



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO – CTC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Fernanda Mary de Souza Fernandes

**Identificação da Topologia Operativa de Redes Elétricas com Base em Testes
de Hipóteses e Estatística Bayesiana**

Florianópolis
2023

Fernanda Mary de Souza Fernandes

**Identificação da Topologia Operativa de Redes Elétricas com Base em Testes
de Hipóteses e Estatística Bayesiana**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fernandes, Fernanda Mary de Souza
Identificação da Topologia Operativa de Redes Elétricas
com Base em Testes de Hipóteses e Estatística Bayesiana /
Fernanda Mary de Souza Fernandes ; orientador, Antonio
José Alves Simões Costa, 2023.
93 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Erros de Topologia em
Modelos de Redes Elétricas. 3. Estimacão de Estados em
Sistemas Elétricos de Potência. 4. Modelagem em Tempo Real
de Sistemas Elétricos de Potência. I. Simões Costa,
Antonio José Alves. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
III. Título.

Fernanda Mary de Souza Fernandes

Identificação da Topologia Operativa de Redes Elétricas com Base em Testes de Hipóteses e Estatística Bayesiana

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. André Abel Augusto, Dr.
Universidade Federal Fluminense

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.
Coordenação do Programa de
Pós-Graduação

Prof. Antonio José Alves Simões Costa,
Ph.D.
Orientador

Florianópolis, 2023.

Dedico este trabalho à todos que me ensinaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que esteve comigo em todas as horas e me fez forte e resistente em cada uma das dificuldades. Agradeço aos meus familiares e amigos pelo suporte, incentivo e amor. Em especial, agradeço aos meus pais, irmãos e esposo por serem meu exemplo de força, perseverança e por sempre me apoiarem. Aos meus sobrinhos e cunhada por cada abraço e riso que compartilhamos e tornaram a caminhada mais leve.

Ao meu orientador, professor Antonio José Alves Simões Costa, pela orientação, colaboração e confiança no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos que partilharam dessa caminhada comigo e torceram pelo meu êxito durante este trabalho. Aos professores do Grupo de Sistemas de Potência, pelos momentos de aprendizado.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, à Universidade Federal de Santa Catarina e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade e o apoio financeiro durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros da banca Prof. André Augusto, Prof. Miguel Moreto e Prof. Antonio Felipe da Cunha pelo interesse para avaliação deste trabalho e contribuições para seu aperfeiçoamento.

Enfim, agradeço a todos que se fizeram presentes e caminharam comigo nessa jornada.

RESUMO

A ocorrência de erros de topologia na configuração de redes elétricas compromete a precisão dos resultados de aplicativos de apoio à operação em tempo real a serem executados posteriormente, tais como a estimação de estados e análise de contingências. Com o intuito de solucionar este problema, neste trabalho é apresentado um novo método para determinar a topologia operativa da rede que é melhor suportada pelas medidas analógicas disponíveis, em condições iniciais de erro de topologia. O método proposto realiza o teste de hipóteses baseado no teorema de Bayes e no critério do mínimo expoente da função densidade de probabilidade associada às hipóteses alternativas. Para a obtenção das hipóteses candidatas, é utilizado o teorema de Sherman-Morison-Woodbury que adiciona estabilidade numérica ao método e reduz o esforço computacional exigido para a atualização das configurações de cada hipótese alternativa. O método proposto é avaliado mediante testes envolvendo subestações de três diferentes sistemas-teste, um de menor porte, tutorial, que visa ilustrar detalhadamente a aplicação; e os sistemas-teste de 24 e 30 barras do IEEE, todos contendo subestações modeladas no nível de seção de barra. São analisados diferentes tipos de erros de topologia e diferentes arranjos de subestações. Os resultados obtidos demonstram a eficiência da metodologia proposta.

Palavras-chave: Erros de Topologia em Modelos de Redes Elétricas. Estimação de Estados em Sistemas Elétricos de Potência. Modelagem em Tempo Real de Sistemas Elétricos de Potência.

ABSTRACT

Topology errors contaminating network configuration results compromise the performance of subsequently executed applications such as state estimation and contingency analysis. This work presents a new method for determining the topology which is best supported by available analog measurements, under initial conditions of topology error. The proposed method it is based on hypothesis testing, Bayes'theorem, and the minimum exponent of the probability density function associated with the alternative hypotheses. The Sherman-Morison-Woodbury theorem is used to obtain the candidate hypotheses, which adds numerical stability to the method and reduces the computational effort required for updating the configurations of each alternative hypothesis. The proposed method is assessed through test performed on three different test systems, one small test system, tutorial, which aims to illustrate the application in detail; and the IEEE 24-bus and IEEE 30-bus test systems.

Keywords: Topology Errors in Electrical Network Models. Power System State Estimation. Power System Real-Time Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 – Sistema-teste 1 - Sistema teste de 3 barras.	58
Figura 5.2 – Sistema-teste 2 - Sistema teste de 24 barras do IEEE.	59
Figura 5.3 – Sistema-teste 3 - Sistema teste de 30 barras do IEEE.	60
Figura 5.4 – Fluxograma dos procedimentos de simulação.	62
Figura 5.5 – Sistema-teste 1 - Hipótese com erro de topologia <i>simples</i>	64
Figura 5.6 – Sistema-teste 2 - 24 barras, 10 nós, 47 ramos e 13 disjuntores.	69
Figura 5.7 – Sistema-teste 3 - 32 barras, 9 nós, 59 ramos e 18 disjuntores.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Possíveis erros de topologia no sistema-teste 1.	63
Tabela 2 – Resultado da identificação da topologia em caso de erro de topologia <i>simples</i> no sistema-teste 1.	66
Tabela 3 – Resultado da identificação da topologia em caso de erro de topologia <i>múltiplo</i> no sistema-teste 1.	67
Tabela 4 – Resultado de identificação de topologia para erros de topologia aleatórios no sistema-teste 1.	68
Tabela 5 – Resultado da identificação da topologia em casos de erro simples de <i>inclusão</i> no sistema-teste 2.	70
Tabela 6 – Resultado da identificação da topologia em casos de erro simples de <i>exclusão</i> para o sistema-teste 2.	71
Tabela 7 – Resultado de identificação de topologia sob condições de erros de <i>bypass</i> no sistema-teste 2.	72
Tabela 8 – Resultado da identificação da topologia em casos de erro simples de <i>exclusão</i> no sistema-teste 3.	75
Tabela 9 – Resultado da identificação da topologia em caso de erro de <i>bus-split</i> no sistema-teste 3.	76
Tabela 10 – Resultado da identificação da topologia em casos de erro simples de <i>inclusão</i> no sistema-teste 3.	77
Tabela 11 – Resultado de erros de topologia aleatórios no sistema-teste 2.	78
Tabela 12 – Resultado de erros de topologia aleatórios no sistema-teste 3.	79
Tabela 1 – Dados das barras - Sistema de 3 barras.	93
Tabela 2 – Dados das Linhas - Sistema de 3 barras.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EEG	Estimação de Estados Generalizada
EENSB	Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra
EESP	Estimação de Estados em Sistemas de Potência
ETs	Erros de Topologia
fdp	Função densidade de probabilidade
MLN	Multiplicador de Lagrange Normalizado
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SEP	Sistemas Elétricos de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Número total de barras do sistema
N_m	Número de medidas
n	Número de estados do sistema
\mathbf{x}	Vetor de estados verdadeiros
$\hat{\mathbf{x}}$	Vetor de estados estimados
\mathbf{z}_m	Vetor de medidas
\mathbf{z}_0	Vetor de valores verdadeiros das medidas
$\boldsymbol{\eta}_m$	Vetor de erros de medição
$\mathbf{h}_m(\cdot)$	Vetor de funções não-lineares das medidas
σ_i	Desvio-padrão associado ao medidor i
σ_i^2	Variância associada ao medidor i
$E[\cdot]$	Operador esperança matemática
\mathbf{R}_m	Matriz de covariância dos erros de medição
ρ_r	Índice de redundância global
\mathbf{r}_m	Vetor de resíduos de medição
J_m	Função-objetivo do método de MQP
\mathbf{H}_m	Matriz Jacobiana das medidas
$\bar{\mathbf{G}}$	Matriz ganho
k	Iteração corrente
$\Delta\mathbf{x}$	Vetor incremento de estados
$\Delta\mathbf{z}_m$	Vetor de resíduos de estimação
$\boldsymbol{\lambda}$	Vetor dos multiplicadores de Lagrange
$\mathcal{L}(\cdot)$	Função Lagrangeana
n_d	Número de disjuntores
$\boldsymbol{\delta}$	Vetor de estados de ângulo das barras
\mathbf{v}	Vetor de estados das magnitudes de tensão
\mathbf{t}	Vetor de estados dos fluxos de potência ativa
\mathbf{u}	Vetor de estados dos fluxos de potência reativa

$z_{m_t,ij}$	Medidas de fluxos de potência ativa no ramo $i - j$
$z_{m_u,ij}$	Medidas de fluxos de potência reativa no ramo $i - j$
t_{ij}	Variável de fluxo de potência ativa no ramo $i - j$
u_{ij}	Variável de fluxo de potência reativa no ramo $i - j$
$z_{p,i}$	Medida de injeção de potência ativa na barra i
$z_{q,i}$	Medida de injeção de potência reativa na barra i
$\bar{\Omega}_i$	Conjunto de ramos convencionais conectados a barra i
$\bar{\Gamma}_i$	Conjunto de ramos chaveáveis incidentes a barra i
$\eta_{m_p,i}$	Erros aleatórios das medidas de injeção de potência ativa na barra i
$\eta_{m_q,i}$	Erros aleatórios das medidas de injeção de potência reativa na barra i
t_{ik}	Variável de fluxo de potência ativa no ramo $i - k$
u_{ik}	Variável de fluxo de potência reativa no ramo $i - k$
t_{il}	Variável de fluxo de potência ativa no ramo $i - l$
u_{il}	Variável de fluxo de potência reativa no ramo $i - l$
$\mathbf{h}_o(\cdot)$	Vetor de funções das restrições operacionais
N_o	Número de restrições operacionais
p_i	Injeção de potência ativa na barra i
q_i	Injeção de potência reativa na barra i
δ_ϕ	Vetor das barras de referência do sistema
n_i	Número de ilhas da sub-rede
$\mathbf{h}_s(\cdot)$	Vetor de funções das restrições estruturais
N_s	Número de restrições estruturais
$\bar{\mathbf{x}}$	Vetor de informações <i>a priori</i>
\mathbf{P}	Matriz de covariância das informações <i>a priori</i>
n_{mr}	Número de medidas restrições estruturais e operacionais
\mathbf{V}	Matriz de covariância de $\boldsymbol{\lambda}$
λ_i^N	Multiplicador de Lagrange normalizado
$\lambda_{o_{max}}^N$	Máximo multiplicador de Lagrange normalizado associado as restrições operacionais
\mathbf{R}_i	Matriz de covariância atualizada para hipótese alternativa

$\Delta \mathbf{R}_i$	Matriz de atualização
\mathcal{H}_o	Hipótese básica
\mathcal{H}_i	Hipótese alternativa
n_{ds}	Número de disjuntores suspeitos
N_h	Número de hipóteses viáveis
k	Número de disjuntores que alteram seu <i>status</i> na \mathcal{H}_i com relação a \mathcal{H}_o
$f(\cdot)$	Função de densidade de probabilidade
$P(\cdot)$	Probabilidade condicional a <i>posteriori</i>
Ω_i	Matriz de covariância do vetor z_i para hipótese i
α	Expoente da função de densidade de probabilidade
\mathbf{M}	Matriz do Tableau
\mathbf{W}	Matriz inversa da Matriz do Tableau

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.2.1	Estimação de Estados em Sistemas de Potência	18
1.2.2	Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra	19
1.2.3	Erros de Topologia	20
1.3	CONTRIBUIÇÕES / OBJETIVOS	22
1.4	ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRA	23
2.1	INTRODUÇÃO	23
2.2	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	23
2.3	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRA	28
2.3.1	Formulação da EENSB via problema de Otimização	29
2.3.2	Restrições Operacionais e Estruturais	30
2.3.3	Incorporação de Informações a Priori	31
2.4	CONCLUSÕES	34
3	ERROS DE TOPOLOGIA	35
3.1	INTRODUÇÃO	35
3.2	ERROS DE TOPOLOGIA	35
3.2.1	Caracterização e Efeitos dos Erros de Topologia	35
3.2.2	Tipos de Erros de Topologia	36
3.3	DETECÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA MULTIPLICADORES DE LAGRANGE NORMALIZADOS	37
3.3.1	Interpretação dos Multiplicadores de Lagrange	37
3.3.2	Detectabilidade dos Erros de Topologia	39
3.4	IDENTIFICAÇÃO DOS ERROS DE TOPOLOGIA	40
3.4.1	Identificação de Erros de Topologia via Teorema de Bayes	41
3.4.1.1	Hipótese básica e topologia presumida	42
3.4.1.2	Hipótese alternativa e sistema linear modificado	42
3.4.1.3	Probabilidade de ocorrência de hipóteses sobre a topologia da rede	45
3.4.1.4	Problemas numéricos associados	47
3.5	CONCLUSÕES	48
4	IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA ANÁLISE DO EXPOENTE DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE	49

4.1	INTRODUÇÃO	49
4.2	MÉTODO PARA CONTORNAR DIFICULDADES NUMÉRICAS DA APLICAÇÃO DO TEOREMA DE BAYES	49
4.2.1	Identificação da Hipóteses de Máxima Probabilidade $P(\mathcal{H}_i \mathbf{z})$	49
4.2.2	Cálculo do Determinante	50
4.3	CÁLCULO DO EXPOENTE PARA UMA DADA HIPÓTESE ALTERNATIVA	51
4.3.1	Aplicação Teorema Sherman-Morrison-Woodbury para Cálculo das Hipóteses Alternativas	52
4.4	IDENTIFICAÇÃO DA TOPOLOGIA CORRETA VIA CRITÉRIO DO MÍNIMO EXPOENTE	54
4.5	ALGORITMO PROPOSTO	55
4.6	OBSERVAÇÕES SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	56
4.7	CONCLUSÕES	56
5	RESULTADOS E SIMULAÇÕES	58
5.1	INTRODUÇÃO	58
5.2	METODOLOGIA PARA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS E ANÁLISES	60
5.3	APLICAÇÃO TUTORIAL EM SISTEMA DE PEQUENO PORTE	63
5.4	SISTEMA DE 24 BARRAS DO IEEE	68
5.4.1	Erros Simples	69
5.4.2	Erros Múltiplos	71
5.5	SISTEMA DE 30 BARRAS DO IEEE	73
5.5.1	Erros de Exclusão	74
5.5.2	Erros de <i>Bus-Split</i>	75
5.5.3	Casos Especiais	76
5.6	ERROS ALEATÓRIOS	77
5.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS	80
5.8	CONCLUSÕES	80
6	CONCLUSÃO	82
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
6.2	TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS	86
	APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA TESTE DE PEQUENO PORTE	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Para manter a estabilidade do sistema elétrico, evitar sobrecargas, quedas de tensão e outros problemas que possam levar a interrupções de energia ou danos aos equipamentos elétricos, é fundamental que a operação dos sistemas de energia elétrica seja bem gerenciada. Para isso, é necessário empregar estratégias eficazes de controle e operação.

Considerando esse desafio, foram desenvolvidas ferramentas como a Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP). Essa ferramenta permite que os operadores do sistema elétrico monitorem a condição operativa do sistema em tempo real, usando informações obtidas por meio de sensores, medidores e outros dispositivos (MONTICELLI, 1999).

A EESP fornece subsídios para a análise de segurança do sistema elétrico, permitindo que os operadores identifiquem possíveis falhas e perturbações, e tomem medidas para evitar interrupções e minimizar os danos em caso de falhas no fornecimento de energia elétrica.

Para diagnóstico e análise das informações na operação em tempo real, o sistema de supervisão utiliza diversos aplicativos, que determinam a topologia da rede elétrica com base nas posições de chaves e disjuntores; detectam medidas claramente errôneas para evitar comprometer a modelagem e fornecem um modelo confiável da rede em tempo real. Assim, procuram garantir que o operador possa avaliar o estado atual de operação do sistema e verificar a segurança do sistema diante de contingências pré-selecionadas que possam vir a ocorrer.

Atualmente, os dados do sistema são obtidos por um conjunto de telemedidas, fornecidas por sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e de medição fasorial. O estimador é capaz de processar diversos tipos de medidas e, no caso das medidas analógicas, considera a existência dos erros aleatórios inerentes às mesmas. Entretanto, erros de maior magnitude, não compatíveis com as hipóteses adotadas pelo modelo de medição, podem também ocorrer. Estes últimos são classificados em três tipos: os erros grosseiros em medidas, os erros em parâmetros e os erros de topologia.

Os erros grosseiros em medidas surgem devido a falhas nos canais de comunicação, equipamentos de medição defeituosos, erros na modelagem de pseudo-medidas e outros fatores, e seu grau de imprecisão é maior do que o previsto no modelo de medição. Atualmente, estimadores eficientes incorporam em seus algoritmos o processamento de alguns tipos de erros grosseiros, e esse problema tem sido amplamente discutido na literatura (QUINTANA, V.; SIMÕES COSTA; MIER, 1982; MONTICELLI, 1999; ABUR; EXPOSITO, 2004).

Na EESP, usualmente supõe-se que os parâmetros utilizados no modelo da rede elétrica são livres de erros. No entanto, existem várias situações em que esses valores

podem não ser confiáveis, tais como erro nos dados de fabricação de componentes da rede, alterações na rede que não foram atualizadas corretamente na base de dados, cálculos incorretos ou muito simplificados dos parâmetros da rede, entre outros (ZARCO; EXPÓSITO, 2000; BRETAS; CASTILLO; LONDON, 2012).

Quando parâmetros incorretos são utilizados, isso pode ter o mesmo efeito de um conjunto de erros correlacionados, atuando em todas as medições relacionadas ao ramo em questão. Portanto, embora a obtenção de valores precisos dos parâmetros da rede não seja uma parte intrínseca do processo de EESP, é crucial garantir que esses valores sejam confiáveis para evitar que o sistema opere além da margem de segurança (ZARCO; EXPÓSITO, 2000).

O erro de topologia ocorre quando não é possível reconhecer corretamente a configuração da rede a partir das informações sobre o *status* de chaves e disjuntores. Esse tipo de erro pode comprometer os resultados de aplicativos executados posteriormente, tais como a própria estimação de estados, a análise de contingências e o fluxo de potência em tempo real (WU, F.; LIU, 1989; SIMÕES COSTA; LEÃO, 1993). Isso se deve ao fato de que todas essas estimativas são feitas com base em uma configuração de rede que pode ser diferente daquela efetivamente usada na operação corrente. Pesquisas relacionadas à identificação de erros de topologia tiveram início na década de 80, utilizando a modelagem barra-ramo da rede (LUGTU *et al.*, 1980; WU, F.; LIU, 1989).

Para a detecção e identificação de erros de topologia é necessária uma modelagem detalhada das subestações da rede. Esta forma de representação é possibilitada pela inclusão de informações sobre arranjos e *status* de dispositivos chaveáveis internos às subestações (CLEMENTS, K.A.; DAVIS, P., 1988; MONTICELLI; GARCIA, 1991).

A modelagem de partes da rede no nível de seção de barra é conhecida como Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra (EENSB). A partir das informações obtidas pela EENSB, aplicada a partes suspeitas da rede é possível detectar e identificar erros de topologia (CLEMENTS, K.A.; SIMÕES COSTA, 1998; LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003; SILVA, N. S.; SIMÕES COSTA, 2015).

Considerando o detalhamento das condições internas das subestações, algoritmos de identificação de erros de topologia têm sido propostos. Entretanto, alguns destes procedimentos apresentam custo computacional considerável e possibilidade de dificuldades numéricas. Verifica-se portanto que este é um problema ainda em aberto, que tem despertado grande interesse de pesquisadores da área em anos recentes (LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003; LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, K.A., 2004; NABEYAMA; ASADA; MATRAKAS, 2020; YIXI *et al.*, 2022).

Nesse sentido, assim como nas referências supracitadas, o método proposto também se apoia em modelos detalhados das condições internas das subestações e na aplicação de testes de hipóteses baseados no Teorema de Bayes (PAPOULIS; PILLAI, 2002). Entretanto, o cálculo explícito da probabilidade a posteriori de cada hipótese alternativa condicionada

ao vetor de medidas, empregado em (LOURENÇO, E. M., 2001; LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003) revela-se, em vários casos, muito suscetível a problemas numéricos.

A solução adotada para contornar os problemas numéricos acima mencionados tem por base a constatação de que a determinação da topologia mais aderente às medidas analógicas disponíveis não requer necessariamente o valor das probabilidades das hipóteses; ao invés disso, a mesma conclusão pode ser obtida a partir do expoente da função densidade de probabilidade de cada hipótese alternativa. O método proposto é desenvolvido em torno deste conceito, e também contempla a utilização do teorema de Sherman-Morrison-Woodbury (GOLUB; VAN LOAN, 2013) para evitar re-estimações sucessivas e o conseqüente aumento de esforço computacional. Os resultados confirmam que o objetivo desejado de contornar dificuldades numéricas é alcançado, e que as taxas de sucesso obtidas para a identificação da topologia operativa em um número significativo de simulações são amplamente satisfatórias.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica dos tópicos relacionados à identificação de erros de topologia em sistemas elétricos de potência. Inicialmente, são apresentadas informações sobre avanços alcançados na EESP, EENSB e Erros de Topologia (ETs).

1.2.1 Estimação de Estados em Sistemas de Potência

A EESP desempenha papel fundamental para subsidiar a segurança e a confiabilidade dos sistemas elétricos de potência (SEP), visto que é a partir das informações advindas da EESP que os centros de controle e operação do sistema conseguem conhecer a condição de operação corrente do sistema.

Na década de 1960, informações sobre as posições dos dispositivos seccionadores nas subestações e subsídios para implementar o controle automático da geração eram as únicas disponíveis em tempo real para o operador. Então o operador era informado sobre a frequência do sistema, a configuração da rede e um conjunto limitado de medidas de potência advindas do controle de geração (SCHWEPPE, F. C.; WILDES, 1970; SCHWEPPE, F. C.; ROM, 1970; SCHWEPPE, F. C., 1970).

Com o desenvolvimento de pesquisas voltadas para a EESP, tornou-se também possível a aquisição de medidas de quantidades analógicas capazes de refletir a condição operativa atual do sistema. Esses valores, obtidos em tempo real e armazenados em um banco de dados, permitem a análise da segurança da operação e a detecção de situações anômalas de funcionamento.

Inicialmente fornecidas pelo sistema SCADA, as telemedidas apresentavam informações sobre as medidas de magnitude de tensão, fluxo e injeções de potência, bem como o *status* dos disjuntores e chaves das subestações. Estas medidas, além de numerosas dada

a grande dimensão dos sistemas de potência, apresentam ruídos inerentes ao processo de medição e apresentam outros desafios relacionados à modelagem e confiabilidade do processo de estimação de estados.

Partindo da hipótese que os dados disponíveis garantem a observabilidade da rede (CLEMENTS; WOLLENBERG, 1975), o método mais comum para estimar os estados do sistema é o baseado nos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), que estima as variáveis fundamentais para a operação do sistema minimizando a soma ponderada do quadrado dos resíduos. Esse método pode ser resolvido principalmente usando o método da Equação Normal, o método do Tableau Esparsa ou técnicas ortogonais (SCHWEPPE, F.; HANDSCHIN, 1974; GJELSVIK; AAM; HOLTEN, 1985; QUINTANA, V.; SIMÕES COSTA; MIER, 1982).

Ao longo dos anos, pesquisas têm sido realizadas e metodologias desenvolvidas para lidar com a presença de erros nas medidas. Inicialmente, os métodos que filtravam os erros exigiam um alto custo computacional, uma vez que normalmente incluíam um estágio de pós-processamento. Merrill e Schweppe (1971) propuseram a utilização de modelos não-quadráticos para a estimação de estados e esses permitiram contornar esse problema, pois esses modelos são robustos diante da presença de erros grosseiros, o que aumenta a confiabilidade do processo de estimação de estados (MONTICELLI; GARCIA, 1983; MONTICELLI; WU, F. F.; YEN, 1986; WU, F. F., 1990). Embora essas propostas tenham um baixo custo computacional, os métodos mencionados podem resultar em problemas de convergência e de mínimos locais. Por esse motivo, ao longo dos anos, outros métodos de estimação têm sido propostos. Alguns desses métodos utilizam conceitos da Teoria da Informação, como Correntropia e Janelas de Parzen (MIRANDA; SANTOS, A.; PEREIRA, 2009; FREITAS, 2020; MENEGHETTI *et al.*, 2020; PESTEH *et al.*, 2019; WU, W. *et al.*, 2011).

1.2.2 Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra

Para obter os estados estimados do sistema, é crucial que haja medições em todo o sistema, tornando-o suficientemente observável. A análise de observabilidade compreende um conjunto de funções que avaliam se a quantidade e a localização das medidas disponíveis são adequadas para a estimação do estado do sistema (KRUMPHOLZ; CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W., 1980; CLEMENTS, K. A.; KRUMPHOLZ; DAVIS, P. W., 1981; SIMÕES COSTA; LOURENÇO, E.; CLEMENTS, K.A., 2002).

Quando a observabilidade do sistema é confirmada, a topologia da rede no modelo barra-ramo (que reproduz o diagrama unifilar da rede), obtida pelo configurador de rede, juntamente com as medidas filtradas, são utilizadas para estabelecer o modelo de medição para a estimação de estados (ASADA, 2004).

Levando em conta que ramos convencionais têm características diferentes de ramos com chaves seccionadoras e disjuntores, Monticelli e Garcia (1991) propuseram um

modelo que representa o fluxo de potência através dos ramos que contêm dispositivos chaveáveis, considerando-os como novas variáveis de estado. Esse modelo permitiu a representação explícita dos *status* desses dispositivos e a modelagem detalhada das subestações, adicionando informações à operação em tempo real.

A inclusão do fluxo de potência em ramos chaveáveis sob a forma de pseudomedidas no processo de estimação de estados é denominada Estimação de Estados Generalizada (EEG), a qual possibilita a observação dos *status* de chaves e disjuntores nas subestações (MONTICELLI; GARCIA, 1991; MONTICELLI, 1993a, 1993b).

Outros autores propuseram a inserção de dados sobre os *status* de chaves e disjuntores sob a forma de restrições operacionais impostas ao problema de estimação de estados (CLEMENTS, K.A.; SIMÕES COSTA, 1998). Essas restrições operacionais modelam a condição de operação dos dispositivos chaveáveis, bem como as restrições estruturais que representam as barras de injeção nula e ângulo de referência. Levando em conta que, com essas restrições de igualdade, é possível a observação das condições dos dispositivos das subestações no nível de seção de barra, Silva e Simões Costa (2015) referem-se a esta abordagem como estimação de estados no nível de seção de barra (EENSB).

1.2.3 Erros de Topologia

Para o estimador de estados, o modelo barra-ramo do sistema, sintetizado a partir de dados sobre os *status* de chaves e disjuntores pelo configurador de redes, presume a ausência de erros de topologia. No entanto, se houver imprecisões nas informações fornecidas ao configurador, é provável que ele forneça uma topologia com erros. Esses erros geralmente se manifestam na EESP como erros generalizados em medidas.

As primeiras pesquisas relacionadas a erros de topologia tinham por base o modelo barra-ramo convencional e exploravam a redundância das medidas analógicas para identificar o *status* de ramos da rede por meio de comparação de informações. No entanto, esse método é limitado a um único nível de testes de linhas duvidosas (LUGTU *et al.*, 1980).

No estudo de Clements e Davis (1988), é apresentada uma metodologia para avaliar a detectabilidade e identificabilidade de erros de topologia. Nesta metodologia, os vetores de resíduos derivados da estimação de estados são analisados para a detecção e identificação de erros de topologia. De modo semelhante à interpretação geométrica utilizada para erros de medição, um teste de colinearidade é realizado entre a matriz de sensibilidade residual e a matriz de incidência de medição para o ramo (CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W., 1986).

Em Simões Costa e Leão (1993) é proposta uma metodologia que quantifica a correlação entre medidas suspeitas de conter erros grosseiros e ramos sujeitos a erros de configuração mediante índices apropriados. Quanto mais próximo de 1 for esse índice, maior é a possibilidade de que a anomalia seja atribuída a ETs. Nesse artigo, também é feita a classificação dos erros de topologia em simples e múltiplos, incluindo erros como

exclusão, inclusão, *bus-split* e *by-pass*.

O trabalho de Simões Costa e Clements (1998) utilizando a modelagem da EENSB propõe uma metodologia para a identificação de erros de topologia com base no uso de multiplicadores de Lagrange normalizados, estendendo desta forma o conceito de resíduos de medição normalizados então já empregados no processamento de erros em medidas analógicas.

Através de testes estatísticos de hipóteses, é possível conceber métodos para identificar qual das hipóteses sobre a configuração da rede é a verdadeira. Para isso, Lourenço (2001) utiliza os conceitos do Teorema de Bayes e dos multiplicadores de Lagrange normalizados para calcular qual das hipóteses possui a maior probabilidade condicional de ser a correta (LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003; LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, K.A., 2004).

Simões Costa, Lourenço e Vieira (2005) modelam a rede elétrica no nível de seção de barra e utilizam o estimador de estados ortogonal via rotação de Givens no processo de detecção e identificação de erros de topologia. Esse método utiliza o teste de hipóteses baseado no teorema de Bayes para avaliar a probabilidade de cada configuração de topologia ser a correta.

Em um outro esforço de pesquisa sobre a identificação de erros de topologia usando modelagem no nível de seção de barra, Lourenço, Clements e Simões Costa (2002) apresentaram resultados da implementação de testes de colinearidade baseados na projeção ortogonal dos multiplicadores de Lagrange no espaço gerado pelas colunas da matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange, inicialmente apenas com o propósito de detectar o conjunto de disjuntores suspeitos de terem seus status reportados incorretamente. Considerando a simplicidade e rapidez de execução do teste, este foi estendido em Lourenço *et al.* (2005) para permitir a identificação de ETs. A extensão consiste de duas etapas: a primeira para detecção da presença de erros, enquanto na segunda, o teste de colinearidade é repetido várias vezes com o objetivo de contrair o conjunto de disjuntores suspeitos até chegar ao subconjunto de disjuntores com o *status* incorreto.

Com o intuito de assegurar condições topológicas favoráveis para a identificação de erros de topologia, os trabalhos de Simões Costa, Lourenço e Colzani (2007) e de Coelho, Lourenço e Simões Costa (2013) utilizam os multiplicadores de Lagrange para determinar zonas de anomalia, porções relevantes da rede modeladas em detalhes, que garantem a delimitação adequada de regiões contendo disjuntores erroneamente modelados.

Em Lourenço, Coelho e Pal (2015) é apresentado o uso de multiplicadores de Lagrange normalizados associado a testes geométricos para processar simultaneamente erros de topologia da rede e dados grosseiros em medições analógicas.

Silva *et al.* (2016) e Meneghetti *et al.* (2020) usam o conceito de coestimação de estados e topologia, para obter uma topologia confiável mesmo na presença de erros nos *status* de disjuntores e medidas analógicas. No que diz respeito aos sistemas de distribuição,

Nabeyama, Asada e Matrakas (2020) apresentam o uso de técnicas de inteligência artificial para reconhecer a topologia da rede a partir de dados de medições analógicas.

Em que pesem as contribuições sumarizadas acima, a complexidade do tema ainda o mantém em aberto a novos esforços de pesquisa. É neste contexto que se enquadra o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

1.3 CONTRIBUIÇÕES / OBJETIVOS

Considerando que a presença de erros de topologia pode afetar significativamente a precisão da estimação de estados, neste trabalho propõe-se a identificação da topologia operativa em sistemas de transmissão, utilizando teste de hipóteses via análise do expoente da função densidade de probabilidade (fdp) associada à probabilidade de cada hipótese sobre a topologia da rede, condicionada às medidas disponibilizadas pelo plano de medição, obtido utilizando o teorema de Bayes.

Para atingir o objetivo central dessa dissertação temos como principais contribuições:

1. Formulação do cálculo do expoente para as hipóteses alternativas utilizando a aplicação do Teorema de Sherman - Morrison - Woodbury;
2. Identificação da topologia operativa real via critério do mínimo expoente da função densidade de probabilidade em sistemas de transmissão.

1.4 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação possui seis capítulos, incluindo este introdutório e de revisão bibliográfica. Os seis capítulos restantes estão organizados conforme descrição a seguir.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos da estimação de estados convencional do sistema de potência e da EENSB.

No capítulo 3, é apresentado o conceito de Erros de Topologia (ETs), os diferentes tipos de ETs, seus impactos na estimação de estado, e as formas para sua detecção e identificação, consolidadas na literatura.

No Capítulo 4, é apresentado o método que utiliza o cálculo do mínimo expoente da fdp como uma abordagem para superar as dificuldades numéricas associadas à identificação de ETs por meio de metodologias que usam o cálculo explícito da máxima probabilidade associada à hipótese alternativa correta.

No Capítulo 5, mostram-se os resultados obtidos nas simulações dos erros de topologia nos sistemas-teste, para a simulação de diferentes tipos de ETs.

Por fim, o Capítulo 6 é dedicado às conclusões e às contribuições relevantes deste estudo, incluindo sugestões para estudos futuros.

2 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRA

2.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de assegurar a confiabilidade do SEP, os sistemas de controle e operação dos centros de operação realizam a análise e monitoramento da segurança do sistema. Para isso, a EESP fornece em tempo real uma base de dados contendo informações sobre as grandezas elétricas do sistema. Para alcançar esse resultado, a EESP conta com subfunções que permitem a análise da segurança e observação de situações de contingência.

Uma dessas subfunções é o configurador de rede, responsável por determinar a topologia da rede elétrica. Já o banco de dados, fornece ao estimador de estados os parâmetros da rede, enquanto os aplicativos de pré-filtragem utilizam as telemidas para iniciar o processo de detecção e remoção de medidas claramente errôneas. O estimador de estados, por sua vez, utiliza um conjunto de programas que desempenham o processamento de dados analógicos a fim de obter a melhor estimativa.

Além disso, o estimador realiza o processamento de erros grosseiros, identificando e corrigindo medidas inconsistentes ou discrepantes. Outra subfunção ligada à estimação de estados analisa a observabilidade do sistema, ou seja, verifica se é possível determinar os estados do sistema com base nas medidas disponíveis. Se a rede elétrica é observável, o estimador de estados determina os estados do sistema, ou seja, calcula os valores mais prováveis para magnitude e ângulo de todas as barras, os estados do sistema.

Até a década de 90, esse conjunto de estados era composto apenas pelas as grandezas de magnitude e ângulo das tensões nas barras. No entanto, com a formulação apresentada em (MONTICELLI, 1993a), passou a ser possível representar mais detalhadamente certas subestações, que assim deixam de ser de ser tratadas como um único nó elétrico. Esse avanço na modelagem permitiu considerar as características individuais das subestações e melhorar a capacidade de processar erros de topologia.

Posteriormente, Clements e Simões Costa (1998) demonstraram que informações referentes aos *status* dos dispositivos chaveáveis podem ser incluídas no problema de estimação de estados como restrições de igualdade. Essa abordagem possibilitou acesso às informações de barras e seções de barras e deu origem a EENSB, a qual permite a representação explícita de ramos contendo dispositivos chaveáveis, proporcionando uma visão mais detalhada do funcionamento do sistema elétrico.

Este capítulo apresenta alguns conceitos fundamentais da estimação de estados convencional e detalhes que constroem a estimação de estados no nível de seção de barra.

2.2 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Tradicionalmente, a estimação de estados é realizada considerando uma topologia de rede modelada no nível barra-ramo, juntamente com um plano de medição formado por

medidas provenientes do sistema SCADA. Essas medidas devem ser redundantes e incluem injeções de potência ativa e reativa, fluxos de potência ativa e reativa e magnitudes de tensão.

Considerando um sistema elétrico com N barras e N_m medidas, o modelo de medição que relaciona as variáveis de estados, as quantidade medidas e os erros de medição, pode ser expresso da seguinte forma:

$$\mathbf{z}_m = \mathbf{z}_0 + \boldsymbol{\eta}_m \quad (1)$$

em que \mathbf{z}_m é o vetor de medidas de ordem $N_m \times 1$, \mathbf{z}_0 é o vetor $N_m \times 1$ dos valores verdadeiros das quantidades medidas e $\boldsymbol{\eta}_m$ é o vetor $N_m \times 1$ dos erros aleatórios de medição e representa a imprecisão das quantidades medidas.

Os valores verdadeiros das quantidades medidas são desconhecidos. Para serem estimados, considera-se a equação (2) que relaciona os estados verdadeiros do sistema e os valores verdadeiros das medidas:

$$\mathbf{z}_0 = \mathbf{h}_m(\mathbf{x}) \quad (2)$$

onde \mathbf{x} é o vetor das variáveis de estado, de dimensão $n \times 1$, com $n = 2N - 1$, constituído usualmente por N magnitudes de tensão de barra e $N - 1$ ângulos de fase de tensão de barra, já que uma das barras do SEP é escolhida como referência angular. O vetor $\mathbf{h}_m(\cdot)$ é formado por funções não-lineares, obtidas pela aplicação das leis de Ohm e de Kirchhoff às variáveis de estado, tendo dimensão $N_m \times 1$.

Para estimar os estados, supõe-se inicialmente a ausência de medidas contaminadas por erros grosseiros e que os valores dos erros fornecidos pelos medidores situam-se em uma faixa de tolerância aceitável, de acordo com sua classe de exatidão.

Dito isso, temos então o modelo de medição:

$$\mathbf{z}_m = \mathbf{h}_m(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\eta}_m \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} z_{m_1} \\ z_{m_2} \\ \vdots \\ z_{m_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{m_1}(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_{m_2}(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_{m_m}(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_{m_1} \\ \eta_{m_2} \\ \vdots \\ \eta_{m_m} \end{bmatrix}$$

De acordo com as considerações anteriores, admite-se que o vetor de erros, $\boldsymbol{\eta}_m$, possui média zero e que os erros de medição não são correlacionados. Portanto, a matriz de covariância correspondente, \mathbf{R}_m é diagonal, e seus elementos são definidos pelas variâncias dos erros de medição, calculados com base na precisão dos medidores.

$$E(\boldsymbol{\eta}_m) = 0 \quad \text{e} \quad E(\boldsymbol{\eta}_m \boldsymbol{\eta}_m^T) = \mathbf{R}_m \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_m = \begin{bmatrix} \sigma_{m_1}^2 & & & \\ & \sigma_{m_2}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{m_m}^2 \end{bmatrix}$$

onde $E\{\cdot\}$ representa o operador esperança matemática e \mathbf{R}_m é a matriz $N_m \times N_m$ de covariância dos erros de medição, composta pelas variâncias das medidas $\sigma_{m_i}^2$, cujo i -ésimo elemento equivale à variância do medidor i .

Conforme mencionado, um importante aspecto da estimação é relacionado à observabilidade da rede elétrica. Nesse sentido, é importante considerar o grau de redundância global, denotado por ρ_r .

$$\rho_r = \frac{N_m}{n} = \frac{N_m}{2N - 1} \quad (5)$$

Nota-se de (5) que uma condição necessária para estimar o estado do sistema é que $N_m \geq n$. Na prática, os valores de ρ_r devem refletir boa redundância e medidas distribuídas adequadamente pela rede elétrica, pois isto favorece a estimação de estados, a detecção e identificação de erros, sejam eles de topologia ou erros grosseiros.

Caso as características das N_m medidas não sejam suficientes para atingir a observabilidade, informações preliminares dos estados, injeções de potência em barras de transferência, estudos de previsão de carga, e demais dados provenientes de informações conhecidas, informações *a priori*, podem ser utilizadas para complementar o plano de medição de forma que os estados possam ser estimados.

A estimação de estados é formulada para obter o estado estimado do sistema, $\hat{\mathbf{x}}$, e para isso utiliza de métodos de otimização que buscam minimizar os resíduos de medição, \mathbf{r}_m . Dentre os métodos utilizados para obter as estimativas dos estados, o método mais empregado é o método baseado no critério de Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), cuja formulação tem o objetivo de minimizar a seguinte função:

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \quad (6)$$

O MQP objetiva minimizar a soma dos quadrados dos resíduos de estimação, ponderados pelo inverso das variâncias, $\sigma_{m_i}^2$.

$$J_m(\hat{\mathbf{x}}) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{r_{m_i}^2}{\sigma_{m_i}^2} = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{[\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})]^2}{\sigma_{m_i}^2} \quad (7)$$

$$J_m(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m \quad (8)$$

onde r_{m_i} é o resíduo de estimação da medida i , obtido pela relação entre z_{m_i} e h_{m_i} , sendo z_{m_i} o valor da medida i e h_{m_i} a função que relaciona o vetor $n \times 1$ de estados estimados $\hat{\mathbf{x}}$ ao valor verdadeiro da grandeza medida i .

Observa-se de (7) que a ponderação dos resíduos é dada pelo inverso da variância $\sigma_{m_i}^2$, associada à medida i , que também pode ser representada pela matriz \mathbf{R}_m^{-1} . Nota-se de

(7) que, quanto mais preciso for o medidor, menor a variância, ou seja, melhor a exatidão e relevância na solução da estimação de estados. Usando notação vetorial, a função-objetivo a ser minimizada pelo método MQP é dada como:

$$\min_{\hat{\mathbf{x}}} J_m(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})]^T \mathbf{R}_m^{-1} [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})] \quad (9)$$

Para a solução do problema (9) utiliza-se a primeira condição de otimalidade e então tem-se:

$$\left. \frac{\partial J_m(\hat{x})}{\partial x} \right|_{x=\hat{\mathbf{x}}} = 0 \Rightarrow \mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})] \quad (10)$$

onde $\mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})}{\partial x} \right|_{x=\hat{\mathbf{x}}}$ é a matriz Jacobiana de $\mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})$, \mathbf{H}_m tem dimensão $N_m \times n$. A expressão (10) é formada por um sistema de equações não-lineares. Portanto, para sua solução é necessário o uso de métodos iterativos em que a estimativa atual do vetor de estado, \mathbf{x}^k , é atualizada a cada iteração, pelo vetor de incremento de estados $\Delta \mathbf{x}$, como segue:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x} \quad (11)$$

Para se obter a solução, utiliza-se o Método de Gauss-Newton, que é equivalente a se fazer a linearização de $\mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})$ em torno de um ponto \mathbf{x}^k pela série de Taylor, desprezando os termos de ordem superior à primeira ordem (MONTICELLI, 1999), e obtém-se:

$$\mathbf{h}_m(\mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}) \approx \mathbf{h}_m(\mathbf{x}^k) + \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) \Delta \mathbf{x} \quad (12)$$

Usando (12) em (6) obtém-se:

$$\Delta \mathbf{z}_m = \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}^k + \boldsymbol{\eta}_m \quad (13)$$

onde $\Delta \mathbf{z}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)$ é o vetor de resíduos de medição. Em posse dessas condições tem-se então o modelo de medição linearizado e a nova função objetivo:

$$\Delta \mathbf{z}_m = \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}^k + \boldsymbol{\eta}_m$$

$$E(\boldsymbol{\eta}_m) = 0 \quad E(\boldsymbol{\eta}_m \boldsymbol{\eta}_m^T) = \mathbf{R}_m$$

$$J_m(\Delta \mathbf{x}) = [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) \Delta \mathbf{x}]^T \mathbf{R}_m^{-1} [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) \Delta \mathbf{x}] \quad (14)$$

Aplicando a primeira condição de otimalidade, chega-se a:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \Delta \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = 0 \Rightarrow \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)^T \mathbf{R}_m^{-1} [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}] = 0$$

$$[\mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)] \Delta \mathbf{x} = [\mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)^T \mathbf{R}_m^{-1}] \Delta \mathbf{z}_m \quad (15)$$

A expressão apresentada na equação (15) é conhecida como a Equação Normal de Gauss. Essa equação representa o sistema linear a ser resolvido a cada iteração para

determinar o vetor de incrementos do vetor de estados, denotado por $\Delta \mathbf{x}$. O processo é iterativo e continua até que seja alcançada um valor de $\Delta \mathbf{x}$ pré-definido.

A partir da equação (15), podemos concluir que, para realizar a estimação de estados, é necessário que a matriz $\bar{\mathbf{G}} = \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)$, conhecida como matriz ganho ou matriz de informação, seja simétrica não singular.

Embora amplamente utilizado e geralmente produza resultados satisfatórios, o método da Equação Normal de Gauss pode apresentar problemas de instabilidade numérica, especialmente quando a matriz Jacobiana $\mathbf{H}_m(\mathbf{x}^k)$ é mal condicionada.

Para contornar essa importante questão foram desenvolvidos métodos numericamente mais robustos. Esses métodos incluem abordagens baseadas em fatoração ortogonal, como o método de solução sequencial ortogonal baseado em rotações de Givens, bem como métodos não ortogonais, como o método da Matriz Aumentada de Hachtel (SIMÕES-COSTA; QUINTANA, V. H., 1981).

O método do Matriz Aumentada de Hachtel, também chamado de Tableau Esperso, escolhido para a implementação neste trabalho, tem como fator positivo à sua melhor estabilidade em sistemas mal condicionados e sua flexibilidade para a consideração de restrições quando comparado com o método da Equação Normal (GJELSVIK; AAM; HOLTEN, 1985). Seja a equação que representa os resíduos de medição, reescrita da forma linearizada (6) :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_m &= \Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m \Delta \hat{\mathbf{x}} \\ J_m(\Delta \mathbf{x}) &= [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) \Delta \mathbf{x}]^T \mathbf{R}_m^{-1} [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) \Delta \mathbf{x}] \end{aligned} \quad (16)$$

Para formação do Tableau Esperso tem-se que o problema de estimação de estados é formulado como um problema de otimização restrita, cuja função objetivo é a soma ponderada dos quadrados dos resíduos e as restrições são impostas pelo modelo de medição:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m \\ \text{sujeito a} \quad & \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

A função Lagrangeana aplicada à formulação (17) é dada por :

$$\mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda}_m) = \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \boldsymbol{\lambda}_m [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m] \quad (18)$$

onde $\boldsymbol{\lambda}_m$ é o vetor dos multiplicadores de Lagrange correspondentes à equação que envolve os resíduos de estimação, vetor de dimensão $N_m \times 1$. Aplicando as condições de otimalidade de primeira ordem é obtido o conjunto de equações não-lineares mostrado em (19).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda}_m)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} &= -\mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}) \boldsymbol{\lambda}_m = \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda}_m)}{\partial \mathbf{r}_m} &= \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m - \boldsymbol{\lambda}_m = \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda}_m)}{\partial \boldsymbol{\lambda}_m} &= \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (19)$$

Da segunda e terceira equações de (19), tem-se que:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_m &= \mathbf{R}_m \boldsymbol{\lambda}_m \\ \mathbf{z}_m &= \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{R}_m \boldsymbol{\lambda}_m \end{aligned} \quad (20)$$

Rescrevendo as equações não-lineares (19) e aplicando o método de Newton, considerando a eliminação da variável \mathbf{r}_m , o sistema linear a ser resolvido a cada iteração é dado por:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_m \Delta \boldsymbol{\lambda}_m + \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}) \Delta \boldsymbol{\lambda}_m &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (21)$$

Na forma matricial o sistema é escrito

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}^k) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\lambda}_m \\ \Delta \hat{\mathbf{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Assim como no método da Equação Normal, o problema apresentado em (22) é resolvido de forma iterativa, sendo que nesse caso os valores de $\hat{\mathbf{x}}$ é que são incrementados. A presente abordagem tem como benefício o fato de evitar o cálculo explícito da matriz ganho, melhorando sensivelmente o condicionamento numérico do problema.

2.3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRA

De acordo com o mencionado na seção 1.2.2, ramos que possuem dispositivos chaveáveis (disjuntores e chaves) apresentam características que os distinguem dos ramos convencionais, seja pela atualização de seus *status*, seja pelos valores de impedância. Levando em consideração as características desses componentes, Monticelli e Garcia (1991) propuseram a inclusão dos fluxos de potência no conjunto de variáveis de estado do problema de estimação de estados, sendo seus *status* modelados como pseudomedidas.

Essa abordagem demonstrou ser numericamente mais robusta, uma vez que não requer o uso de impedâncias baixas para representar chaves, disjuntores fechados ou trechos de barra. Além disso, ela aprimora a descrição detalhada das condições da rede, facilitando a detecção de erros.

Posteriormente Clements e Simões Costa (1998), modelaram as condições operacionais dos dispositivos chaveáveis e as condições estruturais da rede como restrições de igualdade. Estas restrições devem ser adicionadas ao problema de otimização a ser resolvido via Método de Tableau Esparsos. Esta formulação conduz ao problema de Estimação de Estados no nível de Seção de Barra (EENSB).

A EENSB é discutida neste trabalho devido à importância do uso dos multiplicadores de Lagrange dessas restrições para a identificação de erros de topologia.

2.3.1 Formulação da EENS via problema de Otimização

Devido à complexidade do problema de estimação de estados, inicialmente ele é implementado como um problema convencional de estimação de estados modelado no nível de barras e ramos. Quando há indicação de regiões do sistema que contenham erros de topologia, essas regiões são modeladas no nível de seção de barras, permitindo detalhar as subestações envolvidas. Dessa forma, o sistema com N barras modelado no nível de seção de barras com n_d dispositivos chaveáveis, tem o vetor de estados:

$$\mathbf{x} = \left[\boldsymbol{\delta}^T \mathbf{v}^T \mathbf{t}^T \mathbf{u}^T \right]^T \quad (23)$$

onde $\boldsymbol{\delta}$ representa o vetor $N \times 1$ de estados referente aos ângulos das barras do sistema; \mathbf{v} é o vetor $N \times 1$ de estados referente às magnitudes das tensões; \mathbf{t} vetor de estados referente aos fluxos de potência ativa e \mathbf{u} vetor de estados referente aos fluxos de potência reativa através dos ramos chaveáveis. Nota-se que nessa modelagem \mathbf{x} tem dimensão $n \times 1$, sendo n a quantidade de variáveis de estado, $n = 2N + 2n_d$.

A inclusão dos fluxos através dos disjuntores como variáveis de estado permite que o fluxo de potência em disjuntores seja expresso unicamente em termos de \mathbf{t} e \mathbf{u} e não como funções das tensões complexas. Então, em subestações presentes em regiões críticas para o sistema, se um disjuntor estiver conectado entre os terminais i e j , as medidas de fluxos de potência ativa, $z_{m_t,ij}$, e reativa, $z_{m_u,ij}$, através dele são:

$$z_{m_t,ij} = t_{ij} + \eta_{m_t,ij} \quad (24)$$

$$z_{m_u,ij} = u_{ij} + \eta_{m_u,ij} \quad (25)$$

onde t_{ij} e u_{ij} representam as variáveis fluxo de potência ativa e reativa no disjuntor entre os ramos i e j e $\eta_{m_t,ij}$ e $\eta_{m_u,ij}$ os erros aleatórios das medidas potência ativa e reativa deste mesmo disjuntor. A injeção de potência nas barras convencionais ligadas a ramos com dispositivos chaveáveis também tem sua formulação alterada, passando a ser:

$$z_{p,i} = \sum_{k \in \bar{\Omega}_i} t_{ik}(\delta_i, \delta_k, V_i, V_k) + \sum_{l \in \bar{\Gamma}_i} t_{il} + \eta_{m_p,i} \quad (26)$$

$$z_{q,i} = \sum_{k \in \bar{\Omega}_i} u_{ik}(\delta_i, \delta_k, V_i, V_k) + \sum_{l \in \bar{\Gamma}_i} u_{il} + \eta_{m_q,i} \quad (27)$$

onde t_{ik} e u_{ik} representa os fluxos de potência ativa e reativa no ramo $i - k$; t_{il} e u_{il} os fluxos de potência ativa e reativa no disjuntor entre os nós $i - l$; $\bar{\Omega}_i$ os conjunto de ramos convencionais conectados a barra i ; $\bar{\Gamma}_i$ o conjunto de ramos chaveáveis incidentes a barra i . $\eta_{m_p,i}$ e $\eta_{m_q,i}$ os erros aleatórios das medidas de injeção de potência ativa e reativa na barra i .

Conforme mencionado, uma parte da rede possui suas subestações detalhadas no nível de seção de barra. É importante observar que a representação explícita de disjuntores

abertos nessa modelagem pode resultar no isolamento de algumas barras ou partes da rede, condio conhecida como ilhamentos na rede (LOURENÇO, E. M., 2001).

Para lidar com problemas de ilhamento, algumas abordagens devem ser utilizadas. Por exemplo,  possível definir barras de referência para cada ilha, evitar a presença de disjuntores fechados em seoes radiais e utilizar informaçoes *a priori*, que serão apresentadas na seo 2.3.3.

2.3.2 Restrioes Operacionais e Estruturais

As restrioes operacionais e estruturais incluem informaçoes sobre os estados dos disjuntores e os dados das barras de injeo nula. Essas restrioes buscam representar as condioes operacionais presumidas sobre os ramos chaveáveis e exploram as características elétricas do sistema. Seja um disjuntor conectado aos nós i e j da rede; se este disjuntor estiver fechado presume-se que a diferença angular e queda de tensão entre os nós i e j são nulas e sua representao  dada pelas seguintes expressoes:

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j = 0 \quad (28)$$

$$v_{ij} = v_i - v_j = 0 \quad (29)$$

Já se o disjuntor estiver aberto, espera-se a ausência de fluxo de potência nesse ramo, logo seu *status* pode ser representado pelas expressoes:

$$t_{ij} = 0 \quad (30)$$

$$u_{ij} = 0 \quad (31)$$

onde i representa a barra de origem e j representa a barra de destino do ramo chaveado. De forma genérica a representao das restrioes relacionadas aos ramos chaveáveis  dada por:

$$\mathbf{h}_o(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (32)$$

com dimensão $N_o \times 1$, sendo $N_o = 2n_d$.

A modelagem da rede no nível de subestao traz ao problema características da rede física, como a presença de barras de passagem, barras que possuem injeo de potência ativa e reativa nulas e podem ser representadas como:

$$\mathbf{p}_i(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \quad (33)$$

$$\mathbf{q}_i(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \quad (34)$$

onde \mathbf{p}_i e \mathbf{q}_i representam as injeoes de potência ativa e reativa na barra i , respectivamente.

Do mesmo modo,  possível modelar as barras de referência angular do sistema através de restrioes estruturais, ou seja:

$$\delta_\phi = \mathbf{0} \quad (35)$$

onde δ_ϕ é o vetor que representa o conjunto formado por todas as barras de referência do sistema, de dimensão $n_i \times 1$, sendo n_i o número de ilhas da sub-rede. De forma semelhante às condições operacionais, as restrições estruturais podem ser representadas por:

$$\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \quad (36)$$

onde $\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})$ é um vetor de funções não lineares que tem dimensão $N_s \times 1$, sendo N_s o número de restrições estruturais formado por duas vezes o número de barras de injeção nula somado a n_i . Sobre o conjunto representado por $\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}})$, é interessante mencionar que é formado por equações lineares com relação às variáveis de estado.

Levando em conta as restrições operacionais e estruturais e o método dos MQP (17) tem-se o problema de otimização :

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m \\ \text{sujeito a} \quad & \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (37)$$

2.3.3 Incorporação de Informações a Priori

Conforme citado, o problema de estimação apresenta sensibilidade significativa ao número e a distribuição das medidas no plano de medição. Quando estas estão suficientemente distribuídas, dizemos que o plano de medição é algebricamente observável.

Embora o sistema elétrico normalmente opere em condições observáveis, a possibilidade de falhas no plano de medição e/ou nos sistemas de comunicação de dados pode limitar a identificação de partes do sistema (SILVA, N. S. d., 2015).

Com o intuito de contornar essas condições e contribuir para a estabilidade numérica do problema, a inclusão de informações *a priori*, informações prévias das variáveis de estado, se apresenta como aspecto importante na análise de sistemas no nível de seção de barra. Estas informações são modeladas como variáveis aleatórias que possuem distribuição uniforme dentro de um dado intervalo e a sua variância traduz a incerteza sobre seus valores (LOURENÇO, E. M., 2001).

Como neste trabalho consideramos um sistema elétrico de potência, estável, e operando em regime permanente, as magnitudes de tensão serão consideradas num intervalo de $[0,9; 1,1]$ pu e ângulos em um intervalo de $[-\delta_{lim}; \delta_{lim}]$, onde δ_{lim} é um valor limite preestabelecido para ângulo de fase das tensões.

Com isso a função de densidade de probabilidade das informações *a priori*, considerando que seguem a distribuição uniforme, podem ser expressas como mostra (38) (PAPOULIS; PILLAI, 2002).

$$\begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (38)$$

Assim, os valores médios das informações *a priori* são dados por:

$$\bar{x} = \frac{1}{2}(a + b) \quad (39)$$

Então tem-se a representação genérica das variâncias (PAPOULIS; PILLAI, 2002):

$$\sigma^2 = E\{x^2\} - [E\{x\}]^2 \quad (40)$$

onde $E\{\cdot\}$ é o valor da esperança matemática de \mathbf{x} . Considerando as propriedades apresentadas, tem-se que as variâncias das informações *a priori* podem ser:

$$\sigma^2 = \frac{(b - a)^2}{12} \quad (41)$$

As informações *a priori* têm a sua contribuição dada pela adição do termo quadrático apresentado em (42) à função-objetivo.

$$\frac{1}{2}(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}^{-1}(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (42)$$

onde $\bar{\mathbf{x}}$ representa o vetor $n \times 1$ que contém as informações dos estados e \mathbf{P} é uma matriz diagonal de covariância, de dimensão $n \times n$ que modela a incerteza da informação. Os valores dos termos diagonais de \mathbf{P} , obtidos de (41) dependem do nível de confiança atribuída à respectiva informação *a priori*. Quanto menor esse nível, maior é o valor do termo em \mathbf{P} .

Na expressão dos MQP essa informação é adicionada conforme mostra a seguinte expressão:

$$\text{Min} \quad \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (43)$$

Similar à expressão (9), aplicando as condições de otimalidade de primeira ordem e as condições de linearização ao problema (43), obtemos a seguinte expressão:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \Delta \mathbf{x}} \right|_{x=\hat{\mathbf{x}}} = 0 \Rightarrow \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}_m^{-1} [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}] + \frac{1}{2} (\Delta \mathbf{x} - \Delta \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}^{-1} (\Delta \mathbf{x} - \Delta \bar{\mathbf{x}}) = 0$$

$$[\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m + \mathbf{P}^{-1}] \Delta \mathbf{x} = [\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \Delta \mathbf{z}_m + \mathbf{P}^{-1} \Delta \bar{\mathbf{x}}] \quad (44)$$

Assim como as informações sobre as medidas, supõe-se que os erros das estimativas *a priori* são não-correlacionados. A inclusão de informações *a priori*, conforme mostra (43), traz ao problema a adição de informações sobre cada variável de estado \hat{x}_i , com valores equivalentes a \bar{x}_i e variância P_{ii} . Isto reduz as dificuldades causadas por possíveis ilhamentos.

Dada as restrições apresentadas na seção anterior e as informações *a priori* adicionadas, temos que o problema de estimação de estados torna-se:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \\ \text{sujeito a} \quad & \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (45)$$

De modo semelhante ao apresentado na equação (17) tem-se a matriz Jacobiana do problema, \mathbf{H} composta pelas derivadas parciais de primeira ordem das funções não lineares das medidas e restrições estruturais e das lineares referentes às restrições operacionais.

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{H}_s(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{H}_o(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_m(\hat{x}^k)}{\partial \hat{x}} \\ \frac{\partial h_s(\hat{x}^k)}{\partial \hat{x}} \\ \frac{\partial h_o(\hat{x}^k)}{\partial \hat{x}} \end{bmatrix} \quad (46)$$

onde $\mathbf{h}_m(\cdot)$, $\mathbf{h}_s(\cdot)$ e $\mathbf{h}_o(\cdot)$ correspondem aos vetores das funções não-lineares das medidas, das restrições estruturais e operacionais, de dimensão $N_m \times 1$, $N_s \times 1$ e $N_o \times 1$. Já o \mathbf{z} e $\Delta \mathbf{z}$ da Equação Normal são atualizados para:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_m \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \text{ e } \Delta \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(x^k) \\ -\mathbf{h}_s(x^k) \\ -\mathbf{h}_o(x^k) \end{bmatrix} \quad (47)$$

E a matriz de covariância \mathbf{R} do problema é dada por:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_s & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R}_o \end{bmatrix} \quad (48)$$

Considerando o modelo de medição linearizado e as condições de otimalidade obtém-se a função Lagrangeana apresentada em (49).

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) + \lambda_m [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m] + \lambda_s [-\mathbf{H}_s \hat{\mathbf{x}}] + \lambda_o [-\mathbf{H}_o \hat{\mathbf{x}}] \quad (49)$$

sendo que λ é o vetor de multiplicadores de Lagrange com dimensão $n_{mr} \times n_{mr}$ formado por λ_m , vetor $N_m \times 1$ relacionado às funções que representam as medidas, λ_s vetor $N_s \times 1$ referente às restrições estruturais e λ_o vetor $N_o \times 1$ referente às restrições operacionais.

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$n_{mr} = N_m + N_s + N_o$$

De modo semelhante ao obtido com a equação (19), tem-se que o sistema resultante das condições de otimalidade de primeira ordem referentes à função Lagrangeana, apresentada em (49) é dada por:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{x}^k) \\ \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (51)$$

ou

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}_m^T & \mathbf{H}_s^T & \mathbf{H}_o^T \\ \mathbf{H}_m & \mathbf{R}_m & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_o & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}} \\ \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} \bar{\mathbf{x}} \\ \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{x}^k) \\ -\mathbf{h}_s(\hat{x}^k) \\ -\mathbf{h}_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (52)$$

Ao final, a expressão mencionada em (51) resultará nas soluções incrementais $\Delta\hat{\mathbf{x}}$, que serão iterativamente utilizadas para atualizar os valores das variáveis de estado, conforme descrito em (11), até que um limite pré-estabelecido de $\Delta\hat{\mathbf{x}}$ seja alcançado.

Observa-se, portanto, que essa formulação se baseia em um método iterativo, no qual a convergência é obtida garantindo o cumprimento das condições de otimalidade e restrições do problema.

2.4 CONCLUSÕES

A estimação de estados no nível de seção de barra possibilita a representação explícita de chaves e disjuntores, e por consequência, permite a atualização da condição operacional desses componentes, além de facilitar a aplicação de propostas de métodos e algoritmos para a identificação da topologia operativa diante de erros de topologia.

Neste capítulo foi apresentada a estimação de estados convencional. Sua extensão, com a inserção das variáveis dos fluxos de potência nos ramos chaveáveis e restrições referentes às condições operacionais e estruturais da rede, também é revista, já que permite a estimação de estados no nível de seção de barra. A estimação de estados no nível de seção de barra é modelada como um problema de otimização restrito que possui detalhamento das condições físicas e operacionais da rede e permite a detecção de erros de topologia no sistema analisado através da utilização dos multiplicadores de Lagrange normalizados.

No capítulo seguinte são apresentadas as características e efeitos dos erros de topologia, método para detecção e o método probabilístico utilizado neste trabalho para a identificação da topologia operativa, baseado no Teorema de Bayes e no teste de hipóteses.

3 ERROS DE TOPOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da topologia da rede é uma informação relevante para operação do sistema, pois ela aponta a condição de chaves e disjuntores e indica como as linhas estão conectadas. Conforme citado na Seção 1.2.3, um equívoco nesses dados pode resultar em erros de topologia, que conseqüentemente causarão inexatidão nas aplicações que seguem a partir da informação da modelagem da rede. Conseqüentemente, erros de topologia comprometem as análises de segurança da operação em tempo real baseadas na EESP.

Inicialmente as metodologias para identificação de erros de topologia (ETs) utilizavam informações sobre a rede no modelo barra-ramo (LUGTU *et al.*, 1980). Essa abordagem, entretanto, apresenta limitações frente à atualização das redes convencionais para modelos mais interativos e/ou inteligentes. Posteriormente reconheceu-se a necessidade de uma representação mais detalhada da rede (MONTICELLI, 1993b, 1993a). Nesse contexto, a EENSB apresenta-se como contribuição para resolver esse problema, permitindo a observação das condições operacionais em partes relevantes da rede (CLEMETS, K.A.; SIMÕES COSTA, 1998).

Dada a sua importância para a realização deste trabalho, a seguir serão apresentados os diferentes tipos de ETs, seus impactos na estimação de estado e os métodos para detecção e identificação desses erros.

3.2 ERROS DE TOPOLOGIA

Os erros de topologia estão relacionados às informações incorretas sobre o *status* de componentes da rede. Esses erros podem surgir devido ao mau funcionamento de chaves e disjuntores, manobra não registrada desses dispositivos ou falha mecânica nos dispositivos de sinalização. Em alguns casos, o *status* do dispositivo pode ser desconhecido, e nessas situações, o configurador de rede determina o *status* do dispositivo com base em informações relacionadas aos dispositivos e ramos aos quais está conectado.

3.2.1 Caracterização e Efeitos dos Erros de Topologia

Quando ocorrem ETs, o modelo de rede local se torna incorreto, o que afeta à estimação de estados. A presença desses erros resulta em uma incompatibilidade entre a configuração presumida e aquela suportada pelas medidas analógicas disponíveis. Essa incompatibilidade leva a inconsistências nas equações das Leis de Kirchhoff, ou seja, nas relações entre as variáveis elétricas representadas no modelo de medição.

A identificação e correção de erros de topologia melhoram a precisão e a confiabilidade da estimação de estado, uma vez que a falta de consideração desses erros afeta os resíduos normalizados, comprometendo medidas analógicas isentas de erros (CLEMETS,

K.A.; SIMÕES COSTA, 1998). Caso o erro de topologia seja ignorado, a rotina de detecção e identificação de erros grosseiros pode erroneamente excluir várias medidas analógicas interpretadas como dados ruins, e desse modo comprometer a precisão das variáveis estimadas. Além disso, existe a possibilidade de o processo de estimação divergir ou enfrentar sérios problemas de convergência.

Portanto, torna-se necessário desenvolver mecanismos eficazes destinados a detectar e identificar este tipo de erro. Dado que o erro de topologia possui um efeito local, a modelagem da rede no nível da seção de barra facilita a detecção e identificação dos dispositivos presumidos com *status* incorreto (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Na Seção 2.3 mostra-se que, na EENSB, inicialmente o problema de estimação de estados é modelado de forma convencional. Com a indicação de regiões de anomalia, explora-se então as sub-redes relevantes dessa região, incluindo detalhes das subestações suspeitas. Desse modo, a abordagem da EENSB permite uma análise mais detalhada dessas regiões, fornecendo informações adicionais sobre os dispositivos suspeitos, mas sem afetar significativamente a dimensão do problema.

3.2.2 Tipos de Erros de Topologia

Os erros de topologia, conforme mencionado, têm uma influência significativa na EESP e surgem devido à configuração incorreta de um ou mais elementos de rede. Podem ser classificados como *simples* quando se referem à configuração incorreta do *status* de apenas um elemento da rede, ou *múltiplos*, quando mais de um elemento apresenta erro em seu *status* (SIMÕES COSTA; LEÃO, 1993; ABUR; EXPOSITO, 2004).

Dentre os erros simples (*status* de um ramo), pode-se mencionar os erros de *inclusão* e *exclusão*. O erro de *inclusão* ocorre quando um elemento desconectado da rede é erroneamente modelado como se estivesse em operação. Por exemplo, um disjuntor que está com *status* aberto, mas é modelado com *status* fechado pode resultar na inclusão indevida de um ramo no modelo da rede. Já o erro de *exclusão* representa a situação oposta, e ocorre quando um elemento da rede está em operação, mas não é incluído na topologia fornecida pelo configurador.

Conforme (CLEMENTS, K.A.; SIMÕES COSTA, 1998), no caso de erro simples e sob a hipótese de redundância adequada de medidas, o maior multiplicador de Lagrange normalizado (MLN) associado às restrições operacionais deve corresponder ao disjuntor cujo *status* foi informado erroneamente ao estimador. Contudo, os erros múltiplos não podem ser identificados diretamente pelos multiplicadores de Lagrange normalizados, devido ao efeito de propagação da informação incorreta sobre multiplicadores de Lagrange associados a outros elementos chaveáveis.

Dentre os erros múltiplos, pode-se citar o erro do tipo *Bus-Split*, que ocorre quando uma única barra é modelada como duas seções de barra. Isso acontece devido à consideração incorreta do *status* fechado dos disjuntores que conectam essas seções de barra (SIMÕES

COSTA; LEÃO, 1993).

Há também o erro de *fusão (merging error)*, que é o oposto do erro *Bus-Split*. Este ocorre pela modelagem incorreta dos *status* de um grupo de disjuntores, resultando na conexão de seções de barra que na realidade estão desconexas (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Por fim, o erro do tipo *By-Pass* ocorre em subestações que possuem configuração do tipo disjuntor e meio. Nessa situação, é possível que um disjuntor com *status* informado de forma incorreta faça com que a conexão das linhas à subestação seja ignorada, resultando em um falso *by-pass* da subestação na rede analisada (LOURENÇO, E. M., 2001).

Grande parte dos procedimentos propostos para identificar erros de topologia parte da determinação prévia de um conjunto de disjuntores suspeitos (LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003). A formulação da EENSB, utilizando multiplicadores de Lagrange, conforme apresentado na Seção 2.3, fornece suporte para a detecção e identificação desses erros.

3.3 DETECÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA MULTIPLICADORES DE LAGRANGE NORMALIZADOS

Os multiplicadores de Lagrange fornecem informações sobre as condições das medidas e das restrições operacionais e estruturais. Assim como os valores dos resíduos normalizados auxiliam na detecção de erros grosseiros nas medidas (CLEMENTS, K.A.; SIMÕES COSTA, 1998), os valores dos multiplicadores de Lagrange podem indicar erros na configuração da rede, permitindo a identificação desses erros e a determinação correta da topologia da rede.

3.3.1 Interpretação dos Multiplicadores de Lagrange

De acordo com Clements e Simões Costa (1998), quando as medidas são precisas e a redundância das medidas é suficientemente alta, o maior multiplicador de Lagrange explicitamente indicará a presença de um dado incorreto. Dada a relevância desse aspecto para a obtenção dos resultados deste trabalho, serão apresentados a seguir conceitos importantes relacionados aos multiplicadores de Lagrange.

Reconsiderando a expressão (51) da Seção 2.3, a solução da iteração k da estimação de estados é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Sigma}^{-1} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \quad (53)$$

onde:

$$\begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Sigma}^{-1} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} \end{bmatrix}^{-1} \quad (54)$$

Logo:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{\Sigma}^{-1} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (55)$$

de (55) nota-se que:

$$\mathbf{C}\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{V}\mathbf{H} \quad (56)$$

Observa-se de (53) que:

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \quad (57)$$

portanto:

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{V}(\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k)) - \mathbf{C}(\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k))$$

Substituindo (56) em (57) temos:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda} &= \mathbf{V}(\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k)) - \mathbf{C}(\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k)) \\ \boldsymbol{\lambda} &= \mathbf{V}(\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k)) - \mathbf{V}\mathbf{H}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k) \end{aligned} \quad (58)$$

Assim como em (12), utilizando os termos de primeira ordem da expansão em série de Taylor das funções não-lineares de $\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$ em torno de $\hat{\mathbf{x}}$, temos (CLEMENTS, K.A.; SIMÕES COSTA, 1998):

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) \end{bmatrix} \approx \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}$$

E a aproximação linearizada correspondente ao vetor \mathbf{r} é:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ -\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) \\ -\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) \end{bmatrix} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}} = \Delta\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}} \quad (59)$$

Seja

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{V}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}) \quad (60)$$

então o vetor de multiplicadores de Lagrange é dado por:

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{V}\Delta\mathbf{z} \quad (61)$$

Ao resolver o sistema de equações apresentado em (51) obtém-se:

$$(\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \quad (62)$$

e, assim como foi feito para obter (60) :

$$(\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{z} - \mathbf{H}(\bar{\mathbf{x}}) \quad (63)$$

Ao considerar as equações (61) e (63), pode-se observar que:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\lambda} &= \mathbf{V}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}) \\ \boldsymbol{\lambda} &= (\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{H}(\bar{\mathbf{x}}))\end{aligned}$$

Comparando as duas últimas equações conclui-se que:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (64)$$

Como, de (61), o vetor de multiplicadores de Lagrange é $\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{V}\Delta\mathbf{z}$ e na hipótese de não haver erros estruturais ou operacionais, tem-se $\Delta\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_m^T & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$. Lembrando que os erros de medição são variáveis aleatórias com distribuição normal, média zero e matriz de covariância \mathbf{R}_m , então pode-se dizer que a matriz de covariância de $\boldsymbol{\lambda}$ é:

$$E\{\boldsymbol{\lambda} \boldsymbol{\lambda}^T\} = \mathbf{V}\mathbf{R}\mathbf{V}^T = \mathbf{V} \quad (65)$$

Diante das condições apresentadas e levando em conta que a matriz de covariância de $\boldsymbol{\lambda}$ é \mathbf{V} , conclui-se que o vetor multiplicador de Lagrange, $\boldsymbol{\lambda}_i$, é um vetor aleatório de média zero com variância \mathbf{V} . Os multiplicadores de Lagrange normalizados (MLN) podem ser calculados conforme expressa a equação (66):

$$\lambda_i^N = \frac{\lambda_i}{\sqrt{V_{ii}}} \quad (66)$$

Conforme apresentado em (CLEMENTS, K.A.; SIMÕES COSTA, 1998), o resíduo normalizado e o multiplicador de Lagrange normalizado, dada a formulação apresentada, possuem propriedades análogas. Portanto, assim como os resíduos de estimação viabilizam o processamento de erros grosseiros em medidas analógicas, pode-se considerar que os multiplicadores de Lagrange normalizados possibilitam a detecção e identificação de restrições incorretas associadas à topologia.

3.3.2 Detectabilidade dos Erros de Topologia

A detecção de ETs representa uma tarefa relevante na estimação de estados. Uma das maneiras de identificar erros de topologia é analisar os efeitos provocados por diferentes erros associados ao plano de medição através de indicadores de sensibilidade (SIMÕES COSTA; LEÃO, 1993; ASADA, 2004).

Na EENSB, os multiplicadores de Lagrange normalizados são utilizados para detectar erros e identificar um conjunto de disjuntores suspeitos. Essa estratégia analisa a sensibilidade das medidas em relação à configuração dos disjuntores. Na ausência de ETs os multiplicadores de Lagrange normalizados têm distribuição normal unitária. Dessa forma, para a detecção de ETs, usa-se o conceito de que, na presença de erros de topologia ou erros grosseiros em medidas, os valores dos MLN são superiores a um valor limiar

pré-estabelecido, o que torna possível detectar o ETs e preliminarmente os disjuntores que podem estar associados a esses erros na topologia da rede.

Seja $\lambda_{o_{max}}^N$ o máximo multiplicador de Lagrange normalizado associado às restrições operacionais. Tem-se:

$$\left| \lambda_{o_{max}}^N \right| > \lambda_{lim} \quad (67)$$

onde λ_{lim} é um valor de limiar pré-especificado. Considerando que a probabilidade do valor de uma variável aleatória com distribuição normal unitária está entre -3σ e $+3\sigma$ é de 99,8%, um valor típico para λ_{lim} é 3,0 (ROSS, 2006).

Se, de acordo com (67), houver a detecção de erro de topologia, os disjuntores associados às restrições operacionais cujos multiplicadores de Lagrange normalizados ($\lambda_{o_i}^N$) têm magnitude superior ao limiar são considerados como suspeitos (LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003). Em outras palavras, um critério para selecionar um disjuntor como suspeito é:

$$\left| \lambda_{o_i}^N \right| > \lambda_{lim} \quad (68)$$

onde $\lambda_{o_i}^N$ é o multiplicador de Lagrange normalizado relacionado ao disjuntor i .

É importante destacar que a presença de medidas, restrições ou conjuntos críticos pode comprometer a capacidade de detecção de erros.

Isso ocorre porque os resíduos normalizados de medidas e restrições críticas são nulos, o que impede a detecção de inconsistências envolvendo os respectivos elementos. Adicionalmente, resíduos normalizados de elementos pertencentes a conjuntos críticos de um plano de medição, são iguais entre si, o que dificulta a identificação de erros em qualquer um deles (VIEIRA, 2001). Por exemplo, Colzani(2001) mostra que a presença de disjuntores fechados em ramos radiais torna críticas as restrições operacionais referentes ao *status* desses disjuntores, criando assim uma limitação à detecção dos erros de topologia relacionados a esses dispositivos.

Outro fator complicador para a identificação de ETs é a ocorrência de laços compostos por disjuntores fechados em subestações explicitamente representadas no nível de seção de barra. De acordo com (LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA; P JR, 2010), estes laços formam caminhos fechados de impedância desprezível percorridos por fluxos de potência circulantes. Isso leva a um sistema de equações indeterminado, tornando a solução do fluxo de potência nesse sistema mais complexa e, conseqüentemente, afetando também a detecção de erros de topologia.

3.4 IDENTIFICAÇÃO DOS ERROS DE TOPOLOGIA

Após a fase de detecção dos disjuntores suspeitos, segue-se para a etapa de identificação dos ETs. Dentre os métodos de identificação pode-se citar os procedimentos que utilizam a metodologia do Tableau Esparsos e os associados a métodos ortogonais. Dentre os métodos que utilizam o conceito do Tableau Esparsos, e mais precisamente

a EENSB, pode-se citar o método enumerativo (CLEMENTS, K.A.; SIMÕES COSTA, 1998), o método que utiliza interpretação geométrica dos multiplicadores Lagrange (SIMÕES COSTA; VIEIRA, 2001; LOURENÇO, E. *et al.*, 2006) e o baseado em estatística bayesiana (LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003).

O método enumerativo consiste na re-estimação a cada nova combinação dos *status* dos elementos suspeitos. Este método apresenta dificuldades para a aplicação em tempo real, pois se for n_{ds} o número de disjuntores suspeitos é necessário realizar $2^{n_{ds}} - 1$ re-estimações de estados, para, dentre essas combinações encontrar a combinação para a qual todos os MLN apresentam valor absoluto abaixo de λ_{lim} .

No segundo método, utiliza-se o conceito de colinearidade entre o vetor de multiplicadores de Lagrange das restrições operacionais e as colunas da matriz de covariância V . Trata-se portanto de um teste geométrico de colinearidade que pode ser generalizado para testar vários dados incorretos. Pode ser aplicado repetidamente com o objetivo de contrair o conjunto de disjuntores suspeitos até chegar ao subconjunto de disjuntores com o *status* incorreto (LOURENÇO, E. *et al.*, 2006).

A aplicação de testes de hipóteses baseados em estatística Bayesiana para a identificação de erros de topologia configura um diferencial entre as metodologias supracitadas, por não necessitar a realização da estimação de estados para cada uma das topologias possíveis, como ocorre no caso do método enumerativo, e por conseguir, a partir do processamento de disjuntores suspeitos, inferir diretamente a configuração de topologia operativa. Considerando o bom desempenho da aplicação dessa metodologia apresentado em trabalhos anteriores, esses métodos são utilizados como base para o desenvolvimento desta dissertação (LOURENÇO, E. M., 2001; LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003; SANTOS, M. C., 2006). Na Seção 3.4.1, são apresentados detalhes sobre essa abordagem.

3.4.1 Identificação de Erros de Topologia via Teorema de Bayes

Na metodologia de identificação de erros de topologia utilizando o teste de hipóteses e Teorema de Bayes, é possível determinar a hipótese que apresenta maior probabilidade de ser consistente com as medidas analógicas disponíveis ao Estimador de Estados.

Tendo sido realizada a etapa de detecção do erro de topologia e de posse do conjunto de disjuntores suspeitos, calcula-se a probabilidade de ocorrência de cada hipótese alternativa, condicionada aos valores das medidas do plano de medição, utilizando o Teorema de Bayes (PAPOULIS; PILLAI, 2002). O número de combinações envolvidas é de $2^{n_{ds}}$, onde n_{ds} é o número de disjuntores suspeitos. Entretanto, como se verá, não é necessário re-estimar os estados para cada hipótese, graças ao uso da solução de sistemas lineares modificados e do Teorema de Sherman-Morrison-Woodbury (GOLUB; VAN LOAN, 2013). Esta metodologia foi inicialmente proposta por (LOURENÇO, E. M., 2001; LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003).

3.4.1.1 Hipótese básica e topologia presumida

Conforme já mencionado, o configurador de redes utiliza dados de entradas digitais que reportam os *status* de disjuntores e chaves para determinar a topologia a ser usada pelo estimador de estados. Esta será considerada como a topologia *presumida* da rede elétrica.

No entanto, essa configuração presumida pode conter informações incorretas sobre o *status* de um ou mais disjuntores pertencentes às subestações modeladas no nível de seção de barra. Para validá-la, é utilizado um procedimento de teste de hipóteses no qual a hipótese básica (\mathcal{H}_0) corresponde à topologia presumida.

No que segue, “1” representa *status* do disjuntor fechado e “0” *status* do disjuntor aberto. Se, por exemplo, a topologia presumida de um conjunto formado por quatro disjuntores é “1010” e os disjuntores 3 e 4 são declarados suspeitos com base nos valores dos multiplicadores de Lagrange normalizados correspondentes, conclui-se então que o número de disjuntores suspeitos, n_{ds} é 2, e a hipótese básica, \mathcal{H}_0 é “10” .

As restrições operacionais relacionadas à hipótese básica \mathcal{H}_0 estão associadas aos disjuntores suspeitos. Para disjuntores fechados tem-se que as restrições são as que se referem a diferenças nulas do ângulo de fase e de magnitude de tensão, $\delta_{ij} = 0$ e $v_{ij} = 0$. Já as que representam disjuntores abertos, estabelecem que os fluxos de potência ativa e reativa são ambos nulos, ou seja, $t_{ij} = 0$ e $u_{ij} = 0$.

3.4.1.2 Hipótese alternativa e sistema linear modificado

Como mencionado, para cada conjunto de n_{ds} disjuntores suspeitos, existem $N_h = 2^{n_{ds}}$ possíveis combinações hipotéticas, das quais deve ser excluída a hipótese básica em que o erro de topologia foi detectado, resultando num total de $N_h = 2^{n_{ds}} - 1$ hipóteses alternativas viáveis, \mathcal{H}_i , de configuração dos disjuntores suspeitos. Cada uma dessas hipóteses difere da hipótese básica na configuração de pelo menos um disjuntor suspeito.

Para que seja possível representar as restrições operacionais das hipóteses alternativas na matriz que representa as restrições operacionais \mathbf{H}_o em (52), deve-se usar a complementariedade entre restrições operacionais, e representar no problema de estimação de estados as restrições das duas configurações possíveis de cada disjuntor, sendo consideradas ativas no problema as restrições operacionais referentes à hipótese presumida, e inativas as restrições complementares referentes às hipóteses alternativas (LOURENÇO, E. M., 2001).

O mecanismo de ativação/desativação de uma restrição operacional é implementado modelando-a como pseudomedida: uma restrição é ativada atribuindo-se a ela uma variância de valor próximo a zero; em contrapartida, a desativação consiste na atribuição à restrição de uma variância relativamente alta (por exemplo, 1×10^4), que chamaremos de γ . O valor atribuído a γ deve ser significativamente alto para garantir a efetiva ação

desse mecanismo, porém com o devido cuidado para que este procedimento não contribua para a incidência de problemas numéricos.

A implementação deste mecanismo requer que tanto a restrição associada ao *status* presumido do disjuntor quanto a que corresponde ao seu complemento sejam simultaneamente modeladas na matriz \mathbf{H}_o . Adicionalmente, as respectivas variâncias devem ser definidas na matriz \mathbf{R}_o conforme descrito acima. Na implementação desse trabalho o valor de γ manteve-se igual em todas as simulações realizadas (LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003).

Para descrever este incremento no problema, supõe-se que \mathbf{H} passa a representar as medidas (\mathbf{H}_m), restrições estruturais (\mathbf{H}_s) e restrições operacionais referentes aos disjuntores abertos (\mathbf{H}_{o_a}) e fechados (\mathbf{H}_{o_f}) e também que \mathbf{R} passa a ser particionado a fim de ativar e desativar as restrições operacionais. Conforme apresenta (69), observa-se a representação das restrições das duas configurações de *status* possíveis para cada disjuntor suspeito. Além disso, com a atualização da modelagem de \mathbf{R} , tem-se que, para uma dada hipótese, apenas um dos *status* de cada disjuntor será modelado por restrição ativa.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{0}_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R}_{o_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{R}_{o_f} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_m \\ \mathbf{H}_s \\ \mathbf{H}_{o_a} \\ \mathbf{H}_{o_f} \end{bmatrix} \quad (69)$$

onde: \mathbf{H}_{o_a} e \mathbf{H}_{o_f} são submatrizes da matriz \mathbf{H}_o que contêm as linhas referentes às restrições operacionais dos disjuntores abertos e fechados, respectivamente; e \mathbf{R}_{o_a} e \mathbf{R}_{o_f} são as submatrizes correspondentes da matriz de covariância das restrições operacionais. Logo, a equação (52) passa a ser:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}_m^T & \mathbf{H}_s^T & \mathbf{H}_{o_a}^T & \mathbf{H}_{o_f}^T \\ \mathbf{H}_m & \mathbf{R}_m & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_s & \mathbf{0} & \mathbf{R}_s & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_{o_a}^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{o_a} & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_{o_f}^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{o_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}} \\ \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_{o_a} \\ \lambda_{o_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1} \bar{x} \\ \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{x}^k) \\ -\mathbf{h}_s(\hat{x}^k) \\ -\mathbf{h}_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (70)$$

Para representar a hipótese básica, os *status* complementares aos da topologia presumida (isto é, disjuntor l aberto se o configurador de rede apontá-lo como fechado, e vice-versa) são inicialmente desativados, associando-se a eles uma variância igual a γ . Caso a hipótese básica seja rejeitada pelo teste de hipóteses a ser descrito, será necessário avaliar as hipóteses alternativas. Para isso, a modificação da configuração dos disjuntores em cada hipótese alternativa \mathcal{H}_i é obtida pela atualização das variâncias em \mathbf{R} , como segue:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R} + \Delta \mathbf{R}_i \quad (71)$$

onde :

$$\Delta \mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{0}_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm \boldsymbol{\gamma}_{o_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mp \boldsymbol{\gamma}_{o_f} \end{bmatrix} \quad (72)$$

sendo $\Delta \mathbf{R}_i$ uma matriz de dimensão $n_{mr} \times n_{mr}$ que representa as modificações em \mathbf{R} para cada hipótese \mathcal{H}_i .

Suponha, por exemplo, que o disjuntor l é considerado fechado na hipótese básica, e agora deve ter seu *status* alterado para aberto em uma dada hipótese alternativa. Ao se adicionar o valor $-\boldsymbol{\gamma}$ a $R_{o_{i_a}}$ as restrições operacionais relacionadas ao *status* do disjuntor l aberto tornam-se ativas. Simultaneamente o valor $\boldsymbol{\gamma}$ deve ser adicionado à restrição de *status* fechado do disjuntor l para garantir que estas fiquem inativas.

A matriz de modificação, $\Delta \mathbf{R}_i$, pode ser escrita genericamente como mostra a equação (73) (LOURENÇO, E. M., 2001).

$$\Delta \mathbf{R}_i = \mathbf{E}_i \mathbf{G}_i \mathbf{E}_i^T \quad (73)$$

Portanto, a matriz de covariância para a hipótese alternativa é dada por:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R} + \mathbf{E}_i \mathbf{G}_i \mathbf{E}_i^T \quad (74)$$

onde:

$$\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_m & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{0}_s & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{F}_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{F}_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{F}_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{F}_i \end{bmatrix} \quad (75)$$

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{i_1} & \mathbf{e}_{i_2} & \cdots & \mathbf{e}_{i_k} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} \pm \boldsymbol{\gamma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pm \boldsymbol{\gamma} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mp \boldsymbol{\gamma} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mp \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad (76)$$

e \mathbf{e}_{i_j} representa a j -ésima coluna da matriz identidade de dimensão $n_d \times 1$; n_d corresponde ao número de disjuntores; \mathbf{F}_i é uma matriz de dimensão $n_d \times k$ formada pelos vetores \mathbf{e}_{i_j} ; k é o número de disjuntores suspeitos cujo *status* é diferente na hipótese alternativa testada, \mathcal{H}_i , com relação a \mathcal{H}_0 ; \mathbf{E}_i é uma matriz de dimensão $n_{mr} \times g$ e possui a função de alocar a informação atualizada dos k disjuntores que modificam seu *status* em \mathcal{H}_i com relação a \mathcal{H}_0 e \mathbf{G}_i é uma matriz diagonal $g \times g$ formada por valores $\pm \boldsymbol{\gamma}$, onde $g = 4k$.

A partir de (74) pode-se obter a matriz \mathbf{R}_i que, inserida na equação (51), permite que o problema na forma matricial (77) represente genericamente uma dada hipótese alternativa \mathcal{H}_i :

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}}_i \\ \lambda_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \quad (77)$$

ou

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} + \mathbf{E}_i \mathbf{G}_i \mathbf{E}_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}}_i \\ \lambda_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \quad (78)$$

Formalmente, a solução de cada hipótese alternativa pode ser obtida pela resolução do sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}}_i \\ \lambda_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} + \mathbf{E}_i \mathbf{G}_i \mathbf{E}_i^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \quad (79)$$

A formulação apresentada em (79) permite que seja possível o cálculo dos MLN para qualquer uma das hipóteses alternativas, porém às custas de múltiplas soluções (uma para cada uma das hipóteses) o que se torna inviável por envolver um significativo esforço computacional. Porém, no próximo capítulo será visto que é possível obter soluções múltiplas eficientemente, mediante o uso de técnicas para resolver sistemas lineares modificados baseadas no teorema de Sherman-Morrison-Woodbury (GOLUB; VAN LOAN, 2013).

3.4.1.3 Probabilidade de ocorrência de hipóteses sobre a topologia da rede

O cálculo dos MLN e a representação matemática das hipóteses alternativas, apresentada na seção anterior viabilizam o cálculo da probabilidade de ocorrência de cada hipótese com base nas medidas que compõem o plano de medição. Isto se deve à aplicação do Teorema de Bayes, conforme descrito nesta seção. Pode-se assim determinar qual hipótese apresenta a maior probabilidade de ser mais respaldada pelas medidas disponíveis, e portanto de ser a que aponta a topologia correta (LOURENÇO, E. M., 2001).

Para cumprir este objetivo, a expressão apresentada em (80), obtida da aplicação do teorema de Bayes, calcula o valor das probabilidades de todas as hipóteses condicionadas aos valores disponíveis para as medidas (LOURENÇO, E. M., 2001; LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, 2003). A hipótese que obtiver maior valor de probabilidade condicional associada será considerada verdadeira, ou seja, a configuração de disjuntores suspeitos que apresentar a maior compatibilidade com as medidas será considerada a hipóteses correta. Pelo Teorema de Bayes tem-se que a probabilidade condicional *a posteriori* de \mathcal{H}_i em relação \mathbf{z} é :

$$P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z}) = \frac{f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_i)P(\mathcal{H}_i)}{\sum_{j=0}^{2^{n_{ds}}-1} f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_j)P(\mathcal{H}_j)} \quad (80)$$

onde $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$ corresponde à probabilidade condicional a *posteriori* de \mathcal{H}_i dado o vetor de medidas; $P(\mathcal{H}_i)$ à probabilidade a *priori* de \mathcal{H}_i ; $f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_i)$ é a função densidade de probabilidade (fdp) condicional de \mathbf{z} , dado que \mathcal{H}_i é verdadeiro; e \mathbf{z} é o vetor das medidas em tempo real, pseudomedidas e restrições estruturais e operacionais, conforme apresentado em (47).

Como as hipóteses alternativas tratam da mudança dos *status* dos disjuntores, essas são independentes e existe apenas a possibilidade de estarem abertos ou fechados, tem-se que a probabilidade a *priori* de cada hipótese alternativa é:

$$P(\mathcal{H}_i) = p^k (1 - p)^{n_{ds} - k} \quad (81)$$

onde p é a probabilidade de cada disjuntor ter seu *status* em \mathcal{H}_i diferente do *status* apresentado em \mathcal{H}_0 . Neste trabalho, será considerado que as hipóteses são equiprováveis (LOURENÇO, E. M., 2001).

Para o cálculo da função densidade de probabilidade condicional $f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_i)$ para cada hipótese alternativa, \mathcal{H}_i , em (80), considera-se que as variáveis de estado, \mathbf{x} , e os erros de medição, $\boldsymbol{\eta}_m$, são variáveis aleatórias normalmente distribuídas. Isso faz com que \mathbf{z} seja uma função normalmente distribuída cuja função de densidade é gaussiana. Aplicam-se portanto os seguintes resultados:

$$f_x(\mathbf{x}) = (2\pi)^{-0,5n} |\mathbf{P}|^{-0,5} e^{\{-0,5\mathbf{x}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{x}\}} \quad (82)$$

$$f_{\boldsymbol{\eta}}(\boldsymbol{\eta}_m | \mathcal{H}_i) = (2\pi)^{-0,5m} |\mathbf{R}_i|^{-0,5} e^{\{-0,5\boldsymbol{\eta}^T \mathbf{R}_i^{-1} \boldsymbol{\eta}\}}$$

Para determinar a função densidade de \mathbf{z} , lembremos que o vetor de medidas e restrições se relacionam pela função:

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\eta} \quad (83)$$

e que o vetor de erros estendido tem dimensão $n_{mr} \times 1$ e pode ser representado como

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_m \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (84)$$

Logo a matriz de covariância pode ser obtida a partir da consideração de

$$E \{ \mathbf{z}\mathbf{z}^T \} = \mathbf{H} \{ \mathbf{z}\mathbf{z}^T \} \mathbf{H}^T + E \{ \boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\eta}^T \} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R} \quad (85)$$

Com isso, nota-se que o vetor de medidas \mathbf{z} também é uma variável aleatória normalmente distribuída e, conseqüentemente, também tem sua função de densidade de probabilidade gaussiana expressa como mostra (86).

$$f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_i) = (2\pi)^{-0,5K} |\boldsymbol{\Omega}_i|^{-0,5} e^{-0,5\boldsymbol{\beta}_i} \quad (86)$$

onde $|\cdot|$ representa o determinante, $\mathbf{\Omega}_i$ é a matriz de covariância do vetor \mathbf{z} considerando que a hipótese \mathcal{H}_i seja verdadeira, e K é a dimensão de $\mathbf{\Omega}_i$, $K = n_{mr}$. É possível mostrar que (LOURENÇO, E. M., 2001)

$$\mathbf{\Omega}_i = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R}_i. \quad (87)$$

Além disso, de (87) e da equação (64) pode-se também concluir que:

$$\mathbf{\Omega}_i = \mathbf{V}_i^{-1} \quad (88)$$

A variável β_i no expoente de (86) é dada por:

$$\begin{aligned} \beta_i &= (\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{\Omega}_i^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}) \\ &= (\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{V}_i (\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}) \end{aligned} \quad (89)$$

Resolvendo (80) a partir das subfunções (81) e (86) é teoricamente possível determinar qual das hipóteses alternativas tem maior probabilidade de ser a hipótese com a configuração correta, sendo que esta tem os *status* dos dispositivos chaveáveis compatíveis com as restrições da rede e informações do plano de medição.

A presença de erro de topologia pode comprometer a convergência do processo de estimação. Portanto, para contornar esses problemas propõe-se em (LOURENÇO, E. M., 2001) que o procedimento de detecção e identificação seja realizado em uma iteração intermediária do processo de estimação de estados. Isto torna viável a correção da topologia de acordo com as informações da rede, garantindo na maior parte dos casos a convergência da estimação de estados sob a topologia correta.

3.4.1.4 Problemas numéricos associados

O principal desafio a ser vencido visando a utilização do método acima descrito é a sua aplicabilidade em ambiente de tempo real. Dadas as características da equação (80), percebe-se a necessidade do uso de algumas técnicas para evitar que sua aplicação envolva a necessidade de re-estimações sucessivas de estados, envolvendo múltiplos processos iterativos.

Em (LOURENÇO, E. M., 2001) é proposto o uso de técnicas de esparsidade, propriedades de determinantes e do teorema de Sherman-Morrison-Woodbury para contornar as dificuldades acima mencionadas. O algoritmo resultante visa o cálculo explícito da probabilidade condicional $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$ de maior valor, e conseqüentemente a determinação da hipótese alternativa a ela associada.

Entretanto, dependendo da quantidade de disjuntores suspeitos, n_{ds} , e da dimensão do sistema, o cálculo da $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$ para todas as N_h hipóteses alternativas pode incorrer em problemas numéricos, principalmente ligados ao cálculo dos determinantes em (86) e as inversões de matrizes.

Em outra aplicação de metodologia análoga, também baseada no Teorema de Bayes (SANTOS, M. C., 2006), demonstra-se que é possível determinar a hipótese alternativa de maior probabilidade sem recorrer ao cálculo explícito das probabilidades condicionais $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$, ou seja, sem a necessidade de calcular cada elemento no lado direito de (86). Isto reduz significativamente as chances de ocorrência de problemas numéricos no curso da solução.

Esta dissertação estende e adapta a metodologia proposta naquelas referências com o objetivo de aplicá-las ao problema de identificação da topologia correta em sistemas de transmissão face à presença de dados digitais inconsistentes sobre os *status* de chaves e disjuntores. No próximo capítulo, serão apresentadas e discutidas a aplicação da técnica de solução de sistemas lineares modificados e a extensão do método proposto em (SANTOS, M. C., 2006) visando a identificação da topologia de sistemas de transmissão.

3.5 CONCLUSÕES

Nesse capítulo é inicialmente feita uma caracterização dos diferentes erros de topologia e seus efeitos na estimação de estados. Dada a importância da detecção e identificação desses erros, é apresentado o uso dos multiplicadores de Lagrange normalizados para detecção da existência de erros de topologia.

Considerando os casos em que o processo de detecção é positivo, são apresentadas as bases teóricas dos métodos de identificação de erros de topologia e da topologia correta que servem de base a este trabalho. Dentre as metodologias citadas, destacam-se a utilização de testes de hipóteses e a aplicação do teorema de Bayes.

Ao final, chama-se atenção para o fato de que, dependendo da dimensão do sistema e do número de disjuntores selecionados como suspeitos, o problema pode apresentar uma complexidade computacional significativa e sua solução incorrer em dificuldades numéricas. Para contornar tais dificuldades, no Capítulo 4 são apresentadas abordagens para reduzir tanto o esforço computacional quanto a incidência de problemas numéricos no processo de identificação da topologia correta da rede elétrica.

4 IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA ANÁLISE DO EXPOENTE DA FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE

4.1 INTRODUÇÃO

Na identificação de erros de topologia o teste de hipóteses unido ao teorema de Bayes são utilizados com o objetivo de determinar qual das hipóteses alternativas é mais aderente às medidas do plano de medição (LOURENÇO, E. M., 2001).

Entretanto, levando em conta a aplicabilidade em ambiente de tempo real, nota-se que, para a obtenção da hipótese alternativa com maior probabilidade de ser a hipótese efetivamente operativa, há a necessidade da aplicação de algumas técnicas numéricas que viabilizem computacionalmente o método e o tornem eficiente. Nesse capítulo, alguns fatores relacionados ao desempenho numérico do uso da estatística bayesiana aplicada à identificação de erros de topologia são analisados e um procedimento mais eficiente para a identificação da hipótese operativa correta é proposto.

4.2 MÉTODO PARA CONTORNAR DIFICULDADES NUMÉRICAS DA APLICAÇÃO DO TEOREMA DE BAYES

Conforme já mencionado, a análise das hipóteses alternativas é feita em uma dada iteração do processo iterativo da estimação de estados no nível de seção de barra. Para encontrar a hipótese operativa é necessário varrer o conjunto de hipóteses alternativas, e encontrar entre as hipóteses \mathcal{H}_i o maior valor de $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$, pela equação (80). Para isso, é necessário a cada hipótese, calcular $f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_i)$ pela equação (86), sendo que isto envolve o cálculo do determinante e da inversa da matriz $\mathbf{\Omega}_i$ que, pela equação (88), é igual a \mathbf{V}_i (LOURENÇO, E. M., 2001).

4.2.1 Identificação da Hipóteses de Máxima Probabilidade $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$

Em Lourenço (2001) é apresentado que, para a obtenção da hipótese de maior probabilidade $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$ dentre as N_h hipóteses viáveis, deve ser utilizada a equação (80). No denominador do lado direito dessa equação tem-se o somatório das fdp's de cada hipótese \mathcal{H}_j ponderadas pela probabilidade de ocorrência dessas hipóteses, $P(\mathcal{H}_j)$.

Nota-se que, para as N_h hipóteses alternativas, o valor do denominador de $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$ é constante. Portanto, com o objetivo de encontrar a máxima $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$ dentre as N_h hipóteses alternativas tem-se:

$$b = \frac{1}{\sum_{j=0}^{2^{n_{ds}}-1} f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_j) P(\mathcal{H}_j)}$$

$$P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z}) = b \times \{f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_j) P(\mathcal{H}_j)\} \quad (90)$$

De (90), invocando-se o fato de que as hipóteses são consideradas equiprováveis, conclui-se que encontrar a máxima $P(\mathcal{H}_i | \mathbf{z})$ dentre as N_h hipóteses alternativas é equivalente a determinar:

$$\max_i \{f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_1), \dots, f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_i), \dots, f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_{N_h})\} \quad (91)$$

Conforme mostra a função (86), para obter $f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_i)$ é necessário calcular a matriz de covariância e seu determinante para cada uma das N_h hipóteses viáveis. Considerando o esforço computacional envolvido, nas seções a seguir serão introduzidas novas técnicas computacionais que garantam o cálculo eficiente desses resultados.

4.2.2 Cálculo do Determinante

Conforme mostrado em Seção 3.4.1, o valor da matriz de covariância $\mathbf{\Omega}_i$ do vetor \mathbf{z} considerando que a hipótese \mathcal{H}_i é verdadeira deve ser obtido por (87). A cada uma das N_h hipóteses viáveis testadas corresponde uma matriz $\mathbf{\Omega}_i$. Utilizando o mecanismo de atualização da matriz $\mathbf{\Omega}_i$ a partir de $\mathbf{\Omega}_0$, tem-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{\Omega}_i &= \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R}_i \\ \mathbf{R}_i &= \mathbf{R} + \mathbf{E}_i\mathbf{G}_i\mathbf{E}_i^T \end{aligned} \quad (92)$$

Substituindo a segunda equação acima na primeira, tem-se:

$$\mathbf{\Omega}_i = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R} + \mathbf{E}_i\mathbf{G}_i\mathbf{E}_i^T \quad (93)$$

Para a hipótese básica \mathcal{H}_0 considera-se que $\Delta\mathbf{R} = \mathbf{0}$, então:

$$\mathbf{\Omega}_0 = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R}. \quad (94)$$

Além disso, da equação (64) tem-se:

$$\mathbf{V} = (\mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} = \mathbf{\Omega}_0^{-1} \quad (95)$$

Substituindo a equação (94) em (93), tem-se que $\mathbf{\Omega}_i$ pode ser representado como:

$$\mathbf{\Omega}_i = \mathbf{\Omega}_0 + \mathbf{E}_i\mathbf{G}_i\mathbf{E}_i^T \quad (96)$$

ou

$$\mathbf{\Omega}_i = \mathbf{\Omega}_0 \left[\mathbf{I}_{n_{mr}} + \mathbf{\Omega}_0^{-1}\mathbf{E}_i\mathbf{G}_i\mathbf{E}_i^T \right] \quad (97)$$

onde $\mathbf{I}_{n_{mr}}$ é uma matriz identidade de dimensão $n_{mr} \times n_{mr}$, sendo n_{mr} o número de medidas e restrições.

Adicionalmente, para o cálculo do determinante da matriz $\mathbf{\Omega}_i$ tem-se de (97)

$$|\mathbf{\Omega}_i| = |\mathbf{\Omega}_0| |\mathbf{I}_{n_{mr}} + \mathbf{\Omega}_0^{-1}\mathbf{E}_i\mathbf{G}_i\mathbf{E}_i^T| \quad (98)$$

A partir de (98) e utilizando a propriedade de determinante do produto de matrizes, tem-se:

$$|\mathbf{\Omega}_i| = |\mathbf{\Omega}_0| |\mathbf{I}_k + \mathbf{G}_i \mathbf{E}_i^T \mathbf{\Omega}_0^{-1} \mathbf{E}_i| \quad (99)$$

onde \mathbf{I}_k matriz identidade de dimensão $k \times k$, sendo k número de disjuntores com *status* de \mathcal{H}_i diferente de \mathcal{H}_0 . O artifício acima implica na redução significativa da dimensão do determinante a ser calculado.

Ademais, observa-se que $|\mathbf{\Omega}_i|$ pode ser representado na forma exponencial como:

$$|\mathbf{\Omega}_i| = e^{\ln|\mathbf{\Omega}_i|} \quad (100)$$

Usando (100) em (86) obtém-se:

$$f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_i) = (2\pi)^{-0,5K} e^{-0,5\alpha_i} \quad (101)$$

onde

$$\alpha_i = \ln|\mathbf{\Omega}_i| + \beta_i \quad (102)$$

e, de (89),

$$\beta_i = (\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{x})^T \mathbf{V}_i (\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{x}). \quad (103)$$

Sendo K a dimensão de $\mathbf{\Omega}_i$, o primeiro fator do lado direito de (101) é constante. Conclui-se portanto que, para obter a $\max_i \{f(\mathbf{z} | \mathcal{H}_i)\}$, basta determinar

$$\min_i \{\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_{N_h}\} \quad (104)$$

em que α_i envolve o cálculo do determinante de uma matriz de dimensão muito menor, refletindo assim numa redução significativa do esforço computacional.

Tendo abordado o cálculo de $|\mathbf{\Omega}_i|$, resta ainda desenvolver uma forma computacionalmente eficiente de determinar a forma quadrática representada por β_i em (103). Isto é feito a seguir.

4.3 CÁLCULO DO EXPOENTE PARA UMA DADA HIPÓTESE ALTERNATIVA

Conforme mencionado, o expoente da função de densidade de probabilidade, α_i , tem função diferenciativa entre as hipóteses candidatas a hipótese operativa. Visando o desempenho e viabilidade computacionais do método, nessa seção será apresentado o uso do teorema de Sherman-Morrison-Woodbury (GOLUB; VAN LOAN, 2013) a fim de possibilitar o cálculo numericamente estável das matrizes envolvidas no cálculo do expoente.

4.3.1 Aplicação Teorema Sherman-Morrison-Woodbury para Cálculo das Hipóteses Alternativas

Pela equação (79) tem-se que a solução associada a cada hipótese alternativa pode ser obtida pela resolução da equação apresentada em (105).

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}}_i \\ \boldsymbol{\lambda}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} + \mathbf{E}_i \mathbf{G}_i \mathbf{E}_i^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \quad (105)$$

Definindo \mathbf{M}_i como a matriz do Tableau Esparsa associada à hipótese \mathcal{H}_i , (equação (77) rerepresentada como (106)), tem-se:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} + \mathbf{E}_i \mathbf{G}_i \mathbf{E}_i^T \end{bmatrix} \quad (106)$$

onde \mathbf{M}_i tem dimensão $d \times d$, em que d corresponde à quantidade de variáveis de estado, números de medidas, restrições estruturais e operacionais, $d = n + N_m + N_s + N_{o_a} + N_{o_f}$.

Para a hipótese básica, \mathcal{H}_0 , tem-se:

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (107)$$

e

$$\tilde{\mathbf{E}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{E}_i \end{bmatrix} \quad (108)$$

onde a matriz $d \times g$ $\tilde{\mathbf{E}}_i$ é obtida a partir da justaposição de duas matrizes: a matriz \mathbf{E}_i determinada na equação (75) e a matriz *nula* de dimensão $n \times g$. Substituindo (107) e (108) em (106) tem-se:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{M}_0 + \tilde{\mathbf{E}}_i \mathbf{G}_i \tilde{\mathbf{E}}_i^T \quad (109)$$

em que \mathbf{G}_i é uma matriz diagonal de dimensão $g \times g$ usada para atualizar a configuração da hipótese \mathcal{H}_i sob teste, a partir do mecanismo de ativação/desativação dos disjuntores suspeitos, conforme apresenta equação (76).

Observa-se de (109) que a obtenção de \mathbf{M}_i para cada hipótese alternativa \mathcal{H}_i depende da atualização de $\tilde{\mathbf{E}}_i \mathbf{G}_i \tilde{\mathbf{E}}_i^T$. Essa atualização é dada pela mudança dos *status* dos disjuntores pertencentes ao conjunto de disjuntores suspeitos. Mais especificamente, dos disjuntores que mudam de *status* em \mathcal{H}_i com relação a \mathcal{H}_0 .

Verifica-se portanto que o cálculo do expoente da fdp requer a obtenção da inversa de \mathbf{M}_i . Neste trabalho, propõe-se a aplicação do teorema de Sherman-Morrison-Woodbury com o objetivo de realizar eficientemente esta operação.

Pelo teorema de Sherman-Morrison-Woodbury (GOLUB; VAN LOAN, 2013) tem-se que, se a matriz $\mathbf{A} + \mathbf{BQ}^T$ é uma matriz inversível, sua inversa pode ser obtida por:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{BQ}^T)^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{I} + \mathbf{Q}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{Q}^T \mathbf{A}^{-1} \quad (110)$$

onde a matriz \mathbf{A} tem dimensão $n_a \times n_a$, \mathbf{B} dimensão $n_a \times n_b$ e \mathbf{Q} dimensão $n_b \times n_a$. Se for considerado que o produto \mathbf{BQ}^T é uma perturbação aplicada sobre a matriz \mathbf{A} , o teorema pode ser interpretado como uma forma eficiente de se obter a inversa da matriz perturbada a partir do conhecimento da inversa da matriz original.

Na presente aplicação em particular, tem-se que a inversa de \mathbf{M}_i pode ser obtida definindo

$$\mathbf{A} \triangleq \mathbf{M}_0 \quad (111)$$

$$\mathbf{B} \triangleq \tilde{\mathbf{E}}_i \quad (112)$$

$$\mathbf{Q}^T \triangleq \mathbf{G}_i \tilde{\mathbf{E}}_i^T \quad (113)$$

e então tem-se:

$$\mathbf{M}_i^{-1} = \mathbf{M}_0^{-1} - \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{E}}_i \left(\mathbf{I} + \mathbf{G}_i \tilde{\mathbf{E}}_i^T \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{E}}_i \right)^{-1} \left(\mathbf{G}_i \tilde{\mathbf{E}}_i^T \right) (\mathbf{M}_0)^{-1} \quad (114)$$

Seja

$$\Phi_i \triangleq \left(\mathbf{I} + \mathbf{G}_i \tilde{\mathbf{E}}_i^T \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{E}}_i \right)^{-1} \quad (115)$$

$$\left(\mathbf{I} + \mathbf{G}_i \tilde{\mathbf{E}}_i^T \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{E}}_i \right)^{-1} = \left(\mathbf{G}_i \left(\mathbf{G}_i^{-1} + \tilde{\mathbf{E}}_i^T \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{E}}_i \right) \right)^{-1}$$

Pode-se definir Φ_i como a matriz $g \times g$ dada por:

$$\Phi_i \triangleq \left(\mathbf{G}_i^{-1} + \tilde{\mathbf{E}}_i^T \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{E}}_i \right)^{-1} \mathbf{G}_i^{-1} \quad (116)$$

Supondo que Ψ_i seja uma matriz $g \times g$ dada por:

$$\Psi_i \triangleq \left(\mathbf{G}_i^{-1} + \tilde{\mathbf{E}}_i^T \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{E}}_i \right) \quad (117)$$

obtem-se

$$\Phi_i \triangleq \Psi_i \mathbf{G}_i^{-1} \quad (118)$$

Após algumas manipulações matemáticas, chega-se a

$$\mathbf{M}_i^{-1} = \mathbf{M}_0^{-1} - \mathbf{M}_0^{-1} \tilde{\mathbf{E}}_i \Psi_i \tilde{\mathbf{E}}_i^T \mathbf{M}_0^{-1} \quad (119)$$

As matrizes \mathbf{M}_0 e \mathbf{M}_i dadas em (107) e (106), respectivamente, suas inversas são definidas como:

$$\mathbf{W}_0 \triangleq \mathbf{M}_0^{-1} \quad \text{e} \quad \mathbf{W}_i \triangleq \mathbf{M}_i^{-1} \quad (120)$$

Com estas definições, (119) torna-se:

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{W}_0 - \mathbf{W}_0 \tilde{\mathbf{E}}_i \Psi_i \tilde{\mathbf{E}}_i^T \mathbf{W}_0 \quad (121)$$

Para simplificar (121), seja

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{W}_0 \tilde{\mathbf{E}}_i \quad (122)$$

o que resulta em:

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{W}_0 - \mathbf{U}_i \boldsymbol{\Psi}_i \mathbf{U}_i^T \quad (123)$$

onde

$$\mathbf{U}_i = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{E}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^T \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \mathbf{E}_i \quad (124)$$

e

$$\boldsymbol{\Psi}_i = \mathbf{G}_i^{-1} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E}_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{E}_i \end{bmatrix} = \mathbf{G}_i^{-1} + \mathbf{E}_i^T \mathbf{V} \mathbf{E}_i \quad (125)$$

Conforme mencionado na Seção 3.3.1 a solução do Tableau Esparso para a hipótese inicial é obtida a partir da matriz \mathbf{M}_0 (ver equação (53)). A solução para as N_h demais hipóteses implicaria em princípio na repetição do procedimento para cada uma delas, o que é claramente ineficiente do ponto de vista computacional. Por outro lado, a obtenção de \mathbf{W}_i a partir de \mathbf{W}_0 como mostra a equação (123) permite uma significativa simplificação nesse cálculo, obtida pela atualização direta da matriz inversa para cada hipótese alternativa.

Pelas equações (105) e (54) observa-se que a submatriz \mathbf{V}_i é obtida a cada \mathcal{H}_i pela inversa da Matriz do Tableau, então tem-se que:

$$\mathbf{W}_i = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{V}_i \end{bmatrix} \quad (126)$$

Direcionando o cálculo da submatriz \mathbf{V}_i a partir de \mathbf{W}_i obtida em (126) para o cálculo do expoente da fdp, mais precisamente no cálculo de β_i , percebe-se que a aplicação do teorema de Sherman-Morrison-Woodbury simplifica significativamente o esforço computacional envolvido na obtenção de α_i .

4.4 IDENTIFICAÇÃO DA TOPOLOGIA CORRETA VIA CRITÉRIO DO MÍNIMO EXPOENTE

Pela formulação obtida da aplicação do teorema de Sherman-Morrison-Woodbury na seção anterior, nota-se que a atualização das matrizes para cada uma das hipóteses alternativas pode ser obtida como mostra equação (127).

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}}_i \\ \boldsymbol{\lambda}_i \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{V} \end{bmatrix} - \mathbf{U}_i \boldsymbol{\Psi}_i \mathbf{U}_i^T \right\} \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \quad (127)$$

Além das vantagens computacionais já mencionadas, o procedimento acima descrito é também capaz de contornar dificuldades relacionadas ao mau condicionamento numérico. Com as definições anteriores, o expoente modificado da função de densidade de probabilidade, α_i , que corresponde à hipótese alternativa i , pode ser expresso como:

$$\alpha_i = \ln |\boldsymbol{\Omega}_i| + (\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{V}_i (\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}) \quad (128)$$

A aplicação do teorema de Sherman-Morrison-Woodbury viabiliza computacionalmente o método e o torna numericamente mais estável, já que evita a re-estimação dos estados para cada hipótese.

Em conclusão, a determinação da hipótese operativa mais provável resume-se à determinação do $\min_i \alpha_i$, com α_i obtido de (128) para cada uma das N_h hipóteses viáveis.

Na próxima seção, será apresentado o algoritmo utilizado para a identificação da topologia operativa da rede elétrica na presença de erros de topologia na hipótese básica, que se baseia nos desenvolvimentos descritos nesta seção.

4.5 ALGORITMO PROPOSTO

Conforme mencionado, o processo de identificação da topologia operativa face à presença de erros de topologia é iniciado no segundo estágio do processo de estimação de estados. No primeiro estágio, o processo de estimação de estados parte do pressuposto de que a topologia da rede é livre de erros de topologia. Entretanto, se ao fim desse estágio os multiplicadores de Lagrange normalizados das restrições operacionais, obtidos como subproduto do processo de convergência, apresentarem valores incompatíveis com a topologia adotada para a rede elétrica, segundo condição apresentada em (67), conclui-se pela necessidade da ativação de um laço interno de identificação de erros de topologia no processo de estimação.

Segue-se então para a construção de uma lista de disjuntores suspeitos de terem sido erroneamente modelados. A lista pode ser baseada, por exemplo, em um critério como o estabelecido em (68), aplicado à sub-rede relevante da rede formada pelas subestações suspeitas, modeladas no nível de seção de barra.

Após a formação do conjunto de disjuntores suspeitos, procede-se à aplicação do teste de hipóteses via critério de mínimo expoente baseado no teorema de Bayes, proposto nesta dissertação, para a identificação da topologia da rede que apresenta a maior aderência às informações do plano de medição.

O algoritmo a seguir detalha as etapas de aplicação da metodologia proposta para identificação da topologia operativa.

Algoritmo 1 Algoritmo para Identificação da topologia operativa

1. Iniciar o processo iterativo de estimação de estados não linear considerando as subestações suspeitas modeladas no nível de seção de barra;
2. Interromper o processo iterativo em uma iteração pré-fixada (tipicamente, na segunda ou terceira iteração) e analisar os multiplicadores de Lagrange normalizados obtidos da solução do Tableau Esparsa, conforme equação (67):
 - a) Se detectada a existência de ETs, seguir para o passo 3;
 - b) Se não, a topologia informada pelo configurador de rede está em conformidade com o plano de medição, seguir para passo 8;

3. Construir a lista de disjuntores suspeitos com base em critério pré-estabelecido, como por exemplo o dado por (68);
4. Levantar o número de hipóteses viáveis, N_h , e as configurações dos *status* dos disjuntores suspeitos para cada \mathcal{H}_i ;
5. Com base na aplicação do teorema de Sherman-Morrison-Woodbury, calcular os valores dos expoentes α_i para cada uma das N_h hipóteses viáveis;
6. Determinar o menor valor entre os expoentes calculados, α_{min} , e identificar a configuração dos disjuntores suspeitos relacionados à hipótese respectiva;
7. Atualizar os *status* dos disjuntores suspeitos conforme preconizado pela combinação associada à hipótese de menor expoente, identificada no passo 6;
8. Fim do processo de detecção e identificação de erros de topologia.
9. Retomar o processo iterativo de estimação.

4.6 OBSERVAÇÕES SOBRE A IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

O ponto de partida para a implementação computacional do método proposto é um código desenvolvido em FORTRAN, em conexão com (LOURENÇO, E. M., 2001), para a estimação de estados de uma rede elétrica em que subestações pré-selecionadas são modeladas no nível de seção de barra.

O modelo de rede adotado neste programa computacional comporta todas as diferentes configurações de disjuntores para as subestações representadas, sendo a mudança entre configurações implementada mediante alterações nos valores das variâncias das restrições operacionais (valores elevados atribuídos a uma destas variâncias equivale na prática à desativação da restrição operacional correspondente).

O programa computacional existente foi estendido nesta dissertação para permitir o cálculo dos expoentes α_i associados a cada hipótese alternativa (à originalmente considerada, suposta como contendo erro de topologia). Para tal, é aplicado o teorema de Sherman-Morrison-Woodbury, conforme descrito na seção 4.3.

O aplicativo codificado em FORTRAN resultante foi denominado ENSEB, e é utilizado para a obtenção dos resultados apresentados nesta dissertação.

4.7 CONCLUSÕES

No Capítulo 4 é apresentada a abordagem matemática proposta para contornar dificuldades numéricas percebidas na implementação probabilística do Teorema de Bayes para a identificação de erros de topologia.

Na aplicação do Teorema de Bayes às hipóteses viáveis do problema, consegue-se perceber que a busca pelo mínimo expoente da função de densidade de probabilidade das hipóteses sobre a topologia da rede elétrica, possibilita a identificação da hipótese de

maior probabilidade de corresponder à condição operativa real, assim como a identificação da topologia mais aderente às informações do plano de medição.

No decorrer do capítulo também são apresentados os desenvolvimentos matemáticos que viabilizam a aplicação computacional do método, como o uso do Teorema de Sherman-Morrison-Woodbury, que evita a necessidade de inversão de matrizes de grande dimensão e esparsas relativa a cada hipótese.

Por fim, é apresentado o algoritmo utilizado para a obtenção dos resultados das simulações que serão detalhadas no Capítulo 5. Estes mostrarão importantes resultados obtidos nas simulações do método para três sistemas-teste: um de menor porte, tutorial, com o objetivo de ilustrar detalhadamente a aplicação; e os sistemas-teste de 24 e 30 barras do IEEE, todos contendo subestações modeladas no nível de seção de barra, para demonstrar a eficiência da metodologia apresentada.

5 RESULTADOS E SIMULAÇÕES

5.1 INTRODUÇÃO

A fim de observar a efetividade do método para a identificação da topologia operativa perante a presença de erros de topologia na hipótese básica, neste capítulo são apresentados os resultados da implementação da metodologia apresentada no capítulo anterior, segundo os passos elencados no Algoritmo 1.

Para ilustrar a execução do método proposto, três sistemas-teste foram utilizados. Inicialmente são apresentados os resultados obtidos para um sistema-teste de pequeno porte, composto por três barras, dois nós e quatro disjuntores, modelado no nível de seção de barra como mostra a Figura 5.1. Este sistema será utilizado para ilustrar com maiores detalhes a aplicação da metodologia proposta.

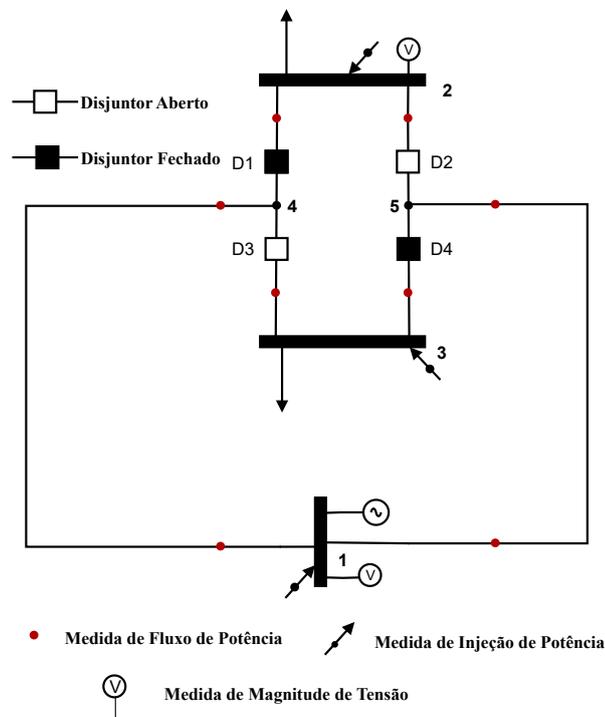


Figura 5.1 – Sistema-teste 1 - Sistema teste de 3 barras.

Com o intuito de avaliar a aplicação do método proposto para identificação da topologia operativa em sistemas de maior porte, também são apresentados os resultados numéricos de simulações computacionais realizadas com os sistemas de 24 e 30 barras do IEEE, contendo subestações representadas no nível de seção de barra e utilizando modelos não-lineares para ambas as redes nas seções 5.4 e 5.5.

No sistema-teste de 24 barras do IEEE denominado sistema-teste 2 como mostra a Figura 5.2, as subestações 14 e 16 são modeladas em detalhes e referidas como SE14 e SE16.

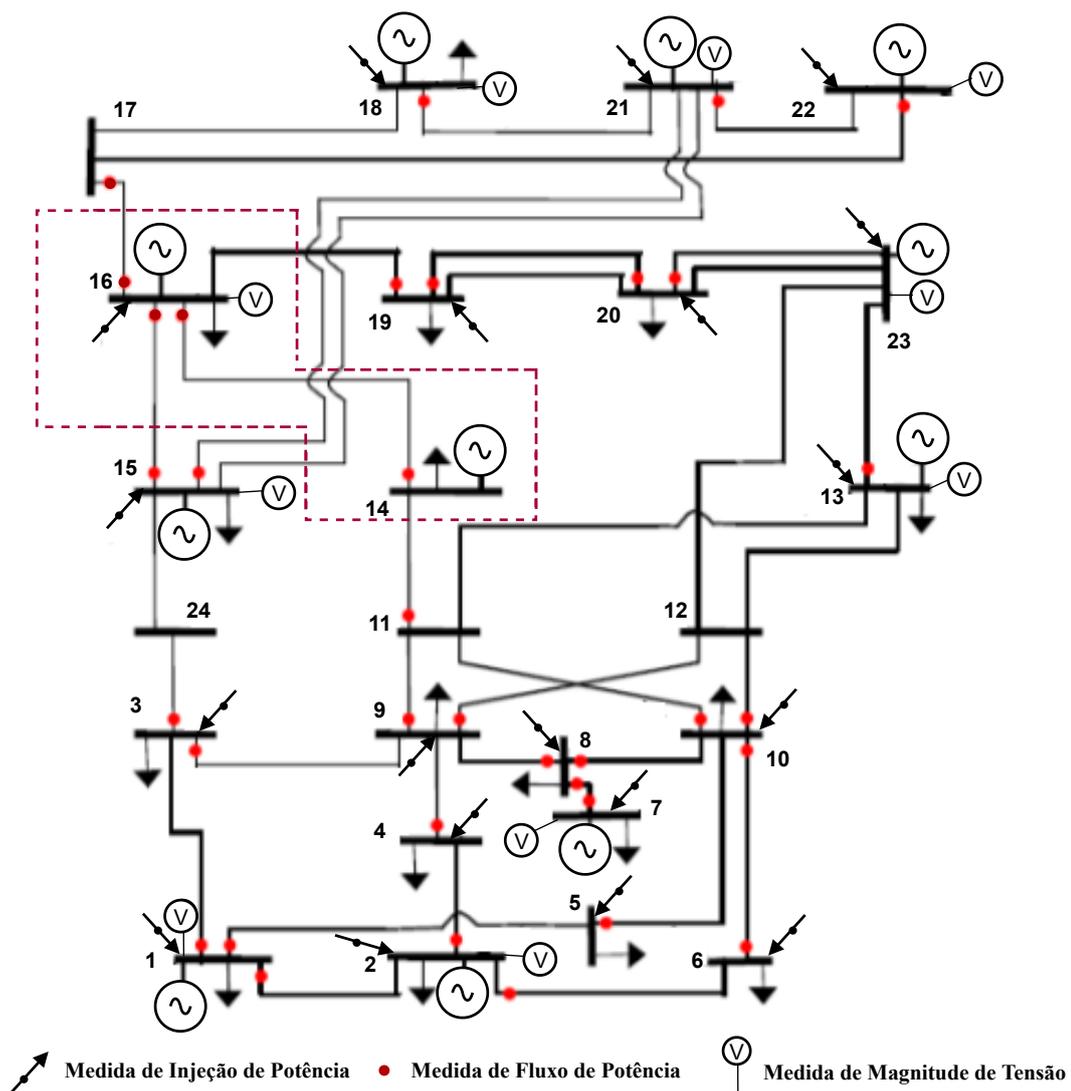


Figura 5.2 – Sistema-teste 2 - Sistema teste de 24 barras do IEEE.

O sistema-teste de 30 barras do IEEE é igualmente utilizado neste trabalho sendo referido como sistema-teste 3. Seu diagrama unifilar e plano de medição são apresentados na Figura 5.3 (ANDREOLI, 2013; MENEGHETTI, 2018). Suas subestações 12 e 15 são representadas no nível de seção de barra, correspondendo às SE12 e SE15.

Os estudos desenvolvidos neste capítulo seguem as condições de simulação estabelecidas na Seção 5.2. Na Seção 5.3, são apresentados detalhamentos da aplicação do teste de hipóteses para identificação da topologia concordante com o plano de medição.

Adiante, nas Seções 5.4 e 5.5, avalia-se o desempenho da metodologia para a identificação da topologia operativa na presença de erros de topologia simples e múltiplos, conforme definidos no Capítulo 3. Com o intuito de melhor avaliar o método proposto, são simulados também ETs inseridos de forma aleatória nos dados da topologia da rede, sendo os resultados apresentados na Seção 5.6.

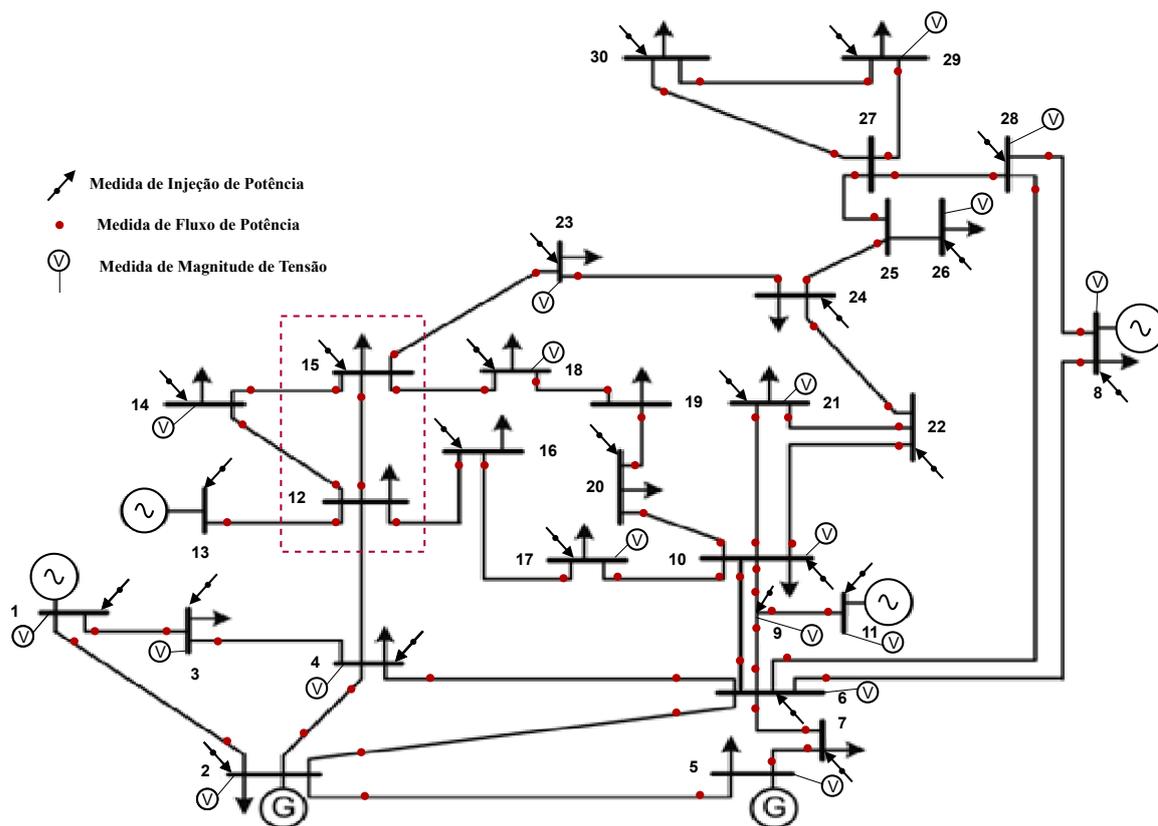


Figura 5.3 – Sistema-teste 3 - Sistema teste de 30 barras do IEEE.

Finalmente, a Seção 5.7, apresenta uma discussão sobre o desempenho do método proposto e uma análise geral dos resultados obtidos, resumindo as principais conclusões extraídas dos estudos realizados.

5.2 METODOLOGIA PARA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS E ANÁLISES

A realização das simulações foi dividida em quatro etapas, como mostra Figura 5.4. A primeira etapa é caracterizada pela simulação de medidas para a estimação de estados e formação dos dados para teste. Na segunda etapa é realizada a estimação de estados no nível de seção de barra e detecção dos erros de topologia. Na terceira etapa, de identificação da topologia operativa da rede, aplica-se o Algoritmo 1 apresentado na Seção 4.5 a fim de obter via critério de mínimo expoente a topologia operativa de acordo com o plano de medição. Finalmente, a última etapa é de análise dos resultados: nesta é analisado se a topologia obtida na simulação é coerente com a topologia operativa.

Para a realização da primeira etapa utiliza-se um algoritmo implementado em ambiente MATLAB[®]. Este algoritmo, a partir do resultado do fluxo de potência, fornece os valores reais dos estados do sistema, tensão complexa e fluxo de potência nos ramos. Simulam-se então as medidas que formarão o plano de medição. Para isto, utilizam valores reais dos estados, superpostos por erros aleatórios com distribuição normal, considerando

precisão de 1×10^{-3} p.u. nas medidas de tensão e 1×10^{-2} nas medidas de potência.

Baseado nas informações referentes à topologia operativa da rede, realiza-se, de acordo com a quantidade de disjuntores do sistema, n_d , o levantamento do número de possibilidades de erros de topologia desse sistema.

Considerando que 2^{n_d} corresponde a quantidade de possibilidades de configuração da topologia, e descartando dentre elas, a hipótese em que todos os n_d disjuntores estão com o *status* aberto e a topologia operativa, existem então $n_p = 2^{n_d} - 2$ configurações possíveis para simulação de erro de topologia.

Com o intuito de observar os resultados da metodologia para a identificação de ETs, é sorteada de forma aleatória uma dentre as n_p possibilidades, gerando-se então uma topologia modificada composta pelos *status* dos disjuntores do sistema, sendo que entre estes pelo menos um é diferente do apresentado na topologia operativa que será referida como topologia *presumida*. Por fim, tem-se como resultado desta etapa os dados de medição obtidos na simulação de medidas com erros aleatórios e as informações da topologia *presumida*, com a presença de ETs em pelo menos um disjuntor.

Na segunda etapa utiliza-se o aplicativo ENSEB para estimação de estados não linear no nível de seção de barra e obtém-se as informações sobre os estados do sistema e sobre os multiplicadores de Lagrange normalizados que indicam se há erro de topologia. Se a estimação de estados e a análise dos MLN revelam a presença de ETs nos dados do sistema obtém-se, como dados de saída, informações sobre a hipótese básica que na etapa de identificação da topologia operativa será utilizada para formar as N_h hipóteses alternativas.

A terceira etapa, de identificação da topologia operativa, tem como informações para inicialização os dados da hipótese básica, os disjuntores suspeitos e seus respectivos *status*. Com esses dados, conforme mostrado no Capítulo 4, realiza-se o cálculo do expoente α_i para cada uma das N_h hipóteses viáveis, sendo $N_h = 2^{n_{ds}} - 1$, onde n_{ds} representa o número de disjuntores suspeitos. Ressalta-se que, se n_{ds} for igual n_d , então $N_h = 2^{n_{ds}} - 2$, pois além da hipótese \mathcal{H}_0 tem-se que a hipótese em que todos os disjuntores estão com o *status* aberto, também não é uma hipótese viável.

Seguindo os passos do Algoritmo 1, são comparados os valores dos α_i obtidos para cada uma das hipóteses alternativas \mathcal{H}_i e então considera-se a hipótese de menor expoente como a hipótese operativa melhor respaldada pelos dados do plano de medição.

Com o intuito de avaliar o desempenho do método, na quarta etapa de simulação são realizadas análises comparando a topologia obtida pelo processo de identificação e a topologia operativa utilizada como base para o caso sob estudo.

Neste trabalho, são simulados testes inserindo erros *simples* e *múltiplos* de topologia como os apresentados no Capítulo 3. Estes terão seus resultados analisados e sumarizados nas próximas seções.

Considerando a quantidade expressiva de possibilidades de erros de topologia, n_p ,

apresentada pelos sistemas-teste 2 e 3, é realizada uma bateria de simulações considerando uma variedade de ETs, inseridos de forma aleatória e não repetida, com o intuito de testar a eficiência na identificação da topologia operativa. As Seções 5.4 e 5.5 mostram esses resultados, finalizando assim a última etapa das simulações.

A fim de esclarecer detalhes sobre o método apresentado, na próxima seção será apresentado a aplicação da metodologia em um sistema de pequeno porte. Ressalta-se que, para a definição da configuração dos *status* dos disjuntores, aplica-se a convenção binária, em que “0” indica um disjuntor aberto e “1” indica disjuntor fechado.

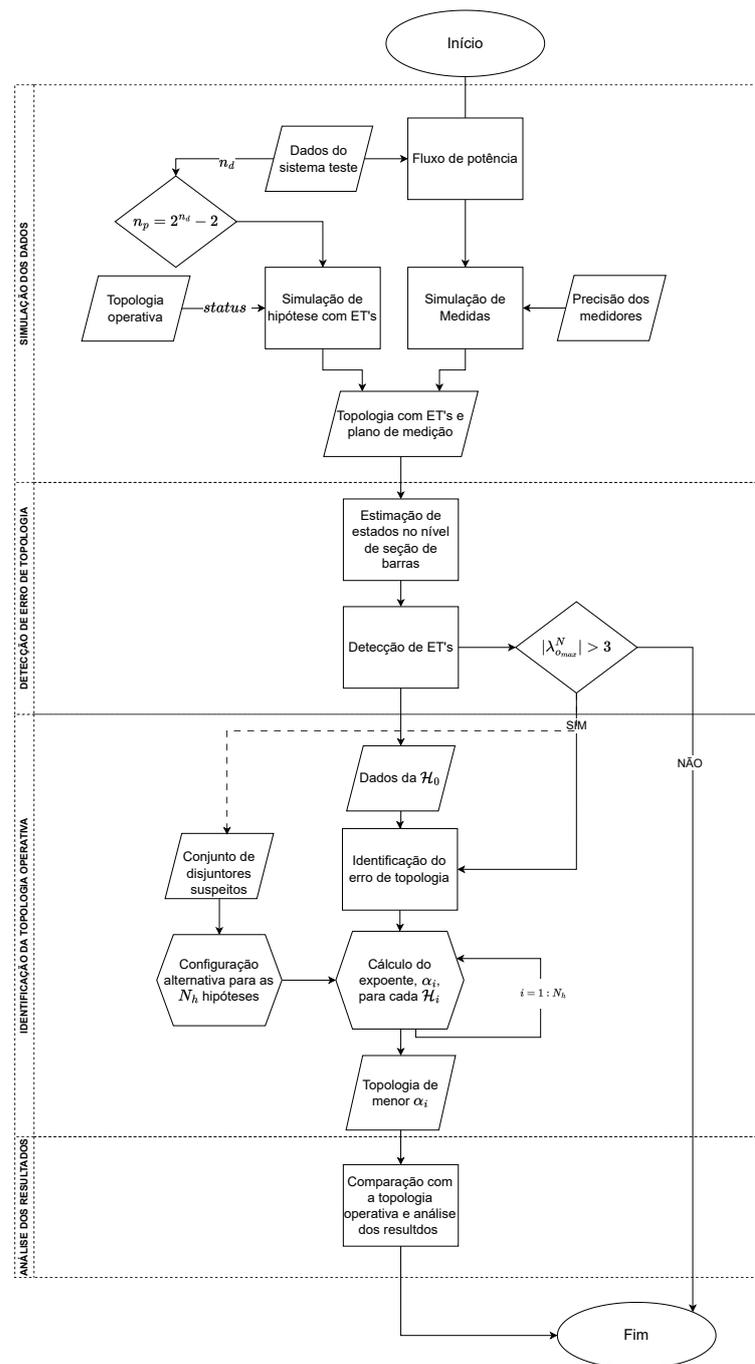


Figura 5.4 – Fluxograma dos procedimentos de simulação.

5.3 APLICAÇÃO TUTORIAL EM SISTEMA DE PEQUENO PORTE

O sistema-teste 1, composto por três barras, dois nós internos à subestação, seis ramos e quatro disjuntores tem sua subestação configurada conforme mostra Figura 5.1. Nesta figura pode também ser observado o plano de medição utilizado neste trabalho para esse sistema teste, composto por 24 medidas e a topologia operativa aderente a este plano de medição, também disponibilizado no Apêndice A. Nota-se que nesta topologia operativa os disjuntores D1 e D4 apresentam-se com o *status* fechado e D2 e D3 com *status* aberto, logo a topologia operativa é dada pela cadeia {1001}.

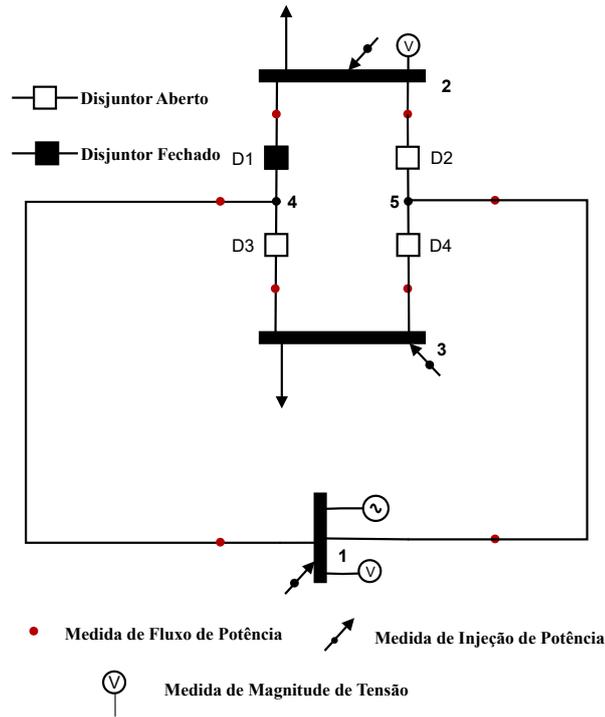
Considerando a quantidade de disjuntores desse sistema, $n_d = 4$, observa-se que há a possibilidade de existir 14 diferentes erros de topologia na configuração informada pelo configurador de rede ao estimador de estados, como mostra Tabela 1.

p	<i>Status</i>				Tipo de ETs
	D1	D2	D3	D4	
1	1	1	1	1	múltiplos
2	1	1	1	0	múltiplos
3	1	1	0	1	simples
4	1	1	0	0	múltiplos
5	1	0	1	1	simples
6	1	0	1	0	múltiplos
7	1	0	0	0	simples
8	0	1	1	1	múltiplos
9	0	1	1	0	múltiplos
10	0	1	0	1	múltiplos
11	0	1	0	0	múltiplos
12	0	0	1	1	múltiplos
13	0	0	1	0	múltiplos
14	0	0	0	1	simples

Tabela 1 – Possíveis erros de topologia no sistema-teste 1.

Observa-se pela Tabela 1, que, de acordo com a configuração errônea informada pelo configurador de rede, pode-se ter erros do tipo *simples* e *múltiplos* na topologia.

Partindo da topologia operativa, propõe-se inicialmente a inserção de um erro *simples* em que o *status* do disjuntor D4 seja {0}. Considera-se a topologia *presumida* {1000} com erro de topologia, como apresenta a Figura 5.5, e o plano de medição representado na Figura 5.1, cujos valores das medidas são aderentes à topologia operativa também apresentada nesta figura.


 Figura 5.5 – Sistema-teste 1 - Hipótese com erro de topologia *simples*.

Levando em conta a formulação apresentada na Seção 2.3, tem-se que as restrições operacionais ativas relacionadas aos disjuntores com *status* fechado são $t_{ij} = 0$ e $u_{ij} = 0$ e com *status* aberto são $\delta_{ij} = 0$ e $v_{ij} = 0$. Nota-se que, devido à inserção do ET no disjuntor D4, as restrições operacionais relacionadas a esse disjuntor serão inseridas de forma incorreta, pois consideram esse disjuntor como aberto ao invés de fechado. Então o conjunto de restrições ativas que representa a topologia *presumida* com ETs é

$$\mathbf{h}_o(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} t_{24} \\ u_{24} \\ t_{25} \\ u_{25} \\ t_{35} \\ u_{35} \\ \delta_{34} = \delta_3 - \delta_4 \\ v_{34} = v_3 - v_4 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (129)$$

Durante a estimação de estados, conforme esperado, tem-se a detecção da presença de ETs nos dados informados. Essa detecção acontece conforme estabelece a equação (67). Como máximo MLN nessa simulação, obtém-se $\lambda_{o_{max}}^N = 158,1014$ que, sendo maior que 3, indica a necessidade da identificação da topologia correta.

Dada a detecção da presença de erro de topologia, sugere-se os disjuntores D3 e D4 como candidatos de terem seus *status* incorretamente reportados ao configurador de rede.

Com essas informações levantadas parte-se então para a etapa de identificação dos ETs. Utilizando o teste de hipóteses e os disjuntores suspeitos D3 e D4, $n_{ds} = 2$, tem-se que o número de hipóteses alternativas viáveis de serem a hipótese operativa é $N_h = 2^{n_{ds}} - 1 = 3$.

Supondo que a hipótese alternativa, \mathcal{H}_i , em que os D3 e D4 possuem *status* aberto e fechado, respectivamente, seja utilizada para obtenção do expoente, tem-se então $\mathcal{H}_i : \{01\}$. Com o intuito de obter o expoente da fdp para cada hipótese alternativa \mathcal{H}_i , segundo 3.4.1, mantém-se a matriz \mathbf{H} como a matriz gerada na hipótese básica e calcula-se a matriz \mathbf{R}_i conforme mostra equação (130).

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{0}_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R}_{o_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{R}_{o_f} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_m \\ \mathbf{H}_s \\ \mathbf{H}_{o_a} \\ \mathbf{H}_{o_f} \end{bmatrix} \quad (130)$$

A matriz \mathbf{R}_i de dimensão $d \times d$, com $d = N_m + N_s + N_{o_a} + N_{o_f}$, é dada pela equação (74), conforme apresentado na seção 3.4.1. Considerando que a hipótese básica formada pelo *status* corrente dos disjuntores suspeitos seja dada pela combinação $H_0 : \{00\}$ e que na hipótese alternativa o disjuntor D4 tem seus *status* modificado de aberto para fechado, então $k = 1$ e as matrizes formadoras da matriz $\Delta\mathbf{R}_i$ são:

$$\Delta\mathbf{R}_i = \mathbf{E}_i \mathbf{G}_i \mathbf{E}_i^T \quad (131)$$

onde

$$\mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_m & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{0}_s & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{F}_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{F}_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{F}_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{F}_i \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_i = [\mathbf{e}_{i_1}]$$

$$\mathbf{e}_{i_1} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (132)$$

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} \gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma \end{bmatrix}$$

Conforme apresentado na equação (131) tem-se que, para a obtenção da configuração da hipótese alternativa \mathcal{H}_i , é necessário a modificação das restrições operacionais que tornam o disjuntor D4 fechado. A matriz de modificação resultante é:

$$\Delta \mathbf{R}_i = \text{diag} \left\{ \overbrace{0, \dots, 0}^{N_m + N_s}, \overbrace{0, 0, 0, \gamma, 0, 0, 0, \gamma}^{N_o}, \overbrace{0, 0, 0, -\gamma, 0, 0, 0, -\gamma}^{N_o} \right\} \quad (133)$$

Adicionando a matriz $\Delta \mathbf{R}_i$ à matriz \mathbf{R} , correspondente a \mathcal{H}_0 obtida na iteração inicial da EENSB obtém-se a atualização da topologia, da hipótese básica para a hipótese alternativa. Assim como $\Delta \mathbf{R}_i$, as submatrizes \mathbf{G}_i e \mathbf{E}_i são utilizadas para o cálculo do determinante $\mathbf{\Omega}_i$ e da matriz inversa do Tableau \mathbf{W}_i , utilizadas no cálculo do expoente, α_i .

Os valores resultantes para os expoentes α_i , considerando a atualização de topologia para cada hipótese i obtida pela modificação das restrições operacionais ativas, são apresentados na Tabela 2.

i	$D3$	$D4$	α_i
1	1	0	35.223
2	1	1	23.805
3	0	1	10.696

Tabela 2 – Resultado da identificação da topologia em caso de erro de topologia *simples* no sistema-teste 1.

Nota-se pela Tabela 2 que a hipótese alternativa que possui menor expoente é a hipótese alternativa $\mathcal{H}_i : \{01\}$. Considerando que os disjuntores D1 e D2 tiveram seus *status* considerados corretos na fase de detecção, o resultado dessa simulação indica que a topologia de configuração $\mathcal{H}_i : \{1001\}$ é a topologia aderente ao plano de medição. Esse resultado indica sucesso na identificação da topologia operativa partindo da hipótese *presumida* com erro de topologia.

Como outro estudo de caso, é também simulado outro erro dentre os 14 possíveis erros de topologia listados na Tabela 1. A configuração representada por $p=8$ referente à combinação $\{0111\}$, é selecionada e simulada. Nota-se que nesta topologia *presumida* os *status* dos disjuntores D1, D2 e D3 são errôneos. Realizando a EENSB obteve-se $\lambda_{max}^N = 99,03$ constatando a presença de ETs. Seguindo para a fase de identificação e considerando que todos os disjuntores são incluídos como disjuntores suspeitos, tem-se $N_h = 2^{n_{ds}} - 2 = 14$. A Tabela 3 apresenta os resultados dessa simulação.

i	$status$ da \mathcal{H}_i				α_i
1	1	0	0	0	89.167
2	1	1	0	0	90.253
3	0	1	0	0	100.100
4	0	1	1	0	81.114
5	1	1	1	0	71.285
6	1	0	1	0	70.186
7	0	0	1	0	81.008
8	0	0	1	1	21.307
9	1	0	1	1	10.456
10	1	1	1	1	11.074
11	0	1	0	1	20.703
12	1	1	0	1	10.825
13	1	0	0	1	9.759
14	0	0	0	1	20.587

Tabela 3 – Resultado da identificação da topologia em caso de erro de topologia *múltiplo* no sistema-teste 1.

Observa-se pela Tabela 3 que o menor valor de α_i corresponde à hipótese $\{1001\}$, mais uma vez indicando sucesso na identificação da topologia operativa para a condição simulada.

Além das duas condições de ETs apresentadas, foram simulados os outros 12 erros de topologia possíveis para o sistema-teste 1. Para todas essas 14 hipóteses presumidas com ETs obtém-se λ_{max}^N maior que três, como mostra a Tabela 4, e neste estudo quatro disjuntores são considerados suspeitos. A Tabela 4 sumariza os resultados obtidos para todas as 14 simulações.

Pela Tabela 4 pode-se observar que, para todas as possibilidades de ETs obtém-se como resposta do método uma topologia com o *status* aderente às medidas, mostrando que para o sistema de 3 barras o método conseguiu identificar a topologia operativa para todas as possibilidades de erros de topologia possíveis.

i	Disjuntores Erro. modelados	λ_{max}^N	Configuração* identificada	α_{min}
1	D2 D3	41,48	{00}	9608
2	D2 D3 D4	154,77	{001}	9796,1
3	D2	59,91	{0}	9806,6
4	D2 D4	157,98	{01}	9815,3
5	D3	60,85	{0}	9945,3
6	D3 D4	154,91	{01}	10676
7	D4	158,10	{1}	10696
8	D1 D2 D3	99,04	{100}	9759
9	D1 D2 D3 D4	154,90	{1001}	10242
10	D1 D2	99,03	{10}	10257
11	D1 D2 D4	158,09	{101}	10262
12	D1 D3	99,04	{10}	10005
13	D1 D3 D4	154,90	{101}	10698
14	D1	99,03	{1}	10714

*Apresenta a configuração formada pelo *status* de cada um dos disjuntores erroneamente modelados.

Tabela 4 – Resultado de identificação de topologia para erros de topologia aleatórios no sistema-teste 1.

5.4 SISTEMA DE 24 BARRAS DO IEEE

Para o sistema-teste 2 de 24 barras do IEEE, mostrado na Figura 5.2 as barras 14 e 16 são representadas no nível de seção de barra, correspondendo às subestações SE14 e SE16. A subestação SE14 é composta por quatro disjuntores e a subestação SE16 é formada por nove disjuntores sendo suas configurações detalhadas na Figura 5.6. Com a ampliação resultante do detalhamento das subestações, o sistema-teste 2 conta com 24 barras, 10 nós, 47 ramos e 13 disjuntores que na topologia operativa apresentam os *status* conforme mostra Figura 5.6, e pode ser representada por {1110111010111}. A localização das 141 medidas que formam o plano de medição é apresentada nas Figuras 5.2 e 5.6 (ANDREOLI, 2013; MENEGHETTI, 2018).

Levando em conta a configuração das duas subestações desse sistema-teste, nota-se que é possível a ocorrência 8190 diferentes topologias com ETs, já que $n_d = 13$ e $n_p = 2^{13} - 2 = 8190$. Propõe-se inicialmente a simulação de ETs específicos na SE16, como apresentado a seguir.

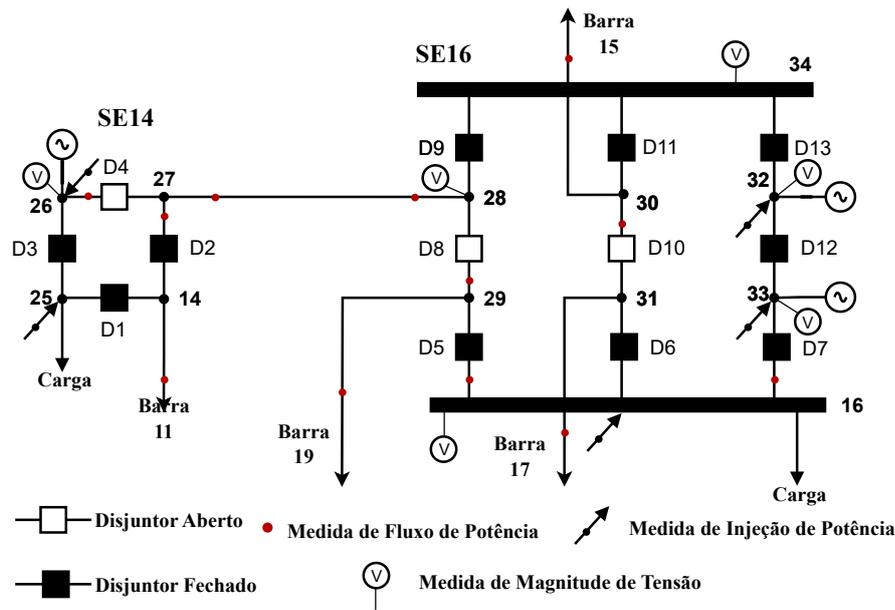


Figura 5.6 – Sistema-teste 2 - 24 barras, 10 nós, 47 ramos e 13 disjuntores.

5.4.1 Erros Simples

Conforme já mencionado no Capítulo 3, os erros simples são caracterizados pela informação errada do *status* de um único disjuntor reportado ao estimador de estados. Neste estudo de caso, utilizando os dados dos nove disjuntores da SE16, são simulados nove diferentes erros de topologia simples.

Os disjuntores D8 e D10, que apresentam na topologia operativa o *status* aberto, têm seus *status* simulados como fechados, incluindo assim na topologia *presumida* um ramo ao sistema, sem que este esteja realmente em operação. Já os sete demais disjuntores tiveram seus *status* simulados como aberto. De modo contrário ao erro de *inclusão*, nesse caso os setes ramos são incorretamente considerados fora de operação um por vez, para testar o método proposto. As Tabelas 5 e 6 resumizam os resultados dessas nove simulações.

A Tabela 5 apresenta o resultado para as simulações em que os disjuntores D8 e D10 são inseridos, um de cada vez, como fechados na topologia *presumida*. Nota-se por essas simulações que a presença dos ETs é detectada pelo valor de λ_{max}^N maior que três.

Em ambos os casos, o conjunto de disjuntores suspeitos é formado por quatro disjuntores, $n_{ds} = 4$. Tem-se então que, para cada uma das duas simulações existem 15 hipóteses viáveis, $n_h = 2^4 - 1 = 15$. A partir destas, as quatro hipóteses que possuem os menores valores de α são apresentadas. Observa-se pela Tabela 5 que $\{1110\}$ e $\{0101\}$ são os *status* dos disjuntores suspeitos da hipótese com menor valor do expoente nas simulações 1 e 2, respectivamente.

Observando que os disjuntores erroneamente modelados fazem parte do conjunto de disjuntores suspeitos e comparando os *status* destes, obtidos pelo método, com os *status* da topologia operativa para os mesmo disjuntores, percebe-se que nessas duas simulações

Simulação	Disjuntores Err. modelado	λ_{max}^N	Disjuntores* Suspeitos	i	status \mathcal{H}_i	α_i
1	D8	3,75	D5- {1}	1	1110	89.056
			D6- {1}	2	1010	505.090
			D7- {1}	3	1011	505.780
			D8- {0}	4	0111	109.900
2	D10	3,75	D8- {0}	1	1110	99.348
			D9- {1}	2	1111	89.791
			D10- {0}	3	0101	89.061
			D11- {1}	4	1101	89.892

*Ao lado do disjuntor suspeito é apresentado o *status* desse disjuntor na topologia operativa.

Tabela 5 – Resultado da identificação da topologia em casos de erro simples de *inclusão* no sistema-teste 2.

houve a identificação eficaz da topologia operativa.

Assim como na Tabela 5, a Tabela 6 traz os resultados da simulações de outros erros de topologia simples, neste caso com disjuntores que estão na topologia operativa com *status* fechado e foram simulados como abertos. Para essas sete simulações observa-se que os valores de $\lambda_{o_{max}}^N$ indicam a presença de ETs.

Conforme mostra a Tabela 6, em todos os casos simulados há quatro disjuntores suspeitos, $n_{ds} = 4$. Então para cada uma das sete simulações existem 15 hipóteses viáveis. Destas, a Tabela 6 apresenta o *status* das quatro hipóteses alternativas na qual o expoente apresenta o menor valor.

Ao comparar os *status* obtidos com os da topologia operativa apresentada na Figura 5.6, também representados na tabela ao lado de cada disjuntor suspeito, nota-se que para todas as hipóteses básicas com ETs simples relacionadas a SE16 o método detecta a presença de erro de topologia e identifica a topologia correta, mais aderente ao plano de medição.

Simulações	Disjuntor com ETs	λ_{max}^N	Disjuntores* suspeitos	i	status da \mathcal{H}_i	α_i
1	D5	116,50	D5 -{1}	1	1 1 1 0	90.087
			D6 -{1}	2	1 0 1 0	495.590
			D7 -{1}	3	1 1 1 1	90.453
			D8 -{0}	4	0 1 1 1	103.700
2	D6	621,55	D5 -{1}	1	0 1 1 0	108.510
			D6 -{1}	2	1 1 1 0	89.068
			D7 -{1}	3	1 1 1 1	89.840
			D8 -{0}	4	0 1 1 1	110.300
3	D7	1147,36	D5 -{1}	1	0 1 1 0	108.260
			D6 -{1}	2	1 1 1 0	88.754
			D7 -{1}	3	1 1 1 1	89.589
			D8 -{0}	4	0 1 1 1	110.200
4	D9	486,31	D8 -{0}	1	1 1 1 1	92.414
			D9 -{1}	2	0 1 1 1	90.530
			D10-{0}	3	0 1 0 1	89.539
			D11-{1}	4	1 1 0 1	91.298
5	D11	97,65	D8 -{0}	1	0 0 1 1	331.120
			D9 -{1}	2	1 1 1 1	89.808
			D11-{1}	3	0 1 1 1	88.878
			D12-{1}	4	1 1 0 1	98.804
6	D12	712,19	D9 -{1}	1	0 0 1 1	376.350
			D11-{1}	2	1 0 1 1	97.852
			D12-{1}	3	1 1 1 1	88.624
			D13-{1}	4	0 1 1 1	331.130
7	D13	2019,95	D9 -{1}	1	0 0 1 1	376.300
			D11-{1}	2	1 0 1 1	97.691
			D12-{1}	3	1 1 1 1	88.459
			D13-{1}	4	0 1 1 1	331.380

*Ao lado do disjuntor suspeito é apresentado o *status* desse disjuntor na topologia operativa.

Tabela 6 – Resultado da identificação da topologia em casos de erro simples de *exclusão* para o sistema-teste 2.

5.4.2 Erros Múltiplos

Os erros de topologia *múltiplos* são caracterizados pela presença de *status* incorreto em mais de um disjuntor. Na SE16, dada ao seu arranjo do tipo disjuntor e meio, um possível erro de topologia *múltiplo* é o erro do tipo *By-Pass*. Para essa subestação, este erro pode acontecer em dois casos: um com o fechamento incorreto do disjuntor D8 e abertura do disjuntores D5 e D9, e outro com o fechamento do disjuntor D10 e abertura dos disjuntores D6 e D11.

Com o intuito de observar a resposta do método diante da criação de um caminho alternativo de fluxo de potência devido ao erro de topologia do tipo *By-Pass*, foram simuladas as duas configurações erradas como topologia *presumida* com este tipo de ET.

Os resultados das duas simulações são sumarizadas na Tabela 7.

Simulação	Disjuntores Erron. Modelados	λ_{max}^N	Disjuntores* suspeitos	i	status de \mathcal{H}_i	α_i
1	D5	485,32	D5 -{1}	1	01111	104420
			D6 -{1}	2	11111	91507
	D8		D7 -{1}	3	11101	91253
			D8 -{0}	4	01101	102820
	D9		D9 -{1}			
2	D6	621,75	D6 -{1}	1	11011	89684
			D7 -{1}	2	11111	89834
	D10		D10 -{0}	3	11101	98518
			D11 -{1}	4	11001	98177
	D11		D12 -{1}			

*Ao lado do disjuntor suspeito é apresentado o *status* desse disjuntor na topologia operativa.

Tabela 7 – Resultado de identificação de topologia sob condições de erros de *by-pass* no sistema-teste 2.

Nas duas simulações com ETs do tipo *By-Pass*, o fluxo de potência passa a ser transferido pelos ramos que contêm os disjuntores D8 e D10, ao invés de passar pelos ramos que contêm os disjuntores D5 e D9 (na simulação 1) e D6 e D11 (na simulação 2). Nesses dois casos, três disjuntores apresentam *status* incorreto na hipótese básica. Durante a EENSB é detectada a presença de ETs pelo valor de λ_{omax}^N e é levantado que cinco disjuntores dentre os nove da subestação são suspeitos de terem *status* incorreto. Em cada uma das simulações, há 31 hipóteses alternativas viáveis. Durante a execução do método, para cada uma das simulações os expoentes relacionados as 31 hipóteses alternativas são calculados. A Tabela 7 apresenta os quatro menores valores de α para cada uma das simulações.

Com o valor $\alpha_3 = 91253$ a hipótese alternativa representada pelos *status* $\mathcal{H}_i : \{11101\}$ é apresentada como a hipótese de menor expoente da fdp para a simulação 1. Observa-se que todos os disjuntores com *status* errôneo fazem parte do conjunto de disjuntores suspeitos. Pela Figura 5.6, que apresenta a topologia operativa dos disjuntores citados como suspeitos, tem-se para esses disjuntores a cadeia $\{11101\}$, confirmando a identificação correta da topologia operativa mediante o método proposto.

Para a simulação 2 a configuração da hipótese alternativa referente ao menor valor de α_i é $\mathcal{H}_i : \{11011\}$, com $\alpha_1 = 89684$. Levando em conta que os disjuntores D6, D10 e D11 fazem parte do conjunto de disjuntores suspeitos e que o *status* que representa o mínimo expoente é concordante com a topologia operativa, percebe-se que, para a simulação 2, há também a identificação correta de todos os *status* da topologia operativa, inicialmente errados na topologia *presumida*.

Com as simulações de erros de topologia para o sistema-teste 2, consegue-se perceber que os tipos de erros de topologia podem variar de acordo com a configuração da subestação, como no caso do erro de *By-Pass* típico em subestações de arranjo de disjuntor e meio. Nos erros do tipo simples, nota-se que a modelagem errada dos disjuntores D7, D12 e D13 pelo configurador de rede secciona a barra 16, representada pela SE16. Erros de falso *By-pass* e seccionamento de barra tem um impacto significativo na operação dos sistemas. Portanto a identificação da topologia operativa nas condições citadas evita situações indesejáveis e perdas significativas no processo de estimação.

5.5 SISTEMA DE 30 BARRAS DO IEEE

O sistema-teste de 30 barras do IEEE, Figura 5.3, modelado no nível de seção de barra, tem as barras 12 e 15 representadas como as subestações SE12 e SE15. Neste sistema-teste 3, as subestações SE12 e SE15 serão utilizadas para inserção de erros de topologia. Diante dessa condição, os dez disjuntores da SE12 e os oito disjuntores da SE15, tem suas configurações representadas pela Figura 5.7. Devido ao detalhamento dessas subestações, o sistema-teste 3 passa a contar com 32 barras, 9 nós, 59 linhas, sendo 41 convencionais e 18 chaveáveis. A topologia operativa e a localização das 260 medidas utilizadas para montar o plano de medição operativo podem ser observadas nas Figuras 5.3 e 5.7 (ANDREOLI, 2013; MENEGHETTI, 2018).

Nesta seção, assim como nas seções 5.3 e 5.4, a partir da topologia operativa utilizada para montar o plano de medição, nesse caso representada na Figura 5.7, são inseridos erros de topologia nas subestações SE12 e SE15 e é analisado o desempenho do método na identificação do erro e na correção da topologia *presumida*, segundo o critério de mínimo expoente.

Com esse objetivo, inicialmente são apresentados resultados de quatro simulações de erro de *exclusão* de ramo na SE15. Na segunda parte desta seção, é abordado o resultado da simulação de uma topologia *presumida* em que mais de um disjuntor é modelado erroneamente; em particular, é apresentada a resposta do método para a simulação de erros do tipo *bus-split*. Para esse sistema-teste é interessante observar que devido à configuração de suas subestações, a presença de erros na modelagem de alguns disjuntores podem causar situações de não detecção de ETs conforme discutido na Seção 5.5.3.

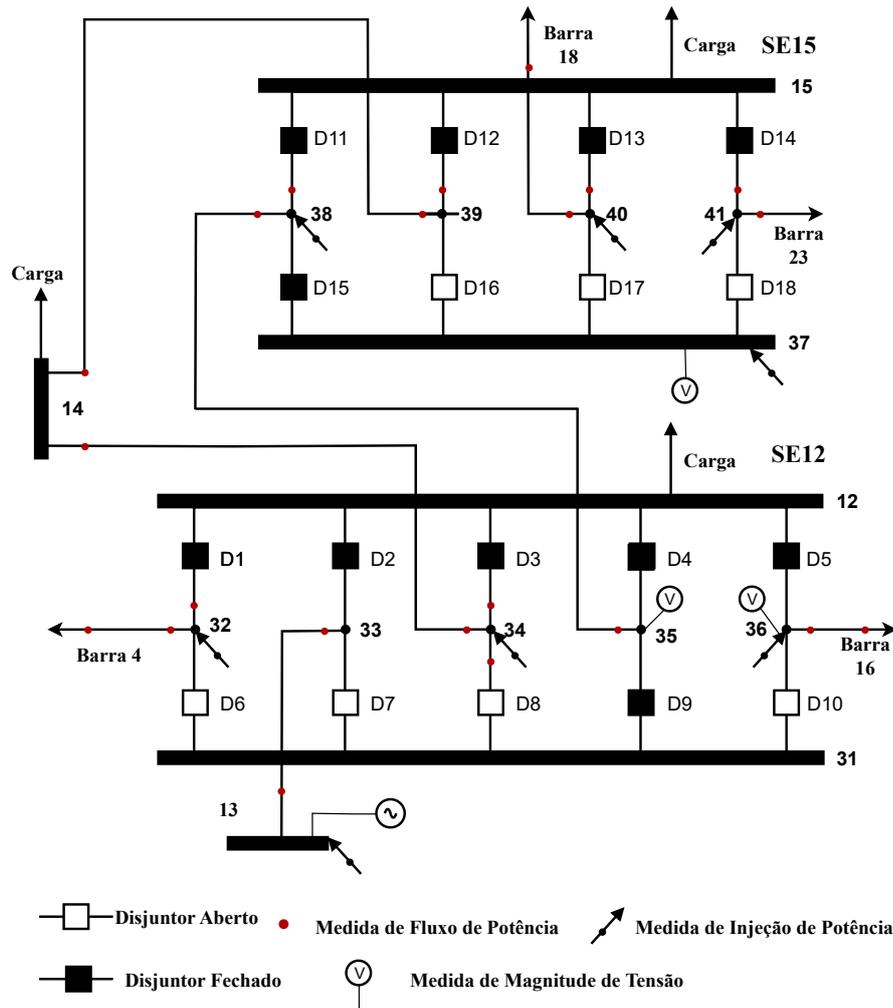


Figura 5.7 – Sistema-teste 3 - 32 barras, 9 nós, 59 ramos e 18 disjuntores.

5.5.1 Erros de Exclusão

Os erros de *exclusão* podem ser advindos de erros de topologia *simples* e ocorrem quando um ramo em operação é excluído da hipótese básica em consequência de apenas um disjuntor ter seu *status* modelado erroneamente. O erro de topologia do tipo *exclusão* foi simulado considerando individualmente a abertura de cada um dos quatro disjuntores da SE15, que na topologia operativa apresentam-se com o *status* fechado. Os resultados da aplicação do método a cada um desses casos pode ser observado na Tabela 8.

Observa-se pela Tabela 8 que, para as quatro simulações de erro de topologia ocorre a detecção do erro de topologia, pois $\lambda_{o_{max}}^N > 3$, e para cada umas das simulações quatro disjuntores são considerados suspeitos de terem ETs. Dadas essas condições o processo de identificação é inicializado e determina dentre as 15 hipóteses viáveis a hipótese que possui o menor expoente. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para os quatro menores valores de α em cada uma das simulações. Pela lista de disjuntores suspeitos é possível ver que em cada uma das simulações os disjuntores erroneamente modelados

Simulação	Disjuntor Erron. Modelados	λ_{max}^N	Disjuntores* suspeitos	i	status de \mathcal{H}_i	α_i
1	D11	38,84	D11- $\{1\}$	1	1 1 0 0	52.599
			D12- $\{1\}$	2	1 1 1 0	52.357
			D13- $\{1\}$	3	1 1 1 1	52.102
			D14- $\{1\}$	4	1 1 0 1	52.360
2	D12	20,83	D11- $\{1\}$	1	1 0 0 0	53.243
			D12- $\{1\}$	2	1 1 1 0	52.241
			D13- $\{1\}$	3	1 1 1 1	51.967
			D14- $\{1\}$	4	1 1 0 1	52.318
3	D13	20,05	D11- $\{1\}$	1	1 1 0 0	52.836
			D12- $\{1\}$	2	1 1 1 0	52.361
			D13- $\{1\}$	3	1 0 1 1	52.803
			D14- $\{1\}$	4	1 1 1 1	52.170
4	D14	15,59	D11- $\{1\}$	1	1 1 0 0	52.905
			D12- $\{1\}$	2	1 0 1 1	52.838
			D13- $\{1\}$	3	1 1 1 1	52.156
			D14- $\{1\}$	4	1 1 0 1	52.498

*Ao lado do disjuntor suspeito é apresentado o *status* desse disjuntor na topologia operativa.

Tabela 8 – Resultado da identificação da topologia em casos de erro simples de *exclusão* no sistema-teste 3.

são elencados como suspeitos, e que a metodologia de identificação proposta consegue identificar a configuração coerente com a topologia operativa.

5.5.2 Erros de Bus-Split

Dada a configuração e topologia operativa do sistema-teste 3, é possível observar que tanto a barra 12 quanto a barra 15 podem ser seccionadas com o erro do tipo *bus-split* na modelagem de seus disjuntores. Levando em conta o impacto do seccionamento inadequado de uma barra, esta seção apresenta resultados da simulação deste tipo de erro de topologia.

Para simulá-los, é suposta a modelagem errônea do *status* dos disjuntores D11 e D15, que assim são representados como abertos na topologia *presumida*. Durante a simulação o processo de detecção obteve $\lambda_{\theta_{max}}^N = 55,81$ indicando a presença de ETs. Segue-se a etapa de identificação com os dados da hipótese básica e o conjunto de disjuntores suspeitos formado pelos disjuntores D11, D12, D13 e D15. Com quatro disjuntores suspeitos, o teste de hipótese contou com 15 hipóteses viáveis que têm os valores do expoente da fdp calculados. A Tabela 9 apresenta as quatro configurações da \mathcal{H}_i para qual α apresenta os menores valores.

Pela Tabela 9 é possível observar que o menor valor de α apresentado indica a \mathcal{H}_i com a configuração $\mathcal{H}_i : \{1111\}$. Considerando que os disjuntores D11 e D15 fazem

i	status de \mathcal{H}_i				α_i
1	1	0	1	1	52687
2	1	1	1	1	52206
3	1	1	0	1	52413
4	1	0	0	1	52742

Tabela 9 – Resultado da identificação da topologia em caso de erro de *bus-split* no sistema-teste 3.

parte do conjunto de disjuntores suspeitos e que todos apresentaram configuração igual à apresentada na topologia operativa, observa-se que em casos de seccionamento de barras advindos de erro na modelagem dos disjuntores o método consegue identificar e corrigir o erro de topologia.

Um outro erro de *Bus-split* que pode acontecer nesse sistema-teste é advindo da abertura dos disjuntores D4 e D9, mas devido às características especiais desses disjuntores na topologia operativa, a simulação dessa topologia presumida será discutida na Seção 5.5.3, que trata de simulações em condições especiais.

5.5.3 Casos Especiais

Na realização das simulações com o sistema-teste 3, é possível observar que alguns disjuntores possuem particularidades que tornam complexas a identificação de erros de topologia, conforme mencionado na Seção 3.3. Levando em conta essas especificidades, nessa seção serão discutidos os resultados de algumas simulações realizadas com o intuito de evidenciar o impacto dessas características. Como já mencionado, a não detecção e identificação de erros de topologia afeta outros processos dentro da estimação de estados e conseqüentemente a correção de seus resultados finais.

Conforme mencionado na seção anterior um possível erro de topologia para o sistema-teste 3, é o erro do tipo *Bus-Split*, que pode acontecer pela modelagem errada dos disjuntores D4 e D9 como abertos, tendo como consequência o seccionamento da SE12, na Figura 5.6.

Observando a SE12 é possível notar que o disjuntor D9 é um disjuntor que na topologia operativa está fechado e conectado em um ramo radial, condição que segundo (COLZANI, 2001) torna crítica as restrições operacionais relacionadas a esse dispositivo, inviabilizando a detecção de um erro de topologia relacionado a ele.

A fim de verificar essa situação, foi simulado o erro do tipo *Bus-Split* na SE12 considerando os disjuntores D4 e D9 como abertos na topologia presumida. Nesta simulação obtém-se como resultado o valor de $\lambda_{\theta_{max}}^N = 2,063$, menor que três, mostrando a não detecção de erros de topologia nesses dados. Esse resultado impossibilita a aplicação do método de identificação de erro de topologia e com isso a topologia *presumida* da rede é tratada como livre de erros, quando na verdade possui um erro de topologia não detectado.

Um outro caso que torna complexa o processo de detecção e identificação de erros de topologia acontece quando disjuntores são modelados erroneamente como fechados, e como consequência criam circuitos fechados nas subestações. Segundo (LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA; P JR, 2010), laços fechados em subestações criam condições para fluxos circulantes em malha.

O sistema-teste 3 também tem em suas subestações características que permitem a ocorrência de erros de topologia que ensejam as condições discutidas acima. Com o intuito de observar este cenário, foram simulados na SE 15 três erros de *inclusão*. Para isso os disjuntores D16, D17 e D18, em cada uma das simulações, são inicializados na topologia *presumida* com o *status* fechado. Os resultados podem ser observados na Tabela 10.

Simulação	Disjuntores Err. modelado	$\lambda_{o_{max}}^N$
1	D16	2,40
2	D17	2,46
3	D18	2,54

Tabela 10 – Resultado da identificação da topologia em casos de erro simples de *inclusão* no sistema-teste 3.

Pela Tabela 10, é possível observar que nas três simulações o valor de $\lambda_{o_{max}}^N$ é menor que três, mostrando a não detecção do erro de topologia da rede, em consequência da complexidade de resolução do fluxo de potência circulante criado em cada uma das simulações.

Observa-se pelas simulações apresentadas nessa seção, que apesar do bom desempenho na identificação da topologia operativa apresentado nas seções anteriores, os problemas causados pela modelagem errada de disjuntores podem criar situações de não detecção de erro na topologia presumida. Desta forma, o método apresentado nesse trabalho, que diz respeito fundamentalmente à etapa de identificação, não é acionado, impossibilitando a correção desta classe de erros de topologia.

5.6 ERROS ALEATÓRIOS

Levando em conta as condições reais de operação do sistema e a fim de observar a resposta do método frente à imprevisibilidade dos ETs, são também realizadas simulações e análises de um número significativo de ETs aleatórios nos sistemas-teste 2 e 3.

Dada a quantidade de disjuntores do sistema-teste 2, existe a possibilidade da formação de 8190 topologias com ETs na hipótese básica. Destas, 100 foram sorteadas e simuladas como topologias *presumidas*.

Destas 100 simulações, sete apresentam $\lambda_{o_{max}}^N < 3$. Nas 93 simulações em que é detectado erro de topologia, a quantidade de disjuntores suspeitos é considerada igual a

quatro. Ainda com referência às 93 simulações com detecção positiva, são realizados testes com 15 hipóteses viáveis para cada uma delas, sendo então aplicado o critério do mínimo expoente. A Tabela 11 apresenta quantas vezes cada disjuntor é erroneamente modelado, quais disjuntores não têm seu erro de *status* detectado e quantos disjuntores erroneamente modelados não têm seu *status* identificado corretamente.

Disjuntor	Disjuntor Erron. modelado	Disjuntor com ETs não detectados	Disjuntor com <i>status</i> não identificados
1	8	0	0
2	16	0	0
3	24	0	22
4	8	1	0
5	14	0	0
6	16	0	0
7	16	0	0
8	12	2	0
9	16	0	0
10	37	5	29
11	16	0	0
12	16	0	0
13	16	0	0

Tabela 11 – Resultado de erros de topologia aleatórios no sistema-teste 2.

Com essas simulações é possível observar que a aleatoriedade da seleção dos possíveis ETs permite constatar algumas situações específicas. Por exemplo, o caso dos disjuntores D4, D8 e D10, por aparecerem na hipótese operativa com *status* aberto, sob condições de erros de topologia seu impacto é bem menor que disjuntores inicialmente considerados fechados. Isto acontece porque o impacto de simular erroneamente um ramo com um baixo fluxo de potência é significativamente menor que o impacto de retirar de operação um ramo para o qual os dados indicam ter um fluxo de potência significativo. O disjuntor D3 apresenta-se na topologia operativa como um disjuntor fechado em um ramo radial, condição de criticidade que torna a identificação de ETs difícil, conforme citado na seção anterior.

Nessas 93 simulações em que houve detecção de ETs o método consegue identificar corretamente o *status* de 291 disjuntores pertencentes ao conjunto de disjuntores suspeitos, tendo uma taxa de 78,226% de acerto para as 93 hipóteses que tiveram suas topologias identificadas pelos critério do mínimo expoente.

De modo semelhante ao realizado com o sistema-teste 2, no sistema-teste 3 observa-se que são possíveis 262.142 configurações de topologia com ETs, levando em conta os 18 disjuntores pertencentes às subestações SE12 e SE15 ($n_p = 2^{18} - 2$). Em razão desta significativa quantidade de possíveis ETs que podem ser gerados pelo configurador de rede na formação da topologia, são sorteadas e simuladas 100 possíveis topologias *presumidas*

com pelo menos um erro, às quais é aplicado o método de identificação proposto neste trabalho.

Dentre estas 100 topologias presumidas com erro, 76 tiveram $\lambda_{o_{max}}^N$ maior que três, indicando a presença de erro de topologia. Para a aplicação do método de identificação proposto, em cada um dos casos, quatro disjuntores são considerados suspeitos e 15 hipóteses viáveis são submetidas ao critério do mínimo expoente proposto nesta dissertação. A Tabela 12 sumariza os resultados dessas simulações.

Disjuntor	Disjuntor Erron. modelado	Disjuntor com ETs não detectados	Disjuntor com <i>status</i> não identificados
1	32	0	0
2	0	0	0
3	16	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	16	6	0
7	0	0	0
8	16	6	6
9	0	0	0
10	20	3	9
11	16	0	0
12	0	0	0
13	16	0	0
14	22	0	0
15	16	6	10
16	0	0	0
17	24	8	10
18	21	8	9

Tabela 12 – Resultado de erros de topologia aleatórios no sistema-teste 3.

Conforme mencionado na seção anterior, a configuração do sistema-teste 3 favorece a não detecção de alguns tipos de erros de topologia, como é o caso do fechamento dos disjuntores D6, D8, D10, D17 e D18. Estes contribuem para que, das 100 simulações com topologia incorreta, 24 não tenham o ET detectado. Verifica-se que, quando os disjuntores acima referidos são inseridos no contexto de ETs *múltiplos* pode até ocorrer detecção de ET, com $\lambda_{o_{max}}^N > 3$, mas devido às suas características o processo de identificação tem seu desempenho prejudicado. O disjuntor D15, cujo *status* em alguns casos aparece como disjuntor com *status* identificado apresenta a mesma característica do disjuntor D9 mencionado na seção anterior. Por ser um disjuntor fechado em um ramo radial, as condições topológicas da rede dificultam a identificação do seu *status* operativo.

Da Tabela 12, é possível observar que as topologias presumidas portadoras de erros de topologia cobrem uma gama de possibilidades de configuração, algumas delas com impacto significativo sobre o desempenho do processo de identificação. Dadas as condições

peculiares desse sistema-teste, observa-se uma certa degradação de desempenho do método proposto, já que a taxa de acerto na identificação do *status* operativo dos disjuntores com *status* errôneo sofre uma pequena queda para 71,05%.

5.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

Os resultados apresentados nesse capítulo mostram o desempenho do método para diferentes possíveis configurações de ETs. O sistema-teste 1 sendo de pequeno porte, permite ilustrar em mais detalhes a aplicação do método proposto. Os resultados indicam que, para este sistema-teste, o método consegue identificar a topologia operativa partindo de qualquer uma das possíveis topologias errôneas.

Os testes com o sistema-teste 2 apresentam resultados bastante satisfatórios de aplicação do método proposto para erros de topologia de *inclusão* e *exclusão*. O método apresenta também bom desempenho para erros do tipo *By-pass*, que podem ocorrer particularmente em subestações configuradas no arranjo disjuntor e meio. O impacto negativo no processo de estimação de estados advindo da informação incorreta associada a este tipo de erro de topologia pode ser evitado mediante a identificação correta da topologia operativa fornecida pelo método proposto.

O sistema-teste 3 tem suas subestações configuradas com barramento duplo e disjuntor duplo, condição que, pode apresentar situações de maior complexidade para a detecção do ET, prejudicando a ativação do procedimento de identificação. Por outro lado, em outras condições desafiadoras para a operação do sistema, como a ocorrência de erros de *exclusão* e *Bus-split*, o método apresentou resposta satisfatória quanto à identificação da topologia operativa correta, evitando que uma linha seja incorretamente considerada fora de operação ou uma barra seja seccionada indevidamente.

Finalmente, os resultados da realização de uma significativa quantidade de simulações para os sistemas de maior porte mostram taxas de sucesso bastante satisfatórias, além de indicar que as dificuldades numéricas que afligiam a abordagem Bayesiana para a identificação de topologia são satisfatoriamente contornados graças à adoção do critério de mínimo expoente.

5.8 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com simulações destinadas a avaliar o algoritmo desenvolvido para a identificação de erros da topologia operativa da rede utilizando o critério do mínimo expoente da função densidade de probabilidade.

Para a obtenção desses resultados são considerados três sistemas-teste diferentes, parcialmente modelados no nível de subestação. Uma pequena rede elétrica de três barras é utilizada para detalhar os procedimentos de identificação do método proposto, que é

também utilizado para avaliar o desempenho face a diferentes tipos de erros de topologia nas subestações.

Os resultados para os sistemas-teste de maior porte mostram que a utilização dos multiplicadores de Lagrange normalizados fornece uma boa ferramenta para a seleção dos disjuntores suspeitos de conterem erros de modelagem, mas que a configuração das subestações pode influenciar e criar condições operativas desfavoráveis ao desempenho da detecção de erros de topologia, confirmando algumas conclusões previamente relatadas na literatura pertinente.

Em relação aos resultados obtidos com a identificação dos erros de topologia nos sistemas de porte mais realístico, observa-se que, uma vez que os disjuntores erroneamente modelados estejam incluídos no conjunto de disjuntores suspeitos, a configuração operativa dos *status* destes disjuntores tem uma grande possibilidade de ser identificada corretamente pela hipótese alternativa associada ao menor valor do expoente da função densidade de probabilidade. Confirma-se assim o princípio que constitui a essência do método proposto nesta dissertação.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Erros no reconhecimento da configuração operativa da rede têm um impacto significativo na modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência, dado que as medidas disponíveis em tempo real, serão adquiridas considerando interconexões que não estão presentes na topologia da rede fornecida pelo Configurador de Redes. Como na estimação de estados os *status* dos disjuntores e chaves seccionadoras condicionam ou reconfiguram as aplicações baseadas nas Leis de Kirchoff, a presença de erros de topologia tem como efeito o espalhamento de imprecisões, que como consequência podem levantar suspeitas sobre medidas analógicas isentas de erros.

Além disso, é importante ressaltar que a existência de erros na topologia presumida da rede pode ter como consequência a não convergência do processo de estimação de estados. Desta forma esforços no sentido de abordar problemas relacionados à identificação de erros de topologia, preferencialmente sem a necessidade de re-estimações de estados, podem oferecer contribuições significativas para a modelagem em tempo real de redes elétricas de potência.

A estimação de estado no nível de seção de barra traz ao problema de identificação de erros de topologia a possibilidade de conhecimento das condições internas das subestações, e permite que atualizações nas condições dos componentes sejam modeladas sob a forma de hipóteses formuladas quanto à topologia operativa.

Na estimação de estados no nível de seção de barra, as condições operacionais dos dispositivos chaveáveis são modeladas como restrições operacionais ao problema de otimização correspondente. Durante o processo iterativo de estimação, multiplicadores de Lagrange normalizados associados a estas restrições são calculados, e fornecem meios de avaliar o quanto as condições operacionais advindas da topologia são aderentes às medidas e às informações estruturais da rede. Em casos de presença de erros na modelagem dos dispositivos chaveáveis, os multiplicadores de Lagrange normalizados relacionados a esses dispositivos indicarão inconsistências na topologia presumida para a rede.

Com a detecção de erros de topologia indicada pelos valores dos multiplicadores de Lagrange relacionados as restrições operacionais, é possível se proceder à identificação de erros de topologia. A metodologia para identificação de erros de topologia que fundamenta esse trabalho parte da aplicação do Teorema de Bayes para a realização de testes de hipóteses, seguindo a abordagem originalmente proposta em (LOURENÇO, E. M., 2001). Os conceitos inerentes ao teorema de Bayes permitem calcular a probabilidade *a posteriori* das hipóteses alternativas àquela subjacente à topologia presumida, todas condicionadas às medidas disponibilizadas pelo sistema SCADA. A hipótese que apresentar a maior probabilidade aponta a topologia mais aderente aos valores das medidas do plano de medição.

Com esse objetivo Lourenço (2001) propõe o cálculo explícito das probabilidades *a posteriori* a partir da atualização da configuração dos disjuntores suspeitos em cada umas das hipóteses alternativas. Para além de ter um custo computacional significativo, o cálculo da probabilidade associada a cada hipótese pode incorrer em problemas de mau condicionamento numérico capazes de comprometer os resultados finais.

Levando isso em conta, mostra-se neste trabalho que as mesmas conclusões almeçadas em (LOURENÇO, E. M., 2001) podem ser alcançadas sem a necessidade de se calcular explicitamente os valores das probabilidades condicionais *a posteriori*. Ao invés disso, é suficiente determinar um valor modificado do expoente da função densidade de probabilidade para a identificação da hipótese operativa mais aderente às medidas que refletem a condição de operação da rede elétrica.

O uso do Teorema de Sherman-Morison-Woodbury na metodologia proposta promove significativa redução do esforço computacional envolvido durante a atualização das configurações de cada hipótese alternativa a partir da hipótese básica, pois evita a necessidade de inversões repetitivas de matrizes de grande dimensão.

Em resumo, o método proposto consegue, a partir da análise do menor expoente da função de densidade de probabilidade, determinar a topologia operativa real e permite retificar durante o processo iterativo de estimação de estados os erros de topologia eventualmente contidos nos resultados originalmente fornecidos pelo configurador de redes.

As análises iniciais são conduzidas utilizando-se um sistema-teste de cinco barras e tem como objetivo apresentar detalhadamente as condições de aplicação do método. Com o intuito de atestar a aplicabilidade do método em sistemas de porte mais realístico, a metodologia proposta é também aplicada aos sistemas de 24 e 30 barras do IEEE, nos quais algumas das subestações são modelados no nível de seção de barra. Para o primeiro destes sistemas, os resultados obtidos atestam o bom desempenho da estratégia desenvolvida nesta dissertação, tendo sido obtidas taxas de sucesso próximas a 80% dos diversos casos analisados.

Nas subestações do sistema de 30 barras do IEEE, modeladas com arranjo do tipo barra dupla disjuntor duplo foram simulados erros de *exclusão* e *Bus-split*, que têm impacto significativo na operação do sistema, já que retiram ramos de operação ou criam condições de seccionamento de barras. Nestes casos a aplicação do método mostrou contribuições significativas. Adicionalmente, são discutidas condições em que certas classes de erros de topologia não são passíveis de detecção, fazendo com que o processo de identificação não seja acionado.

Considerando as condições de manifestação dos erros de topologia no contexto da operação em tempo real, este trabalho também apresenta resultados de 200 simulações que contemplam a ocorrência de diferentes erros de topologia, sendo 100 para o sistema de 24 barras e 100 para o sistema de 30 barras. Estes resultados comprovam a aplicabilidade do método proposto face a uma variedade de erros possíveis no contexto da operação

em tempo real. As situações de não identificação da topologia operativa são causadas geralmente por condições de não detectabilidade de erros, previamente abordadas na literatura.

Em suma, conclui-se que a estimação de estados no nível de seção de barras, a aplicação do teorema de Sherman-Morison-Woodbury e testes de hipóteses baseados no teorema de Bayes compõem uma metodologia eficiente para a identificação da topologia operativa real de redes elétricas de grande porte. Por outro lado, a adoção do critério de mínimo expoente desenvolvido nesta dissertação é entretanto fundamental para garantir a estabilidade numérica dos procedimentos computacionais envolvidos.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Os tópicos citados a seguir podem ser explorados em trabalho futuros:

- *Considerar o processamento de erros grosseiros em medidas e erros de modelagem em restrições estruturais.* Na metodologia apresentada, parte-se como pressuposto a ausência de erros nas medidas e que as informações sobre barras de injeção nula são pertinentes. Entretanto é possível que as medidas sejam portadoras de erros e barras de carga, por exemplo, sejam erroneamente modeladas. Essas condições podem afetar a identificação da topologia operativa, visto que pode haver um espalhamento dos erros e esses serem caracterizados como erros de topologia. Como uma extensão relevante deste trabalho, propõe-se a análise do impacto de erros simultâneos em medidas e nas restrições estruturais no processo de identificação de erros de topologia;
- *Inclusão do Método dos Cossenos para formação do conjunto de disjuntores suspeitos.* Considerando que nesta abordagem o processo de identificação da topologia operativa é inicializado com as informações da topologia presumida e dos disjuntores suspeitos, é importante que esta lista de dispositivos suspeitos contenha todos aqueles com *status* realmente incorretos, e ao mesmo tempo apresente uma dimensão tão reduzida quanto possível. A aplicação de testes de colinearidade como os descritos em (LOURENÇO, E. M., 2001) e (LOURENÇO, E. *et al.*, 2006) pode contribuir para a seleção adequada de disjuntores suspeitos.
- *Análise do impacto do arranjo da subestações para a identificação de erros de topologia.* Com a simulação de erros de topologia em quatro configurações diferentes de arranjos de subestações, observou-se que, dependendo do arranjo das subestações e da condição operativa dos disjuntores, o erro de topologia pode apresentar impactos diferentes sobre os procedimentos de detecção. A análise dos efeitos de diferentes arranjos de subestações no desempenho dos procedimentos de detecção e identificação de erros de topologia constitui portanto um tópico

de pesquisa relevante para a área de modelagem em tempo real de grandes redes elétricas.

REFERÊNCIAS

- ABUR, Ali; EXPOSITO, Antonio Gomez. **Power system state estimation: theory and implementation**. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- ANDREOLI, E. **Coestimação de estados e topologia em sistemas de potência representados por modelo não-linear**. 2013. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil.
- ASADA, E. N. **Análise de observabilidade e processamento de erros grosseiros conformativos utilizando a metaheurística busca tabu na estimação de estado generalizada**. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil.
- BRETAS, N. G.; CASTILLO, M. R. M.; LONDON, J. B. A. The innovation concept for parameter error identification and correction using the composed measurements errors in power system state estimation. *In*: 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. [S.l.: s.n.], 2012. P. 1–7.
- CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W. Multiple Bad Data Detectability and Identifiability: A Geometric Approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 3, p. 355–360, 1986.
- CLEMENTS, K. A.; KRUMPHOLZ, G. R.; DAVIS, P. W. Power System State Estimation Residual Analysis: An Algorithm Using Network Topology. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100, n. 4, p. 1779–1787, abr. 1981. ISSN 0018-9510.
- CLEMENTS, K.A.; DAVIS, P.W. Detection and identification of topology errors in electric power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 4, p. 1748–1753, 1988.
- CLEMENTS, K.A.; SIMÕES COSTA, A. Topology error identification using normalized Lagrange multipliers. **Power Systems, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 13, n. 2, p. 347–353, 1998.
- CLEMENTS, KA; WOLLENBERG, BF. An algorithm for observability determination in power system state estimation. *In*: IEEE PES Summer Meeting. [S.l.: s.n.], 1975. v. 75, p. 447–449.

- COELHO, T. C.; LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A. Anomaly Zone Determination for Topology Error Processing in Power System State Estimation. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 24, p. 312–323, 2013.
- COLZANI, L. **Determinação de sub-redes relevantes para a identificação de erros de topologia em sistema de potência**. 2001. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil.
- FREITAS, V. S. **Estimação robusta de estados em sistemas elétricos de potência baseada em algoritmo ortogonal e modelos de máxima correntropia**. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil.
- GJELSVIK, Anders; AAM, Sverre; HOLTEN, Lars. Hachtel's Augmented Matrix Method - A Rapid Method Improving Numerical Stability in Power System Static State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-104, n. 11, p. 2987–2993, 1985.
- GOLUB, G. H.; VAN LOAN, C. F. **Matrix computations**. [S.l.]: JHU press, 2013.
- KRUMPHOLZ, G. R.; CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W. Power system observability: a practical algorithm using network topology. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, IEEE, n. 4, p. 1534–1542, 1980.
- LOURENÇO, E. M. **Análise de observabilidade e identificação de topologia na estimação de estados generalizada**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil.
- LOURENÇO, E. M.; CLEMENTS, K. A.; SIMÕES COSTA, A. Geometrically-based hypothesis testing for topology error identification. *In*: SN. PROC. of the 14th PSCC. [S.l.: s.n.], 2002. P. 24–28.
- LOURENÇO, E. M.; COELHO, E. P. R.; PAL, B. C. Topology Error and Bad Data Processing in Generalized State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 6, p. 3190–3200, 2015.
- LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A. Identificação de erros de topologia via multiplicadores de Lagrange normalizados e testes de hipóteses. v. 14, n. 2, p. 166–175, abr. 2003.

- LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A.; CLEMENTS, K.A. Bayesian-based Hypothesis Testing for Topology Error Identification in Generalized State Estimation. v. 19, n. 2, p. 1206–1215, mai. 2004.
- LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A.; P JR, Raimundo Ribeiro. Steady-State Solution for Power Networks Modeled at Bus Section Level. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 1, p. 10–20, 2010.
- LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A. J. A.; CLEMENTS, K. A.; CERNEV, R. A. A topology error identification method directly based on collinearity tests. *In: 2005 IEEE Russia Power Tech. [S.l.: s.n.], 2005. P. 1–6.*
- LOURENÇO, E.M.; SIMOES COSTA, A.J.A.; CLEMENTS, K.A.; CERNEV, R.A. A Topology Error Identification Method Directly Based on Collinearity Tests. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 4, p. 1920–1929, 2006.
- LUGTU, R.L.; HACKET, D. F.; LIU, K. C.; MIGHT, D. D. Power System State Estimation: Detection of Topological Errors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-99, n. 6, p. 2406–2412, mai. 1980.
- MENEGHETTI, R. **Coestimação de estados e topologia em sistemas elétricos de potência via critério de máxima correntropia**. 2018. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil.
- MENEGHETTI, R.; SIMÕES COSTA, A.; MIRANDA, V.; ASCARI, L. B. Information Theoretic Generalized State Estimation in power systems. **Electric Power Systems Research**, v. 182, p. 106251, mai. 2020.
- MERRILL, H. M.; SCHWEPPE, F. C. Bad Data Suppression in Power System Static State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-90, n. 6, p. 2718–2725, nov. 1971. ISSN 0018-9510.
- MIRANDA, V.; SANTOS, A.; PEREIRA, J. State Estimation Based on Correntropy: A Proof of Concept. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 4, p. 1888–1889, nov. 2009. ISSN 0885-8950.
- MONTICELLI, A. Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 3, p. 1143–1149, 1993.

MONTICELLI, A. **State estimation in electric power systems: a generalized approach**. [S.l.]: Springer, 1999. v. 507.

MONTICELLI, A. The impact of modeling short circuit branches in state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 1, p. 364–370, 1993.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 6, n. 4, p. 1561–1570, 1991.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Reliable Bad Data Processing for Real-Time State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-102, n. 5, p. 1126–1139, 1983.

MONTICELLI, A.; WU, F. F.; YEN, M. Multiple Bad Data Identification for State Estimation by Combinatorial Optimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 3, p. 361–369, 1986.

NABEYAMA, G. N.; ASADA, E. N.; MATRAKAS, M. Identificação de Topologia de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica por Métodos de Aprendizagem Inteligentes. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 1, n. 1, 2020.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S.U. **Probability, random variables and stochastic processes with errata sheet**. [S.l.]: McGraw Hill Higher Education, 2002.

PESTEH, S.; MOAYYED, H.; MIRANDA, V.; PEREIRA, J.; FREITAS, V. S.; SIMÕES COSTA, A.; LONDON, J.B.A. A new interior point solver with generalized correntropy for multiple gross error suppression in state estimation. **Electric Power Systems Research**, v. 176, p. 105937, 2019. ISSN 0378-7796.

QUINTANA, V.H.; SIMÕES COSTA, A.; MIER, M. Bad Data Detection and Identification Techniques Using Estimation Orthogonal Methods. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, PAS-101, n. 9, p. 3356–3364, set. 1982. ISSN 0018-9510.

ROSS, S. **A first course in probability**. Seventh Edition. [S.l.]: Pearson, 2006. P. 282.

SANTOS, M. C. **Monitoração em tempo real da geração distribuída em sistemas de distribuição**. 2006. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil.

SCHWEPPE, F. C. Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-89, n. 1, p. 130–135, jan. 1970. ISSN 0018-9510.

SCHWEPPE, F. C.; ROM, D. B. Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-89, n. 1, p. 125–130, jan. 1970. ISSN 0018-9510.

SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-89, n. 1, p. 120–125, jan. 1970. ISSN 0018-9510.

SCHWEPPE, F.C.; HANDSCHIN, E.J. Static state estimation in electric power systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 7, p. 972–982, 1974.

SILVA, N. S.; SIMÕES COSTA, A. Two-stage hierarchical state estimation based on local substation modeling. *In*: p. 1–6.

SILVA, N. S. da. **Estimação de estados hierárquica considerando a coestimação de estados e topologia no nível de subestação**. 2015. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil.

SILVA, N.S. da; SIMÕES COSTA, A.; CLEMENTS, K.A.; ANDREOLI, E. Simultaneous estimation of state variables and network topology for power system real-time modeling. **Electric Power Systems Research**, v. 133, p. 338–346, 2016. ISSN 0378-7796.

SIMÕES COSTA, A.; LEÃO, J.A. Identification of topology errors in power system state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 4, p. 1531–1538, 1993.

SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M.; COLZANI, L. Reduced Anomaly Zone Determination for Topology Error Processing in Generalized State Estimation. *In*: IEEE. 2007 IEEE Lausanne Power Tech. [*S.l.: s.n.*], 2007. P. 137–142.

SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E.M.; CLEMENTS, K.A. Power system topological observability analysis including switching branches. **Power Systems, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 17, n. 2, p. 250–256, 2002.

SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E.M.; VIEIRA, F. Topology Error Identification for Orthogonal Estimators Considering A Priori State Information. *In: 15TH Power Systems Computation Conference*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 1–6.

SIMÕES COSTA, A.; VIEIRA, F. Topology Error Identification for Orthogonal Estimators Considering A Priori State Information. *In: 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 3, 6 pp. vol.3-.

SIMÕES-COSTA, A.; QUINTANA, V. H. An Orthogonal Row Processing Algorithm for Power System Sequential State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100, n. 8, p. 3791–3800, ago. 1981. ISSN 0018-9510.

VIEIRA, F. **Identificação de erros de topologia em sistemas de potência através de métodos ortogonais e testes de hipóteses**. 2001. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis, Brasil.

WU, F. F. Power system state estimation: a survey. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 12, n. 2, p. 80–87, 1990. ISSN 0142-0615.

WU, F.F.; LIU, W.-H.E. Detection of topology errors by state estimation (power systems). **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 4, n. 1, p. 176–183, 1989.

WU, W.; GUO, Y.; ZHANG, B.; BOSE, A.; HONGBIN, S. Robust state estimation method based on maximum exponential square. *In: 11*. v. 5, p. 1165–1172.

YIXI, C.; MA, W.; ZHAO, Y.; CHEN, Y.; HUANG, S.; XU, Z. Research and Comparative Analysis of Topology Identification Methods. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2290, 2022.

ZARCO, P.; EXPÓSITO, A.G. Power system parameter estimation: a survey. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 15, n. 1, p. 216–222, 2000.

Apêndices

APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA TESTE DE PEQUENO PORTE

Neste apêndice são apresentadas os dados das barras e das linhas do sistema de 3 barras.

Barra	Tipo	V	δ	P_d	Q_d	P_g	Q_g
1	2	1.00	0.00	0	0	0	0
2	0	1.00	0.00	0.1	0	0	0.04
3	0	1.00	0.00	0.2	0	0	0.03
4	0	1.00	0.00	0	0	0	0
5	0	1.00	0.00	0	0	0	0

Tabela A.1 – Dados das barras - Sistema de 3 barras.

Ramo	De	Para	R	X	B_{sh}
1	1	4	0.2	1	0.02
2	1	5	0.3	0.98	0.02
3	2	4	0	0	0
4	2	5	0	9999	0
5	3	4	0	9999	0
6	3	5	0	0	0

Tabela A.2 – Dados das Linhas - Sistema de 3 barras.