
Sumário

1	Introdução	5
1.1	Apresentação	5
1.2	Organização do Livro	10
2	Operação em Tempo Real de Sistemas Elétricos de Potência	13
2.1	Estados Operativos	13
2.2	Sistema de Análise de Redes	17
2.3	Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência	20
2.4	Estimação de Estado Generalizada	34
3	Fluxo de Potência em Sistemas Elétricos	37
3.1	Introdução	37
3.2	Formulação Básica do Problema	38
3.3	Modelagem e Equações para Cálculo de Fluxo de Potência	40
3.4	Fluxo de Potência Não-Linear	49
3.5	Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição	56
3.6	Exercícios	60
4	Estimação de Estado Estática em Sistemas Elétricos de Potência	63
4.1	Introdução	63
4.2	O Modelo de Medição	64
4.3	Estimador de Estado WLS	65
4.4	Formulações Alternativas do Estimador WLS	79
4.5	Estimador WLS considerando Medidas SCADA e MFSs	85
4.6	Estimadores de Estado Estatisticamente Robustos	87
4.7	Estimadores de Estado para Sistemas de Distribuição	89
4.8	Exercícios	94
5	Características Qualitativas de Conjuntos de Medidas	97
5.1	Análise de Observabilidade	98

5.2	Redundância de Medidas Analógicas	122
5.3	Características qualitativas para sistemas de medição contendo medidas SCADA e MFSs	140
5.4	Projeto e Fortalecimento de Sistemas de Medição	142
5.5	Atualização das Características Qualitativas de Conjuntos de Medidas	143
5.6	Características qualitativas considerando a modelagem trifásica da rede elétrica	145
5.7	Exercícios	146
6	Processamento de Erros Grosseiros em Medidas	147
6.1	Introdução	147
6.2	Classificação de Erros Grosseiros	149
6.3	Redundância x Processamento de EGs	150
6.4	Propriedades dos Resíduos das Medidas	152
6.5	Detecção e Identificação de Medidas Portadoras de Erros Grosseiros	154
6.6	Exercícios	162
7	Metodologia Geométrica para Processamento de Erros	167
7.1	Introdução	167
7.2	Interpretação Geométrica dos Erros das Medidas	167
7.3	Conceito de Inovação e Índice de Inovação (<i>II</i>)	172
7.4	A Metodologia Geométrica Aplicada ao Processamento de Erros Grosseiros	174
7.5	A Metodologia Geométrica Aplicada ao Processamento de Erros de Parâmetros e Topológicos	177
Referências		181
A	Ponto de Alavancamento em EESEP	199
B	Robustez Estatística e Ponto de Quebra	201
C	Respostas para os Exercícios Propostos	203
C.1	Capítulo 2	203
C.2	Capítulo 3	204
C.3	Capítulo 4	204
C.4	Capítulo 6	206

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem por objetivo fornecer uma visão panorâmica deste livro, destacando-lhe a estrutura e a motivação que levou os autores a realizá-lo, para tanto organizando as seguintes seções:

- **Seção 1.1 Apresentação:** descreve, de forma sucinta, a importância do processo de estimação de estado para operação em tempo real de sistemas elétricos de potência, apresentando conceitos e a natureza geral desse processo, contextualizando o seu desenvolvimento e a necessidade de evolução para se manter em sintonia com as novas tendências e tecnologias atuais;
- **Seção 1.2 Organização do Livro:** descreve a sua estrutura.

1.1 Apresentação

1.1.1 Contexto Histórico

No final da década de 1960, realizaram-se mudanças significativas na filosofia da operação de Sistemas Elétricos de Potência (SEPs). Isto em função dos *black-outs* ocorridos na costa leste dos Estados Unidos, que mostraram a relevância de questões relacionadas à segurança da operação de SEPs. Nessa mesma época, a junção de dois fatores, o aumento da dificuldade para operação de SEPs (cada vez mais interligados) e os avanços tecnológicos em computação e telecomunicação, propiciaram o desenvolvimento de funções relacionadas com a monitoração e análise de segurança, dando origem ao chamado Controle de Segurança ou, simplesmente, Operação em Tempo Real (WU; MOSLEHI; BOSE, 2005).

O passo inicial para operação em tempo real de um SEP é a determinação do seu estado operativo corrente, para, em seguida, determinar as ações de controle cabíveis. Conhecida a topologia e os parâmetros da rede elétrica, o estado operativo de um SEP, operando em regime permanente senoidal, torna-se função das tensões complexas nas suas

barras, pois, através das mesmas, torna-se possível determinar todas as demais grandezas elétricas de interesse (correntes e fluxos de potência). Dessa forma, neste contexto, as tensões complexas nas barras de um SEP são chamadas simplesmente de variáveis de estado.

Devido às grandes dimensões dos SEPs, as suas variáveis de estado são determinadas através dos sistemas de telemedição, isto é, medições feitas à distância, que estão sujeitas a uma série de ruídos decorrentes, por exemplo: das diferentes exatidões dos transformadores dos instrumentos de medição, do circuito secundário destes transformadores (fiação e carregamento) e dos diversos dispositivos de medição (transdutores, conversores, etc.) (MORAES, 2009). Dessa forma, para a obtenção de valores mais confiáveis para as variáveis de estado, necessários à realização da operação em tempo real, as medidas devem ser filtradas. Para execução dessa tarefa, os centros de controle dispõem de um conjunto de programas desenvolvidos em computador responsáveis pela execução do chamado processo de Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência (EESEP).

A partir dos trabalhos publicados por Scheppe e colaboradores, no final da década de 1960 e início de 1970 (SCHWEPPE; WILDES, 1970; SCHWEPPE; ROM, 1970; SCHWEPPE, 1970; SCHWEPPE; HANDSCHIN, 1974), que delinearam vários conceitos e a natureza geral do problema, a EESEP tornou-se alvo de inúmeras pesquisas. Em trabalhos como os publicados em (COUTTO FILHO; SILVA; FALCAO, 1990; MONTICELLI, 1999; ABUR; EXPOSITO, 2004), nos é apresentada uma vasta revisão bibliográfica a partir de 1968.

Atualmente, o processo de EESEP já se consolidou como um procedimento básico necessário para operação em tempo real dos SEPs. Entretanto, em função do desenvolvimento de novos equipamentos e dispositivos elétricos associados às chamadas *Smart Grids* (avançadas estruturas de medição, medidores inteligentes, medidas fasoriais sincronizadas, recursos energéticos distribuídos, etc.), os paradigmas da operação dos SEP se expandem e exigem que o processo de EESEP evolua para se manter em sintonia com as novas tendências.

Face ao exposto, para trabalhar com a operação de SEPs, compreendendo os problemas e sugerindo soluções, os profissionais da área devem possuir o embasamento teórico necessário para entender o funcionamento de todo o processo de EESEP. Nesse sentido importa destacar que, embora diversos artigos científicos já tenham tratado de forma específica de diversos problemas relacionados ao processo de EESEP, são relativamente poucos os livros publicados tratando de todas as etapas envolvidas nesse processo.

Foi essa a motivação principal para escrita deste livro, cujo objetivo é apresentar, de forma didática e com a profundidade necessária para formação e especialização de engenheiros eletricistas, todas as etapas do processo de EESEP, utilizando como base diversos artigos científicos publicados ao longo das últimas décadas tratando de pontos específicos desse processo.

1.1.2 O Processo de EESEP

A 1^a Etapa do processo de EESEP consiste na obtenção da topologia do sistema com a devida localização dos medidores disponíveis no chamado modelo barra-ramo (que corresponde ao diagrama unifilar do sistema), que se realiza a partir de medidas lógicas, obtidas de forma contínua consistindo em status de chaves e disjuntores, bem como de informações quanto ao tipo e à localização dos medidores instalados no sistema (informações modeladas em nível de seção de barra, ou seja, na representação física dos elementos do sistema).

Uma vez obtida a topologia do sistema no modelo barra-ramo, a 2^a Etapa do processo é verificar se é possível, através do conjunto de medidas analógicas¹ disponível, determinar todas as variáveis de estado do sistema. Em caso afirmativo, o sistema dir-se-á observável. Caso contrário, a falta de medidas pode ser suprida por pseudo-medidas², através das quais o sistema se tornará observável como um todo.

Sendo o sistema observável, a partir da topologia do sistema e dos seus parâmetros³, armazenados no banco de dados dos centros de operação, bem como do conjunto de medidas analógicas disponível, realizar-se-á a estimativa de estado propriamente dita, que se trata da 3^a Etapa do processo.

Vale ressaltar que o estimador de estado empregado na 3^a Etapa pode ser dinâmico ou estático. No caso do estimador dinâmico⁴, as variações das grandezas de interesse, em relação à variável "tempo", são consideradas na modelagem da rede. Por outro lado, no estimador estático, o modelo de rede utilizado é estático, traduzindo-se numa "fotografia" do sistema num instante de tempo fixo. Dessa forma, o comportamento matemático do sistema elétrico é traduzido utilizando-se apenas equações algébricas não-lineares, sem o emprego de equações diferenciais. Este livro vai focar apenas no estimador de estado estático, tendo em vista ser o mais utilizado na prática.

Em razão das medidas analógicas, utilizadas no processo de EESEP, não serem exatas, a estimativa obtida, para as variáveis de estado desconhecidas, também não será exata. Pode-se dizer então que o processo de EESEP consiste em encontrar uma forma de atingir-se a melhor estimativa das variáveis de estado desconhecidas. Para isto, dos muitos critérios estatísticos existentes, o que vem sendo mais utilizado, no processo de EESEP, é o dos mínimos quadrados ponderados (WLS do inglês, *Weighted Least Squares*), que foi formulado originalmente em (SCHWEPPPE; WILDES, 1970).

Quando os erros nas medições são Gaussianos, o Estimador WLS funciona muito

¹São aquelas realizadas continuamente e usualmente se constituem de fluxo de potência ativa e reativa nas linhas, injeção de potência ativa e reativa e magnitudes de tensão nas barras.

²Pseudo-medidas são dados de previsão de carga, previsão de geração, dados históricos, etc., que fazem parte do banco de dados dos centros de operação.

³Impedância de linhas de transmissão, posição de taps de transformadores, etc.

⁴Uma vasta revisão bibliográfica sobre estimadores dinâmicos pode ser encontrada em (SHIVAKUMAR; JAIN, 2008; COUTTO FILHO; SOUZA, 2009).

bem, falhando, entanto, na ocorrência de um ou mais Erros Grosseiros (EGs⁵). Dentre as causas de EGs, pode-se destacar: erros de conversão "análogo-digital" e erros nos canais de comunicação das telemedidas.

Na tentativa de superar tal limitação, métodos para detecção e identificação de EGs foram desenvolvidos, dentre os quais os mais utilizados são aqueles baseados na análise estatística dos resíduos das medidas, ou numa função dos mesmos (MONTICELLI, 1999; ABUR; EXPOSITO, 2004). Isto porque os resíduos fornecem informações úteis sobre eventuais violações das suposições feitas em relação ao modelo de medição.

Na ocorrência de EG simples, isto é, quando apenas uma medida possui EG, ou EGs múltiplos não interativos⁶, o estimador WLS clássico associado com técnicas para processamento de EGs a partir da análise dos resíduos das medidas apresenta um bom desempenho. Entretanto, aumenta a possibilidade de falhas nas seguintes situações (ABUR; EXPOSITO, 2004): EGs presentes em medidas com baixa redundância⁷; EGs múltiplos interativos; e EGs em medidas que possuam a característica de altamente influentes, ou seja, de atraírem a convergência do processo de estimação de estado, chamadas tradicionalmente medidas ponto de alavancamento (MONTICELLI, 2000).

Deve-se destacar que, devido aos problemas supracitados, estimadores de estado mais robustos estatisticamente foram aplicados em SEP, como, por exemplo, o baseado no método do Mínimo Valor Absoluto Ponderado (*Weighted Least Absolute Value*, WLAV) (IRVING; OWEN; STERLING, 1978; KOTIUGA; VIDYASAGAR, 1982). O estimador WLAV mostrou-se mais robusto que o WLS associado com técnicas de análise de resíduos na presença de EGs simples e múltiplos. Entretanto, o WLAV também falha na ocorrência de EG em uma ou mais medidas ponto de alavancamento (FALCAO; ASSIS, 1988). Para contornar os problemas causados pelas medidas classificadas como pontos de alavancamento com EGs, em (MILI; PHANIRAJ; ROUSSEEUW, 1991) foi proposto o Estimador baseado no método da Mínima Mediana do Resíduo Ponderado ao Quadrado (*Weighted Least Median of Squares*, WLMS) para SEP. Esse estimador foi a primeira proposta de estimador robusto estatisticamente que é capaz de identificar EGs em medidas classificadas como pontos de alavancamento. Entretanto, tal estimador requer uma busca combinatória, tornando-o inviável para aplicação, em tempo real, em SEP de grande porte (FALCAO; ARIAS, 1994; MONTICELLI, 2000).

Outras propostas fazendo uso de robustez estatística para tratamento de EGs foram também propostas na literatura, como, por exemplo, os estimadores apresentados em (MILI et al., 1996; PIRES; COSTA; MILI, 1999).

Importa destacar ainda o desenvolvimento de estimadores de estado baseados no Cri-

⁵Em geral dizemos que uma medida é portadora de EG, quando a mesma desvia do seu valor "verdadeiro" de, no mínimo, três vezes a sua variância (MILI; VAN CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA, 1984).

⁶Definições e conceitos pertinentes aos tipos de EGs em medidas, assim como, à análise de resíduos das medidas, serão detalhados no decorrer deste livro, mais precisamente no capítulo 6.

⁷Redundância, tema que será tratado em detalhes no decorrer deste livro, refere-se a um excedente de medidas em relação ao número de variáveis de estado a serem estimadas.

tério de Máxima Correntropia (CMC), conforme apresentado em (MIRANDA; SANTOS; PEREIRA, 2009; FREITAS; COSTA; MIRANDA, 2017).

A ideia que norteia a utilização do CMC é a obtenção de um processo de EESEP em que o tratamento de EGs não seja um procedimento pós-filtragem, ou seja, realizado sobre um resultado de estimação provisória que já está contaminado pelos ruídos e EGs. De acordo com (MIRANDA; SANTOS; PEREIRA, 2009; FREITAS; COSTA; MIRANDA, 2017), os estimadores baseados no CMC são capazes de rejeitar automaticamente EGs, possibilitando a obtenção de estimativas de boa qualidade mesmo na presença de medidas com EGs.

Entretanto, em função da simplicidade da sua formulação e da facilidade de implementação em computador, o estimador WLS, associado à análise dos resíduos das medidas, é o estimador mais utilizado na prática e estudado na academia.

Ante o exposto nos últimos parágrafos, na 4^a Etapa do processo de EESEP realiza-se então o processamento de EGs, isto é, o procedimento de detecção, identificação e eliminação de medidas portadoras de EGs (ou do efeito dessas medidas). Se for detectada alguma medida com EG, após o processamento da 4^a Etapa a 3^a Etapa é executada novamente para obtenção de variáveis de estado sem a influência das medidas errôneas. O processo de EESEP como um todo termina quando, após uma estimativa, não for detectada medida alguma com EG.

A formulação clássica do processo de EESEP baseia-se nas suposições de que a configuração da rede (obtida na 1^a Etapa) e os parâmetros usados nos modelos que representam os elementos da rede elétrica são corretos. Entretanto, essas suposições são frequentemente não verdadeiras. Dessa forma, além dos EGs, o processo de EESEP está sujeito ainda a outros dois tipos de erros. A saber: erro causado por informação errada de algum parâmetro da rede elétrica, conhecido como Erro de Parâmetro (EP), e erro devido a informação errada quanto ao status (aberto ou fechado) de chave e/ou disjuntor (erro na medida lógica processada na 1^a Etapa), conhecido como Erro Topológico (ET).

É drástico o efeito de ETs e de EPs para o processo de EESEP, normalmente intolerável, e diversas pesquisas foram e estão sendo desenvolvidas para tratamento desses erros.

Apesar de a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica ocorrerem usualmente através de sistemas trifásicos, na formulação clássica do processo de EESEP considera-se a hipótese de sistema equilibrado. Ou seja, considera-se que as cargas são balanceadas e as redes simétricas, onde as grandezas elétricas nas fases apresentam a mesma magnitude, porém com defasagem angular de 120°. Dessa forma, a maioria dos estudos desenvolvidos no contexto de EESEP fazem uso do modelo por-fase, ou monofásico (modelo de sequência positiva), adequado para maioria dos sistemas de transmissão, foco principal deste livro.

Destaca-se, ainda, que na formulação clássica do processo de EESEP considera-se a

existência apenas das medidas lógicas e analógicas não sincronizadas disponibilizadas pelo Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados, ou abreviadamente SCADA (proveniente do seu nome em inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*).

1.2 Organização do Livro

Com o intuito de facilitar o entendimento de todas as etapas do processo de EESEP, bem como de alguns problemas relativos a esse processo e das propostas de solução já apresentadas, este livro está dividido em 7 capítulos, onde a Introdução corresponde ao primeiro. Com o objetivo de tornar o texto mais claro, utilizar-se-ão, em todos os capítulos, notas explicativas de rodapés de páginas, definindo ou explicando o significado de terminologias comuns à área a que se referem.

Os capítulos foram elaborados seguindo uma sequência lógica. Entretanto, eles foram organizados para permitirem uma consulta de forma independente, de acordo com o interesse do leitor.

No segundo capítulo deste livro são apresentados conceitos, definições e os procedimentos de análise de redes envolvidos na operação em tempo real de SEPs. Todas as etapas do processo de EESEP são descritas detalhadamente, em especial a primeira etapa. Os efeitos de erros de parâmetros e de topologia, no processo de EESEP, são analisados nesse capítulo, destacando alguns métodos já desenvolvidos para tratamento desses erros. A possibilidade de inclusão de medidas fasoriais sincronizadas no processo de EESEP é analisada na penúltima seção desse capítulo. Na última seção encontra-se um exercício relacionado à primeira etapa do processo de EESEP.

O terceiro capítulo apresenta a formulação básica do problema de fluxo de potência em SEP, tanto para sistemas de transmissão quanto de distribuição de energia. Este capítulo exibe também a modelagem dos componentes elétricos da rede e as equações de fluxo de potência que são também utilizadas na formulação do processo de EESEP. Finalmente, alguns exercícios são propostos.

O quarto capítulo dedica-se a terceira etapa do processo tradicional de EESEP, ou seja, a estimação de estado estática propriamente dita considerando a modelagem monofásica. Definições básicas e formulações do estimador de estado WLS nas versões acoplada, desacoplada e linear são apresentadas. Bem como formulações alternativas do estimador WLS, mais robustas numericamente. Estimadores mais robustos estatisticamente que o estimador WLS são também discutidos nesse capítulo. É exposto, ainda, o Estimador WLS híbrido, que recebe essa denominação em função de ter sido proposto para possibilitar o processamento simultâneo de medidas SCADA e de medidas fasoriais sincronizadas obtidas através das PMUs. As particularidades do processo de estimação de estado em sistemas de distribuição são discutidas em uma seção desse capítulo, destacando alguns estimadores de estado que foram desenvolvidos especialmente para esses sistemas. Exercí-

cios para auxiliar no entendimento do funcionamento do estimador WLS são apresentados na última seção do capítulo.

As características qualitativas de conjuntos de medidas no contexto do processo de EESEP são tratadas no capítulo 5. Ou seja, esse capítulo aborda os problemas de análise de observabilidade e de redundância de medidas. Conceitos, definições e alguns dos métodos já desenvolvidos para tratamento desses problemas são apresentados de forma detalhada, considerando a modelagem monofásica da rede elétrica e, como variáveis de estado a serem estimadas, as tensões complexas nodais. Os problemas de projeto de sistemas de medição para estimação de estado, com restrições relacionadas à observabilidade e redundância de medidas, e de atualização das características qualitativas após a perda de medidas durante a operação de SEPs são também discutidos nesse capítulo. Características qualitativas para conjuntos de medidas contendo medidas SCADA e de PMUs, bem como considerando a modelagem trifásica da rede, são também desenvolvidos neste capítulo. Ao longo do capítulo são apresentados exercícios para auxiliar no aprendizado do conteúdo exposto.

O sexto capítulo discorre sobre a quarta etapa do processo tradicional de EESEP, ou seja, do processamento de EGs. Tendo em vista que no contexto de SEPs o estimador WLS é o estimador de estado mais utilizado na prática e mais estudado na academia, esse capítulo aborda o processamento de EGs através da análise dos resíduos do estimador WLS. Definições e conceitos pertinentes ao processamento de EGs via análise de resíduos são apresentados nesse capítulo, bem como exemplos para auxiliar no aprendizado dos métodos expostos.

Os fundamentos da metodologia geométrica desenvolvida recentemente para processamento de erros no processo de EESEP são apresentados no capítulo 7. Com base em uma análise geométrica do estimador de estado WLS, apresenta-se, nesse capítulo, uma nova perspectiva para entendimento do processamento de erros no processo de EESEP. Conceitos, métodos e algoritmos são então apresentados para processamento de EGs, ETs e EPs nessa nova perspectiva.

Finalmente, no último capítulo, isto é, no capítulo 8, encontram-se as referências bibliográficas que serviram de base para elaboração deste livro.

Este livro conta ainda com 3 apêndices, sendo: Apêndice A - com a definição formal de medidas ponto de alavancamento; Apêndice B - com conceitos importantes sobre robustez estatística necessários para compreensão de estimadores de estado robustos estatisticamente; e Apêndice C - com as respostas dos exercícios propostos ao longo do livro.

Capítulo 2

Operação em Tempo Real de Sistemas Elétricos de Potência

No Capítulo 1 foram introduzidas informações gerais para o entendimento do processo de EESEP e para destacar a sua importância para implantação de funções relacionadas à monitoração e análise de segurança de SEPs, ou seja, para realização da operação em tempo real de SEPs. Para possibilitar um melhor entendimento desse processo, neste capítulo serão apresentados, de forma mais detalhada, definições, conceitos e os procedimentos de análise de redes envolvidos na operação em tempo real de SEPs. O capítulo descreverá ainda todas as etapas do processo de EESEP, em especial a 1^a Etapa, pois as demais serão tratadas detalhadamente nos próximos capítulos deste livro. Informações relacionadas aos efeitos de erros de parâmetros e de topologia, no processo de EESEP, serão apresentadas, destacando algumas das metodologias desenvolvidas para tratamento desses erros. Inclusão de medidas fasoriais sincronizadas no processo de EESEP será tema da penúltima seção deste capítulo. Finalmente, na última seção, será apresentado um exercício tratando da primeira etapa do processo de EESEP.

2.1 Estados Operativos

Conforme exposto no Capítulo 1, o primeiro passo para realização da operação em tempo real de um SEP é a determinação do estado operativo corrente do sistema, isto é, determinar se o sistema está ou não operando adequadamente e, caso não esteja, deve indicar o que deve ser feito para corrigir essa operação inadequada, isto é, as ações de controle cabíveis.

A operação de um SEP obedece a certas condições que podem ser expressas sob a forma de três conjuntos de restrições que determinam os estados operativos do SEP (DY-LIACCO, 1974), (MONTICELLI, 1983):

- **Restrições de Carga** - Estas restrições representam o fato de que o sistema de

potência deve satisfazer à demanda de carga, ou seja, deve atender a todos os seus consumidores. Portanto, são restrições de igualdade expressas matematicamente como:

$$g(x) = 0, \quad (2.1)$$

onde x é o vetor de variáveis de estado e g é um vetor de funções não lineares. A Equação (2.1) corresponde, na verdade, à imposição da Primeira Lei de Kirchhoff.

- **Restrições de Operação** - As restrições de operação refletem a necessidade de que os limites operacionais dos equipamentos do sistema (linhas de transmissão, transformadores, geradores, etc.) devem ser respeitados como, por exemplo, a potência máxima que pode ser transmitida por uma determinada linha de transmissão. Dessa forma, são restrições de desigualdade representadas matematicamente por:

$$h(x) \leq 0, \quad (2.2)$$

onde h é um vetor de funções não lineares.

- **Restrições de Segurança** - Nos sistemas de potência, esta caracterização requer que seja inicialmente elaborada uma lista de contingências¹ possíveis (ou mais prováveis) na condição corrente de operação. Tendo em mãos esta lista de contingências em potencial, pode-se verificar se o sistema resiste ou não ao impacto de cada uma delas sem ingressar em um estado de operação inadequado, ou seja, desrespeitando restrições de carga e/ou operação. Se s é um vetor de funções que consiste de todas as restrições de operação e de carga para cada contingência da lista, é possível caracterizar matematicamente as restrições de segurança como

$$s(x) \leq 0. \quad (2.3)$$

É importante notar que essas restrições são funções vetoriais das variáveis de estado “x”, que são as tensões complexas nas barras do sistema. Baseando-se nessas restrições, quatro estados de operação podem ser definidos (MONTICELLI, 1983):

1. **Estado Normal Seguro** - É o estado de operação ideal, pois são obedecidos os três conjuntos de restrições: carga, operação e segurança. Isto significa que o sistema está em perfeitas condições de operação, com suprimento total da demanda de carga e nenhuma violação de limites de operação. Além disso, há a observância das restrições de segurança, isto é, nenhuma das contingências de segurança preestabelecidas, se de fato ocorrer, levará o sistema a uma situação de emergência. No entanto, a ocorrência de uma contingência não listada poderá provocar uma emergência.

¹Tais contingências podem incluir saídas de linhas, saídas de geradores, etc.

2. **Estado Normal Alerta** - Neste estado são obedecidas apenas as restrições de carga e operação, entretanto, nem todas as restrições de segurança são obedecidas. Da mesma forma que no estado seguro, o sistema opera intacto e com atendimento de todas as cargas e sem violação alguma dos limites operacionais. A não observância das restrições de segurança significa que a ocorrência de pelo menos uma das contingências listadas como possíveis poderá levar o sistema a uma situação de emergência (violação de restrições operacionais).
3. **Estado de Emergência** - O que caracteriza o estado de emergência é a violação das restrições de operação. A emergência pode ser provocada por uma contingência e consequente desligamento de um ou mais componentes do sistema (linhas, geradores, transformadores, etc.). Com exceção dos equipamentos que provocaram a emergência, o sistema está intacto. A eliminação da emergência pode ser feita com a passagem do sistema para o estado alerta, ou então, pelo desligamento de partes do sistema (cargas, por exemplo), o que leva o sistema para o próximo possível estado de operação, o restaurativo.
4. **Estado Restaurativo** - Este estado é atingido quando uma emergência é eliminada por desligamento manual ou automático de partes do sistema, efetuado pelo centro de controle ou por dispositivos locais. As restrições operacionais são obedecidas, mas o sistema não está intacto (violação de restrições de carga, ilhamentos², etc.). Na necessidade de se passar do estado de emergência para o restaurativo, sacrifica-se a integridade do sistema em benefício da observância das restrições de operação.

Pode-se concluir que o objetivo da operação em tempo real é manter o sistema operando no estado normal seguro de operação, visando minimizar transições desse estado para o estado de emergência ou restaurativo.

Considerando os estados operativos apresentados, as transições entre os mesmos podem ocorrer tanto em consequência de perturbações no sistema (ditas transições involuntárias) como devido a ações de controle (transições voluntárias) de responsabilidade dos centros de monitoração e controle. Como apresentado em (MONTICELLI, 1983), as possíveis transições de estado são:

- **Transição Seguro-Alerta** (Involuntária) - Esse tipo de transição pode ser ocasionada por alguma contingência não prevista, ou até mesmo pelo aumento normal de demanda da carga, que pode levar o sistema do estado seguro para o estado alerta, no qual uma ou mais restrições de segurança deixam de ser atendidas.
- **Transição Alerta-Seguro** (Voluntária) - Esta transição é realizada pelo centro de controle através da execução da função controle de segurança (modo corretivo),

²Um ilhamento pode ser sucintamente definido como a separação física de uma área do restante do sistema interligado.

que é responsável pela determinação de uma solução viável para as restrições de carga, operação e segurança a partir de uma situação na qual apenas as restrições de segurança são violadas. Para este fim, realizam-se análises no SEP através, por exemplo, de um programa de fluxo de potência ótimo com restrições de segurança, que permite a determinação de uma solução viável que torne mínimo o deslocamento do ponto de operação do sistema, a alteração nas variáveis de controle ou o custo operacional.

- **Transição Seguro-Seguro** (Voluntária) - Através de dados obtidos por um programa de previsão de carga de curto prazo (1 hora, por exemplo), altera-se o ponto de operação do sistema para este se adequar às condições futuras do SEP, mesmo estando ele no estado normal-seguro. Isto porque, tais condições futuras poderiam levá-lo ao estado alerta ou, até mesmo, em casos extremos, ao estado de emergência. Neste caso, pode ser acionada a função controle de segurança em modo preventivo, que tentará colocar o sistema no estado seguro também para as condições previstas.
- **Transição Alerta-Emergência** (Involuntária) - Se o sistema estiver no estado alerta e ocorrer uma das contingências previamente listadas responsáveis por esse estado (ou mesmo na ocorrência de uma contingência não prevista), então o sistema passará para o estado de emergência. O estado de emergência é atingido quando uma dessas contingências, de fato, ocorre antes de se adotarem medidas de controle para colocar o sistema no estado seguro (transição alerta-seguro). Estando o sistema no estado de emergência, dois tipos de controle de emergência podem atuar: o modo corretivo ou o de crise.
- **Transição Emergência-Alerta** (Voluntária) - Essa transição é realizada pelo controle de emergência no modo corretivo. Neste caso, uma violação de limite pode ser eliminada por ações de controle envolvendo remanejamento da geração, variação de tensões controladas ou de *taps* de transformadores, chaveamento de bancos de capacitores ou indutores, etc. Neste modo de atuação do controle de emergência, ao contrário do que ocorre no modo de crise, o atendimento da demanda ou a integridade do sistema não são sacrificados. As ações de controle de emergência em modo corretivo podem ser preestabelecidas, determinadas com a ajuda de programas computacionais durante a emergência ou confiadas ao operador, nos casos mais simples.
- **Transição Emergência-Restaurativo** (Voluntária) - Em algumas situações de emergência, dispositivos locais de controle e proteção atuam antes de qualquer medida do centro de controle, colocando o sistema no estado restaurativo pelo desligamento de cargas ou circuitos. Em outros casos, esses desligamentos são efetuados pelo próprio centro de controle por meio da função controle de emergência em modo

crise, sacrificando o atendimento de cargas. Tal atitude deve ser tomada quando não for possível obedecer os limites de operação por meios mais brandos como remanejamento da geração ou controle de tensão.

- **Transição Alerta-Alerta (Voluntária)** - Esta transição ocorre quando a previsão de carga, de um sistema em estado de alerta, acusa possível situação de emergência para um estado futuro. Em razão disto, o operador poderá utilizar a função de controle de emergência no modo preventivo, o qual é responsável pela mudança do ponto de operação do sistema de forma que, para o estado previsto, não se verifique mais a emergência detectada anteriormente.
- **Transição Restaurativo-Alerta (Voluntária)** - Essa transição é feita pela execução da função de controle restaurativo, cuja finalidade é religar as cargas e os circuitos do sistema, desligados durante a emergência, tentando colocar o sistema de volta ao estado alerta ou, se possível, no estado seguro.

A Figura 2.1 representa um diagrama de transições possíveis entre os diversos estados de operação de um SEP.

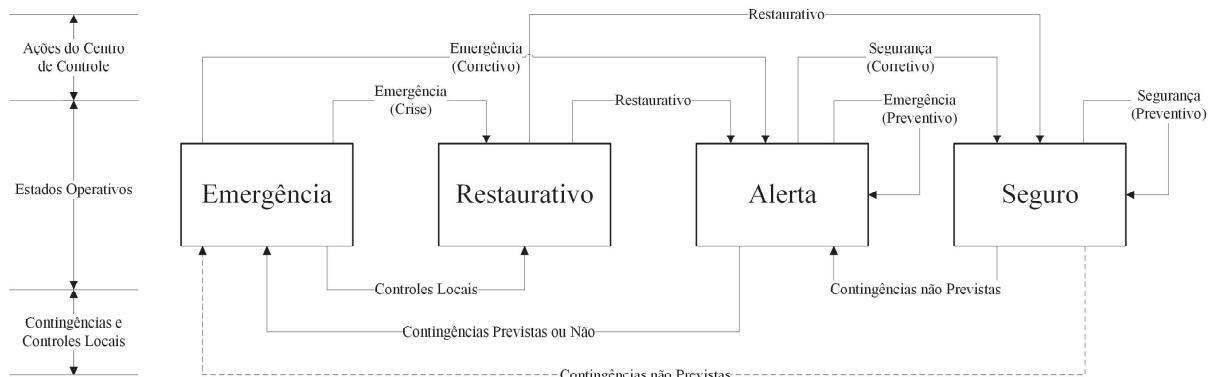


Figura 2.1: Diagrama de transições de estados de operação de um sistema de potência.

2.2 Sistema de Análise de Redes

A partir dos conceitos previamente apresentados, pode-se dizer que a segurança do sistema é a capacidade de um SEP, no estado normal, sofrer uma perturbação sem passar ao estado de emergência. Assim, a segurança de um SEP está relacionada diretamente com as estratégias adotadas pelos centros de controle, quando o SEP está no estado normal de operação. Em virtude disto, as estratégias de segurança são divididas em (DY-LIACCO, 1974):

- **Monitoração de Segurança:** Esta etapa consiste na identificação, em temporal, da topologia e das atuais condições de operação do sistema e de possíveis

violações das restrições de operação. Para isto, os dados obtidos em tempo-real são processados em intervalos curtos de tempo;

- **Análise de Segurança:** Caracteriza-se pela determinação da segurança do sistema frente a um conjunto de contingências previamente estabelecidas. Realiza-se através de programas de simulações estáticas e/ou dinâmicas, onde se verifica o novo estado operativo do sistema perante as várias contingências;
- **Controle Preventivo:** Caso a análise de segurança acuse que o sistema esteja no estado normal alerta, o próximo passo é determinar as ações que devem ser tomadas para levar o sistema ao estado seguro, se isto for possível. Assim, tem-se como objetivo encontrar a solução ótima que não viole os limites operativos, de carga e de segurança.

Para a execução em tempo-real das estratégias de segurança supracitadas, os centros de supervisão e controle são constituídos de vários sistemas parciais, entre os quais está o sistema de análise de redes, que é responsável pela execução de funções como o processo de EESEP, fluxo de potência, análise de segurança, análise de despacho corretivo, etc. Entretanto, devido às jurisdições das empresas e visando a redução das dimensões dos problemas de análise de redes, a rede elétrica é comumente dividida em *sistema interno* e *sistema externo*. O interno abrange todas as barras e circuitos pertencentes e supervisionados por uma dada empresa, e também de áreas fronteiriças supervisionadas. Já o externo, compreende todas as áreas não supervisionadas que são interligadas ao sistema interno. Nesta seção serão apresentadas as várias funções que compõem o sistema de análise de redes, com o objetivo de esclarecer seu papel na operação em tempo real, bem como suas interfaces.

1. **Programa de Pré-Filtragem:** executa testes de compatibilidade sobre as medidas analógicas, de modo a detectar e excluir erros óbvios, chamados muitas vezes de **Erros Grotescos**, a fim de diferenciá-los dos EGs, que não são óbvios e exigem um tratamento estatístico para serem detectados. Os Erros Grotescos podem ser detectados através de uma simples checagem de plausibilidade, mesmo antes do processo de EESEP. Alguns exemplos de erros como esses são magnitudes negativas de tensão, medidas com várias ordens de magnitude maiores ou menores que o valor esperado ou medidas com grandes diferenças entre correntes de entrada e saída em um nó de uma subestação.
2. **O processo de EESEP:** consiste em um conjunto de programas computacionais que possibilitam a determinação do estado operativo corrente do SEP. Para isso, os dados de entrada do processo de EESEP são: representação da rede elétrica em nível de seção de barra, ou seja, a representação da conexão física dos elementos do sistema (geradores, transformadores, linhas de transmissão, chaves, disjuntores,

etc.); medidas analógicas e lógicas pré-filtradas obtidas de forma contínua; e os parâmetros elétricos da rede. Tradicionalmente o processamento dessas informações realiza-se em quatro etapas distintas que são executadas de forma sequencial:

- *Etapa 1: Obtenção da topologia do sistema com a correspondente configuração de medidores no modelo barra-ramo;*
- *Etapa 2: Análise e Restauração da Observabilidade;*
- *Etapa 3: Estimação de Estado;*
- *Etapa 4: Processamento de EGs.*

Cada uma dessas etapas será apresentada detalhadamente na próxima seção. Destaca-se que se alguma medida for identificada como portadora de EG na Etapa 4, será necessária uma nova execução da Etapa 3. Essas duas etapas, terceira e quarta, serão executadas iterativamente até que EG algum seja detectado na Etapa 4, encerrando assim o processo de EESEP.

3. **Programa de Previsão de Carga:** baseia-se na previsão de demanda da rede supervisionada e da não supervisionada. Este programa é utilizado pelo controle automático de geração, que é responsável pelos intercâmbios de fluxo de potência e controle de frequência, para melhor balancear a potência gerada com a carga demandada e, consequentemente, evitar alterações bruscas na frequência do sistema interligado. O programa de previsão de carga possibilita, ainda, a previsão da demanda por barra do sistema interligado, através dos fatores de distribuição obtidos pelas análises das curvas de consumo (diário-semanais).
4. **Fluxo de Potência:** visa a determinação das tensões complexas (magnitudes e ângulos) de todas as barras da rede interna e externa do SEP. Para isto, o configurador de redes (programa responsável pela execução da Etapa 1 do processo de EESEP) deve conter, previamente, informações a respeito da topologia e da previsão de carga da rede externa. Neste programa, as tensões complexas são obtidas pela execução do algoritmo de fluxo de potência, considerando as barras da rede interna como barras θV (a partir dos resultados do processo de EESEP), e as da rede externa dos tipos PV ou PQ. Pode ser utilizado também para verificação dos efeitos de ações de controles preventivos ou corretivos, antes mesmo de os mesmos serem executados.
5. **Programa de Análise de Segurança:** é constituído por sub-programas responsáveis pela seleção e simulação das contingências mais plausíveis de ocorrer no SEP, em relação ao ponto de operação do sistema obtido através da estimação de estado e do fluxo de potência. Estas simulações podem ser estáticas ou dinâmicas. As simulações dinâmicas são ainda grandes desafios para os centros de controle, em virtude

do grande esforço computacional exigido e o tempo de processamento devido à sua complexidade. Já as simulações estáticas, apesar de fazerem várias aproximações na modelagem matemática do SEP, dão um bom indicativo do comportamento do sistema, e ademais, suas exigências computacionais viabilizam suas utilizações em tempo-real. A partir dos resultados dessas simulações obtém-se o estado operativo resultante de uma determinada contingência.

6. **Fluxo de Potência Ótimo:** é comumente utilizado para se determinar quais as melhores estratégias de controle corretivo que devem ser tomadas pela operação e suas consequências para o sistema, em virtude de alguma violação nos limites de operação. Neste aplicativo, busca-se encontrar uma solução ótima que satisfaça às restrições de operação, de cargas, e de segurança, sem alterar em demasia o ponto de operação do sistema. A ele, podem-se agregar fatores econômicos, de modo a diminuir os custos operativos.

A seguir, na Figura 2.2, tem-se a representação em blocos do sistema de análise de redes no contexto de operação em tempo real de SEP.

2.3 Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

Nesta seção serão apresentadas as quatro etapas do processo de EESEP, conforme a sua formulação clássica. Ou seja, considerando a existência apenas de medidas SCADA e as suposições de sistema equilibrado e de que a configuração da rede elétrica, e os parâmetros usados nos modelos que a representam, são corretos. Em seguida serão abordados alguns aspectos do processo de EESEP não considerados na formulação clássica.

2.3.1 1^a Etapa: Obtenção da Topologia do Sistema com a correspondente configuração de medidores no modelo barra-ramo

Esta etapa consiste na determinação, em tempo real, da topologia atual da rede e a correspondente configuração de medidores, no modelo barra-ramo, sendo executada pelo configurador de redes. Isto se torna possível a partir do processamento de dados, armazenados em um banco de dados estático, que descrevem a conexão dos equipamentos do sistema (geradores, transformadores de corrente e de potencial, cargas, capacitores, linhas de transmissão, medidores, etc.) com as seções de barramento. Além desses dados, o configurador processa ainda as medidas lógicas, que são obtidas continuamente pelo sistema SCADA e que consistem em status de chaves e disjuntores.

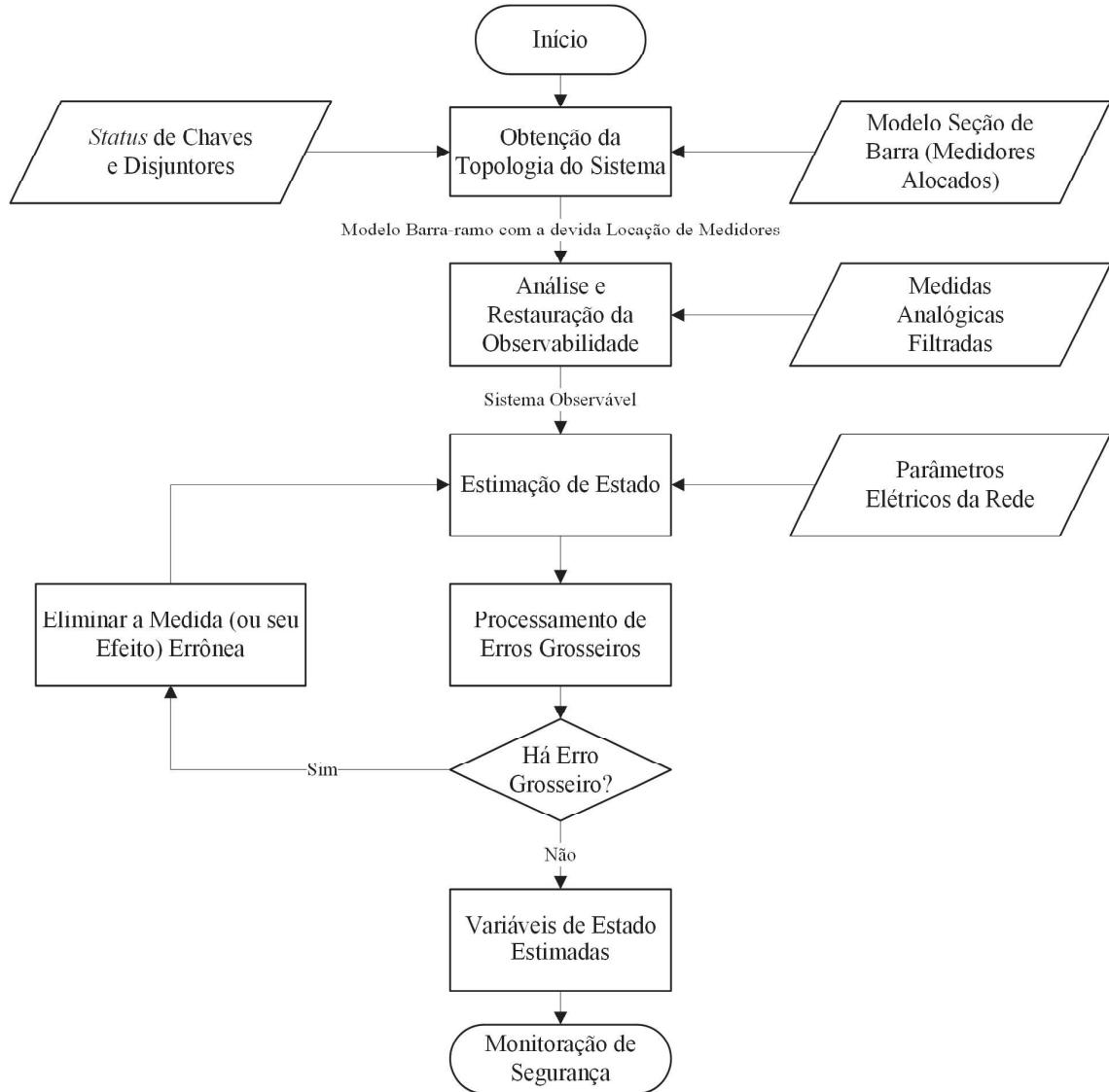


Figura 2.2: Etapas envolvidas no sistema de análise de redes no contexto de operação em tempo real de SEP.

O processo de obtenção da topologia do sistema pelo configurador de redes possui as seguintes características:

- Seções de barramento que estão em um mesmo nível de tensão podem ser interconectadas pelo fechamento de dispositivos seccionadores (chaves e disjuntores) formando uma única barra no modelo barra-ramo.
- Para diferentes combinações de status dos dispositivos seccionadores teremos, em geral, diferentes topologias da rede.
- Para obter a topologia inicial de um SEP, o configurador de redes deve processar todos os circuitos (geradores, transformadores, linhas de transmissão, etc.) e status dos dispositivos seccionadores disponíveis.

- Depois dessa inicialização, o configurador será executado novamente somente na ocorrência de mudanças na posição dos dispositivos seccionadores que acarretem alterações na topologia inicial do SEP.

Exemplo: Configurador de Redes

Para exemplificar o processo de obtenção da topologia da rede, no modelo barra-ramo, com a correspondente configuração de medidores, as Figuras 2.3 e 2.4 apresentam, respectivamente, as informações processadas e a saída de um configurador de redes.

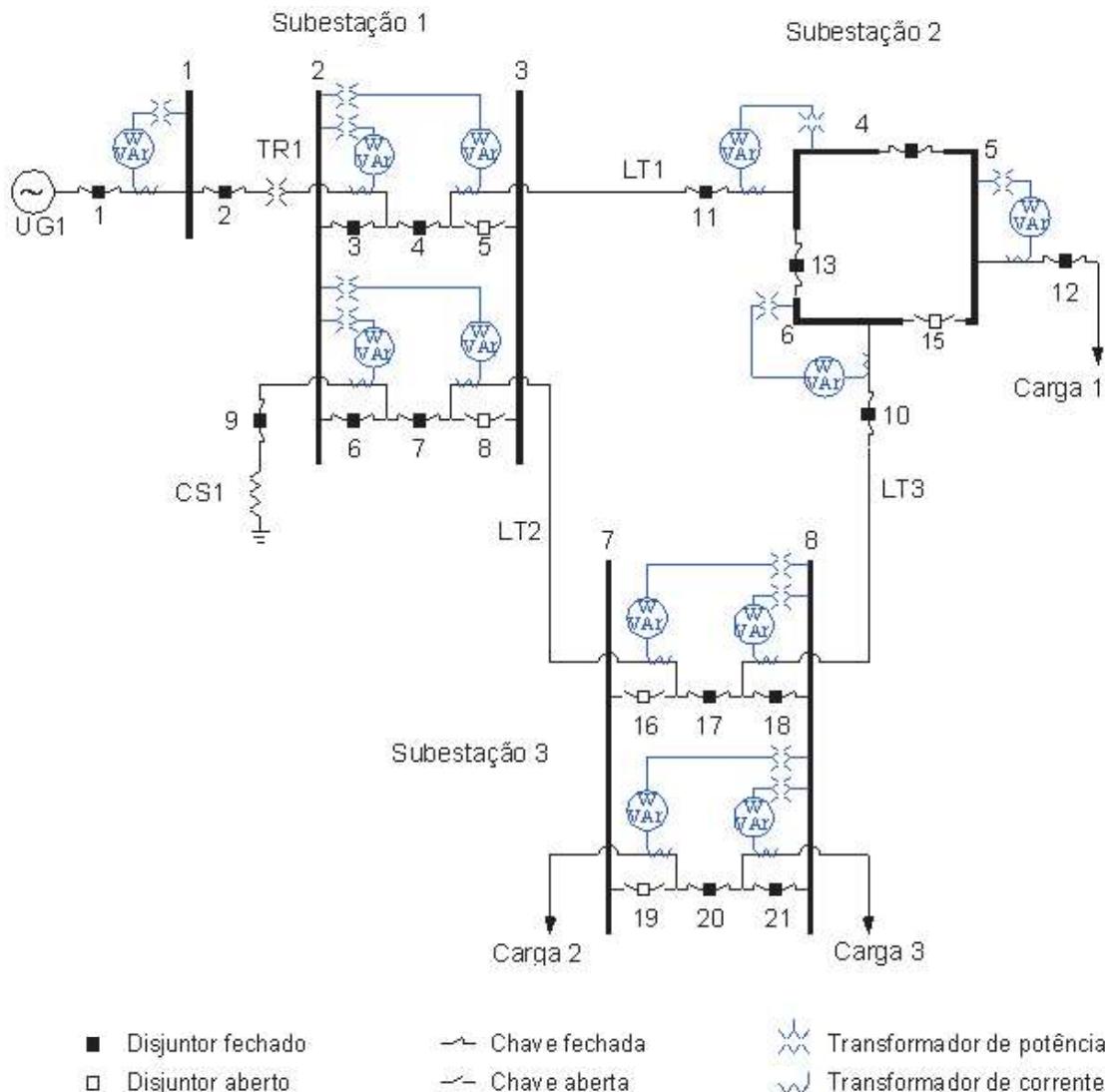


Figura 2.3: Modelo de um sistema de três subestações em nível de seção de barra e dispositivos seccionadores, incluindo arranjos de medidores (UG representa unidade geradora; LT linha de transmissão; TR transformador; CS condensador síncrono; W medidor de potência ativa e VAr medidor de potência reativa) (LONDON JR., 2011).

Conforme ilustrado na Figura 2.4, o configurador apresenta como saída o modelo barra-ramo (com a correspondente associação de medidores); a identificação de cada barra juntamente com sua geração, suas cargas e dispositivos em derivação; a conectividade

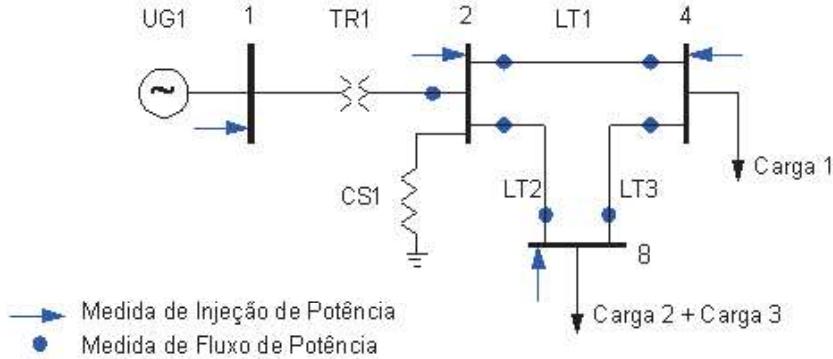


Figura 2.4: Modelo barra-ramo do SEP da Figura 2.3, incluindo a locação de medidores (LONDON JR., 2011).

entre as barras devida à presença de linhas de transmissão e transformadores e, além disso, também identifica ilhamentos e descarta as ilhas que não possuem geração (incluindo barras e ramos isolados). De uma forma geral, os configuradores de redes propostos para efeito de estimativa de estado trabalham em quatro fases distintas:

1. Configuração de subestação: nesta fase são processadas as informações relacionadas às seções de barramento de cada subestação. Todas as seções de barramento, conectadas por dispositivos seccionadores fechados, irão compor uma barra da rede no modelo barra-ramo;
2. Configuração de rede: nesta fase são processadas as barras da rede, determinadas na fase anterior, para verificar se as mesmas estão conectadas, através de dispositivos seccionadores fechados, a equipamentos série (linhas de transmissão e transformadores). Essas conexões serão representadas como ramos da rede, no modelo barra-ramo;
3. Associação dos medidores disponíveis aos devidos componentes no modelo barra-ramo: usualmente o mecanismo utilizado para realizar esta fase pode ser interpretado como um processo de redução de rede. Isto é, da rede representada em termos de seção de barramento para rede representada no modelo barra-ramo (MONTICELLI, 1999);
4. Tabulação de resultados: consiste na tabulação de todos os equipamentos conectados às barras da rede, no modelo barra-ramo.

Devido à importância do processo de obtenção da topologia do sistema para análise de redes, a partir de 1973 diversos estudos foram desenvolvidos na busca por configuradores de redes confiáveis e eficientes computacionalmente (SASSON et al., 1973; DY LIACCO; RAMARAO; WEINER, 1973). Em algumas situações, a mudança no estado de algum dispositivo lógico acarreta apenas alterações na geração, ou no carregamento de determinadas barras, sem alterar a topologia da rede. Em tais situações, como as matrizes

associadas ao processo de estimação de estado não se alteram, não se faz necessária uma nova execução do configurador de redes. Esse fato consistia em uma limitação dos primeiros configuradores desenvolvidos, pois mesmo na ocorrência de uma pequena alteração no sistema, dava-se início a todo o processo de configuração de rede (GODERYA; METWALLY; MANSOUR, 1980) (BERTRAN; CORBELLÀ, 1982).

Na tentativa de superar essa limitação em (PRAIS; BOSE, 1988) foi introduzido o conceito de Configurador *Tracking* que, armazenando a configuração proveniente da última execução, possibilita uma rápida atualização da topologia da rede, na ocorrência de pequenas alterações, através de uma busca localizada.

Posteriormente, em (PIERETI, 2007; PIERETI et al., 2011) foi apresentado um configurador de redes *tracking* que faz uso da estrutura de dados chamada Representação Nô-Profundidade (DELBEM; CARVALHO; BRETAS, 2004). Esse configurador apresenta as seguintes características interessantes:

- Permite a realização das etapas configuração de subestação e de rede ao mesmo tempo, diminuindo assim o tempo de processamento necessário para a obtenção do modelo barra-ramo;
- Possibilita a associação dos medidores, aos componentes da rede no modelo barra-ramo, de forma direta;
- Possibilita uma rápida atualização da topologia da rede após mudanças de estados de dispositivos seccionadores, sem a necessidade de reiniciar todo o processo de configuração de redes;
- Após mudanças nos estados de dispositivos seccionadores, indica as alterações necessárias na matriz Jacobina do estimador de estado WLS. A partir dessa informação, métodos de re-fatoração parcial de matrizes (CHAN; BRANDWAJN, 1986) podem ser utilizados para tornar mais rápido o processo de estimação de estado.

2.3.2 2^a Etapa: Análise e Restauração da Observabilidade

A finalidade desta etapa é verificar se as medidas analógicas e virtuais disponíveis possibilitam a estimação das variáveis de estado em todo o SEP (usualmente essas variáveis são as tensões complexas nodais). Em caso afirmativo, o sistema é dito observável. Caso contrário, essa falta de medidas pode ser suprida, em algumas situações, por pseudo-medidas³, através das quais o sistema se torna observável como um todo. Outra alternativa, para essa situação, é determinar as partes observáveis do sistema, isto é, as suas ilhas observáveis.

³Dados de previsão de carga, previsão de geração, dados históricos, etc., que fazem parte dos bancos de dados dos centros de operação.

Em (CLEMENTS; WOLLEMBER, 1975) foram investigadas as condições mínimas para observabilidade de um SEP, utilizando a sua topologia e as Leis de Kirchhoff. Definiu-se então o conceito de ilhas observáveis e foi proposto um algoritmo heurístico. Embora este algoritmo não nos permitisse utilizá-lo em tempo-real, forneceu base para elaboração dos conceitos de observabilidade algébrica, topológica e numérica, apresentados em (KRUMPHOLZ; CLEMENTS; DAVIS, 1980) e definidos em função da formulação do estimador de estado WLS.

Dada à importância e o número de trabalhos desenvolvidos tratando do problema de análise e restauração da observabilidade no contexto de EESEP, o Capítulo 5 deste livro tratará desse tema de forma bem detalhada.

2.3.3 3^a Etapa: Estimação de Estado

Esta etapa visa determinar, em tempo real, as variáveis de estado do SEP, a partir das seguintes informações: a topologia do sistema e a correspondente configuração de medidores no modelo barra-ramo, obtida pelo configurador de redes na 1^a Etapa; os parâmetros do SEP armazenados no banco de dados; e o conjunto disponível de medidas analógicas e virtuais (além de pseudo-medidas que tenham sido selecionadas na 2^a Etapa para restauração da observabilidade).

Para realizar tal tarefa foram desenvolvidos diversos estimadores de estado, que devem possibilitar o cálculo de variáveis de estado desconhecidas através de um conjunto de medidas analógicas não exatas. Logo, o valor estimado para essas variáveis de estado desconhecidas também não será exato e o estimador deve então encontrar uma forma de atingir a melhor estimativa para essas variáveis de estado.

Face ao exposto, os estimadores de estado baseiam-se em critérios estatísticos de minimização, dentre os quais, conforme informado no capítulo 1, o que vem sendo mais utilizado em SEP é o estimador WLS, que será apresentado detalhadamente no Capítulo 4.

2.3.4 4^a Etapa: Processamento de Erros Grosseiros em Medidas Analógicas

Esta etapa se faz necessária em razão de as medidas analógicas fornecidas ao estimador de estado estarem sujeitas a EGs (em função, por exemplo, de erros de conversão analógico-digital, erros nos canais de comunicação das tele-medidas, saturação de transformadores de medição, etc.), que levam o processo de estimação de estado a variáveis de estado que não representam corretamente a atual situação de operação do SEP.

Tradicionalmente o primeiro passo desta etapa é detectar a presença de EGs no conjunto de medidas analógicas processado na 3^a Etapa pelo estimador de estado. Se não for detectado EG algum, o processo de EESEP como um todo se encerra e as variáveis

de estado estimadas na 3^a Etapa serão utilizadas para definir a atual condição de operação do SEP. Caso contrário, o próximo passo da 4^a Etapa é a identificação das medidas portadoras de EGs. Em seguida, o terceiro e último passo, da 4^a Etapa, é eliminar as medidas portadoras de EGs, ou, pelo menos, os efeitos dessas medidas nas variáveis de estado estimadas. Neste caso, após a detecção, identificação e eliminação das medidas portadoras de EGs, a 3^a Etapa é executada novamente para obtenção de variáveis de estado sem a influência das medidas errôneas.

O processo de EESEP como um todo termina quando, após uma estimativa (3^a Etapa) não for detectada medida alguma com EG (4^a Etapa).

Tendo em vista que o estimador de estado mais utilizado no processo de EESEP é o estimador WLS, os métodos para processamento de EGs mais empregados na prática baseiam-se na análise estatística dos resíduos do estimador WLS. Alguns desses métodos serão apresentados no Capítulo 6.

2.3.5 Erros Topológicos e de Parâmetros no Processo de EESEP

Conforme mencionado anteriormente, as quatro etapas do processo tradicional de EESEP foram desenvolvidas considerando as suposições de que a configuração da rede e os parâmetros usados nos modelos que representam os elementos do sistema são corretos. Dessa forma, na formulação clássica do processo de EESEP considera-se apenas a possibilidade de EGs, desprezando-se a possibilidade de ocorrência de ETs e EPs. Entretanto, em razão de aquelas suposições serem frequentemente não verdadeiras, ETs e EPs ocorrem influenciando todo o processo de EESEP, conforme será discutido a seguir.

Tendo em vista que as Etapas 2^a, 3^a e 4^a, do processo de EESEP, baseiam-se na topologia obtida na 1^a Etapa, caso ocorra algum ET, que não tenha sido detectado pelo configurador de redes, tal erro pode causar um aumento nos resíduos das medidas analógicas localizadas nas vizinhanças dos elementos erroneamente configurados do sistema. Assim, na 4^a Etapa, as medidas analógicas, com resíduos elevados, são identificadas como portadoras de EGs. Nessa situação, dar-se-á início a um processo de eliminação de medidas analógicas, e, eventualmente, o processo poderá reduzir a zero o nível de redundância local. Logo, não será mais detectado EG em medida analógica, mas o ET permanece. Consequentemente, o modelo do SEP obtido no processo de EESEP não representará corretamente a sua atual situação de operação.

Similar análise pode realizar-se considerando EPs, pois as Etapas 3^a e 4^a baseiam-se nos parâmetros fornecidos ao estimador na 3^a Etapa. Assim, caso a informação de algum parâmetro do sistema tenha sido erroneamente fornecida ao estimador de estado, tal erro causará um aumento nos resíduos das medidas analógicas, localizadas nas vizinhanças do elemento, cujo parâmetro é o que forneceu aquela informação errada.

Destacam-se, a seguir, algumas informações acerca do tratamento de ETs e EPs.

Erros de Parâmetros

Recordando o apresentado no capítulo 1, EPs são informações erradas de algum parâmetro da rede elétrica (posições de Taps de transformadores, resistência e reatância série de linhas de transmissão, admitância em paralelo, etc.). A suspeita da existência de erro no valor de determinado parâmetro surge quando as medidas relacionadas ao mesmo apresentam resíduos normalizados elevados em diversas amostras de medidas.

Os parâmetros de um sistema, disponíveis no banco de dados da concessionária, podem estar incorretos devido a uma série de fatores, tais como (ALBERTINI, 2010):

- Dados imprecisos fornecidos por fabricantes;
- Aproximações feitas nos modelos de transformadores;
- Estimativas incorretas do comprimento das linhas de transmissão;
- Preenchimento incorreto da base de dados acessada pelo estimador;
- Alterações de projeto não atualizadas na base de dados como, por exemplo, seção de linha aérea que se tornou subterrânea;
- Discrepâncias nos valores dos parâmetros usados por diferentes setores de uma mesma empresa (FREUND, 2006);
- A não consideração da influência das condições climáticas em alguns parâmetros de linha como, por exemplo, a resistência;
- Erros que surgem durante a operação da rede elétrica devido a problemas elétricos ou mecânicos. Podem ocorrer em dispositivos de monitoramento de *taps* de transformadores, ou em função de uma modificação local de um *tap* sem a posterior informação ao centro de controle. Pode-se citar ainda a colocação em operação de bancos de capacitores, chaveamento de reatores de linha, entre outros.

Vários métodos para depuração (detecção, identificação e correção) de valores de parâmetros têm sido propostos, como, por exemplo: aqueles que se baseiam na análise da sensibilidade dos resíduos das medidas (FLETCHER; STADLIN, 1983; VAN CUTSEM; QUINTANA, 1988; LIU; WU; SHAU-MING, 1992); os que aumentam o vetor de variáveis de estado para incluírem os parâmetros suspeitos de estarem com erros como se eles fossem variáveis de estado independentes (CLEMENTS; DENISON; RINGLEE, 1973; CLEMENTS; RINGLEE, 1974; ALLAN; LAUGHTON, 1973; DEBS, 1974; LIU; SWEELIAN, 1995; SLUTSKER; MOKHTARI; CLEMENTS, 1996; ZARCO; EXPOSITO, 1996; CASTILLO et al., 2011; ZHAO et al., 2018); e os métodos baseados em Multiplicadores de Lagrange (ZHU; ABUR, 2006; LIN; ABUR, 2017).

Os métodos que aumentam o vetor de variáveis de estado, para inclusão dos parâmetros suspeitos de estarem com erros, podem ser divididos em dois grupos: (1) Métodos

que utilizam as Equações Normais (LIU; SWEE-LIAN, 1995; ALSAç et al., 1998; TEIXEIRA et al., 1992); e (2) Métodos que utilizam a teoria do Filtro de Kalman (DEBS, 1974; ARAFEH; SCHINZINGER, 1979; HANDSCHIN; KLIOKYS, 1995; SLUTSKER; MOKHTARI; CLEMENTS, 1996).

Os métodos do grupo (1) sofrem de problemas de observabilidade, pois, raramente o número de medidas disponível é suficiente para estimar todas as variáveis de estado "aumentadas". Essa limitação pode ser superada através da utilização de diversas amostras de medidas, seja de forma sequencial ou em lote. Os métodos do grupo (2) processam diversas amostras de medidas de forma sequencial, para melhorar de forma recursiva as estimativas dos parâmetros. Porém, a necessidade de atualização da matriz de covariância dos erros de parâmetros aumenta muito o custo computacional dos mesmos, principalmente quando é grande a quantidade de parâmetros suspeitos.

Os artigos publicados para tratamento de EPs não estabeleceram comparações precisas entre as diferentes metodologias. Com base em (ZARCO; EXPOSITO, 2000) e em outras publicações relevantes, algumas conclusões podem ser estabelecidas:

1. No tocante à estimação do valor do parâmetro, o procedimento baseado no aumento do vetor de variáveis de estado é preferido, em relação àquele que emprega análise de sensibilidade de resíduos. A série de linearizações necessárias para realizar a análise de sensibilidade de resíduos requer um número maior de iterações, para obter precisão semelhante àquela do procedimento do vetor aumentado;
2. Embora o procedimento do vetor aumentado por equações normais seja eficaz na estimação do valor do parâmetro, o mesmo não possui a característica de identificar os parâmetros suspeitos. A carência dessa fase de pré-identificação compromete as metodologias baseadas nesse procedimento, tendo em vista poder iniciar a fase de estimação contemplando valores errados para os parâmetros. Além disso, ao adicionar-se um parâmetro ao vetor de variáveis de estado, reduz-se a eficiência computacional, devido ao aumento da dimensão da matriz ganho. Há ainda como consequência a redução no nível de redundância do sistema de medição, mas esta limitação pode ser contornada considerando-se várias amostras de medidas;
3. O procedimento de análise de sensibilidade de resíduos é eficaz na determinação de parâmetros suspeitos, apresentando, porém, baixa eficiência na existência de mais de um erro de parâmetro;
4. Em razão de não exigirem muitas alterações no código computacional dos estimadores de estado convencionais, os métodos para estimação de parâmetros baseados na análise de sensibilidade residual são mais plausíveis de se incorporarem a aqueles estimadores, relativamente aos métodos que fazem uso de um vetor de estado aumentado;

5. A utilização da teoria de filtro de Kalman é eficaz, pois melhora recursivamente o valor do parâmetro. Entretanto, a necessidade de atualizar as matrizes de covariância torna essa metodologia computacionalmente ineficiente, principalmente quando o número de parâmetros a ser estimado é elevado;
6. Um ponto em que não há controvérsia no tratamento de EPs diz respeito à natureza do processamento para estimação do parâmetro. Para parâmetros que permanecem essencialmente constantes, como a reatância das linhas, o melhor é realizar um processo *off-line* de estimação de parâmetros. Já no que se refere a variáveis dinâmicas, como *taps* de transformadores, o processo *on-line* é o mais indicado.

A maioria das metodologias *off-line* desenvolvidas para tratamento de EPs admitem a hipótese de obtenção de amostras de medidas imunes de ETs e EGs. Como, por exemplo, aquela apresentada em (COUTTO FILHO; SOUZA; MEZA, 2008), para depuração de erros em parâmetros série de linhas de transmissão. A ideia é criar um processo de estimação de estado imune/menos sensível aos erros de parâmetros. Para isso foi explorado o conceito de ramo irrelevante⁴ ou quase irrelevante. Estratégias suplementares, baseadas na mudança da ponderação das medidas, foram desenvolvidas para lidar com situações especiais em que a criação de ramos irrelevantes/quase irrelevantes tornava o sistema não observável. Foram apresentadas diversas simulações com o sistema de 14 barras do IEEE.

Alguns métodos foram desenvolvidos considerando a possibilidade de ocorrência de EPs e EGs. Dentre eles destacam-se o desenvolvido em (ZHU; ABUR, 2006), baseado em multiplicadores de Lagrange associados às restrições impostas sobre a ausência de EPs (restrições nulas). Segundo os autores, a metodologia pode apresentar problemas quando dois ou mais EPs afetam o mesmo subconjunto de medidas.

Fazendo uso de medidas convencionais (medidas obtidas pelo sistema SCADA) e medidas fasoriais sincronizadas, em (ZHU; ABUR, 2010) foi apresentada uma extensão da metodologia proposta em (ZHU; ABUR, 2006). De acordo com os autores, a inclusão das medidas fasoriais sincronizadas, no processo de identificação de EPs através dos multiplicadores de Lagrange, possibilita a identificação de EPs em situações em que tal tarefa é impossível através da utilização apenas de medidas convencionais.

Apesar da grande quantidade de metodologias já desenvolvidas para tratamento de EPs, pouco se sabe sobre o sucesso da implantação prática dessas metodologias. Nesse sentido, importa destacar a metodologia que permite a depuração *off-line* não apenas de parâmetros série de linhas de transmissão (condutância e susceptância série), mas também de parâmetros em derivação (susceptância *shunt*), proposta em (CASTILLO et al., 2011).

Resultados numéricos de diversas simulações apresentados em (CASTILLO et al., 2011), com os sistemas de 14, 30 e 57 barras do *IEEE*, bem como com dois subsistemas

⁴Considera-se um ramo irrelevante para estimação de estado, quando nenhuma medida (fluxo ou injeção) estiver a ele associada, significando que tal ramo não participa do processo de estimação.

da *Hydro-Québec*, demonstraram a alta precisão e confiabilidade da metodologia proposta, mesmo na ocorrência de erros múltiplos (em mais de um parâmetro) em ramos adjacentes, como também em linhas de transmissão paralelas com compensação série. Cumpre salientar que os resultados obtidos pela metodologia foram utilizados para corrigir os valores dos parâmetros disponíveis na base de dados da *Hydro-Québec*, conforme mencionado em (CASTILLO et al., 2011).

A metodologia desenvolvida em (CASTILLO et al., 2011) comprehende três fases:

1. Identificação de ramos (que representam as linhas de transmissão no modelo barra-ramo) suspeitos;
2. Estimação dos parâmetros suspeitos;
3. Validação das estimativas dos parâmetros suspeitos.

O procedimento proposto, na Fase 1, para detecção e identificação de parâmetros suspeitos de estarem com erro, faz uso dos resíduos normalizados das medidas resultantes de um processo de estimação de estado convencional *WLS*. Tendo em vista que o procedimento proposto é *off-line*, a metodologia assume a hipótese de que seja possível selecionar amostras de medidas isentas de EGs e ETs. Desta forma, medidas com resíduos normalizados elevados são um indicativo da presença de EPs. Isto porque, para o processo de EE convencional, o erro no parâmetro de uma linha de transmissão causará um aumento nos resíduos normalizados das medidas analógicas incidentes àquela linha, isto é, medidas de fluxo de potência naquela linha ou de injeção de potência em uma das barras terminais daquela linha.

A partir da análise dos resíduos normalizados das medidas e do número de medidas incidentes para cada uma das linhas de transmissão do SEP, ou ramos do modelo barra-ramo, cria-se um *Índice de Suspeita (IS)* para cada um desses ramos e obtém-se uma lista de ramos suspeitos de estarem com erro.

Na Fase 2, estimam-se os parâmetros identificados como suspeitos na Fase 1, ou seja, as condutâncias série e susceptâncias série e *shunt* dos ramos identificados como suspeitos. Para isso, foi proposto um estimador de estado e parâmetros baseado nas equações normais, que aumenta o vetor de variáveis de estado para inclusão dos parâmetros suspeitos. Em razão disto, temos agora um modelo aumentado e o vetor de variáveis de estado passa a ser chamado de vetor de variáveis de estado aumentado.

A ideia que norteia a Fase 2 consiste em utilizar medidas de diversas amostras e estimar simultaneamente as variáveis de estado e os parâmetros suspeitos. Observe que, a partir da segunda amostra, os valores utilizados como condição inicial para os parâmetros suspeitos são as estimativas obtidas na amostra anterior, permitindo assim a correção dos valores desses parâmetros. No processo proposto de solução simultânea do modelo aumentado, a partir do algoritmo iterativo de Gauss-Newton, cada iteração é dividida em

duas meias iterações. Ou seja, para cada amostra de medidas κ , as correções das variáveis de estado convencionais (Δx_e^κ) e dos parâmetros (Δp^κ) são obtidas de forma sequencial e o teste de convergência baseia-se na análise das alterações máximas em ambas as correções. Observe que, para cada meia iteração, utiliza-se o mesmo conjunto de medidas da amostra κ .

Conforme demonstrado em (ALBERTINI, 2010), as vantagens de fazer uso desse processo de solução simultânea do modelo aumentado são, basicamente, as seguintes:

1. As matrizes envolvidas no processo de solução apresentam condicionamento numérico melhor que a matriz G_{Aum} . Dessa forma, garante-se maior robustez numérica para o algoritmo de solução;
2. Preserva-se a redundância das medidas para estimação dos parâmetros do sistema, pois, utiliza-se o mesmo vetor z para solução de cada uma das duas meias iterações. Assim, se existirem m medidas disponíveis numa determinada amostra, teremos uma relação de redundância global de $m/(2n - 1)$, para processamento da meia iteração para obtenção das correções das variáveis de estado convencionais (Δx_e^κ) e de m/np para processamento da meia iteração para obtenção das correções dos parâmetros (Δp^κ), sendo n e np o número de barras do SEP e de parâmetros a serem estimados, respectivamente.

Em razão do efeito de espalhamento de resíduo, o processo de detecção e identificação de ramos suspeitos (Fase 1) pode falhar, isto é, pode classificar erroneamente um ramo como suspeito de estar com erro. Desta forma torna-se necessário validar as estimativas obtidas para os parâmetros suspeitos. Para isto, na Fase 3, utiliza-se um estimador de estado convencional *WLS* que é processado considerando os valores estimados dos parâmetros dos ramos suspeitos ao invés dos valores disponíveis no banco de dados. Se a estimativa obtida na Fase 2 estiver próxima do valor "verdadeiro" do parâmetro de um determinado ramo suspeito, o correspondente *IS* diminuirá, validando as estimativas obtidas. Caso contrário, continuará o mesmo podendo, inclusive, aumentar.

Erros Topológicos

Importa recordar que ETs são erros nas medidas lógicas, ou seja, medidas realizadas continuamente que consistem em status de dispositivos seccionadores (chaves e disjuntores). Dessa forma, o processamento desse tipo de erro deve ser realizado de forma online, conforme realiza-se o processamento de EGs.

Os ETs são classificados em duas categorias (ABUR; EXPOSITO, 2004):

1. Erro de estado de ramo: afetam a quantidade de ramos da rede (linhas ou transformadores), podendo ocorrer de forma simples ou múltipla. ETs desse tipo são subdivididos em:

- a) ET de exclusão: ocorre quando um elemento do SEP está em operação, mas não é configurado na rede;
 - b) ET de inclusão: situação oposta à anterior, ou seja, o elemento não está em operação, mas é configurado na rede.
2. Erro de configuração de subestação: são erros afetando os dispositivos seccionadores que ligam as seções de barramentos das subestações. São ainda subdivididos em:
- a) ET de divisão: quando um barramento elétrico simples é modelado como duas barras distintas;
 - b) ET de fusão: situação oposta à anterior, duas barras sendo fundidas em um só barramento elétrico.

ETs têm, em geral, uma influência mais drástica nos resíduos das medidas, em comparação a EPs. Esse fato pode ser facilmente constatado ao se considerar, por exemplo, um erro de exclusão afetando um ramo de admitância Y . A exclusão desse ramo é equivalente a considerá-lo um ramo de admitância nula ou, em outras palavras, um ramo cuja admitância possui um EP de 100%.

De acordo com (CLEMENTS; DAVIS, 1988), ETs podem ser detectados através de uma análise sistemática dos resíduos normalizados, desde que a redundância seja grande o suficiente. A presença de resíduos de elevada magnitude em várias linhas formando um *loop*, coexistindo com resíduos de pequena magnitude nas medidas de injeção de potência envolvidas, é considerada um indício claro desse tipo de erro. Entretanto, não é tão simples desenvolver regras para a identificação de uma subestação suspeita de estar com erro, uma vez que o erro seja detectado (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Os primeiros métodos desenvolvidos para detecção de ETs foram chamados de métodos pós-filtragem. Assim o denominaram porque nos mesmos são utilizados, como ponto inicial de suas análises, os resultados de um estimador de estado convencional. Isto é, através da análise dos resíduos das medidas analógicas, tais métodos permitem determinar as subestações suspeitas de estarem erroneamente configuradas. São aquelas nas vizinhanças das medidas analógicas, com os resíduos acima de um limiar preestabelecido. Essas subestações recebem então um tratamento especial.

Os métodos pós-filtragem para detecção de ETs proposto em (SASSON et al., 1973; DY LIACCO; RAMARAO; WEINER, 1973) fazem uso de um algoritmo de busca em árvore. Já o método proposto em (LUGTU et al., 1980) permite a identificação das subestações suspeitas de estarem com ETs através de estimativas de estado para todas as combinações possíveis das posições dos disjuntores e das chaves dessas subestações. Em seguida, classifica como correta a configuração que produza o menor resíduo normalizado nas medidas.

Em (CLEMENTS; DAVIS, 1988) foi proposto um método pós-filtragem, para detectar e identificar ETs, através de uma interpretação geométrica dos resíduos das medidas afetadas por ETs.

Apesar de apresentarem bom desempenho em diversas situações, os métodos pós-filtragem possuem algumas limitações. Isto porque dependem da convergência de um estimador de estado, para começarem as análises. Tal convergência já é ameaçada na presença de EGs, e, na presença de ETs, torna-se ainda mais complicada. Além disso, mesmo com a convergência, a análise dos resíduos da estimação pode ser totalmente inviável, devido ao efeito de espalhamento dos resíduos (MILI; CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA, 1985).

Considerando tais limitações, métodos que não exigem uma estimação de estado inicial foram desenvolvidos (métodos pré-filtragem).

Segundo essa nova linha de pesquisa, em (BONANOMI; GRAMBERG, 1983) foi apresentado um método baseado num procedimento de busca, através do grafo do sistema. Posteriormente, procurando um método pré-filtragem, de fácil implantação e executável em tempo reduzido, que não dependesse das características do sistema, em (SINGH; GLAVITSCH, 1991) foi desenvolvido um método utilizando um banco de informações sobre o sistema, tentando emular a análise que seria realizada por um operador do sistema.

Em (SOUZA; SILVA; SILVA, 1998), apresenta-se-nos um método pré-filtragem, que explora a capacidade de discriminação fornecida pelas inovações normalizadas, as quais são utilizadas como variáveis de entrada de uma rede neural, cuja saída possibilita a identificação de EGs e ETs.

Após o desenvolvimento dos valiosos trabalhos relacionados à representação dos ramos de impedância nula (MONTICELLI; GARCIA, 1991; MONTICELLI, 1993a), que possibilita a modelagem da rede no nível de seção de barra, o interesse pelo desenvolvimento de pesquisas para tratamento de ETs foi renovado.

A modelagem no nível de seção de barra aumenta de forma significativa a dimensão do problema de estimação de estado. Isto em razão de exigir a inclusão dos fluxos de potência ativa e reativa, nos ramos chaveáveis modelados (ramos representando chaves e disjuntores), e das tensões complexas nas seções de barra como novas variáveis de estado a serem estimadas. Para possibilitar a observabilidade desse conjunto aumentado de variáveis de estado, o modelo no nível de seção de barra inclui ainda novas informações (equações) ao problema de estimação, relacionadas aos status de dispositivos chaveáveis. Face ao exposto, a representação de toda a rede, no modelo de seção de barra, é inviável computacionalmente para sistemas de potência reais. Além disso, verificou-se ainda que não é necessária, tendo em vista que a maioria das informações sobre os status de dispositivos seccionadores são usualmente corretas (ABUR; KIM; CELIK, 1995). Dessa forma, foram propostos então estimadores de estado de dois estágios para tratamento de ETs, sendo:

- **Primeiro estágio:** realiza-se o processo de estimação de estado tradicional, com a rede modelada no nível barra-ramo. Com base nos resultados obtidos dessa estimação são definidas as regiões suspeitas de estarem com ETs;
- **Segundo estágio:** realizasse o tratamento dos ETs a partir da modelagem das regiões suspeitas no nível de seção de barra.

A maioria dos estimadores de dois estágios desenvolvidos fazem uso de multiplicadores de Lagrange normalizados para processamento de ETs no segundo estágio do processo (CLEMENTS; COSTA, 1998; JAEN; EXPOSITO, 2002; LOURENÇO et al., 2006).

Importa destacar que a maioria dos métodos desenvolvidos para processamento de ETs não consideram a possibilidade da presença simultânea de EGs e EPs. Nesse sentido, vale mencionar o trabalho apresentado em (LOURENÇO; COELHO; PAL, 2015), que possibilita o tratamento conjunto de ETs e EGs. É um estimador de dois estágios, que trata medidas e status de dispositivos chaveáveis como restrições de igualdade. Realiza-se a identificação do tipo de erro com base na interpretação geométrica dos Multiplicadores de Lagrange.

2.4 Estimação de Estado Generalizada

Conforme mencionado anteriormente, os trabalhos relacionados à modelagem de elementos de impedância nula (MONTICELLI; GARCIA, 1991; MONTICELLI, 1993a,b) trouxeram significativas inovações ao processo de EESEP, isto no sentido de possibilitar a modelagem de componentes que não eram tradicionalmente considerados, como, por exemplo, disjuntores, chaves e parâmetros (impedância de linhas de transmissão e transformadores, bem como elementos *shunt*). À estimação desse modelo mais geral deram-lhe a denominação de estimação de estado generalizada (ALSAÇ et al., 1998).

No modelo tradicional do processo de EESEP, o configurador fornece a topologia da rede, isto é, o modelo barra-ramo conexo da rede, com associação das medidas aos componentes; já o estimador considera a topologia da rede como exata. Assim, o tratamento da topologia e o processamento das medidas analógicas são realizados de forma independente. Por outro lado, como o modelo generalizado representa um único conjunto, o mesmo possibilita a identificação de possíveis erros, com o tratamento simultâneo de medidas, dados de topologia da rede e parâmetros.

O modelo de estimação generalizada é ilustrado na Figura 2.5 (ASADA, 2004).

No modelo generalizado, o próprio fluxo de potência, circulante em dispositivos de impedância nula ou desconhecida, é representado como variável de estado. Desta forma, novas pseudo-medidas são também introduzidas no modelo, tais como: diferença de magnitude e ângulo de tensão, em dispositivos fechados; fluxo nulo de potência ativa e re-

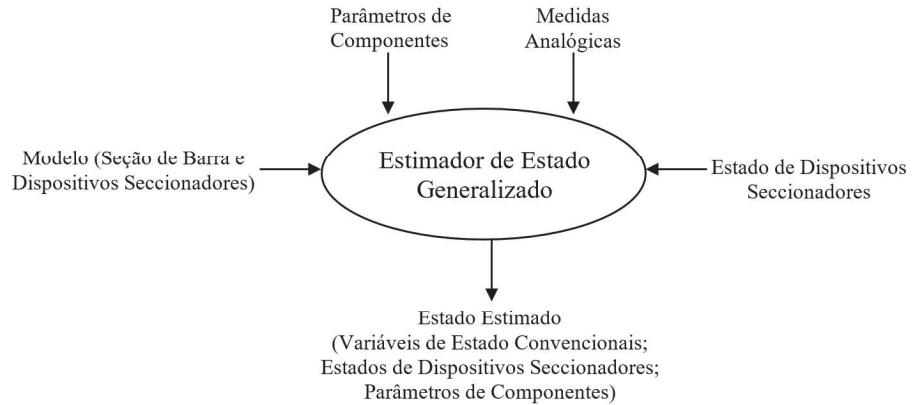


Figura 2.5: Modelo de estimação de estado generalizada

ativa, em dispositivos fechados; diferença na magnitude de corrente para impedâncias desconhecidas; e diferença na admitância *shunt* para modelos π -equivalentes. Com isso, permite-se-nos uma melhor discriminação entre EGs, ETs e EPs.

Uma revisão completa dos aspectos principais relacionados à estimação de estado generalizada é apresentada em (MONTICELLI, 1999).