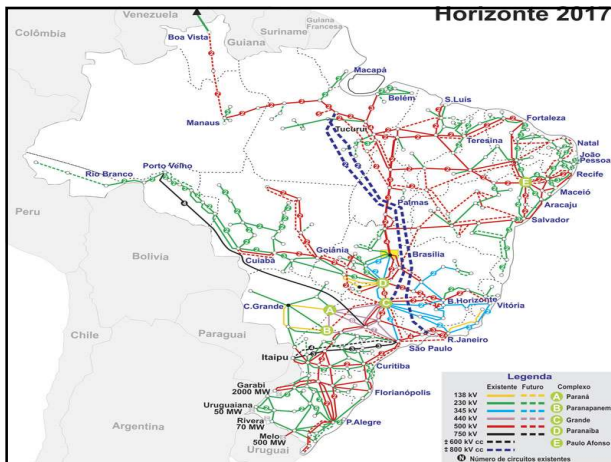
2ª Análise e restauração da observabilidade

➤ Estimador de Estado

➤ Mínimos Quadrados Ponderados

$$\underline{x} = \underline{A}^{-1}\underline{b}$$

$$\underline{A}_{(m \times N)} \begin{cases} m - \text{número de medidas disponíveis} \\ N - \text{número de variáveis de estado} \end{cases}$$



7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

2ª Análise e restauração da observabilidade

Estimador de Estado

Mínimos Quadrados Ponderados

$$\underline{x} = A^{-1} \underline{b}$$

$$A_{(10.000 \times 3.000)}$$

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

2ª Análise e restauração da observabilidade

Estimador de Estado

Mínimos Quadrados Ponderados

$$\underline{x} = A^{-1} \underline{b}$$

- Técnicas de Esparsidade
- Estrutura de dados eficientes para representar computacionalmente os SEP

Análise de Observabilidade

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

2ª Análise e restauração da observabilidade

- Medidas analógicas ➔ todas as variáveis de estado do sistema
 - Sim - Observável
 - Não Observável
 - Restauração da observabilidade (pseudo-medidas)

- Modelo barra linha obtido na etapa anterior

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

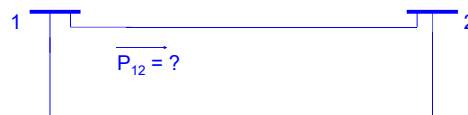
3º Estimação de estado

- Topologia (Etapa 1)
 - Parâmetros do sistema (banco de dados)
 - Medidas analógicas e pseudo-medidas
- ⇒ As variáveis de estado do sistema (\hat{X})

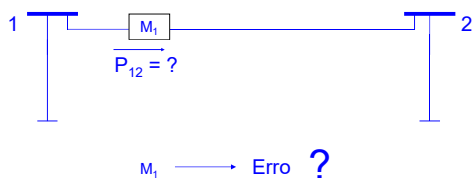
4º Processamento de Erro Grosseiro em medidas analógicas

- Detectar e identificar EG
- As medidas com EGs são eliminadas ou recuperadas
- Redundância das medidas

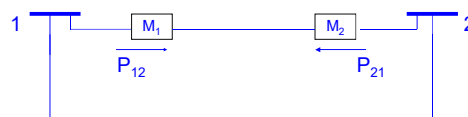
7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado



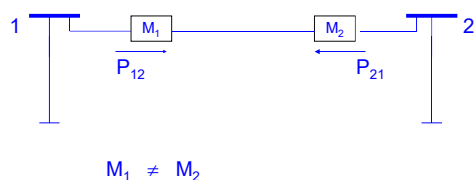
7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado



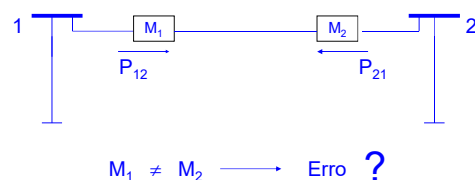
7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado



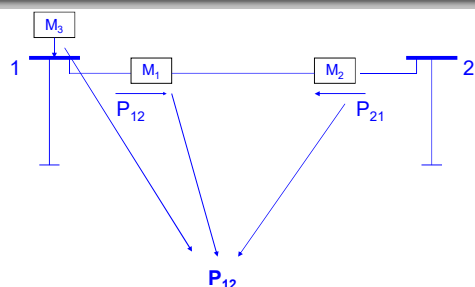
7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado



7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado



7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado



7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

- Etapas envolvidas no processo de estimação de estado:
- 1º Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha, com a correspondente configuração de medidores
- 2º Análise e restauração da observabilidade
- 3º Estimação de estado
- 4º Processamento de erros grosseiros em medidas analógicas

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

- Etapas envolvidas no processo de estimação de estado:
 - 1º Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha, com a correspondente configuração de medidores
 - 2º Análise e restauração da observabilidade
 - 3º Estimação de estado
 - 4º Processamento de erros grosseiros em medidas analógicas

7. Etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado

- Etapas envolvidas no processo de estimação de estado:
 - 1º Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha, com a correspondente configuração de medidores
 - 2º Análise e restauração da observabilidade
 - 3º Estimação de estado
 - 4º Processamento de erros grosseiros em medidas analógicas
- Erros no processo de estimação de estado
 - Erros nas medidas analógicas (erros grosseiros - EGs)
 - Erros devido a informações erradas quanto aos estados de chaves e/ou disjuntores (erros topológicos)
 - Erros causados por informações erradas de algum parâmetro do sistema (erros de parâmetros)

9. Estimação de Estado em SEP (perspectivas futuras)

- O processo de Estimação de Estado em SEP vem sendo foco de inúmeras pesquisas desde o final da década de 1960 e já se consolidou como uma ferramenta fundamental para modelagem em tempo real de redes elétricas
- Entretanto
Desenvolvimentos recentes na área (como, por exemplo, medidores inteligentes, medidas fasoriais sincronizadas, novas arquiteturas de redes elétricas com capacidade de operar autonomamente, penetração de novas fontes de energia renováveis, etc.) exigem que o processo de evolua para se manter em sintonia com as novas tendências

9. Estimação de Estado em SEP (perspectivas futuras)

- Utilização de medidas fasoriais sincronizadas
- Estimação para sistemas de distribuição de energia elétrica (*Smart Grids*)
- Estimadores Hierárquicos
- Estimadores Dinâmicos
- Erros Grosseiros: visão geométrica, matriz de ponderação não diagonal, etc.
- Estimadores resilientes à presença de erros grosseiros
- Erros Topológicos
- Erros de Parâmetros
- Ataques cibernéticos (processamento de erros)

10. Avaliação

- Duas Provas (últimos dois dias de aula)
 - Teórica – **03 / 07 / 2019**
 - Simulações computacionais – **07 / 08 / 2019**
- Trabalhos Computacionais
- Listas de exercícios

Bibliografia

- Livros:
 - MONTICELLI, A. (1999). "State estimation in electric power systems". Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, USA
 - ABUR, A. & EXPÓSITO, A.G. (2004). "Power system state estimation: theory and implementation". Marcel & Dekker Publishers, Nova York, EUA
- Apostila "Estimação de Estado" (Bretas, N. G.; London Jr., J. B. A.; Carvalho, B. E. B.)
- Artigos publicados em congressos e revistas

SEL – 5717 Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

Prof. João Bosco A. London Junior
Departamento de Engenharia Elétrica - EESC - USP
E-mails: jbaj@sc.usp.br