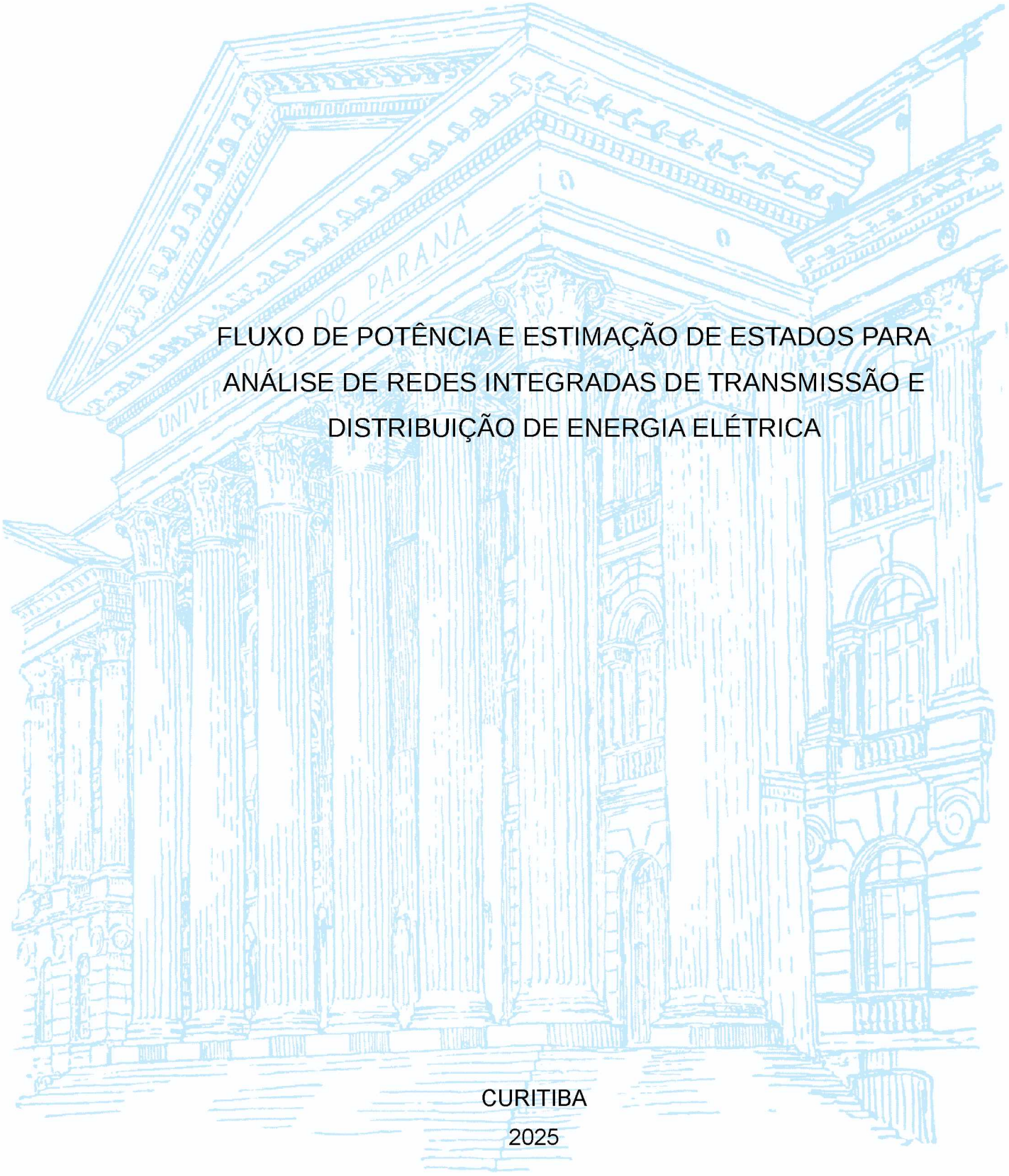
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA CORRÊA DURCE



FLUXO DE POTÊNCIA E ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PARA ANÁLISE DE REDES INTEGRADAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CURITIBA

2025

CAROLINA CORRÊA DURCE

FLUXO DE POTÊNCIA E ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PARA ANÁLISE DE REDES INTEGRADAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Tese apresentada como requisito para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço

Coorientador: Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli

CURITIBA
2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Durce, Carolina Corrêa
Fluxo de potência e estimação de estados para análise de redes integradas de transmissão e distribuição de energia elétrica / Carolina Corrêa Durce. – Curitiba, 2025.
1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Elizete Maria Lourenço
Coorientador: Odilon Luís Tortell

1. Energia elétrica – Distribuição. 2. Energia elétrica – Transmissão. 3. Sistemas de energia elétrica. 4. Fator de potência. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Lourenço, Elizete Maria. IV. Tortell, Odilon Luís. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **CAROLINA CORRÊA DURCE** intitulada: **FLUXO DE POTÊNCIA E ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PARA ANÁLISE DE REDES INTEGRADAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**, sob orientação da Profa. Dra. ELIZETE MARIA LOURENÇO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.
A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 07 de Novembro de 2024.

Assinatura Eletrônica
13/11/2024 09:12:58.0
ELIZETE MARIA LOURENÇO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
13/11/2024 00:16:05.0
JOAO BOSCO AUGUSTO LONDON JUNIOR
Avaliador Externo (ESCOLA DE ENGENHARIA DE SãO CARLOS - USP)

Assinatura Eletrônica
14/11/2024 11:41:17.0
THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
12/11/2024 22:08:48.0
ANDREA LUCIA COSTA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
14/11/2024 16:06:48.0
ODILON LUIS TORTELLI
Coorientador(a) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 411785
Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp e insira o codigo 411785

À minha querida filha Yasmin,
sem a qual essa pesquisa teria sido concluída mais cedo e
com mais qualidade, mas sem a qual eu não teria tanto
amor em meus dias e em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

À minha orientadora professora Elizete, a quem admiro enormemente como mulher, profissional, mãe e ser humano, pela orientação durante todos estes anos, pelos ensinamentos passados de maneira tão preciosa que ficarão para sempre guardados, por acreditar e insistir em mim nos momentos difíceis, que não foram poucos, pela paciência sem fim, pelas trocas, pela preocupação, pelo olhar empático e afetuoso.

Ao meu coorientador professor Odilon, por aceitar mais uma vez participar desta parceria e pelas importantes contribuições e sugestões, sempre tão disruptivas, impensáveis e surpreendentes.

Aos meus pais Janine e Sergei, pela influência acadêmica e pelo incentivo que sempre deram ao meu estudo.

Ao meu irmão Dario, minha cunhada Paula e meus sobrinhozinhos Alice e Henrique, pela torcida, pelas trocas e pelos encontros caóticos e cheios de amor, que muito ajudaram a tornar os meus dias mais leves e entender que o caos não ronda apenas a minha rotina.

À minha filha Yasmin, pela torcida e pela paciência que lhe foi exigida desde tão cedo e por tantos anos, em relação à minha ausência em cuidados e brincadeiras, para que esse sonho do doutorado se tornasse realidade. Ao meu filho Gregório, muito esperado, também pela paciência em ter uma mãe que não pôde se dedicar tanto nesses primeiros meses de gravidez.

Ao meu companheiro Filipe que entrou na minha vida já no modo bagunçado e mesmo assim quis ficar, pelo amor, pela família e pelo apoio, me encorajando em todos os momentos.

Às minhas amigas de vida, Juliana, Fernanda e Aline, que acompanharam meus anseios e dificuldades durante essa caminhada, sempre me ajudando a colocar em sincronia a maternidade, o trabalho e o estudo.

Aos amigos da UFPR que me apoiaram para a realização do meu doutorado. Em especial, ao Renan, à Andressa e ao Leonardo, por não medirem esforços colaborando comigo para a realização desta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica por ajudarem na minha formação e por terem contribuído com este trabalho.

Aos amigos e colegas do Lactec, em especial ao Felipe e Pablo, que me ajudaram e aguentaram firme as demandas profissionais nas minhas necessárias ausências, e ao meu chefe Eduardo, que não mediu esforços para facilitar o caminho do doutorado para mim sempre que possível.

Ao entregar essa tese, encerra-se um ciclo na minha vida que por muitos anos foi, e é, um grande sonho. Acredito que a busca por conhecimento é a certeza que dias melhores virão.

“Pela maior parte da história, 'anônimo',
foi uma mulher.”

Virginia Woolf

RESUMO

Este trabalho propõe uma extensão da formulação convencional de fluxo de potência desacoplado rápido de Newton-Raphson para permitir a análise de sistemas de transmissão e distribuição (T&D) em uma abordagem unificada. A extensão proposta associa a eficiência computacional bem conhecida dos algoritmos de fluxo de potência desacoplado rápido de Newton-Raphson à aplicação da normalização complexa por unidade (*cpu*). Injeções artificiais de potência em barras de fronteira de T&D são anexadas à formulação de fluxo de potência como novas variáveis de estado, a fim de manter a precisão da análise. As modificações necessárias no algoritmo de fluxo de potência desacoplado rápido de Newton-Raphson e uma visão geral da técnica de normalização *cpu* são apresentadas. Além disso, este trabalho apresenta também uma abordagem de estimação de estados desacoplada para sistemas interligados de transmissão e distribuição (T&D). A abordagem proposta é baseada em uma aplicação inovadora da normalização complexa por unidade, que além de viabilizar o uso de métodos desacoplados em sistemas de distribuição, permite o processamento de redes T&D interconectadas sem recorrer a técnicas de compensação fictícia nas barras de fronteira, o que traz robustez ao processo iterativo. Os resultados das simulações do fluxo de potência e do estimador de estados propostos atestam a relevância de uma análise unificada de T&D para determinar adequadamente a interrelação de alimentadores de distribuição ativos e a operação do sistema de transmissão. Neste contexto, o desempenho da abordagem proposta indica claramente sua eficácia para lidar com diferentes redes de energia topológicas e operacionais.

Palavras-chaves: Fluxo de potência, estimação de estados, método Desacoplado Rápido, sistemas de distribuição, sistemas de transmissão, sistemas integrados T&D, normalização complexa por unidade.

ABSTRACT

This work proposes an extension of the conventional Newton-Raphson fast decoupled power flow formulation to enable the analysis of transmission and distribution (T&D) systems in a unified approach. The proposed extension combines the well-known computational efficiency of Newton-Raphson fast decoupled power flow algorithms with the application of complex per unit normalization (*cpu*). Artificial power injections at T&D boundary buses are appended to the power flow formulation as new state variables to maintain the accuracy of the analysis. The necessary modifications to the Newton-Raphson fast decoupled power flow algorithm and an overview of the *cpu* normalization technique are presented. Furthermore, this work also presents a decoupled state estimation approach for interconnected transmission and distribution (T&D) systems. The proposed approach is based on an innovative application of per-unit complex normalization, which, in addition to enabling the use of decoupled methods in distribution systems, allows the processing of interconnected T&D networks without resorting to fictitious compensation techniques at the boundary buses, which brings robustness to the iterative process. The results of the power flow and state estimator proposed simulations and the attest to the relevance of a unified T&D analysis to adequately determine the interrelation of active distribution feeders and the operation of the transmission system. In this context, the performance of the proposed approach clearly indicates its effectiveness in dealing with different topological and operational power networks.

Keywords: Power flow, state estimation, fast decoupled method, distribution systems, transmission systems, integrated T&D systems, complex unit normalization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de rede π 40
Figura 2 - Fluxograma do algoritmo de solução do problema de EE pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados - Formulação clássica 44
Figura 3 - Fluxograma do algoritmo do Estimador de Estados desacoplado no algoritmo 49
Figura 4 - Fluxograma do algoritmo do Estimador de Estados desacoplado no modelo 51
Figura 5 - Conexão T&D radial ou fracamente malhada 58
Figura 6 - Conexão T&D malhada 58
Figura 7 - Conexão T&D totalmente malhada 58
Figura 8 - Compensação fictícia de potência em barras de fronteira T&D 59
Figura 9 - Sistema T&D ilustrativo de 4 barras 62
Figura 10 - Variáveis normalizadas: a) impedância da LT; (b) impedância da LD; (c) carga do ST; (d) carga do SD 62
Figura 11 - Sistema-teste T&D de grande porte 65
Figura 12 - Sistema-teste de SD de 12 barras 65
Figura 13 - Sistema-teste de SD de 20 barras 66
Figura 14 - Diferença nas tensões de barra do ST entre operação em anel fechado e aberto nos SDs 67
Figura 15 - Sistema-teste T&D desbalanceado 68
Figura 16 - Perfil de tensão na barra de fronteira e no SD 69
Figura 17 - Diferença de tensão nas fases das barras do ST 69
Figura 18 - Esquema ilustrativo para T&D 76
Figura 19 - Sistema T&D ilustrativo de 4 barras 79
Figura 20 - EE-Algoritmo BX com medidas perfeitas - Convergência 81
Figura 21 - EE-Algoritmo XB com medidas perfeitas - Convergência 81
Figura 22 - EE-Modelo BX com medidas perfeitas - Convergência 82
Figura 23 - EE-Modelo XB com medidas perfeitas - Convergência. 82
Figura 24 - EE-Algoritmo BX com medidas imperfeitas - Convergência 85
Figura 25 - EE-Algoritmo XB com medidas imperfeitas - Convergência 85
Figura 26 - EE-Modelo BX com medidas imperfeitas - Convergência 86
Figura 27 - EE-Modelo XB com medidas imperfeitas - Convergência 86
Figura 28 - Sistema-teste T&D de grande porte 87
Figura 29 - EE-Algoritmo BX com medidas imperfeitas - Convergência 88
Figura 30 - EE-Algoritmo XB com medidas imperfeitas - Convergência 89
Figura 31 - EE-Modelo BX - Com erro - Convergência 90
Figura 32 - EE-Modelo XB - Com erro - Convergência 90
Figura 33 - Caso A (base): SDs sem GD e com topologia radial 92
Figura 34 - Caso A (base): Fluxo de potência na fronteira T&D 93
Figura 35 - Caso B: SDs com inserção de GDs e com topologia radial 94
Figura 36 - Caso B: Fluxo de potência na fronteira T&D 95
Figura 37 - Caso C: SDs com inserção de GDs e com uma malha fechada entre eles 95
Figura 38 - Caso C: Fluxo de potência na fronteira T&D 96
Figura 39 - Caso D: SDs com inserção de GDs e com três malhas fechadas entre eles 97
Figura 40 - Caso D: Fluxo de potência na fronteira T&D 98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema T&D ilustrativo - Nº de iterações (i_P-i_Q) e fluxos de potência 64
Tabela 2 - Sistema T&D ilustrativo - Tensões complexas nas barras 65
Tabela 3 - Sistema T&D de grande porte: Nº de iterações (i_P-i_Q) 66
Tabela 4 - Sistema T&D de grande porte: Comparação dos fluxos de potência ativa do ST 67
Tabela 5 - Sistema T&D desbalanceado: Nº de iterações (i_P-i_Q) 68
Tabela 6 - Medidas elétricas por barra para sistema T&D ilustrativo de 4 barras 79
Tabela 7 - Medidas elétricas por linha para sistema T&D ilustrativo de 4 barras 79
Tabela 8 - EE-Algoritmo com medidas perfeitas - Convergência 82
Tabela 9 - EE-Modelo com medidas perfeitas - Convergência 83
Tabela 10 - Medidas elétricas por barra para sistema T&D ilustrativo de 4 barras - Com erros 83
Tabela 11 - Medidas elétricas por linha para sistema T&D ilustrativo de 4 barras - Com erros 83
Tabela 12 - EE-Algoritmo com medidas imperfeitas - Convergência 89
Tabela 13 - EE-Modelo com medidas imperfeitas - Convergência 91
Tabela 14 - Caso A: Convergência do EEDR-T&D em diferentes versões com o uso da *cpu* 93
Tabela 15 - Caso B: Convergência do EEDR-T&D em diferentes versões com o uso da *cpu* 94
Tabela 16 - Caso C: Convergência do EEDR-T&D em diferentes versões com o uso da *cpu* 96
Tabela 17 - Caso D: Convergência do EEDR-T&D em diferentes versões com o uso da *cpu* 97
Tabela A.1 - Dados de barra do SD teste de 20 barras 111
Tabela A.2 - Dados de linha do SD teste de 20 barras 112

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO 14

1.1 Motivação 14

1.2 Objetivo e contribuições 17

1.2.1 Objetivo geral 17

1.2.2 Objetivos específicos 18

1.3 Estrutura do documento 18

CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA 20

2.1 Fluxo de Potência em sistemas unificados T&D 20

2.2 Estimação de Estados em sistemas unificados T&D 24

2.3 Considerações do capítulo 32

CAPÍTULO 3: ESTIMAÇÃO DE ESTADOS APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA ..34

3.1 Estimação de Estados: Formulação clássica 34

3.1.1 Formulação clássica: Método dos Mínimos Quadrados Ponderados 36

3.1.2 Solução clássica: Equação Normal de Gauss 37

3.1.3 A função de medidas: $\boldsymbol{hxk}$ 38

3.1.4 Matriz Jacobiana: $\boldsymbol{H}$ 41

3.1.5 Matriz Ganho: $\boldsymbol{G}$ 43

3.1.6 Fluxograma do EE pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados - Formulação clássica 43

3.2 Estimação de Estados: Formulações Desacopladas 44

3.2.1 Estimador de estados desacoplado no algoritmo 47

3.2.2 Estimador de estados desacoplado no modelo 49

3.3 Considerações do capítulo 52

CAPÍTULO 4: FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS T&D 53

4.1 Introdução 53

4.2 Normalização complexa por unidade 54

4.3 Metodologia para fluxo de potência desacoplado para sistemas T&D 58

4.3.1 Compensação de potência nas barras de fronteira dos sistemas T&D 59

4.3.2 Formulação do FPDR-T&D via normalização complexa proposto 61

4.3.3 Sistema T&D ilustrativo 62

4.4 Simulações e resultados 63
4.4.1 Aplicação do FPDR-T&D no sistema ilustrativo 64
4.4.2 Aplicação do FPDR-T&D em sistema de grande porte: Avaliação de diferentes condições operacionais 65
4.4.3 Aplicação do FPDR-T&D em sistema desbalanceado 67
4.5 Considerações Finais 69
CAPÍTULO 5: ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PARA SISTEMAS T&D 71
5.1 Introdução 71
5.2 Metodologia para estimação de estados desacoplada para sistemas T&D 72
5.2.1 Impacto da normalização complexa por unidade no EEDR-T&D proposto 73
5.2.2 Formulação do EEDR-T&D via normalização complexa proposto 75
5.3 Simulações e resultados 78
5.3.1 Aplicação do EEDR-T&D no sistema ilustrativo 78
5.3.2 Aplicação do EEDR-T&D em sistema de grande porte: Avaliação do desempenho . 87
5.3.3 Aplicação do EEDR-T&D em sistema de grande porte: Avaliação de diferentes condições operacionais 91
5.4 Considerações Finais 98
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES 99
6.1 Sugestões de trabalhos futuros 100
6.2 Publicações 100
REFERÊNCIAS 102
ANEXOS 111
ANEXO A - Dados do sistema-teste de distribuição de 20 barras 111

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O setor elétrico brasileiro vem passando por consideráveis modernizações em sua estrutura tradicional de sistemas de geração, transmissão e distribuição, visando atender uma sociedade cada vez mais eletrodependente e exigente quanto à qualidade e ao fornecimento de energia, contribuindo para o aumento da complexidade no âmbito da operação e do planejamento do sistema elétrico.

Além disso, a preocupação com o carbono e suas emissões ganhou destaque significativo nas últimas décadas devido ao aumento das evidências científicas sobre as mudanças climáticas e seus impactos. Como consequência, houve uma crescente conscientização pública sobre a urgência em reduzir as emissões de carbono, conhecida como descarbonização, para limitar o aquecimento global e garantir um futuro sustentável para as gerações futuras (MME; EPE, 2020).

A descarbonização vem como uma ação necessária para combater essa crise ambiental, através de tecnologias de remoção de carbono emitido como, no setor de energia, a transição energética para fontes de energia renovável, apontada como um dos grandes pilares para o crescimento econômico e social dos países, de forma justa e inclusiva. Entretanto, a transição energética também é um desafio para a evolução sustentável e resiliente do sistema elétrico brasileiro. Com o aumento da participação de fonte de energias renováveis, como solar e eólica, no mix energético, o sistema elétrico em todos os seus níveis precisa lidar com alta inserção de recursos energéticos renováveis intermitentes (MME; EPE, 2020). Isso requer a implementação de tecnologias de redes inteligentes, modernização da infraestrutura existente, instalação de tecnologias de informação e comunicação para realizar coleta, análise e tratamento eficaz de grandes volumes de dados e investimento em sistemas de gerenciamento e controle de energia para garantir a operação segura e eficiente do sistema.

Uma vez que os sistemas de transmissão (STs) eram tradicionalmente mais complexos, os sistemas de monitoramento e controle estiveram, até recentemente, voltados principalmente para esse nível de tensão da rede. Consequentemente, os ambientes de planejamento e operação de STs foram mais pesquisados e desenvolvidos para estes sistemas quando comparados aos sistemas de distribuição (SDs), gerando um amplo conhecimento tanto na análise em regime permanente, como estudos de fluxo de potência, fluxo de potência ótimo, estimação de estados, estabilidade de tensão, análise potência reativa, análise de perdas, cálculo de capacidade de carga, análise de contingências, etc., quanto na análise de transitórios, como análise de falhas, estudo de transientes eletromagnéticos,

análise de oscilações de potência, estudo de proteção, simulação de eventos transitórios, etc. Ademais, as áreas de monitoramento, de tecnologia da informação e comunicação e de gestão de dados de STs também têm superior vantagem de desenvolvimento em relação aos SDs.

Ainda que muitas destas abordagens estejam mais consolidadas para os STs, com os avanços tecnológicos nos SDs, em consequência das implantações de tecnologias *Smart Grid* e da inserção massiva de geração distribuída (GD), torna-se importante um monitoramento e controle mais atuantes dos SDs, justificando também a evolução de novas metodologias neste meio. Entretanto, os SDs possuem particularidades se comparados aos STs, como topologia radial e extensa (com centenas ou mesmo milhares de barras/nós), desbalanceamento das fases, baixa relação X/R dos cabos, e, tradicionalmente, baixa redundância de medidas. Segundo Ochoa (2015), algumas aproximações mascaram a análise da distribuição e prejudicam análises em tempo real, como, por exemplo, assumir fases balanceadas em redes de baixa tensão (BT), simplificar o perfil de carga visando o planejamento, usar variáveis determinísticas ao invés de variáveis estocásticas, avaliar individualmente os sistemas dificultando estimar os impactos de um nível de tensão em outro, etc.

Nos últimos anos, as tecnologias *Smart Grids* vêm modernizando os SDs em diversos aspectos, mas principalmente no quesito da automação da distribuição, com sensores, medições e comunicação, tornando a distribuição uma área com grandes volumes de dados. Além disso, o recente aumento no número de fontes de energia renováveis conectadas à rede em níveis de tensão mais baixos exige um monitoramento mais próximo dos SDs e, portanto, forçam as concessionárias a atualizar suas operações e implantar Sistemas Avançados de Gerenciamento da Distribuição (do inglês *Advanced Distribution Management System* - ADMS) (LANGNER; ABUR, 2021).

Embora o SD venha sendo a área do sistema elétrico mais impactada com as estratégias de modernizações do setor nos últimos anos, o ST também sofre consequências dessas evoluções. Um exemplo é a complexidade frente à conexão de grandes parques eólicos nos STs, que trazem desafios como flutuações na quantidade de energia injetada na rede dificultando a operação do ST, necessidade de reservas operacionais para compensar as oscilações rápidas na produção de energia, impactos na estabilidade de tensão e de frequência, sobrecarga das linhas de transmissão (LTs) existentes e congestionamento imprevisível da rede, necessidade de sistemas avançados de controle e automação e de monitoramento contínuo e em tempo real (BLAABJERG; MA, 2017).

Além disso, é de fundamental importância destacar os impactos que SDs com altos índices de GD causam nos STs, como bidirecionalidade do fluxo de energia exigindo adaptações nos sistemas de proteção e controle, oscilações de tensão e frequência necessitando uma resposta mais rápida e precisa dos STs, problemas de estabilidade angular devido à integração de grandes quantidades de GD,

necessidade de coordenação mais estreita entre operadores de transmissão e distribuição para garantir a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico e, mais uma vez, a necessidade de sistemas avançados de controle e automação e de monitoramento contínuo e em tempo real (GUPTA; ABHYANKAR, 2022).

Nesse mesmo sentido e sob uma ótica do mercado de energia, Catalão e Hatziargyriou (2023) ainda revelam de forma assertiva de que maneira os SDs impactam os STs e vice-versa. Segundo eles, as diretivas de política e as inovações tecnológicas fomentaram o surgimento de uma estrutura de mercado hierárquica, que consiste em mercados centralizados e descentralizados. É previsto que os recursos energéticos serão livres para participar de todas as estruturas de mercado ao mesmo tempo para extrair o máximo valor para a rede e monetizar seus serviços. Sob essa arquitetura de mercado, os operadores de rede podem adquirir serviços de energia de ativos conectados tanto no nível de transmissão quanto no de distribuição de forma coordenada. Essa estrutura requer um gerenciamento e otimização de rede eficientes, também para o benefício dos Recursos Energéticos Distribuídos (DERs) na transição para uma economia descarbonizada. O mesmo conjunto de recursos pode ser usado por Operadores de Sistemas de Transmissão (do inglês *Transmission System Operator* - TSOs) e Operadores de Sistemas de Distribuição (do inglês *Distribution System Operator* - DSOs), de modo que as ações de ambos podem afetar mutuamente um ao outro. Portanto, TSOs e DSOs precisam coordenar suas atividades para tornar a estrutura de mercado hierárquica uma realidade. Para manter a operação geral do sistema segura e estável, os SDs precisam fornecer a flexibilidade disponível na interface com a rede de transmissão sobreposta seguindo as instruções do TSO. Ao mesmo tempo, os DSOs devem ter permissão para usar a flexibilidade do DER para evitar congestionamentos e problemas de segurança em seus próprios SDs. Além disso, a cooperação em várias áreas de controle entre diferentes TSOs e a coordenação entre TSOs e produtores de energia que estão fornecendo serviços fronteiriços são essenciais para promover futuros designs de mercado.

Como destacado em (PILATTE; ARISTIDOU; HUG, 2019), espera-se que os SDs deem suporte ativo ao ST, participando de serviços ancilares com a ajuda de tecnologias de informação e comunicação e técnicas avançadas de gerenciamento e controle. Por essas razões, a interação entre as redes de Transmissão e Distribuição (T&D) tornou-se objeto de muitas pesquisas nos anos mais recentes.

Nesse sentido, diversos trabalhos têm demonstrado a necessidade do desenvolvimento de novas metodologias que sejam capazes de realizar análises integradas de sistemas de T&D (Dugan, 2010; Mohseni-Bonad, 2020; Munoz-Delgado, 2021; Sharma, 2022). Esses trabalhos evidenciam a complexidade da operação e tomada de decisões dos SDs, que passaram a exigir uma análise

minuciosa dos impactos mútuos das interações entre os ST e SD. Em decorrência dessa nova realidade, encontram-se na literatura técnico-científica diversos estudos e abordagens que apontam a análise de STs e SDs de maneira unificada como uma contribuição necessária e relevante para a área.

Trabalhos relativamente recentes propõem novos procedimentos e metodologias que permitam efetivamente realizar uma análise integrada de redes elétricas de T&D. Esses envolvem diversas áreas do sistema elétrico, como fluxo de potência (FP) (Portelinha, 2019; Pandey, 2020; Portelinha, 2021), análises de planejamento (Munoz-Delgado, 2021), simulações dinâmicas (Thakar, 2021), fluxo de potência ótimo (Mohseni-Bonab, 2020) e reconfiguração de redes (Chen, 2024). Esses novos desenvolvimentos de análise integrada de T&D têm relevância também para os procedimentos da operação em tempo real, tanto pela característica de intermitência das fontes renováveis de GD, quanto pela busca por uma operação confiável dentro desse novo cenário. A garantia de uma base de dados confiável para redes integradas de T&D, que permita usufruir com segurança desses novos recursos energéticos e assegure a eficácia das diversas aplicações em tempo-real, é atribuição da Estimação de Estados (EE), que precisa igualmente de novos avanços para permitir a análise integrada de redes de T&D. Essa necessidade da extensão dos métodos de EE para análise unificada de redes T&D já eram apontados no início da década passada (ZEGERS; BRUNNER, 2014; GOMEZ-EXPOSITO et al., 2011; XIE et al., 2012). Entre as motivações, os autores apontam o congestionamento da fronteira T&D e das LTs com aumento de GDs ou carga, desafios no balanço de geração e consumo frente ao avanço da GD intermitente, o suporte de tensão de um sistema ao outro (ST para o SD, e vice-versa) através de ajustes nos transformadores de fronteira e da flexibilidade do SD, (anti-) ilhamento, ressincronização e partida autônoma considerando a possibilidade cada vez maior de partes do SD serem desconectadas da rede.

t

1.2 Objetivo e contribuições

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um fluxo de potência desacoplado rápido e um estimador de estados desacoplado rápido que sejam capazes de processar os sistemas de transmissão e distribuição de maneira unificada através do uso da normalização complexa por unidade, de modo a transcender as fronteiras bem conhecidas da tradicional segregação do SEP em ST e SD, visando uma metodologia capaz de permitir a monitoração precisa da interferência crescente entre a operação dos SDs nos STs e vice-versa.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos que constituem o desenvolvimento deste projeto são apresentados a seguir:

i. Formular, modelar matematicamente e implementar computacionalmente o fluxo de potência desacoplado rápido com o uso da técnica de normalização complexa por unidade com compensação fictícia, visando uma análise unificada T&D.

ii. Formular, modelar matematicamente e implementar computacionalmente o estimador de estados desacoplado rápido convencional no modelo e no algoritmo e implementá-los em ambiente computacional.

iii. Incluir nesta modelagem do estimador de estados desacoplado rápido convencional a técnica de normalização complexa por unidade sem compensação fictícia, visando uma análise unificada T&D.

iv. Analisar o esforço computacional, o potencial e a precisão dos métodos propostos através de simulações computacionais com sistemas-teste T&D sob diferentes arranjos de topologia e cenários de operação.

v. Publicar artigos em congressos e periódicos contemplando cada uma das metodologias propostas.

1.3 Estrutura do documento

O presente documento é composto por seis capítulos, sendo este o primeiro capítulo introdutório, o qual situa o leitor no contexto do tema abordado através da motivação da pesquisa, além de apresentar os objetivos e contribuições deste trabalho e a organização do documento.

O capítulo 2 traz a revisão da literatura dos principais trabalhos encontrados na literatura técnico-científica sobre sistemas unificados T&D com ênfase em FP e EE. Tal capítulo visa apresentar o histórico de pesquisas que permitiu avançar e evoluir nesse tema, mostrando os esforços ao longo deste caminho e, também, os últimos avanços existentes no nível mundial, reiterando a importância do assunto.

O capítulo 3 busca inteirar o leitor dos temas desta tese, com uma revisão da formulação clássica da EE, seguida da formulação do estimador de estados desacoplado rápido com detalhamento do estimador desacoplado no algoritmo e do estimador desacoplado no modelo.

O capítulo 4 introduz o primeiro método proposto, que se trata de um fluxo de potência via método Desacoplado Rápido para sistemas integrados T&D. É apresentada a técnica que embasa o método proposto, que é a normalização complexa por unidade com compensação fictícia de potência nas barras de fronteira do sistema interligado T&D. Ainda, neste capítulo são apresentados e analisados os principais resultados dos testes e simulações realizadas e resultados a partir da implementação fluxo de potência via método Desacoplado Rápido para sistemas integrados T&D proposto. Sistemas-testes de transmissão e de distribuição de pequeno e grande porte foram combinados de maneira a permitir a análise do desempenho do método proposto.

Já o capítulo 5 apresenta o segundo método proposto, isto é, um estimador de estados via método Desacoplado Rápido para sistemas integrados T&D. Esse capítulo traz uma releitura da técnica de normalização complexa por unidade, neste caso sem compensação fictícia de potência nas barras de fronteira do sistema interligado T&D. Além disso, são explanados as simulações computacionais e os resultados obtidos a partir de diferentes cenários operacionais de sistemas-testes T&D de pequeno e grande porte combinados com a intenção de avaliar e validar o estimador de estados via método Desacoplado Rápido para sistemas integrados T&D proposto.

Por fim, as conclusões e considerações finais são apresentadas no capítulo 6. Aqui são, também, destacadas algumas possibilidades de trabalho futuro de forma a desenhar possíveis caminhos de investigação relacionados à pesquisa apresentada nesta tese.

CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA

Tradicionalmente, as redes elétricas são divididas e analisadas separadamente, levando em consideração as distintas funções e particularidades de cada segmento, como nos STs e SDs convencionais. Essa abordagem foi adotada em razão das dificuldades em desenvolver ferramentas e métodos que permitam a análise do sistema elétrico como um todo, exigindo frequentes simplificações. Esse padrão é comum em diversas áreas de análise de redes elétricas do SEP, incluindo o estudo do FP e da EE, que são os temas abordados neste trabalho. No entanto, essas aproximações podem limitar os métodos utilizados e distorcer os resultados obtidos.

Este capítulo apresenta um levantamento do estado da arte ao redor do tema de FP e de EE em SEP. A ênfase é dada no caminho percorrido pela comunidade técnico-científica em estudos e pesquisas sobre metodologias e práticas existentes para lidar com o FP e a EE em sistemas unificados T&D. Busca-se elucidar onde o presente trabalho se encontra e qual sua contribuição dentro do universo deste tema, trazendo uma visão geral do que já foi desenvolvido e das fronteiras do tema.

2.1 Fluxo de Potência em sistemas unificados T&D

Em 1956, foi introduzido o primeiro método de solução do fluxo de potência utilizando um computador digital. Até a década de 60, o método de Gauss-Seidel era o mais empregado para a solução do FP. Sua popularidade se devia à facilidade de programação, à simplicidade dos cálculos em cada iteração e ao baixo consumo de memória, o que o tornava adequado para os computadores da época. No entanto, esse método apresentava algumas limitações, como a vulnerabilidade em sistemas mal condicionados e uma convergência lenta, especialmente com o aumento da dimensão do problema, que fazia o número de iterações aumentar rapidamente (WARD; HALE, 1956).

O método de Newton como solução para o problema do FP foi proposto em 1961, mas essa abordagem era restrita a STs. Embora a proposta demonstrasse excelente convergência, a alta demanda de processamento e o esforço necessário para armazenar e inverter matrizes a cada iteração inviabilizaram o método até aquele momento (VAN NESS; GRIFFIN, 1961).

Em 1967, o método de Newton foi aprimorado com a implementação da ordenação ótima da Eliminação de Gauss e armazenamento compacto (TINNEY; HART, 1967). Essa otimização trouxe melhorias significativas na velocidade, no uso de memória e na precisão na solução do FP. Ainda, o método demonstrou robustez, apresentando bom desempenho mesmo em redes mal condicionadas.

Desde então, a abordagem de Tinney e Hart (1967) se tornou uma referência na solução do FP potência, originando várias derivações que são amplamente utilizadas até hoje.

Em 1974, foi introduzida uma das variações mais significativas do método de Newton, o método Desacoplado Rápido (STOTT; ALSAÇ, 1974). Este método se baseia na forte sensibilidade observada em STs entre a potência ativa e o ângulo de tensão ($P - \theta$), bem como entre a potência reativa e a magnitude de tensão ($Q - V$). Aproveitando esse forte acoplamento, foram feitas aproximações na matriz Jacobiana. Em vez de ser calculada e invertida a cada iteração, essa matriz foi substituída por matrizes fixas, conhecidas como B' e B'', o que representou um grande avanço para a viabilidade do método. Os autores também propuseram ajustes na construção dessas matrizes, o que levou à versão XB do método Desacoplado Rápido. As principais modificações incluíram a desconsideração das resistências séries na formação da matriz B' e a exclusão dos elementos da rede associados à potência reativa. O método Desacoplado Rápido demonstrou ser mais ágil do que os métodos anteriores, mantendo a precisão, a convergência e um baixo consumo de memória. Sua convergência foi satisfatória e mostrou-se tão eficiente quanto o método de Newton, tornando-se bastante popular e sendo amplamente utilizado em programas para cálculo de fluxo de potência até hoje. Por outro lado, esse método funcionou bem apenas em STs de alta tensão, devido à elevada razão X/R das linhas, em SDs, onde as relações X/R costumam ser menores, o desempenho do método Desacoplado Rápido é comprometido, resultando em dificuldades de convergência.

Assim, para solução do FP em STs geralmente utiliza-se o método Newton-Raphson e suas variações desacopladas rápidas tendo em vista suas particularidades, como topologia malhada, altas tensões e alta relação X/R nas LTs. Em contrapartida, para SDs, que possuem uma topologia tradicionalmente radial e relações X/R mais baixas, é frequente a aplicação dos métodos de varredura frente e trás (SHIRMOHAMMADI et al., 1988; CESPEDES, 1990). Entretanto, mesmo existindo adaptações aos métodos de varredura, eles ainda enfrentam dificuldades em lidar com condições operacionais mais complexas, como topologia em anel, alto carregamento, alta inserção de GD e dispositivos de controle. Em Eminoglu e Hocaoglu (2009) são discutidos os avanços nos métodos de varredura através de um levantamento de diversos métodos de varredura, suas propriedades de convergência e sua capacidade de lidar com sistemas operando malhado e com a presença de GD.

Ao longo dos anos, novas metodologias de estudo do FP foram propostas considerando a evolução da topologia tradicional radial dos SDs para configurações em malhas em SDs ativos. Algumas que merecem destaque são a análise por admitância nodal (DUGAN; MCDERMOTT, 2011) e a análise por injeções de corrente (GARCIA; PEREIRA et al., 2000).

Apesar de várias metodologias de FP para SD independentes terem sido propostas, o autor Happ (1970), nos anos 70, já demonstrava uma preocupação em desenvolver análises integradas que conectem diferentes sistemas de potência e níveis de tensão apresentando métodos para resolver o FP em sistemas de grande porte, dividindo o sistema em subsistemas mais simples que compartilham uma barra comum. Esses métodos foram posteriormente aprimorados por Andretich et al. (1971).

Dugan e McDermott (2011) e Arritt e Dugan (2011) discutem a análise de SDs modernos e quais pontos são importantes de serem considerados visando enfrentar os novos desafios nos SEPs. Destaque é dado à necessidade de aprimorar as ferramentas computacionais de análises de redes, visando estudos mais integrados entre SDs de alta e baixa tensão além de considerar o impacto destes no ST, podendo melhorar significativamente a segurança e a eficiência operacional de toda a rede elétrica.

Em Marinho e Taranto (2008) foi proposta uma formulação híbrida para a solução do FP que integra modelos trifásicos e monofásicos, sendo o ST representado de maneira monofásica, através da componente simétrica positiva, e o SD podendo ser descrito tanto pelas componentes simétricas, positiva, negativa e zero, quanto pelas componentes de fase, a, b e c. Nesta abordagem, a solução do FP é resolvido através dos métodos tradicionais, como o método de Newton-Raphson.

Em Sun e Zhang (2008), os autores introduzem o conceito de fluxo de potência global, fundamentado na ideia de sistemas mestre-escravo, onde tanto ST quanto os SDs conectados a ele são representados fisicamente, sendo o ST o sistema mestre e os SDs os sistemas escravos. Para a resolução desse sistema, é definido um conjunto de barras de fronteira entre o sistema mestre e os sistemas escravos, que permite a troca de informações entre eles. Nesta proposta, pode-se utilizar o método Desacoplado Rápido para solução do FP no ST e o método da varredura frente e trás para os SDs.

Esta abordagem deu origem a outras propostas. Em um estudo sequencial, Sun, Guo et al. (2015) aprofundam a pesquisa e o método proposto passa a permitir várias representações para os sistemas se adaptando a problemas de diferentes escalas. O ST é representado de maneira monofásica, utilizando a componente de sequência positiva, enquanto os SDs são representados de maneira trifásica por meio das três componentes de fase. Adicionalmente, o arranjo de sistema mestre-escravo possibilita o uso de diferentes bases para o cálculo por unidade nos sistemas, desde que as conversões necessárias para a troca de informações entre o ST e os SDs sejam consideradas.

Em um outro trabalho sequencial, na abordagem proposta por Huang e Vittal (2017) é sugerido que o FP global do ST seja modelado utilizando as três componentes simétricas (positiva,

negativa e zero), enquanto os SDs são representados pelas componentes de fase, mantendo a metodologia baseada no sistema mestre-escravo. Tal proposta prevê que as condições trifásicas na conexão entre o ST e os SDs não são necessariamente equilibradas, lidando de forma mais adequada com análises dinâmicas.

Em mais uma continuação deste método, Yang e Yun (2020) propõem uma melhoria do método de divisão mestre-escravo baseado no equivalente de Thevenin da rede de Huang e Vittal (2017), no qual, ao invés de considerar uma fonte de tensão ideal para a primeira barra do SD, é considerada a ligação de um equivalente de Thevenin do ST.

O trabalho de K. Li et al. (2017) aborda o processamento paralelo de subsistemas baseado na divisão dos sistemas em mestre-escravo para resolver o FP de sistemas T&D interligados. TSO e DSO calculam seus respectivos FPs independentemente. Apenas algumas informações são passadas entre os operadores. Primeiramente, calcula-se o FP dos subsistemas de SDs e, então, realiza-se uma análise de sensibilidade das tensões em relação às injeções de potência reativa a fim de adequar o valor da tensão na barra de fronteira do sistema T&D, permitindo, finalmente, a solução do FP do ST. Nesta abordagem, para solução do problema do FP utiliza-se o método Newton-Raphson.

Em Zhu et al. (2019) é proposto um método de cálculo de FP unificado para integração de ST e SD considerando o desequilíbrio trifásico do SD e a influência das GDs com base no algoritmo de decomposição e coordenação sob a estrutura do cálculo de iteração alternada. No ST é utilizado o método convencional Newton-Raphson no cálculo do FP. Já no SD, o método de solução do FP é um método de injeção de potência trifásico baseado em Newton.

A abordagem proposta por Y. Wang et al. (2020) baseia-se no FP linear. O método calcula, inicialmente, os ângulos de fase das tensões das barras do sistema e, na sequência, as magnitudes das tensões das barras através das equações de injeção de potência reativa. Então, são realizados ajustes nas magnitudes das tensões das barras PQ. Então, as injeções de potência ativa são ajustadas e, finalmente, calculadas as tensões das barras do sistema.

Além dos métodos já citados, várias abordagens foram propostas na literatura científica baseadas em adaptações dos métodos Newton-Raphson e das versões desacopladas para SDs a fim de ajustar as relações X/R das LDs para níveis de LTs (WU, 1977; DYLIACCO; RAMARAO, 1977; DECKMANN et al., 1980; GARCIA; MONTICELLI, 1984; HALEY; AYRES, 1985). Também, foram propostas modificações diretas nas equações do problema de FP sem alterar a topologia da rede (RAJICIC; BOSE, 1988; Wang et al., 1990) ou, então, modificações nos elementos da matriz Jacobianas (NANDA; KOTHARI; SRIVASTAVA, 1987; AMERONGEN, 1989).

Em Lourenço, Loddi e Tortelli (2010), é proposto um FP unificado via método Newton-Raphson que visa processar, por meio de um único algoritmo, sistemas interligados de distribuição ao aplicar diferentes bases de potência complexa a diferentes partes do sistema. Como continuação deste trabalho, Durce, Lourenço e Tortelli (2011), ao FP unificado via método Newton-Raphson proposto, ajustaram artificialmente a relação X/R dos SD para níveis de STs inserindo injeções de potência compensatórias fictícias nas barras de fronteira entre os STs e SD com diferentes bases de potências complexas através da aplicação da normalização complexa por unidade, porém ainda para o método de Newton-Raphson. No estudo sequencial, Durce, Lourenço, Tortelli e Loddi (2012), foi proposto um FP unificado via método Desacoplado Rápido com a aplicação da técnica *cpu* para SDs.

2.2 Estimação de Estados em sistemas unificados T&D

Em 1970, a partir da publicação de uma sequência de artigos intitulados *Power System Static-State Estimation*, a EE foi proposta como ferramenta de suporte ao ambiente de operação no âmbito de Sistemas Elétricos de Potência (SCHWEPPE, 1970; SCHWEPPE; ROM, 1970; SCHWEPPE; WILDES, 1970). Através dela, conjuntos de medidas são processados e a partir da relação matemática entre os estados do sistema (tensão complexa nas barras) e as medidas disponíveis, é possível encontrar o estado de operação em tempo real da rede em questão.

A EE é importante no monitoramento e no controle dos sistemas elétricos e tem como objetivo minimizar os erros decorrentes das telemedidas advindas da rede elétrica ou do sistema de comunicação, fornecendo estimativas confiáveis para os estados da rede através da redundância de dados e informações. Além de acesso às medidas analógicas, é necessário conhecer a topologia e os parâmetros da rede. Assim, barras que não são diretamente supervisionadas têm seu estado estimado (MONTICELLI, 1999).

Desde que a EE foi introduzida como ferramenta de suporte ao ambiente de operação de STs, muitos pesquisadores e especialistas uniram estudos e esforços para consolidar a EE como uma ferramenta computacional crucial para a operação em tempo real de STs (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004; MONTICELLI, 1999).

A EE é um algoritmo implementado nos sistemas de gerenciamento de energia (do inglês *Energy Management Systems* – EMS) dos centros de controle de concessionárias de energia para monitorar SEPs e determinar seu estado operativo mais provável a partir do cálculo dos valores de tensões e ângulos em todas as barras da rede elétrica considerando um número mínimo de sensores alocados de maneira otimizada. Para seu funcionamento, é importante que dispositivos e medidores

coletem informações sobre grandezas elétricas da rede em campo e transmitam os dados coletados ao centro de controle para um sistema supervisório de aquisição de dados utilizando canais e protocolos de comunicação específicos, permitindo acompanhar perfis típicos de carga e tensão durante um período de tempo desejado. A EE se torna imprescindível por oferecer um estado operativo confiável ao operador garantindo uma operação eficaz por meio da avaliação da segurança e estabilidade de tensão com o propósito de verificar a proximidade do ponto operativo à instabilidade. A EE impacta diretamente nos resultados das principais funcionalidades que permitem a análise de redes: fluxo de potência, fluxo de potência ótimo, despacho da geração, análise de contingências incluindo retirada ou perda de transformadores, unidades de geração e LTs (DELGADO DE MELO, 2022).

Conforme a EE ia se consolidando, outras ferramentas foram surgindo para complementar o conceito, como: i) configurador de rede e topologia: responsável por processar as medidas transmitidas pelo SCADA para determinar a topologia atual da rede; ii) pré-filtragem: testes de compatibilidade feitos nas medidas analógicas a fim de detectar e descartar medidas esdrúxulas antes da modelagem do sistema; iii) análise de observabilidade: verificar se as informações das medidas são suficientes para se obter o estado da rede; iv) processamento de erros grosseiros: detectar a presença de medidas espúrias; v) estimação de estados propriamente dita: capaz de fornecer a melhor estimativa para as tensões complexas nas barras da rede; vi) monitoramento de segurança: pela resposta do estimador de estados, é possível identificar o estado de operação da rede (normal, de emergência ou restaurativo); vii) análise de segurança: avaliar as possíveis contingências e o impacto do sistema externo; e viii) controle preventivo: acionado quando a análise de segurança concluir que a rede está num estado inseguro (MONTICELLI, 1999).

A formulação para resolução do problema de EE em STs mais amplamente utilizada é baseada no método dos Mínimos Quadrados Ponderados, onde o problema de minimização é resolvido iterativamente. Os estimadores baseados neste método podem ser solucionados das através de diversos algoritmos de otimização, como: método da Equação Normal (método clássico), métodos ortogonais (método de *Golub*, rotação de *Givens*), métodos desacoplados (no algoritmo e no modelo), método do Tableau Esparso (ou Hachtel, ou Matriz Aumentada) e métodos híbridos (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004; MONTICELLI, 1999).

O principal esforço computacional da solução do problema do EE pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados está no cálculo da matriz Ganho e/ou a matriz Jacobiana, a depender da versão desacoplada em questão. Por ser interessante manter essa(s) matriz(es) constantes, ainda que de forma aproximada a fim de reduzir os esforços computacionais, Horisberger, Richard e Rossier (1976)

propuseram pela primeira vez estender o princípio de desacoplamento $P\theta - QV$ conhecido nos estudos do FP, graças às pesquisas de Stott e Alsaç (1974), para a EE. Eles usaram um algoritmo desacoplado no qual nenhuma aproximação foi introduzida ao lado direito da Equação Normal, apenas diretamente na matriz Ganho, e o desempenho do método proposto não foi comparável ao obtido com o FP desacoplado rápido. Tais estimadores foram definidos posteriormente como estimadores desacoplados no algoritmo.

Mais tarde, estimadores desacoplados no modelo, os quais introduzem a aproximação de desacoplamento na matriz Jacobiana em vez de apenas na matriz Ganho, afetando ambos os lados da equação normal, foram estudados por vários autores (ASCHMONEIT et al., 1976; ALLEMONG; RADU; SASSON, 1982; GARCIA et al., 1979). Esses estudos mostraram que para o sucesso dos estimadores desacoplados rápidos era necessária a introdução das aproximações em ambos os lados da equação normal. Comprovou-se que os erros associados a esse desacoplamento de modelo são aceitáveis para fins de estimação de estados (MONTICELLI, 1999).

Em Wang e Quintana (1984) apresentam um algoritmo desacoplado que usa, ao invés de uma única submatriz da matriz Ganho, uma única submatriz da matriz Jacobiana. O método de *Givens* é, então, usado para resolver o problema de Mínimos Quadrados Ponderados. Dessa forma, o algoritmo combina a técnica de desacoplamento e as transformações de *Givens* de forma natural e próxima, ganhando em confiabilidade e convergência rápida.

A partir de então, várias versões desacopladas muito semelhantes foram propostas e todas apresentavam desempenhos completamente diferentes quando aplicadas a sistemas que apresentam baixas relações X/R das linhas. Monticelli e Garcia (1990), então, propuseram uma alternativa aos estimadores desacoplados que fosse capaz de lidar com essa característica. Nessa abordagem, diferentemente do método desacoplado tradicional, o desacoplamento não está em desprezar submatrizes e, sim, na adoção de um procedimento de dois passos que resolve as equações do método de Newton, sem maiores aproximações. Este método é mais robusto que a versão desacoplada tradicional, com uma melhor convergência para redes com baixas relações X/R.

A consolidação do método desacoplado fomentou muitos estudos que se seguiram, surgindo variações nos métodos tendo como objetivo melhorar a convergência e obter resultados confiáveis para diferentes aplicações, tais como: uso da programação linear para resolver o problema de EE (IRVING; OWEN; STERLING, 1978; EL-KEIB; SINGH, 1992; LO; MAHMOUD, 1986); aplicação das derivadas de primeira e segunda ordem nas equações de um SEP CA-CC desacoplando sem zerar os blocos fora da diagonal das matrizes Jacobiana e ganho (SINHA; ROY; SRIVASTAVA, 1994); aplicação de

um operador rotacional na função de medidas, resultando em um desacoplamento automático das matrizes Jacobiana e Ganho (ROY; MOHAMMED, 1997); e vários outros estudos.

Desde que EE foi proposta como ferramenta de suporte a SEP, seus desenvolvimentos e evoluções eram destinados aos STs, que possuíam uma ampla gama de medições, diferentemente dos SDs. A solução do problema da EE pode ser resolvida de diferentes maneiras e a escolha do método de solução deve levar em consideração as particularidades do sistema em questão. Além da falta de medições, outras particularidades dos SDs fizeram com que, historicamente, o estimador de estados para SDs fosse adaptado dos métodos utilizados e consolidados nos STs ou fosse criado a partir do método de varredura (MONTICELLI, 2000). Contudo, como Sun et al. (2015) destacam, a mera simplificação do SD, sem considerar suas particularidades, pode acarretar em desvios nos cálculos de tensão e potências nas barras de fronteira, perdas da barra de referência devido ao aumento de chaveamento automático na distribuição, fluxos de potência bidirecionais devido à inserção de GD, etc.

Se por um lado houve um rápido interesse e consolidação de pesquisas para EE em STs, por outro apenas na década de 90 iniciaram-se os desenvolvimentos em relação aos SDs. Os primeiros trabalhos de pesquisa começaram a explorar as particularidades dos SDs e inseri-las aos métodos consolidados para STs, trazendo novos métodos específicos e modelos mais adequados para acomodar as características do SD. Algumas dessas peculiaridades são desafios bem conhecidos não apenas para a EE do SD, mas para os estudos de análise de rede como um todo, como: cargas desbalanceadas, representação trifásica, linhas com baixa relação X/R, topologia radial típica e extensa e falta de medidas em tempo real (MASSIGNAN, 2021).

Os interesses na aplicação dessa ferramenta para SDs datam da década de 90 com Roytelman e Shahidehpour (1993), Baran e Kelley (1994), Lu, Teng e Liu (1995) e Baran e Kelley (1995). Em Roylman e Shahidehpour (1993), propõe-se uma abordagem por métodos estatísticos, utilizando um pequeno grupo de medidas remotas em "quase tempo real" através de informações sobre as subestações e a reconfiguração da rede. Em grande parte das formulações propostas, o método dos Mínimos Quadrados Ponderados é utilizado, sendo que em Baran e Kelley (1994) e Lu, Teng e Liu (1995) as tensões complexas nas barras compõem o vetor de variáveis de estados, e em Baran e Kelley (1995), as injeções de corrente.

Nas últimas duas décadas, no entanto, os SDs enfrentam mudanças significativas impulsionadas pela necessidade de integrar fontes de GD. A expansão contínua de GDs e a integração de novas tecnologias nas redes de distribuição e subtransmissão vem impactando de forma crescente a interação entre os STs e SDs. Essa interação mais próxima pode levar a fluxos de potência reversos

para oST, afetando, por exemplo, o controle de tensão tanto nos níveis de transmissão quanto distribuição (SAMAAN, 2018; TAKAR, 2021).

O aumento da complexidade dos SD também se refletiu no desejo de estruturas mais confiáveis, que questionam a operação estritamente radial desses sistemas, como em Li, Yu e Bo (2009), Ren e Kezunovic (2010) e Ruben et al. (2011).

Somadas às incertezas inerentes à produção da GDs, essas dificuldades demandam ferramentas complexas de computação de redes de distribuição, abrindo caminho para a EE para SDs. Simultaneamente, o sistema de energia está enfrentando avanços significativos na infraestrutura de medição e controle, onde PMU/µPMU ((micro) Unidade de Medida Fasorial, do inglês (micro) *Phasor Measurement Unit*) e uma nova geração de IEDs (do inglês, *Intelligent Electronic Devices*) estão se tornando disponíveis em níveis de tensão diferentes. Diversos trabalhos tem abordado a incorporação de PMUs nos estudos de EE e ferramentas associadas como em Phadke, Thorp e Karimi (1986), Phadke et al. (2009), London et al. (2009), Huang et al. (2012), Huang, Lu e Lo (2015), Issicaba, Costa e Colombo (2016), Von Meier et al. (2017) e Ni et al. (2018).

Além desses novos dispositivos, também os medidores inteligentes, associados à Infraestrutura de Medição Avançada (do inglês *Advanced Metering Infrastructure* - AMI), podem contribuir de forma significativa para o atendimento dos requisitos de observabilidade e dos níveis de redundância necessários para viabilizar a EE em SDs, reforçando a importância de viabilizar-se o uso dessas fontes de informações na EE. Em Baran e McDermott (2009) os autores reforçam a relevância da inclusão do AMI no desempenho do EE em SDs comparando-a com a formulação tradicional, onde as pseudomedidas são praticamente as únicas fontes de informação. No entanto, a grande dimensão da rede de distribuição e o aumento da quantidade de dados/informação, tendem a sobrecarregar o processo de EE (HUANG *et al.*, 2012). Assim, conciliar a dimensão do problema com os requisitos de operação em tempo real está entre os desafios atuais dos pesquisadores e da indústria de energia para permitir a aplicação da EE em SDs em diferentes níveis de tensão.

Diferentes abordagens têm sido propostas na literatura para possibilitar a EE para SD (MASSIGNAN et al., 2022; ASADA et al., 2022; LOURENÇO et al., 2022). Uma extensa revisão pode ser encontrada em Primadianto e Lu (2017), onde os autores apontam que os algoritmos de EE para SDs baseados no método dos Mínimos Quadrados Ponderados podem ser divididos em duas categorias principais, dependendo da escolha da variável de estado: tensões nas barras ou correntes nos ramos. O uso de coordenadas polares ou retangulares, a forma de inclusão de injeção nula nas barras, entre outras questões, gera um grande número de métodos em ambas as categorias. Também, os trabalhos que consideram a identificação e detecção de dados errôneos são comentados.

Para levar em consideração os desbalanceamentos de carga nos SD, algumas abordagens adotam a representação trifásica no problema de EE, como proposto em Hansen e Debs (1995), Meliopoulos, Cokkinides e Stefopoulos (2005), De Almeida, Asada e Garcia (2006), Fantin (2016), Massignan (2021) e Massignan et al. (2022).

Além dos avanços na EE focados apenas em SDs, a EE também começou a ser pensada com mais interesse de uma maneira global de forma a integrar os STs e SDs numa só análise. Essa nova abordagem traz a possibilidade de avaliar os efeitos dos SDs ativos sobre os STs e tendo-se modelos mais precisos de análise de rede. É recente que a comunidade científica começou a dar atenção a esta lacuna de pesquisa, buscando desenvolver metodologias e aplicações que lidem com a análise de rede T&D ao invés de ST e SDs separadamente e alguns trabalhos vêm surgindo nos últimos anos.

Embora não existam muitos trabalhos datados desta nessa década sobre este tema, no fim dos anos 2000, Singh et al (1998) entenderam que para se obter um sistema híbrido EMS/DMS eram necessárias funções de análise de segurança de nível mais alto, como EE e análise de contingência para EMS e otimização de perda e tensão do alimentador para sistemas DMS. Eles destacam as especialidades desses sistemas híbridos dando ênfase nos aspectos de modelagem onde os elementos comuns entre EMS e DMS devem ser modelados para atender a ambos os tipos de funções.

A pesquisa de Sun e Zhang (2005) propôs um modelo de Mínimos Quadrados Ponderados (WLS) para o que eles chamam de EE global, isto é, considerar SD e ST integrados, visando estimar o estado consistente global da rede como um todo. Um novo método iterativo de divisão mestre-escravo é desenvolvido para resolver o problema de EE global híbrido (T&D). No método proposto, o problema de EE de grande escala é dividido em uma EE de transmissão e muitos subproblemas de EE de distribuição, que suportam computação distribuída geograficamente on-line. Para ajustar os diferentes recursos entre as redes de transmissão e distribuição, cada subproblema pode ser resolvido com algoritmos diferentes.

Em Dugan et al (2010) os autores discutem a importância de ao menos modelar todos os alimentadores conectados a uma barra comum do ST. Neste trabalho eles dão indícios que será importante a modelagem também de alimentadores conectados a diferentes barras do ST. Para que seja possível representar mais de uma barra do ST é necessária uma barra de referência comum, o que torna atraente a análise integrada de T&D que resolve este problema. Este artigo ainda aponta o fato da operação radial já não ser mais sempre a melhor opção para os SDs, que podem operar em anel ou mesmo de forma malhada para um melhor aproveitamento dos recursos de GD, redução de perdas, etc.

O trabalho mostrado em Gomez-Exposito et al. (2011) tem como principal objetivo o detalhamento de uma estrutura multinível que facilite a integração contínua de estimadores de estados existentes, projetados para funcionar em diferentes níveis da hierarquia de modelagem, a fim de realizar um monitoramento em larga escala de sistemas de energia interconectados. Os autores destacam que esse tem sido um grande desafio há décadas, pois os sistemas de energia cresceram de maneira praticamente independente em diferentes áreas, porém tendo que operar de maneira interconectada e sincronizada. Além de uma breve perspectiva histórica que explica o paradigma da estimação de estados existente, uma revisão dos recentes fatores tecnológicos e regulatórios responsáveis pelos novos desenvolvimentos nas funções de gerenciamento de energia é apresentado. Os autores defendem que uma estrutura teórica comum pode ser usada para implementar um esquema hierárquico pelo qual até mesmo sistemas de energia em larga escala podem ser monitorados de maneira eficiente e precisa. Isso é ilustrado para o nível da subestação, o nível do ST e também para um nível entre diferentes operadores de STs de um determinado sistema. Ainda são salientados o uso e os benefícios do uso de medidas fasoriais quando incorporadas nesses diferentes níveis da infraestrutura proposta.

Em Xie et al. (2012) foi apresentado um estimador de estados distribuído para sistemas de energia interconectados. Através da troca iterativa de informações com áreas de controle vizinhas designadas, todas as áreas de controle podem obter uma estimativa do estado de todo o sistema. Nesta abordagem não é mais necessária a suposição de observabilidade local de todas as áreas de controle, a topologia de comunicação pode ser diferente da topologia de interconexão de energia, e para a estimação de estados linearizada, nenhum coordenador é necessário para que cada área de controle local alcance convergência de todos os estados do sistema comprovável àqueles da estimação centralizada.

O trabalho desenvolvido em Zegers e Brunner (2014) tem por objetivo principal avaliar a futura interação das redes de T&D e identificar os principais desafios e, embora seja direcionado para tomadores de decisão que atuam onde existe uma clara distinção entre a operação de STs e a de SD, este trabalho é útil considerando que uma cooperação cada vez mais estreita entre os sistemas T&D será necessária. Neste trabalho, os autores focaram na interação entre as operações para seis desafios específicos de operação da rede, e possíveis formas futuras de cooperação foram identificadas: congestionamento da fronteira T&D e das LTs conforme aumento de GDs ou carga, desafio do balanço de geração e consumo tendo em vista o aumento de GDs, suporte de tensão de um sistema ao outro através de ajustes de TAPs dos transformadores de fronteira e da flexibilidade da rede de distribuição, (anti-)ilhamento, ressincronização e partida autônoma considerando a possibilidade cada vez maior de partes do SD serem desconectadas da rede.

Este tema tem sido bastante debatido no grupo de pesquisa de sistemas de energia do PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFPR) e tem resultado em publicações referentes ao FP unificado T&D e, também, à EE T&D. Entre essas publicações referentes ao tema de FP, pode-se citar Lourenço, Loddi e Tortelli (2010), Durce, Lourenço e Tortelli (2011), Durce et al. (2012) que propõem o uso da normalização complexa combinada ao método de Newton-Raphson para solução do FP T&D unificado monofásico, Tortelli et al. (2015) que propõe a normalização complexa aliada ao método Desacoplado Rápido para solução do FP em SDs, Portelinha (2020) estende a metodologia para a modelagem trifásica da rede elétrica, contemplando também dispositivos de controle. Já os primeiros esforços associados à incorporação da normalização complexa ao tema de EE no âmbito de SDs foram propostos em Nogueira, Lourenço e Tortelli (2014). Nesse trabalho, a metodologia proposta permite o uso do estimador de estados desacoplado rápido tanto para ST como SD, porém sem considerar a análise integrada de T&D, a análise é feita separadamente seguindo a partição tradicional das análises dos SDs e STs.

Em Pandey, Li e Pileggi (2021), os autores enfrentam esse desafio abordando principalmente a dimensão do problema e a privacidade de dados, via uma abordagem distribuída em recursos de memória e computação. Para garantir a convergência, um modelo de circuito distribuído para redes T&D combinadas e técnicas de paralelismo eficiente são dotados. Os resultados apresentados apresentam a precisão das estimativas em termos de erro médio quadrático e de escalabilidade do algoritmo em termos de tempo computacional.

Em Langner e Abur (2021) investiga-se a formulação da EE de distribuição trifásica onde, no caso mais geral, nenhum dos barramentos do sistema pode ter tensões trifásicas balanceadas. Nesse caso, a escolha e a definição da barra de referência precisam ser revisitadas. A maioria dos trabalhos existentes arbitrariamente atribui a barra raiz do alimentador de distribuição como a referência trifásica balanceada, o que pode não ser realista para os SDs ativos de hoje. Este artigo aborda essa deficiência das formulações de EE existentes e contorna este problema introduzindo uma barra de referência virtual. Vale apontar que uma abordagem T&D, como a proposta nesta tese, poderia resolver esse problema permitindo análise integrada de T&D, indo ainda mais além com a possibilidade de avaliar de forma precisa a interação em os dois sistemas.

Em Sharma et al (2022) os autores reconhecem as diferenças de carregamento e balanceamento dos SDs e STs e propõem um método para lidar com cargas desbalanceadas na fronteira entre o SD e ST, que os métodos tradicionais de EE ignoram. Com o aumento de cargas desequilibradas devido às fontes de energia renováveis, podem ocorrer variações de tensão no limite e nos nós adjacentes dentro do ST. O método apresentado no artigo detecta e identifica esses nós

desbalanceados dentro do ST. Em seguida, ele atualiza com eficiência os estados desses nós usando uma abordagem quase Newton.

O artigo proposto por Zhang et al. (2022) traz um método de EE coordenado descentralizado para lidar com sistemas integrados T&D a fim de enfrentar o desafio de estimar separadamente os estados nos ST e SD. Esse método permite o monitoramento preciso de sistemas integrados de forma descentralizada, melhorando os resultados da estimativa em comparação com métodos independentes. Ao reconciliar as incompatibilidades de tensão e potência nos limites do sistema, o método proposto fornece uma referência global para EE nos sistemas integrados de transmissão e distribuição.

O trabalho de Tang et al. (2022) propõe um algoritmo de EE paralelo e assíncrono para redes acopladas T&D. Esse algoritmo resolve os atrasos de comunicação utilizando uma estratégia de transmissão TN, pré-processamento síncrono e um mecanismo paralelo de recepção-computação-transmissão. Ele apresenta o conceito de seleção de "DN chave" e um método de análise de sensibilidade para melhorar o desempenho. O algoritmo proposto demonstra maiores taxas de convergência, eficiência e robustez em comparação com os métodos convencionais, sem a necessidade de ajuste extensivo de parâmetros.

Bytyqi et al. (2022) elucidam que a evolução das estruturas regulatórias na Europa aumentou a necessidade de aprimorar a troca de dados e a interoperabilidade entre TSO e DSO. Este artigo fornece uma visão geral das trocas de dados TSO-DSO e demonstra as melhores práticas usando o modelo de informação comum (CIM) da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), incluindo a implementação do padrão de troca de modelos de rede comum (CGMES) da IEC e a discussão das vantagens, desvantagens e desafios correspondentes. Além disso, os autores avaliam e relatam as atividades já realizadas em projetos europeus, com foco particular na interoperabilidade TSO-DSO. Finalmente, este artigo conclui a necessidade de TSOs e DSOs confiarem em soluções baseadas em padrões ao realizar a troca de dados TSO-DSO, o que permite a operação e o desenvolvimento eficientes dos futuros sistemas de energia.

2.3 Considerações do capítulo

O desenvolvimento de pesquisas do tema principal, que envolve o tratamento do sistema elétrico de maneira global e integrada T&D sem o tradicional particionamento em SD e ST, é recente e pouco se conhece ainda para poder chegar a um consenso de quais metodologias do FP e da EE para sistemas T&D são mais adequadas para cada tipo de característica e aplicação do sistema. Neste

contexto, a revisão da literatura mostra que há muitas lacunas a serem investigadas relacionadas FP e EE para T&D, tanto na realidade prática do sistema elétrico atual atuais quanto no futuro próximo com as tecnologias *Smart Grids*.

Além disso, a revisão da literatura abordou que a separação histórica dos STs e SDs e, consequentemente, as simplificações feitas para estudos globais precisam ser reavaliadas, uma vez que incertezas introduzidas nos SDs podem afetar diretamente os STs e vice-versa. Isso indica a limitação desse mecanismo de gerenciamento individual de sistema e a necessidade de coordenação entre as análises das redes T&D, trazendo melhoria da eficiência operacional e benefícios econômicos

CAPÍTULO 3: ESTIMAÇÃO DE ESTADOS APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A EE permite obter um modelo em tempo real de uma rede de energia através de uma representação matemática baseada nas condições atuais desta rede, isto é, intervalos de medições em tempo real e dados de rede estáticos (MONTICELLI, 1999).

Desde o início da aplicação da EE em SEP, mais especificamente nos STs, há mais de cinco décadas atrás, o sistema elétrico passou por inúmeros desafios e evoluções em seus segmentos (geração, transmissão e distribuição) e em suas áreas (monitoramento, operação, planejamento, comunicação, regulação, comercialização, etc.). Neste tempo, os estudos relacionados à EE não ficaram parados, pelo contrário, esforços em pesquisas foram paralelamente dedicados ao problema da EE, resultando em diversas metodologias para a formulação analítica do problema da EE propostas, na busca por um ponto de operação que representasse fielmente o atual estado da rede.

Apesar disso, a formulação clássica para resolução do problema do problema da EE para STs que se consolidou mundialmente e é utilizada na maioria dos Sistemas de Gerenciamento de Energia (do inglês *Energy Management Systems* – EMS) encontra-se nos livros dos pesquisadores Monticelli (1999) e Abur e Gómez Expósito (2004) e é baseada no método dos Mínimos Quadrados Ponderados. Tal problema pode ser resolvido por diversos algoritmos de otimização, sendo a mais estabelecida a solução via Equação Normal de Gauss.

Neste capítulo são apresentados os métodos e técnicas que servem como referência para este trabalho, são eles a formulação clássica da EE e os métodos desacoplados.

3.1 Estimação de Estados: Formulação clássica

Em termos gerais, a EE se refere ao procedimento de obtenção dos fasores de tensão em todas as barras do sistema em um determinado espaço de tempo. A EE é usada para construir o modelo da rede e, através de um nível de redundância adequado de medições, pode eliminar o efeito de medições errôneas e permitir a perda temporária de medição sem afetar significativamente a qualidade dos valores estimados. A EE é usada principalmente para filtrar dados redundantes, eliminar medições incorretas e produzir estimativas dos estados confiáveis permitindo, até certo ponto, a determinação dos fluxos de energia em partes da rede que não são diretamente medidas. Tanto a

análise de contingência, o fluxo de energia ótimo e o simulador de despacho dependem da qualidade do modelo de rede em tempo real obtido por meio da EE (MONTICELLI, 1999).

Considerando um sistema de energia com m medidas, n variáveis de estado e que os parâmetros do sistema são conhecidos, é possível determinar os fluxos de potência nas linhas e as injeções nas barras a partir das tensões complexas (variáveis de estado) em cada barra do sistema. Segundo Abur e Gómez Expósito (2004), tal relação pode ser escrita matematicamente da seguinte forma:

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{e} \tag{3.1}$$

onde:

m: quantidade de medidas;

n: quantidade de variáveis de estado;

z: vetor de medidas reais com dimensão mx1;

$h_i(x)$: conjunto de equações não-lineares que relaciona as medidas i com as variáveis de estado x de dimensão mx1;

e: vetor de erros de medidas de dimensão mx1;

x: vetor de variáveis de estado estimadas de dimensão nx1.

No problema demonstrado pela Eq. (3.1), deseja-se calcular o vetor $\boldsymbol{x}$, que representa os valores estimados das variáveis de estado. Os valores verdadeiros das variáveis de estado e das medidas são desconhecidos e para estimá-los as seguintes suposições são comumente feitas em relação às propriedades estatísticas dos erros de medição (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004).

O vetor dos erros de medição $\boldsymbol{e}$ apresenta distribuição normal, com média zero:

$$E(\boldsymbol{e_i}) = 0, \qquad i = 1, \dots, m \tag{3.2}$$

onde:

e: vetor dos erros de medição;

i: posição da medida no vetor $\boldsymbol{e}$;

m: quantidade de medidas;

$E(.)$: valor esperado.

Os erros de medição são independentes, isto é, não-correlacionados:

$$E[\boldsymbol{e_i e_j}] = 0 \tag{3.3}$$

onde:

j: posição da medida no vetor $\boldsymbol{e}$ diferente de i.

Portanto:

$$cov[\boldsymbol{e}] = E[\boldsymbol{e} \cdot \boldsymbol{e^T}] = \boldsymbol{R} = diag\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \tag{3.4}$$

onde:

R: matriz de covariância dos erros de medição;

σ^2: desvio padrão de cada medição.

O desvio padrão de cada medição é calculado para refletir a precisão esperada do medidor usado. Assim, o vetor dos erros de medição apresenta uma matriz de covariância $\boldsymbol{R}$ diagonal, onde seus elementos diagonais são as variâncias dos erros de medição dos medidores. A matriz $\boldsymbol{R}$ traz a ponderação desejada, onde as medidas de maior variância recebem menos peso quando comparadas àquelas que possuem menor incerteza, influenciando menos a solução do processo de EE.

3.1.1 Formulação clássica: Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

Como dito anteriormente, a formulação analítica do problema de EE mais consolidada e considerada como a modelagem clássica é a baseada na minimização da soma ponderada dos quadrados ponderados e será descrita a seguir.

A solução pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados fornece uma maneira de lidar com sistemas sobredeterminados de equações lineares, isto é, sistemas com mais equações do que incógnitas) do tipo:

$$\boldsymbol{Ax} = \boldsymbol{b} \tag{3.5}$$

onde x e b são vetores de dimensões n e m, respectivamente, com $n < m$ e A é uma matriz $m \times n$. b é também conhecido como vetor do lado direito (MONTICELLI, 1999).

O estimador de estados baseado no método dos Mínimos Quadrados Ponderados irá minimizar a função objetivo a seguir a fim de calcular uma estimativa para os estados, isto é, para $\boldsymbol{x}$ (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004):

$$J(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m} \left(z_i - h_i(\boldsymbol{x})\right)^2 / R_{ii} = [\boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})]^T \boldsymbol{R}^{-1} [\boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})] \tag{3.6}$$

3.1.2 Solução clássica: Equação Normal de Gauss

O problema modelado pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados representado pela Eq. (3.6) pode ser solucionado por diversos algoritmos de otimização. Devido às particularidades deste problema, a solução via Equação Normal se tornou o processo iterativo clássico utilizado e será descrito a seguir.

No ponto mínimo as condições de otimalidade de primeira ordem precisam necessariamente ser satisfeitas. Resumidamente, pode-se dizer (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004):

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \tag{3.7}$$

onde $H(x)$ é a matriz Jacobiana de $h(x)$, isto é:

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \tag{3.8}$$

Então, a função $g(x)$ é expandida em série de Taylor em torno do ponto x^k:

$$g(x) = g\left(x^k\right) + G\left(x^k\right)\left(x - x^k\right) + \cdots = 0 \tag{3.9}$$

Truncando os termos de alta ordem, chega-se na solução iterativa do método de Gauss-Newton:

$$x^{k+1} = x^k - \left[G\left(x^k\right)\right]^{-1} \cdot g\left(x^k\right) \tag{3.10}$$

onde:

k: índice da iteração;

x^k: vetor da solução dos estados na iteração k.

Dessa maneira, define-se o vetor do lado direito T^k do processo de EE (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004):

$$g(x^k) = T^k = -H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot \left(z - h(x^k)\right) \tag{3.11}$$

Também, é definida a matriz Ganho $G(x)$, uma matriz esparsa, definida positiva e simétrica, desde que o sistema seja totalmente observável, dada por:

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot H(x^k) \tag{3.12}$$

A matriz Ganho normalmente não é invertida, uma vez que sua inversa será, geralmente, uma matriz completa, enquanto $G(x)$ em si é bastante esparsa. Em vez disso, a matriz Ganho é decomposta por fatoração triangular.

Assim, a EE baseada no método dos Mínimos Quadrados Ponderados envolve a solução iterativa do seguinte sistema de equações lineares denominado Equação Normal de Gauss (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004):

$$\begin{aligned} [G(x^k)]\Delta x^{k+1} &= H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \\ &\equiv G(x)\Delta x = t(x) \end{aligned} \tag{3.13}$$

onde $\Delta x^{k+1} = x^{k+1} - x^k$.

A cada iteração k o valor de Δx é incrementado e a estimativa do vetor de estados é atualizada. O processo iterativo continua até que o critério de parada $max|\Delta x_i| \leq \epsilon$ seja atingido, sendo ϵ uma tolerância pré-estabelecida.

3.1.3 A função de medidas: $h(x^k)$

A função de medidas $h(x^k)$ é o conjunto de equações não-lineares que relacionam os estados do sistema à quantidade de medidas. As medidas que compõem o vetor de medidas podem ser de vários tipos, as mais comuns são: os fluxos de potência nas linhas, as injeções de potência nas barras, as magnitudes de tensão das barras e as magnitudes de corrente das linhas.

3.1.3.1 Vetor de estados: x

Considerando um sistema de N barras, a dimensão do vetor de estados será $2N$-1, sendo N magnitudes de tensão e N-1 ângulos de fase. O ângulo de fase da barra de referência é definido como

igual a um valor arbitrário, como 0. Assumindo que a barra 1 é escolhida como referência, o vetor de estado x pode ser escrito como (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004):

$$x = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ \vdots \\ \theta_N \\ V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

onde

θ: ângulo de fase da tensão complexa das barras;

V: magnitudes da tensão complexa das barras;

N: quantidade de barras do sistema;

θ: vetor dos ângulos de fase das tensões complexas das barras;

V: vetor das magnitudes das tensões complexas das barras.

3.1.3.2 Vetor de medidas: z

Já o vetor de medidas é geralmente composto por medidas de: FP, injeção de potência e grandezas de tensão, representadas por (LOURENÇO *et al.*, 2022):

$$z = \begin{bmatrix} z_{fluxo}^{P} \\ z_{fluxo}^{Q} \\ z_{inj}^{P} \\ z_{inj}^{Q} \\ z_{V}^{mag} \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

onde:

z_{fluxo}^{P} e z_{fluxo}^{Q}: vetores de medidas ativas e reativas de FP, respectivamente;

z_{inj}^{P} e z_{inj}^{Q}: vetores de medidas ativas e reativas de injeção de potência, respectivamente;

z_{mag}^{V}: vetor de medidas de magnitude de tensão.

3.1.3.3 Funções não-lineares que relacionam os estados às medidas

Considerando um sistema que seja do modelo de rede π, conforme a Figura 1, as expressões para cada tipo de medida são dadas por:

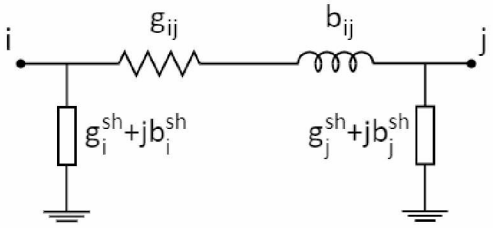


Figura 1 - Modelo de rede π

- Injeção de potência ativa e reativa na barra i:

$$P_i = V_i \sum_{j \in \Omega_i} V_j \left(G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij}\right) \tag{3.16}$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in \Omega_i} V_j \left(G_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}\right) \tag{3.17}$$

- FP ativa e reativa nos ramos da barra i para j:

$$P_{ij} = V_i^2 \left(g_i^{sh} + g_{ij}\right) - V_i V_j \left(g_{ij} \cos\theta_{ij} + b_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij}\right) \tag{3.18}$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 \left(b_i^{sh} + b_{ij}\right) - V_i V_j \left(g_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij} - b_{ij} \cos\theta_{ij}\right) \tag{3.19}$$

onde:

V_i e θ_i: magnitude e ângulo de fase da tensão complexa na barra i;

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$: diferença angular entre as barras i e j;

$G_{ij} + B_{ij}$: $ij^{ésimo}$ elemento da matriz admitância;

$g_{ij} + jb_{ij}$: admitância série do ramo que conecta as barras i e j;

$g_i^{sh} + jb_i^{sh}$: admitância *shunt* do ramo conectado à barra i;

Ω_i: barras diretamente conectadas a barra i.

Conclusivamente, as equações acima descritas são as funções não-lineares que relacionam os estados da rede às medidas. No vetor chamado função de medidas $h(x^k)$ estas equações são agrupadas de acordo com sua natureza, assim como no vetor de medidas z definido na Eq. (3.15):

$$h(x^k) = \begin{bmatrix} P_{fluxo} \\ Q_{fluxo} \\ P_{inj} \\ Q_{inj} \\ V_{mag} \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

3.1.4 Matriz Jacobiana: H

A estrutura da matriz Jacobiana é dada por:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial V} \\ 0 & \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

As equações para cada parte são descritas abaixo:

• Elementos correspondentes às medidas de injeção de potência ativa:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^{N} V_i V_j \left(-G_{ij} \operatorname{sen} \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}\right) - V_i^2 B_{ii} \tag{3.22}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j \left(G_{ij} \operatorname{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}\right) \tag{3.23}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \sum_{j=1}^{N} V_i \left(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \operatorname{sen} \theta_{ij}\right) + V_i G_{ii} \tag{3.24}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i \left(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \operatorname{sen} \theta_{ij}\right) \tag{3.25}$$

• Elementos correspondentes às medidas de injeção de potência reativa:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^{N} V_i V_j \left(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \operatorname{sen} \theta_{ij}\right) - V_i^2 G_{ii} \tag{3.26}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j \left(-G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \operatorname{sen} \theta_{ij}\right) \tag{3.27}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \sum_{j=1}^{N} V_j \left(G_{ij} \operatorname{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}\right) - V_i B_{ii} \tag{3.28}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i\left(G_{ij}\,\mathrm{sen}\,\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}\right) \tag{3.29}$$

- Elementos correspondentes às medidas de FP ativa:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} = V_i V_j\left(g_{ij}\,\mathrm{sen}\,\theta_{ij} - b_{ij}\cos\theta_{ij}\right) \tag{3.30}$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} = -V_i V_j\left(g_{ij}\,\mathrm{sen}\,\theta_{ij} - b_{ij}\cos\theta_{ij}\right) \tag{3.31}$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = -V_i\left(g_{ij}\cos\theta_{ij} + b_{ij}\,\mathrm{sen}\,\theta_{ij}\right) + 2V_i\left(g_{ij} + g_i^{sh}\right) \tag{3.32}$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = -V_i\left(g_{ij}\cos\theta_{ij} + b_{ij}\,\mathrm{sen}\,\theta_{ij}\right) \tag{3.33}$$

- Elementos correspondentes às medidas de FP reativa:

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} = -V_i V_j\left(g_{ij}\cos\theta_{ij} + b_{ij}\cos\theta_{ij}\right) \tag{3.34}$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} = V_i V_j\left(g_{ij}\cos\theta_{ij} + b_{ij}\,\mathrm{sen}\,\theta_{ij}\right) \tag{3.35}$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -V_i\left(g_{ij}\,\mathrm{sen}\,\theta_{ij} - b_{ij}\cos\theta_{ij}\right) - 2V_i\left(b_{ij} + b_i^{sh}\right) \tag{3.36}$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -V_i\left(g_{ij}\,\mathrm{sen}\,\theta_{ij} - b_{ij}\cos\theta_{ij}\right) \tag{3.37}$$

- Elementos correspondentes às medidas de magnitude de tensão:

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1 \tag{3.38}$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0 \tag{3.39}$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \theta_i} = 0 \tag{3.40}$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \theta_j} = 0 \tag{3.41}$$

3.1.5 Matriz Ganho: G

A matriz Ganho G, previamente apresentada na Eq. (3.12) e reapresentada na Eq. (3.42), é formada com base na matriz Jacobiana H e na matriz de covariância de erro das medidas R. Ela é estrutural e numericamente simétrica, esparsa, embora menos esparsa que a matriz H, em geral é uma matriz definida positiva para redes totalmente observáveis, ou seja, todos os seus autovalores são positivos.

$$G\left(x^k\right) = H^T R^{-1} H \tag{3.42}$$

A matriz Ganho G é construída e armazenada como uma matriz esparsa, visando garantir eficiência computacional e processamento de memória. Ela é construída processando uma medida por vez. Portanto, considerando a matriz Jacobiana H e a matriz de covariância R para um conjunto de m medidas, cada medida corresponde a uma linha, conforme mostrado abaixo:

$$H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_m \end{bmatrix}, \qquad R = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & R_{mm} \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

3.1.6 Fluxograma do EE pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados - Formulação clássica

O algoritmo do processo iterativo para solução do problema de EE via método dos Mínimos Quadrados Ponderados pela formulação clássica pode ser representado pelo fluxograma da Figura 2 (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004).

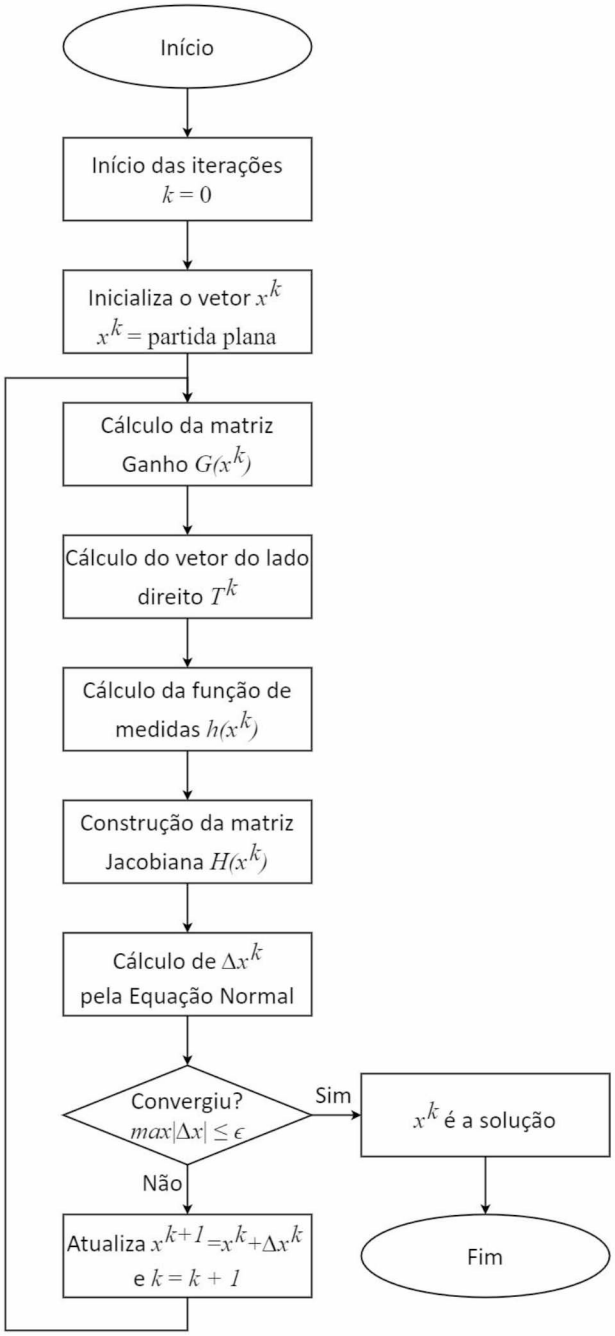


Figura 2 - Fluxograma do algoritmo de solução do problema de EE pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados - Formulação clássica

3.2 Estimação de Estados: Formulações Desacopladas

O principal custo computacional associado ao algoritmo de solução de EE baseada no método dos Mínimos Quadrados Ponderados está no cálculo da matriz Ganho, ainda que já tenha sido inserida a decomposição por fatoração triangular a fim de evitar a sua inversão. Uma maneira de reduzir esse esforço é manter a matriz Ganho constante, mesmo que aproximada (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004).

O desacoplamento $P\theta - QV$ traz para a EE baseada no método dos Mínimos Quadrados Ponderados as mesmas vantagens computacionais vistas no cálculo do fluxo de carga. A sensibilidade das equações de potência ativa às mudanças na magnitude das tensões de barra, assim como a sensibilidade das equações de potência reativa às mudanças nos ângulos de fase das tensões de barra, é muito baixa, especialmente para ST de alta tensão. Essas duas características levam à formulação desacoplada rápida do problema de EE (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004; MONTICELLI, 1999).

Usando aproximações adequadas na matriz Ganho, de modo a mantê-la constante durante o processo iterativo, o tempo computacional e o armazenamento são reduzidos e os resultados são confiáveis. Portanto, do ponto de vista computacional, versões desacopladas são geralmente preferíveis à EE baseada no método dos Mínimos Quadrados Ponderados, exceto em casos especiais como, por exemplo, quando correntes são incluídas no conjunto de medidas (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979).

Na formulação desacoplada, as equações de medidas são separadas em duas partes, seguindo a natureza ativa e reativa da grandeza (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004):

• Medidas ativas: injeções de potência ativa nas barras e fluxos de potência ativa nos ramos.

• Medidas reativas: injeções de potência reativa nas barras, fluxos de potência reativa nos ramos e medidas de magnitude de tensão nas barras.

Assim, o vetor de medidas z pode ser particionado com base na designação acima, os índices A e R denotam a partição ativa e reativa, respectivamente (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004; GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979; LOURENÇO *et al.*, 2022):

$$z = \begin{bmatrix} z_A \\ z_R \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

onde:

$$z_A = \begin{bmatrix} z^A_{fluxo} \\ z^A_{inj} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad z_R = \begin{bmatrix} z^R_{fluxo} \\ z^R_{inj} \\ z^R_{V_{mag}} \end{bmatrix} \tag{3.45}$$

O particionamento impacta da mesma forma a função de medidas $h(x)$, obtém-se:

$$h(x) = \begin{bmatrix} h(x)_A \\ h(x)_R \end{bmatrix} \tag{3.46}$$

O vetor de erros de medidas particionado torna-se:

$$e = \begin{bmatrix} e_A \\ e_R \end{bmatrix} \tag{3.47}$$

A matriz de covariância, por sua vez, agora é expressa por:

$$R = \begin{bmatrix} R_A & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \tag{3.48}$$

Já para o vetor de estados, tem-se:

$$x = \begin{bmatrix} x_A \\ x_R \end{bmatrix} \tag{3.49}$$

onde:

$$x_A = [\theta] \quad \text{e} \quad x_R = [V] \tag{3.50}$$

O desacoplamento da matriz Jacobiana é resultante do particionamento das funções não-lineares $h(x)_P$ e $h(x)_Q$, isto é:

$$H = \begin{bmatrix} H_{AA} & H_{AR} \\ H_{RA} & H_{RR} \end{bmatrix} \tag{3.51}$$

sendo as submatrizes dadas pelas primeiras derivadas de $h(x)_P$ e $h(x)_Q$ em relação ao ângulo e à magnitude de tensão nas barras:

$$H_{AA} = \frac{\partial h(x)_P}{\partial \theta} \tag{3.52}$$

$$H_{AR} = \frac{\partial h(x)_P}{\partial V} \tag{3.53}$$

$$H_{RA} = \frac{\partial h(x)_Q}{\partial \theta} \tag{3.54}$$

$$H_{RR} = \frac{\partial h(x)_Q}{\partial V} \tag{3.55}$$

Dessa maneira, o desacoplamento chega até a matriz Ganho, sendo reescrita como:

$$G = \begin{bmatrix} G_{AA} & G_{AR} \\ G_{RA} & G_{RR} \end{bmatrix} \tag{3.56}$$

onde:

$$G_{AA} = H_{AA}^T \, R_A^{-1} \, H_{AA} + H_{RA}^T \, R_R^{-1} \, H_{RA} \tag{3.57}$$

$$G_{AR} = H_{AA}^T \, R_A^{-1} \, H_{AR} + H_{RA}^T \, R_R^{-1} \, H_{RR} \tag{3.58}$$

$$G_{RA} = H_{AR}^T \, R_A^{-1} \, H_{AA} + H_{RR}^T \, R_R^{-1} \, H_{RA} \tag{3.59}$$

$$G_{RR} = H_{RR}^T \, R_R^{-1} \, H_{RR} + H_{AR}^T \, R_A^{-1} \, H_{AR} \tag{3.60}$$

Além da técnica do desacoplamento para fins de diminuir o esforço computacional do processo iterativo, nesta mesma nota outra particularidade importante de onde derivaram diversos estudos é a alta relação X/R das LTs de ST de alta tensão, o que ocasiona uma predominância das submatrizes H_{AA} e H_{RR} sobre H_{AR} e H_{RA}. Tais simplificações diretamente feitas à matriz Ganho ou à matriz Jacobiana leva às duas versões principais da EE desacoplada rápida. O desacoplamento pode ser aplicado apenas na matriz Ganho G, o que se chama de estimadores desacoplados no algoritmo, ou também na matriz Jacobiana H afetando o lado direito da equação, conhecidos como estimadores desacoplados no modelo. Eles são descritos a seguir (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979; MONTICELLI, 1999).

3.2.1 Estimador de estados desacoplado no algoritmo

No estimador de estados desacoplado no algoritmo, as submatrizes fora da diagonal da matriz Ganho G_{AR} e G_{RA} são desprezadas, explorando-se a predominância das matrizes G_{AA} e G_{RR}, e a condição operacional de partida plana ($V_k = 1\text{pu}$ e $\theta_k = 0°$) é aplicada. Tais considerações resultam na matriz Ganho constante e desacoplada, como pode-se observar a seguir (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979; LOURENÇO *et al.*, 2022):

$$G^{da} = \begin{bmatrix} G_{AA}^{da} & 0 \\ 0 & G_{RR}^{da} \end{bmatrix} \tag{3.61}$$

onde G_{AA}^{da} e G_{RR}^{da} derivam das Eqs. (3.57) e (3.58), apresentadas no algoritmo da EE desacoplada, às quais são inseridas as devidas simplificações, resultando em:

$$G_{AA}^{da} = H_{AA}^T \, R_A^{-1} \, H_{AA} + H_{RA}^T \, R_R^{-1} \, H_{RA} \tag{3.62}$$

$$G_{RR}^{da} = H_{RR}^T \, R_R^{-1} \, H_{RR} + H_{AR}^T \, R_A^{-1} \, H_{AR} \tag{3.63}$$

As iterações deste algoritmo são divididas em duas partes, uma ativa e outra reativa:

$$G_{AA}^{da}\Delta\theta = T_A\left(\theta^k, V^k\right) \tag{3.64}$$

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \Delta\theta^k \tag{3.65}$$

$$G_{RR}^{da}\Delta V = T_R\left(\theta^{k+1}, V^k\right) \tag{3.66}$$

$$V^{k+1} = V^k + \Delta V^k \tag{3.67}$$

O vetor do lado direito agora é descrito por:

$$T = \begin{bmatrix} T_A \\ T_R \end{bmatrix} \tag{3.68}$$

onde:

$$T_A = H_{AA}^T\, R_A^{-1}\,[z_A - h_A(x)] + H_{AR}^T\, R_R^{-1}\,[z_R - h_R(x)] \tag{3.69}$$

$$T_R = H_{RR}^T\, R_R^{-1}\,[z_R - h_R(x)] + H_{RA}^T\, R_A^{-1}\,[z_A - h_A(x)] \tag{3.70}$$

Nessa versão, nenhuma aproximação é introduzida no vetor do lado direito.

A versão desacoplada no algoritmo chega aos mesmos resultados fornecidos pela versão clássica. Dado que nenhuma aproximação é inserida no vetor do lado direito, que acaba sendo recalculado a cada iteração, os efeitos das aproximações realizadas ficam limitados ao processo de convergência apenas.

3.2.1.1 Fluxograma do EE desacoplado no Algoritmo

O algoritmo do processo iterativo para solução do problema de EE via método dos Mínimos Quadrados Ponderados pela formulação desacoplada no algoritmo pode ser representado pelo fluxograma da Figura 3 (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979; LOURENÇO *et al.*, 2022).

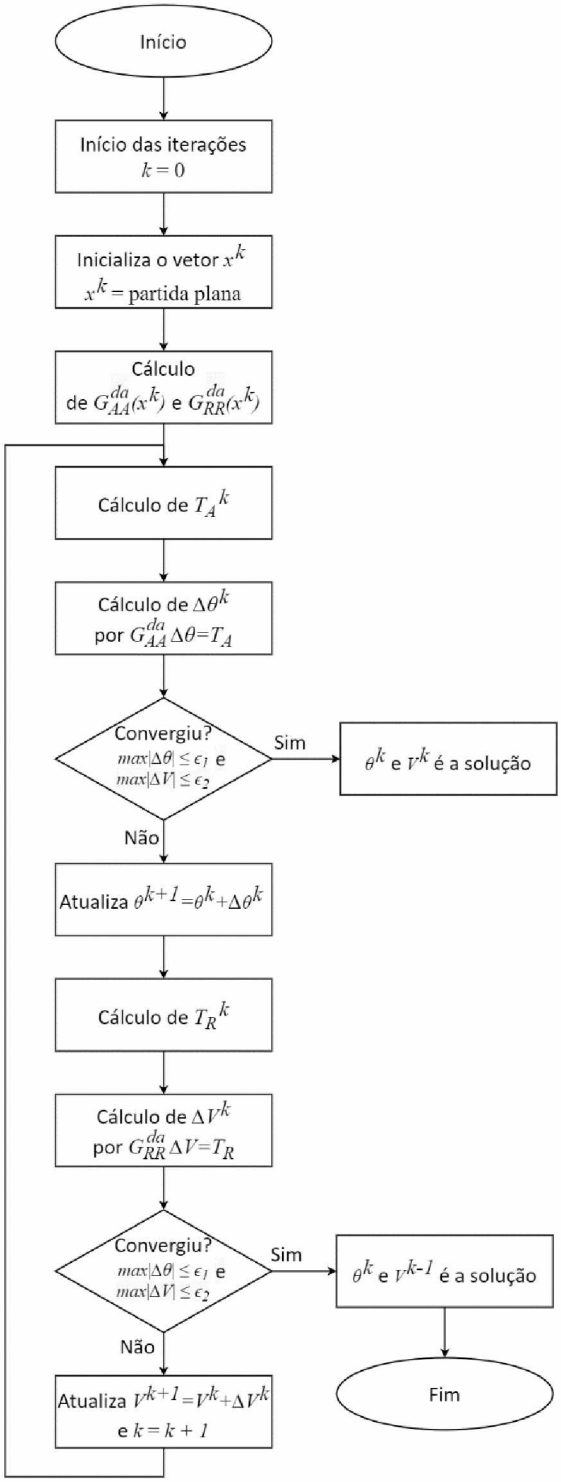


Figura 3 - Fluxograma do algoritmo do Estimador de Estados desacoplado no algoritmo

3.2.2 Estimador de estados desacoplado no modelo

Diferentemente do estimado de estados desacoplado no algoritmo, no estimador de estados desacoplado no modelo ao invés de atuar diretamente nas submatrizes da matriz Ganho, as submatrizes fora da diagonal da matriz Jacobiana H_{AR} e H_{RA} é que são desprezadas. Considerando-

se a condição operacional de partida plana ($V_k = 1\text{pu}$ e $\theta_k = 0°$) é aplicada e tais considerações resultam na matriz Jacobiana constante e desacoplada, como pode-se observar a seguir:

$$H^{dm} = \begin{bmatrix} H_{AA}^{dm} & 0 \\ 0 & H_{RR}^{dm} \end{bmatrix} \tag{3.71}$$

A abordagem acima implica claramente as aproximações em ambos, a matriz Ganho e o vetor do lado direito da solução do problema. Aplicando (8.33) em (8.8) e (8.10), a estimativa de estado é agora resolvida pela solução sucessiva dos seguintes sistemas lineares desacoplados:

As iterações deste algoritmo são divididas em duas partes, uma ativa e outra reativa:

$$G_{AA}^{dm}\Delta\theta = T_A^{dm}\left(\theta^k, V^k\right) \tag{3.72}$$

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \Delta\theta^k \tag{3.73}$$

onde:

$$G_{AA}^{dm} = H_{AA}^{dm^T}\, R_A^{-1}\, H_{AA} \tag{3.74}$$

$$T_A^{dm} = H_{AA}^{dm^T}\, R_A^{-1}\left[z_A - h_A\left(\theta^k, V^k\right)\right] \tag{3.75}$$

$$G_{RR}^{dm}\Delta V = T_R^{dm}\left(\theta^{k+1}, V^k\right) \tag{3.76}$$

$$V^{k+1} = V^k + \Delta V^k \tag{3.77}$$

onde:

$$G_{RR}^{dm} = H_{RR}^{dm^T}\, R_R^{-1}\, H_{RR} \tag{3.78}$$

$$T_R^{dm} = H_{RR}^{dm^T}\, R_R^{-1}\left[z_R - h_R\left(\theta^{k+1}, V^k\right)\right] \tag{3.79}$$

Na versão desacoplada no modelo, as matrizes Ganho e Jacobiana são mantidas constantes, reduzindo o esforço computacional. Nesta versão, ainda, as resistências das LTs são desprezadas no cálculo da submatrizes H_{AA} ou H_{RR}, fazendo com que a matriz Jacobiana dependa apenas das admitâncias. Ignorar as resistências de linha na submatriz H_{AA} ou na H_{RR} leva às versões XB e BX, respectivamente (MONTICELLI, 1999). A versão desacoplada no modelo chega a resultados próximos aos fornecidos pela versão clássica. Como as aproximações do desacoplamento também são inseridas no vetor do lado direito, tornando-o constante durante todo o processo de iteração, os efeitos destas aproximações impactam tanto no processo de convergência quanto na precisão dos resultados.

3.2.2.1 Fluxograma do EE desacoplado no Modelo

O algoritmo do processo iterativo para solução do problema de EE via método dos Mínimos Quadrados Ponderados pela formulação desacoplada no modelo pode ser representado pelo fluxograma da Figura 4.

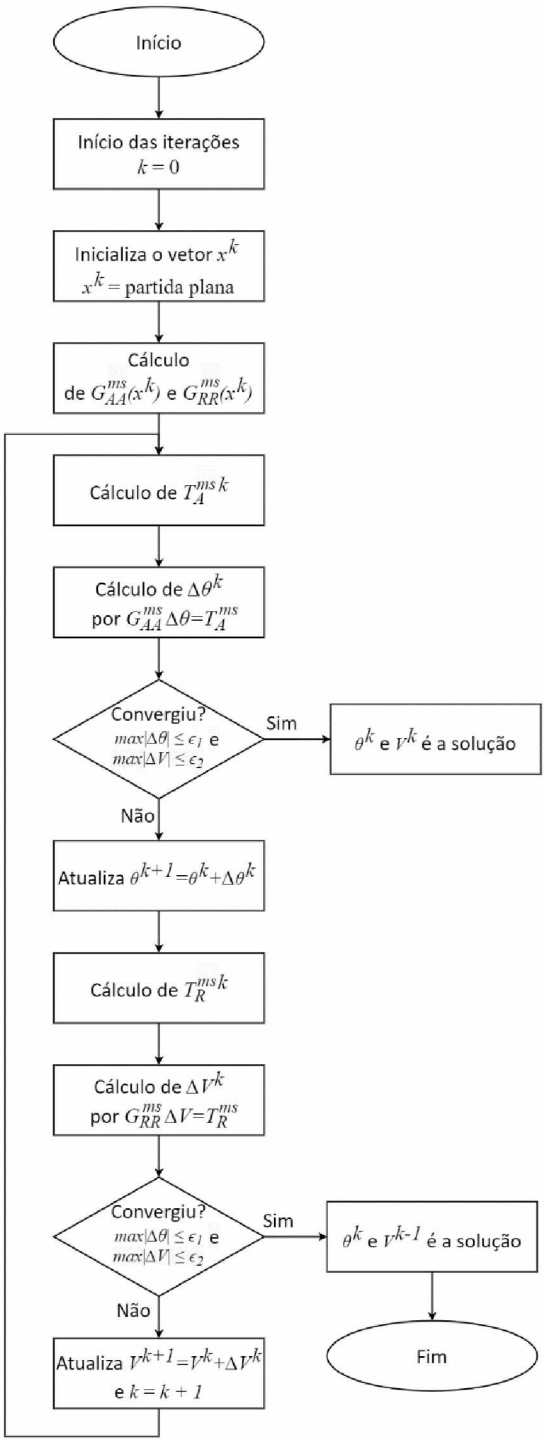


Figura 4 - Fluxograma do algoritmo do Estimador de Estados desacoplado no modelo

3.3 Considerações do capítulo

Neste capítulo são apresentados os métodos e técnicas que servem como referência para este trabalho. Inicia-se como a formulação clássica da EE, desenvolvida tradicionalmente para STs na época. A formulação analítica do problema de EE mais consolidada e considerada como a modelagem clássica é a baseada na minimização da soma ponderada dos quadrados ponderados, então o método dos Mínimos Quadrados Ponderados é detalhado. O principal algoritmos de otimização para a solução do problema é a solução via Equação Normal, também descrita em detalhes. Ainda, são trazidos neste capítulo a formulação dos métodos desacoplados rápidos no algoritmo e no modelo, com seus respectivos métodos de solução.

CAPÍTULO 4: FLUXO DE POTÊNCIA PARA SISTEMAS T&D

4.1 Introdução

Neste capítulo, a formulação convencional de FP baseado no método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido é estendida para permitir a análise de sistemas T&D em uma abordagem unificada. Tal extensão associa a eficiência computacional bem conhecida dos algoritmos desacoplados rápidos à aplicação da normalização complexa por unidade.

Conforme discutido nos capítulos anteriores, o novo cenário ditado pelas redes de distribuição ativas traz uma complexidade crescente para a rede elétrica, particularmente no nível de subtransmissão e distribuição, trazendo novos desafios para o planejamento e operação do sistema elétrico. A crescente implantação de unidades de GD dificulta o equilíbrio entre geração e demanda de potência, uma vez que a natureza flutuante da geração descentralizada, especialmente relacionada às fontes solar e eólica, adiciona incerteza e erros ao planejamento operacional dos STs e SDs. Entre os vários desafios, destacam-se: i) congestionamento de LTs e/ou linhas de distribuição (LDs); ii) suporte de tensão entre ST e SD; iii) (anti-)ilhamento, ressincronização e black-start; e iv) coordenação da proteção (ZEGERS; BRUNNER, 2014). Essas questões enfatizam a necessidade de ferramentas de computação confiáveis e adequadamente adaptadas ao novo contexto do sistema elétrico.

Ferramentas convencionais para realizar análises estáticas do sistema elétrico foram desenvolvidas considerando a divisão usual da rede elétrica em ST e SD. Assim, os SDs são representados como cargas conectadas ao ST, que, por sua vez, é visto como uma única fonte de potência para o SD. Motivados por esse ponto de vista, técnicas distintas para resolver o problema de fluxo de energia foram desenvolvidas para serem aplicadas para cada parte do sistema de energia, considerando suas particularidades. Como consequência, a influência mútua entre ST e SD não é avaliada precisamente.

Com base nas principais características dos STs, notavelmente topologias em malha, altas tensões e prevalência de efeitos indutivos em LTs, levando a altas relações X/R, o problema do FP de transmissão é especialmente resolvido pelo método Newton-Raphson (TINNEY; HART, 1967) e suas variações, como a abordagem desacoplada rápida (STOTT; ALSAC, 1974). Este último aproveita o desacoplamento $P\theta - QV$ para reduzir a carga computacional sem comprometer a precisão da solução. Como consequência, o método Desacoplado Rápido e suas derivações são amplamente utilizados por empresas de energia elétrica para cálculo de FP em ST. Mas, como já apontado na literatura (MONTICELLI; GARCIA; SAAVEDRA, 1990; NANDA *et al.*, 1991; VAN AMERONGAN, 1989), linhas com

baixa relação X/R degradam o desempenho do método Desacoplado Rápido. Por outro lado, algoritmos *Backward-Forward Sweep* (BFS) são geralmente a escolha principal para executar análise de FP em SDs (LUO; SEMLYEN, 1990; SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988). Essas rotinas foram originalmente projetadas considerando uma topologia radial típica e ausência de fontes de geração nos alimentadores de distribuição. No entanto, em SDs modernos, alimentadores ativos conectados a GDs e topologias em malha fechada ou mesmo em malha tendem a ser cada vez mais comuns, visando melhorar a confiabilidade da operação do fornecimento de energia (CELLI *et al.*, 2004; DAVOUDI; CECCHI; AGUERO, 2014). Tais mudanças reforçam a necessidade de novas ferramentas com capacidade de executar cálculos de FP em massa, onde SDs ativos previamente selecionados possa ser explicitamente representados.

A discussão acima aponta que a aplicação de algoritmos baseados em BFS não é adequada para determinar a influência efetiva de SDs ativos emergentes em ST. Por sua vez, os níveis discrepantes de relações X/R entre os ramos de STs e SDs impedem a aplicação direta da versão Desacoplado Rápido para executar uma análise unificada de FP T&D.

Considerando as limitações das abordagens convencionais em abordar adequadamente a interação entre SD e ST ativos, neste capítulo apresenta-se uma formulação inovadora de FP capaz de lidar com redes T&D modernas. A metodologia considera a normalização *cpu*, a abordagem desacoplada rápida e a inclusão de um conceito original de compensação de potência de fronteira, conforme discutido em detalhes nas seções a seguir.

4.2 Normalização complexa por unidade

Várias propostas foram apresentadas para superar os problemas numéricos amplamente conhecidos enfrentados pelos métodos desacoplados rápidos quando aplicados a redes de distribuição devido à baixa razão X/R de suas linhas (HAQUE, 1993; HALEY; AYRES, 1985; RAJICIC; BOSE, 1987). Também, nesse mesmo sentido, o conceito de normalização complexa por unidade, *cpu*, provou ser uma técnica eficaz para permitir a aplicação do método Desacoplado Rápido à análises de FP em SD (TORTELLI *et al.*, 2015). Assim, apresenta-se neste capítulo uma visão geral da técnica de normalização *cpu*.

A normalização *cpu* pode ser vista como uma generalização da normalização convencional por unidade (*pu*), onde uma base de potência complexa é aplicada em vez da base de potência real usada no procedimento tradicional, ou seja:

$$\dot{S}_{base} = \left|\dot{S}_{base}\right| e^{-j\phi_{base}} \tag{4.1}$$

onde ϕ_{base} é o ângulo da potência de base.

A base de tensão, por sua vez, é mantida como um valor real, como na normalização convencional, mantendo o estado original da rede:

$$\dot{V}_{base} = \left|\dot{V}_{base}\right| e^{j0} = V_{base} \tag{4.2}$$

Desse modo, a impedância base pode ser facilmente determinada:

$$\dot{Z}_{base} = \frac{V_{base}^2}{\dot{S}_{base}^*} \left|\dot{Z}_{base}\right| e^{-j\phi_{base}} \tag{4.3}$$

A magnitude da impedância base é a mesma, independente da normalização ser de maneira convencional ou complexa. No entanto, na *cpu* o ângulo da impedância base varia, devido à influência do ângulo de base da potência na normalização, como se pode observar. Assim, a impedância normalizada da *cpu* é dada por:

$$\dot{Z}_{cpu} = \frac{R_\Omega + jX_\Omega}{\dot{Z}_{base}} = \frac{\left|\dot{Z}_\Omega\right| e^{j\alpha}}{\left|\dot{Z}_{base}\right| e^{-j\phi_{base}}} = \left|\dot{Z}_{pu}\right| e^{j(\alpha+\phi_{base})} \tag{4.4}$$

onde α é o ângulo original da impedância de linha.

De acordo com a Eq. (4.4), a impedância normalizada fornecida pela abordagem da *cpu* tem a mesma magnitude que a obtida pela normalização convencional *pu*, mas um ângulo diferente, ajustado pelo ângulo da base de potência complexa, ϕ_{base}.

Os valores normalizados, em *cpu*, para a resistência e a reatância são obtidos diretamente da Eq. (4.4):

$$R_{cpu} = \left|\dot{Z}_{pu}\right| \cos(\alpha + \phi_{base}) \tag{4.5}$$

$$X_{cpu} = \left|\dot{Z}_{pu}\right| \operatorname{sen}(\alpha + \phi_{base}) \tag{4.6}$$

$$R_{cpu} = R_{pu} \cos\phi_{base} - X_{pu} \operatorname{sen}\phi_{base} \tag{4.7}$$

$$X_{cpu} = X_{pu}\cos\phi_{base} + R_{pu}\,\mathrm{sen}\,\phi_{base} \tag{4.8}$$

Como consequência, a relação entre R_{cpu} e X_{cpu} pode ser ajustada de acordo com o valor do ângulo da potência de base, conforme indicado na Eq. (4.9):

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = \mathrm{tg}(\alpha + \phi_{base}) \tag{4.9}$$

Portanto, aplicar um ângulo de base positivo aumentará o valor da relação X/R, o que permite alcançar valores semelhantes de LTs. Assim, este procedimento pode ser visto como uma estratégia artificial para intensificar o desacoplamento $P\theta - QV$ em redes com baixas relações X/R comumente observadas em SD.

Da mesma forma que a normalização convencional, além dos parâmetros da rede, também as injeções de potência são afetadas pela base de potência complexa:

$$\dot{S}_{cpu} = \frac{|\dot{S}_{VA}|e^{j\delta}}{|\dot{S}_{base}|e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{S}_{pu}|e^{j(\delta+\phi_{base})} \tag{4.10}$$

$$\dot{S}_{cpu} = \left(P_{pu} + jQ_{pu}\right)e^{j\phi_{base}} \tag{4.11}$$

onde δ é o ângulo de fase original da potência complexa.

Assim, as injeções de potência ativa e reativa na nova representação normalizada passam a ser calculadas por:

$$P_{cpu} = |\dot{S}_{pu}|\cos(\delta + \phi_{base}) \tag{4.12}$$

$$Q_{cpu} = |\dot{S}_{pu}|\,\mathrm{sen}(\delta + \phi_{base}) \tag{4.13}$$

$$P_{cpu} = P_{pu}\cos\phi_{base} - Q_{pu}\,\mathrm{sen}\,\phi_{base} \tag{4.14}$$

$$Q_{cpu} = Q_{pu}\cos\phi_{base} + P_{pu}\,\mathrm{sen}\,\phi_{base} \tag{4.15}$$

Dessa forma, a solução do problema de FP (o valor das tensões nodais) não é afetada pelo valor do ângulo da base de potência, uma vez que as injeções de potência normalizadas e os parâmetros da linha foram submetidos ao mesmo ângulo de base.

Verifica-se que com a aplicação da *cpu* a base de corrente complexa pode ser descrita por:

$$\dot{I}_{base} = \frac{V_{base}}{|\dot{Z}_{base}|e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{I}_{base}|e^{j\phi_{base}} \tag{4.16}$$

Desta relação é possível concluir que, como $\dot{I}_{base}$ tem o mesmo ângulo de base de $\dot{S}_{base}$, porém de sentido oposto, garante-se um valor real para a base de tensão, mantendo o estado do sistema original. Isto pode ser verificado a partir da aplicação da definição de *pu* e da Eq. (4.11) em $\dot{S} = \dot{V}.\dot{I}^*$, resultando em:

$$\dot{S}_{base} = \dot{V}_{base}.I^*_{base} \tag{4.17}$$

$$|\dot{S}_{base}|e^{-j\phi_{base}} = V_{base}|\dot{I}_{base}|e^{-j\phi_{base}} \tag{4.18}$$

$$V_{base} = \frac{|\dot{I}_{base}|e^{-j\phi_{base}}}{|\dot{S}_{base}|e^{-j\phi_{base}}} \tag{4.19}$$

$$V_{base} = \frac{I_{base}}{S_{base}} \tag{4.20}$$

Donde se conclui que a aplicação da *cpu* em uma rede implica em valores de tensões complexas das barras idênticos aos valores resultantes do emprego da normalização convencional, ou seja, o estado do sistema encontrado por ambas as normalizações é equivalente:

$$V_{cpu} \equiv V_{pu} \tag{4.21}$$

$$\theta_{cpu} \equiv \theta_{pu} \tag{4.22}$$

Portanto, a *cpu* torna-se bastante atraente por possibilitar que a baixa relação X/R, comum em sistemas de distribuição, seja facilmente alterada para níveis típicos de redes de transmissão através da escolha de um ângulo de base adequado sem modificar o estado do sistema.

4.3 Metodologia para fluxo de potência desacoplado para sistemas T&D

Esta seção apresenta a abordagem T&D unificada proposta que se baseia na extensão do algoritmo convencional de FP desacoplado rápido para permitir a representação explícita de alimentadores de distribuição em barra de fronteira de ST.

O algoritmo do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido para sistemas interligados T&D (FPDR-T&D) pode ser aplicado para resolver as distintas condições operacionais envolvendo alimentadores de distribuição, como as redes radiais ou fracamente malhadas, conforme ilustrado na Figura 7. Ele também é eficaz na presença de operações em anel fechado entre alimentadores conectados a barras distintas do ST, conforme ilustrado na Figura 6, ou mesmo em uma topologia totalmente malhada, considerando múltiplas conexões entre SDs e ST, como visto na Figura 7.

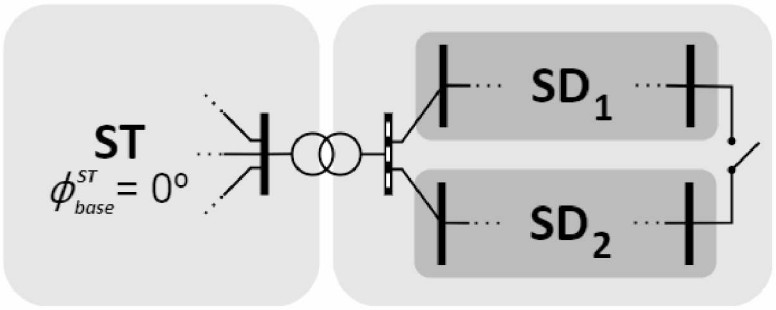


Figura 5 - Conexão T&D radial ou fracamente malhada

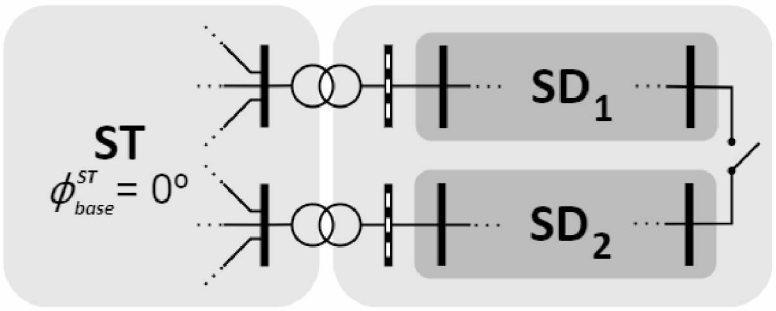


Figura 6 - Conexão T&D malhada

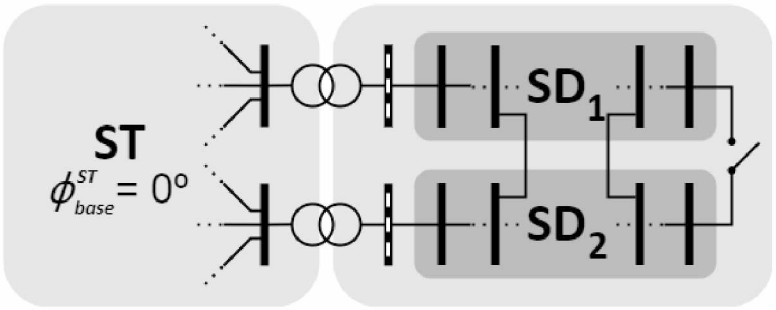


Figura 7 - Conexão T&D totalmente malhada

Para viabilizar a modelagem integrada de ST e SD de forma que esta atenda aos requisitos do método de FPDR, a normalização complexa por unidade é adotada em substituição a normalização *pu* convencional. A estratégia utilizada neste trabalho consiste em atribuir distintas potência de base complexa, e, portanto, diferentes ângulos de base, a cada partição/subsistema da rede unificada. Como consequência, desbalanços de potência são produzidos nas barras de fronteira (barras em destaque nas Figura 5, Figura 6 e Figura 7). Para manter a solução da rede integrada de T&D normalizada com distintas potências de base complexa idêntica à da rede T&D original (em *pu*), compensações fictícias de injeção de potência são inseridas na barra de fronteira, garantindo assim que o balanço de potência da rede original seja mantido.

Essas potências de compensação são incluídas no problema como novas variáveis de estado juntamente com novas equações de balanço de potência nas barras de fronteira, conforme detalhado na próxima seção.

4.3.1 Compensação de potência nas barras de fronteira dos sistemas T&D

Na metodologia proposta, bases de potência complexas distintas são atribuídas a cada alimentador de distribuição, de acordo com as características de cada rede em particular. Dessa forma, os problemas numéricos ocasionados por relações X/R amplamente diferentes entre LTs e alimentadores de distribuição são assim contornados.

O desbalanço numérico de potência na fronteira de duas redes com normalizações distintas, causado pela estratégia acima, é compensado por meio da inclusão de injeções de potência artificiais em cada barra de fronteira ST-SD, conforme ilustrado na Figura 8.

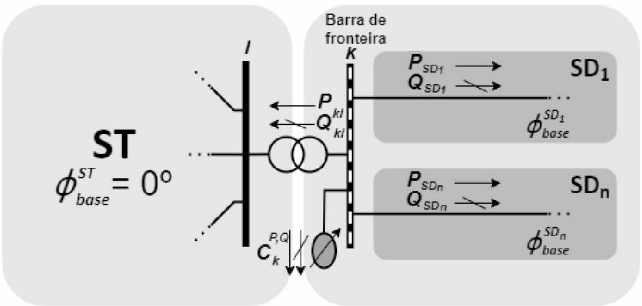


Figura 8 - Compensação fictícia de potência em barras de fronteira T&D

As compensações de potência em cada barra de fronteira k, C_k^P and C_k^Q são incorporadas na formulação como novas variáveis de estado. Então, o vetor de estado é estendido como:

$$\overline{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{V} \\ \boldsymbol{C^P} \\ \boldsymbol{C^Q} \end{bmatrix} \tag{4.23}$$

onde:

V, θ: vetores de magnitudes de tensão e ângulos de fase, respectivamente;

C^P, C^Q: vetores de compensação de potência ativa e reativa, respectivamente.

Da mesma forma, as equações de injeção de potência ativa e reativa em cada barra de fronteira k devem ser ajustadas de acordo com o conjunto estendido de variáveis de estado:

$$P_k = C_k^P + V_k \sum_{m \in \mathrm{K}} V_m (G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} \operatorname{sen}\theta_{km}) \tag{4.24}$$

$$Q_k = C_k^Q + V_k \sum_{m \in \mathrm{K}} V_m (G_{km} \operatorname{sen}\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}) \tag{4.25}$$

onde K é o conjunto de barras de distribuição conectadas à barra k, incluindo a barra k.

Como a escolha usual para o ângulo de base de potência da normalização do ST é zero, o FP ativo e reativo através do transformador de fronteira pode ser convertido, aplicando as Eqs. (4.24) e (4.25), para o ângulo de base dos alimentadores adjacentes (P_{kl}^{conv} e Q_{kl}^{conv}, respectivamente).

Portanto, considerando que n linhas de distribuição são conectadas na barra k e o respectivo transformador de fronteira é conectado através dos nós k e l, conforme ilustrado na Figura 8, as seguintes equações são válidas:

$$E_k^P = P_{kl}^{conv}(V,\theta) + \sum_{m \in \Omega_k^{SD}} P_{km}(V,\theta) = 0 \tag{4.26}$$

$$E_k^Q = Q_{kl}^{conv}(V,\theta) + \sum_{m \in \Omega_k^{SD}} P_{km}(V,\theta) = 0 \tag{4.27}$$

onde:

E_k^P, E_k^Q: equação de balanço dos fluxos de potência na barra de fronteira;

Ω_k^{SD}: conjunto de barras de distribuição ligados à barra de fronteira k.

As Eqs. (4.26) e (4.27) são incluídas no conjunto de equações do algoritmo do FPDR-T&D.

4.3.2 Formulação do FPDR-T&D via normalização complexa proposto

Como as modificações propostas estendem o vetor de estados, o conjunto de equações de balanço de potência também é aumentado pela inclusão das equações de compensação de potência, ou seja:

$$f(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta P}\left(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{C^P}\right) \\ \boldsymbol{\Delta E^P}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}) \\ \boldsymbol{\Delta Q}\left(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{C^Q}\right) \\ \boldsymbol{\Delta E^Q}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} \tag{4.28}$$

onde:

$\Delta P, \Delta Q$: vetores de desvio de potência convencionais;

ΔE^P, ΔE^Q: vetores de desvio de FP nas barras de fronteira.

Aplicando as suposições do método Desacoplado Rápido, o sistema linear aumentado pode ser dividido nos dois seguintes conjuntos de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta P}\left(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{C^P}\right) \\ \boldsymbol{\Delta E^P}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B'} & \boldsymbol{B'_P} \\ \boldsymbol{B'_B} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta \theta} \\ \boldsymbol{\Delta C^P} \end{bmatrix} \tag{4.29}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta Q}\left(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{C^Q}\right) \\ \boldsymbol{\Delta E^Q}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B''} & \boldsymbol{B''_Q} \\ \boldsymbol{B''_B} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta V} \\ \boldsymbol{\Delta C^Q} \end{bmatrix} \tag{4.30}$$

onde:

B', B'': matrizes constantes convencionais formadas de acordo com a versão do método Desacoplado Rápido (XB ou BX) (MONTICELLI; GARCIA; SAAVEDRA, 1990).

B'_P, B''_Q: matrizes constantes com os respectivos elementos da matriz B_{barra} referentes ao resultado das derivadas das equações das injeções de potência ativa e reativa convencionais em relação às novas variáveis de estado de compensação de potência ativa e reativa, respectivamente, com as devidas aproximações referentes ao método Desacoplado Rápido, cujas entradas diferentes de zero são iguais a um.

B'_B, B''_B: matrizes constantes com os respectivos elementos da matriz B_{barra} referentes ao resultado das derivadas das novas equações dos balanço dos fluxos de potência ativo e reativo na barra de fronteira em relação às variáveis de estado convencionais da parte ativa e reativa, respectivamente, com as devidas aproximações referentes ao método Desacoplado Rápido.

A solução do FP pode ser alcançada resolvendo, iterativamente e sequencialmente, as Eqs. (4.29) e (4.30).

4.3.3 Sistema T&D ilustrativo

Uma rede simples, mostrada na Figura 9, composta por uma única LT conectada a um único alimentador de distribuição através de um transformador é apresentada para ilustrar a implementação da abordagem proposta.

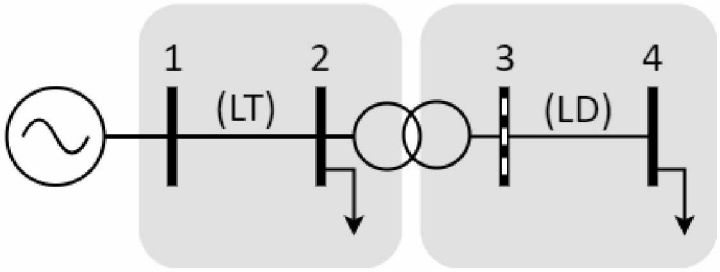


Figura 9 - Sistema T&D ilustrativo de 4 barras

A Fig. 4 mostra as impedâncias e cargas de linha normalizadas, considerando que a *cpu* é aplicada somente ao SD. É importante notar que não somente o ângulo resultante, mas também as magnitudes das variáveis normalizadas podem ser ajustadas.

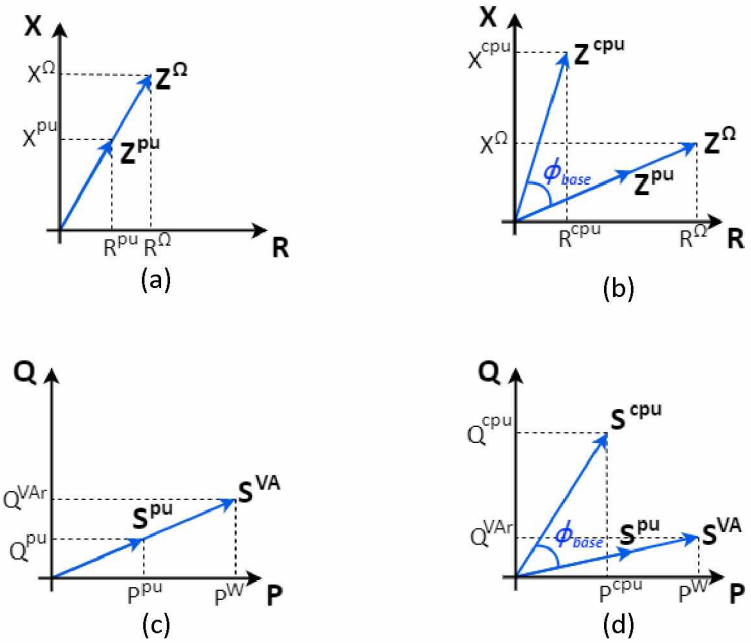


Figura 10 - Variáveis normalizadas: a) impedância da LT; (b) impedância da LD; (c) carga do ST; (d) carga do SD

Compensações artificiais de potência ativa e reativa são anexadas à barra de fronteira T&D (nó 3), conforme mostrado na Figura 9.

Assim, a estrutura da matriz a ser considerada no processo iterativo é composta da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta P_2} \\ \boldsymbol{\Delta P_3} \\ \boldsymbol{\Delta P_4} \\ \boldsymbol{\Delta E^P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \boldsymbol{B'} & & 0 \\ & & & 1 \\ & & & 0 \\ B'_{B2} & B'_{B3} & B'_{B4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta\theta_2} \\ \boldsymbol{\Delta\theta_3} \\ \boldsymbol{\Delta\theta_4} \\ \boldsymbol{\Delta C^P} \end{bmatrix} \tag{4.31}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta Q_2} \\ \boldsymbol{\Delta Q_3} \\ \boldsymbol{\Delta Q_4} \\ \boldsymbol{\Delta E^Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \boldsymbol{B''} & & 0 \\ & & & 1 \\ & & & 0 \\ B''_{B2} & B''_{B3} & B''_{B4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta V_2} \\ \boldsymbol{\Delta V_3} \\ \boldsymbol{\Delta V_4} \\ \boldsymbol{\Delta C^Q} \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

4.4 Simulações e resultados

Com o objetivo de ilustrar o desempenho de tal abordagem, foi desenvolvido um programa computacional a partir da formulação do FPDR-T&D, detalhada na seção anterior, e alguns resultados são apresentados. Para validação do FPDR-T&D proposto três cenários de testes foram simulados.

O primeiro cenário trata-se um sistema-teste T&D ilustrativo de 4 barras, sendo duas barras pertencentes ao ST e as outras duas barras ao SD, no qual busca-se avaliar o comportamento do FPDR-T&D considerando distintas normalizações para o SD. Pode-se avaliar o desempenho do FPDR-T&D com *cpu* através da convergência de cada caso, observar a compensação artificial de potência na barra de fronteira e comparar o resultado das tensões complexas nas barras para todas as simulações com normalizações distintas.

O segundo cenário conta com um sistema-teste T&D de grande porte, onde o ST é representado pelo sistema IEEE 14 barras e o SD por dois alimentadores, um sistema 12 barras conhecido na literatura e o outro uma rede de distribuição real de 20 barras. Aqui, além de avaliar a convergência do método para diferentes normalizações dos SDs, uma malha é fechada entre eles para avaliar o impacto desta condição operacional nas tensões complexas das barras e nos fluxos de potência do ST.

O terceiro cenário, por sua vez, traz como sistema-teste T&D a junção do ST IEEE 14 barras, tido como balanceado, e o SD 12 barras, assumido como desbalanceado, com o objetivo de avaliar o

desempenho do FPDR-T&D em uma análise trifásica. Além da análise do desempenho do método para diferentes potências de base para o SD, as tensões das fases e o impacto do desequilíbrio do SD nas barras do ST são observados.

4.4.1 Aplicação do FPDR-T&D no sistema ilustrativo

Para a verificação da metodologia proposta do FPDR-T&D foi utilizado o sistema T&D ilustrativo de 4 barras, mostrado na Figura 9. Neste sistema as barras 1 e 2 são pertencentes ao ST com tensão nominal de 69 kV, enquanto as barras 3 e 4, separadas por um transformador abaixador, são referentes ao SD com tensão nominal de 13,5 kV. As barras 1 e 2 são conectadas por uma linha com impedância de Z_{LT} =1,2 + j14 Ω, as barras 3 e 4 são conectadas por uma linha com impedância de Z_{LD} = 12 + j2,5 Ω, enquanto as barras 2 e 3 são conectadas por um transformador com impedância de alta tensão igual a Z_T = j0,1 Ω. Ainda, S_2 = (12 + j 3) MVA e S_4 = (1,2 + j 0,3) MVA.

A Tabela 1 mostra os resultados da simulação considerando diferentes bases de potência para o SD (relacionadas à base de potência do ST convencional, que é considerada como 100MVA).

Tabela 1 - Sistema T&D ilustrativo - Nº de iterações (i_P-i_Q) e fluxos de potência

		$S_{SD_{base}}/S_{ST_{base}}$		
		1	$1.e^{j30}$	$10.e^{j30}$
Nº de iterações ($i_P - i_Q$)		20-19	15-14	12-11
Fluxos de potência	3-2 (*pu*)	-1,316 -j 0,324	-1,316 -j 0,324	-1,316 -j 0,324
	C_3 (*cpu*)	0	-0,338 +j 0,615	-1,218 -j 0,230
	3-4 (*cpu*)	1,316 +j 0,324	0,978 +j 0,939	0,098 +j 0,094
	3-4 (MVA)	131,6 +j 32,4	131,6 +j 32,4	131,6 +j 32,4

Pode-se observar que a compensação artificial de potência (C_3) ajusta sua potência injetada, resultando exatamente na mesma quantidade de potência proveniente do ST, não importa qual seja a base de potência adotada.

Também, é apropriado enfatizar que as tensões complexas nas barras do sistema T&D alcançam o mesmo valor para todas as simulações com diferentes bases de potência para o SD,

conforme a Tabela 2, indicando que a solução do problema de FP não é afetada pela escolha da base de potência.

Tabela 2 - Sistema T&D ilustrativo - Tensões complexas nas barras

V_2	V_3	V_4
$0{,}9994.e^{-j0{,}108}$	$0{,}9992.e^{-j0{,}148}$	$0{,}9120.e^{j0{,}051}$

4.4.2 Aplicação do FPDR-T&D em sistema de grande porte: Avaliação de diferentes condições operacionais

Um sistema-teste que combina dois SDs conectados ao sistema-teste IEEE 14 barras (ICSEG, 2013a) é usado para enfatizar o desempenho do FPDR-T&D. A topologia dos dois SDs é mostrada na Figura 11.

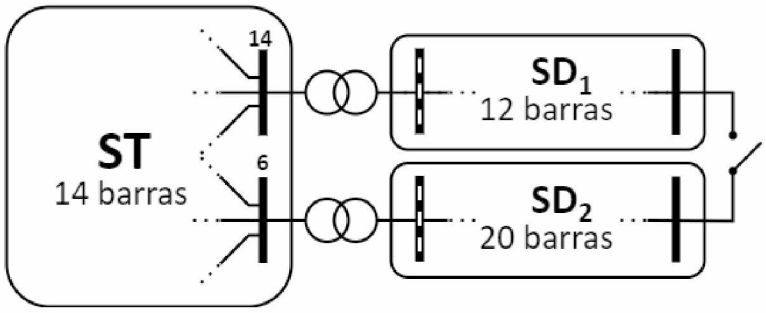


Figura 11 - Sistema-teste T&D de grande porte

Os dados do SD radial de 12 barras, ilustrado na Figura 13, podem ser encontrados em Eminoglu, Gözel e Hocaoglu (2010). O SD teste de 20 barras, na Figura 13, se refere a uma rede de distribuição real de uma concessionária brasileira e os dados do sistema podem ser encontrada no ANEXO A.

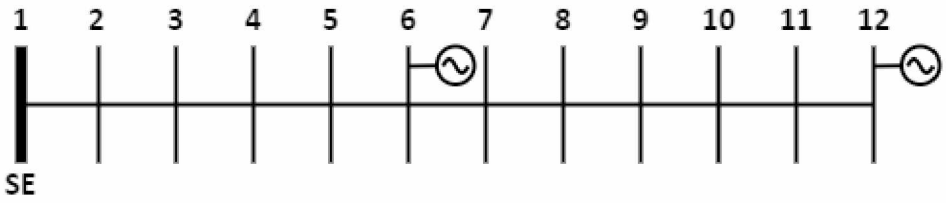


Figura 12 - Sistema-teste de SD de 12 barras

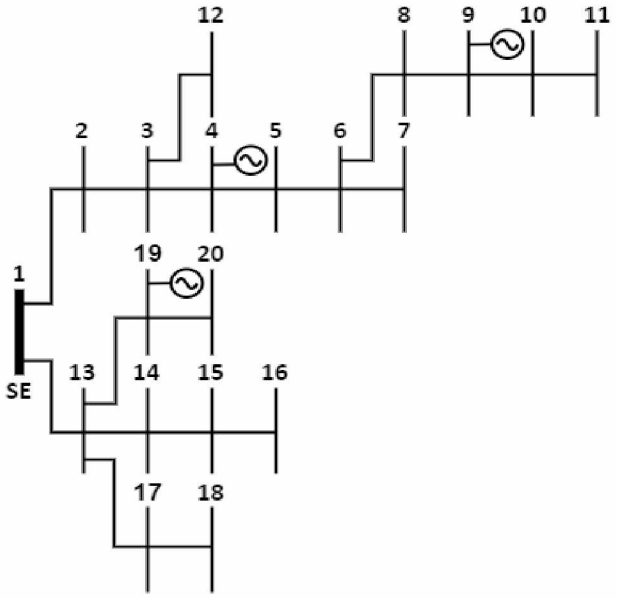


Figura 13 - Sistema-teste de SD de 20 barras

Os resultados da simulação, apresentados na Tabela 3, consideram duas condições operacionais: anel aberto e anel fechado entre os dois SDs. O desempenho é avaliado em termos de número de iterações para atingir a convergência para as duas versões usuais do método Desacoplado Rápido (XB e BX). Diferentes bases de potência para o lado do SD são consideradas e comparadas com a abordagem convencional, ou seja, com a normalização *pu* baseada em uma base de potência de 100 MVA aplicada a todo o sistema. Os resultados mostram claramente a melhoria no desempenho do método Desacoplado Rápido quando a normalização proposta *cpu* é aplicada para ambas as versões do método, ou seja, quando o FPDR-T&D é aplicado.

Tabela 3 - Sistema T&D de grande porte: Nº de iterações (i_P-i_Q)

$S_{SD_{base}}/S_{ST_{base}}$	Anel aberto				Anel fechado			
	Versão XB		Versão BX		Versão XB		Versão BX	
	i_P	i_Q	i_P	i_Q	i_P	i_Q	i_P	i_Q
1	16	15	20	20	35	34	31	31
$1.e^{j45}$	12	11	12	12	12	11	14	13
$10.e^{j45}$	12	11	12	12	12	11	13	12

Outro aspecto relevante a ser destacado é que, do ponto de vista do ST, diferentemente do anel aberto, a operação em anel fechado dos SDs não pode ser adequadamente avaliada pela abordagem convencional, onde o SD é simplesmente representado como uma carga concentrada. Para enfatizar esse aspecto, a Figura 14 mostra a diferença, em porcentagem, entre as magnitudes da

tensão e os ângulos de fase de cada barra de transmissão das duas condições operacionais: anel aberto e fechado.

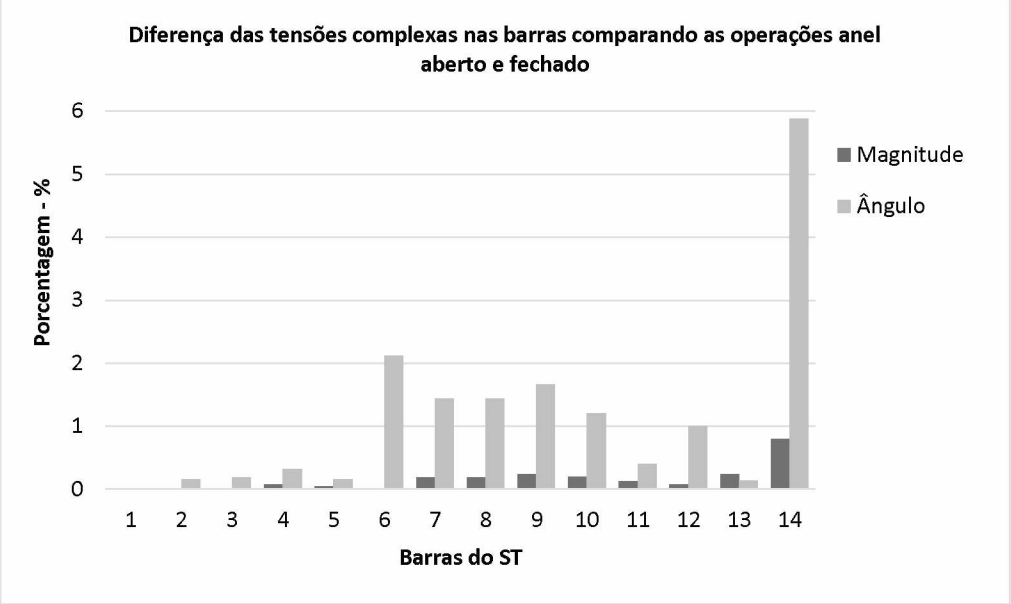


Figura 14 - Diferença nas tensões de barra do ST entre operação em anel fechado e aberto nos SDs

Apesar das diferenças nas magnitudes serem praticamente insignificantes e a diferença nos ângulos não exceder 6%, grandes diferenças no FP do ST promovido pela operação em anel entre os SDs podem ser observadas. A Tabela 4 mostra o efeito da operação em anel do SDs em certos fluxos de potência do ST. Como pode ser notado, a mudança na direção do FP não ocorre apenas nas barras de conexão.

Tabela 4 - Sistema T&D de grande porte: Comparação dos fluxos de potência ativa do ST

LT	Fluxos de potência ativa		Diferença
	Anel aberto	Anel fechado	
6-11	4,79 MW	3,11 MW	35,1 %
9-10	7,48 MW	9,15 MW	22,3 %
10-11	-1,25 MW	0,41 MW	Reverso
13-14	3,15 MW	-0,55 MW	Reverso

4.4.3 Aplicação do FPDR-T&D em sistema desbalanceado

Para ilustrar a aplicação do FPDR-T&D numa análise de FP trifásico, o sistema IEEE 14 barras é combinado ao SD 12 barras, conforme Figura 15.

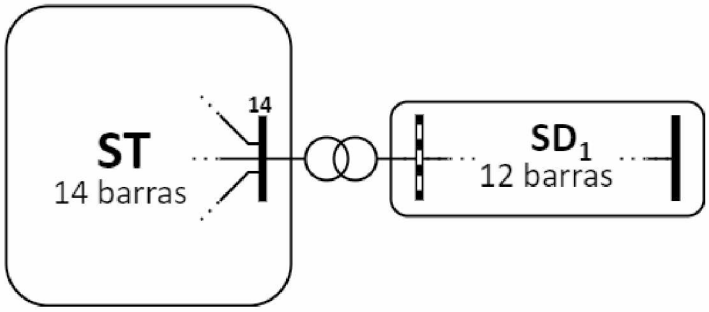


Figura 15 - Sistema-teste T&D desbalanceado

Enquanto o ST de 14 barras é considerado balanceado, o SD de 12 barras é assumido como desbalanceado, contendo circuitos bifásicos (linhas 8-9 e 9-10) e circuitos monofásicos (linhas 10-11 e 11-12). As cargas do SD também são consideradas desbalanceadas: cargas conectadas na fase B são 30% maiores do que aquelas na fase A, enquanto cargas na fase C são 30% menores do que aquelas na fase A. Além disso, as impedâncias mútuas são assumidas como 20% da respectiva impedância de linha.

Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 5 e mostram o número de iterações para a convergência considerando diferentes potências de base adotadas para o SD.

Tabela 5 - Sistema T&D desbalanceado: Nº de iterações (i_P-i_Q)

$S_{SD_{base}}/S_{ST_{base}}$	Versão XB		Versão BX	
	i_P	i_Q	i_P	i_Q
1	59	59	NC	NC
$1.e^{j15}$	39	39	13	15
$1.e^{j35}$	25	25	7	7
$1.e^{j45}$	19	19	19	19
$1.e^{j60}$	14	14	NC	NC

NC - Não convergência

Como se pode verificar, os resultados destacam que as compensações de potência combinadas com a normalização *cpu* permitem a análise T&D trifásica por meio de abordagens desacopladas. Além disso, o desempenho do algoritmo pode ser altamente melhorado com uma escolha adequada da base de potência do SD, proporcionando a convergência com apenas 7-7 iterações quando da adoção de um ângulo de base de 35° na versão BX.

A Figura 16 apresenta o perfil de tensão das fases A, B e C do SD, incluindo a barra de fronteira.

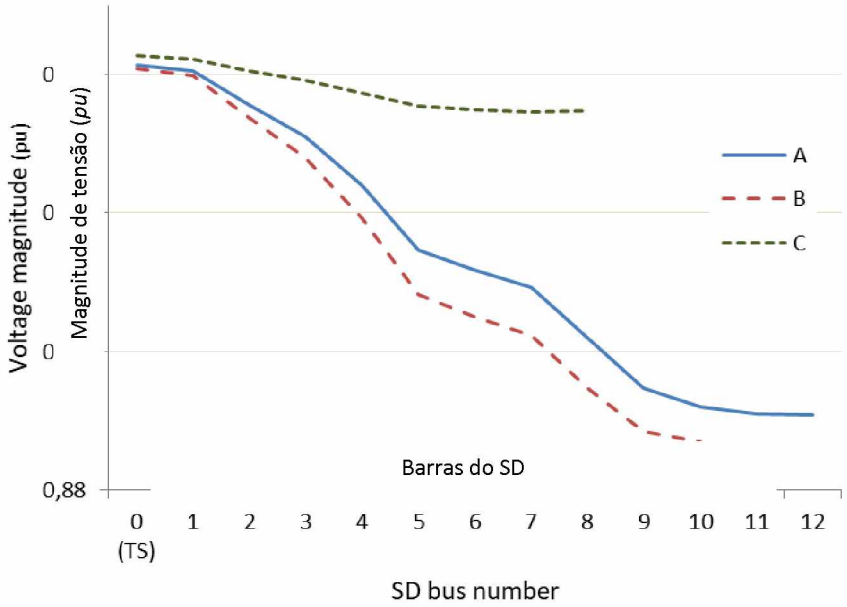


Figura 16 - Perfil de tensão na barra de fronteira e no SD

A Figura 17, por sua vez, mostra o efeito do desequilíbrio do SD nas barras do ST, apontando a diferença, em porcentagem, entre as fases A e B, A e C e B e C.

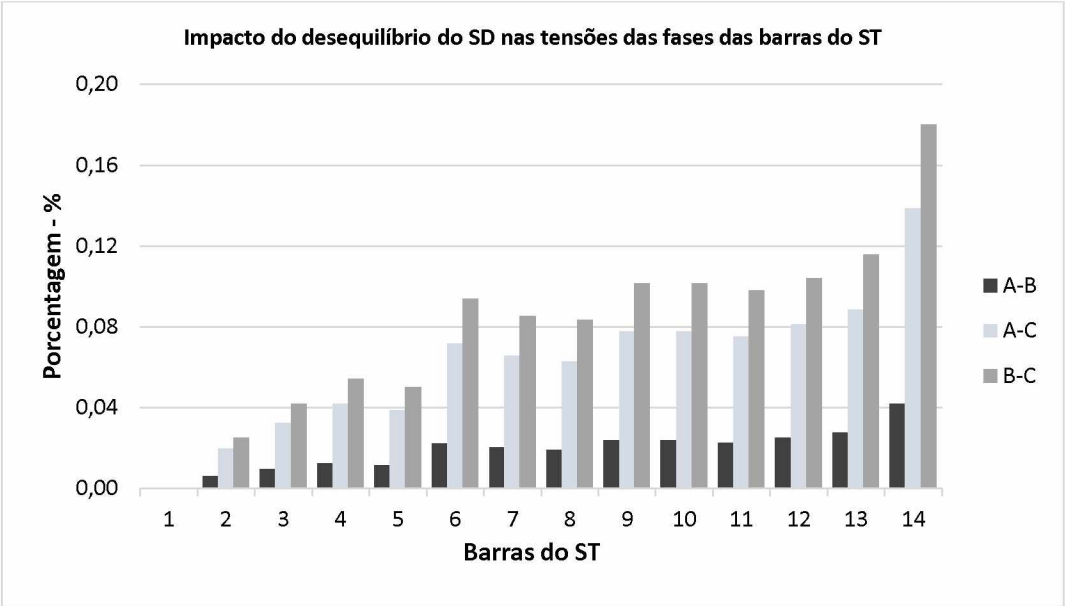


Figura 17 - Diferença de tensão nas fases das barras do ST

4.5 Considerações Finais

Este capítulo descreve o algoritmo de Fluxo de Potência Desacoplado Rápido para sistemas interligados T&D proposto neste trabalho que é capaz de lidar com redes integradas T&D, onde alimentadores de distribuição ativos, previamente selecionados, são explicitamente representados.

O FPDR-T&D proposto permite alcançar as mudanças enfrentadas pelos sistemas de transmissão e distribuição surgidas pela disseminação da GD e tecnologias de *Smart Grid*, possibilitando analisar os impactos do SDs ativos sobre os STs e vice-versa, essenciais para diversas aplicações conforme discutido na revisão da literatura.

A formulação proposta adota diferentes potência de base complexa (via *cpu*), que ajusta as relações X/R de SDs a um padrão típico de LTs durante o processo iterativo. Nessa abordagem, injeções de potência artificiais são atribuídas nas barras de fronteira das redes integradas de T&D, que são incluídas na formulação do FP como novas variáveis de estado.

Os resultados obtidos pela aplicação do algoritmo FPDR-T&D envolvendo combinações de redes interligadas T&D com sistemas de transmissão de 14 barras e sistemas de distribuição de 12 e 20 barras, além de cenários de condições operacionais distintas com topologias radiais e em malha demonstram a eficácia da abordagem ao considerar alimentadores e cargas de distribuição balanceados e desbalanceados. Além disso, a relevância de determinar com precisão a influência da operação de SDs ativos na rede de transmissão qualifica a presente metodologia como uma alternativa promissora para apoio à operação e controle dos sistemas elétricos modernos.

CAPÍTULO 5: ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PARA SISTEMAS T&D

5.1 Introdução

Conforme discutido nos capítulos anteriores, a disseminação da GD, notadamente a partir de fontes renováveis de energia, traz dois aspectos bastante desejáveis ao sistema elétrico: diversificação e sustentabilidade. Aliado a isso, a introdução de novas tecnologias de medição, controle e comunicação, reunidas no amplo conceito de *Smart Grids*, vem afetando de forma significativa a operação em tempo real dos STs e SDs. Além disso, a crescente instalação de recursos energéticos renováveis está criando interações mais impactantes entre os ST e SD, que, devido à intermitência das fontes renováveis e os fluxos reversos na interconexão desses sistemas, afetam o desempenho do controle de tensão em ambas as redes (SAMAAN et al., 2018).

Fica evidente que a operação do SD, antes um ator passivo com aplicações manuais, passou a adotar tomadas de decisões complexas em tempo real, exigindo uma análise minuciosa dos impactos mútuos das interações entre os ST e SD. Foram discutidos também na revisão da literatura apresentada (vide Capítulo 2) que diversos trabalhos têm demostrado a necessidade do desenvolvimento de novas metodologias que sejam capazes de realizar análises integradas de sistemas de T&D, como, por exemplo, (DUGAN, 2010; MOHSENI-BONAD, 2020; MUNOZ-DELGADO *et al.*, 2021; SHARMA; CHAKRABARTI; SHARMA, 2022). Esses trabalhos evidenciam a complexidade da operação e tomada de decisões dos SDs, que passaram a exigir uma análise minuciosa dos impactos mútuos das interações entre os ST e SD.

Motivados por essa nova realidade dos sistemas elétricos, novas abordagens e modelagens para solução do problema de FP vêm sendo desenvolvidas, de forma a permitir uma análise integrada das redes de T&D (HUANG; VITTAL, 2017; PORTELINHA *et al.*, 2021; SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988).

Esses novos desenvolvimentos de análise integrada de T&D têm relevância também para os procedimentos da operação em tempo real, tanto pela característica de intermitência das fontes renováveis de GD, quanto pela busca por uma operação confiável dentro desse novo cenário. A garantia de uma base de dados confiável para redes integradas de T&D, que permita usufruir com segurança desses novos recursos energéticos e assegure a eficácia das diversas aplicações em tempo real, é atribuição da EE, que precisa igualmente de novos avanços para permitir a análise integrada de redes de T&D. Essa necessidade da extensão dos métodos de EE para análise unificada de redes T&D já eram apontados no início da década passada (ZEGERS; BRUNNER, 2014; GOMEZ-EXPOSITO et al., 2011; XIE et al., 2012). Entre as motivações, os autores apontam o congestionamento da fronteira T&D

e das LTs com aumento de GDs ou carga, desafios no balanço de geração e consumo frente ao avanço da geração intermitente, o suporte de tensão de um sistema ao outro (ST para o SD, e vice-versa) através de ajustes nos transformadores de fronteira e da flexibilidade do SD, ressincronização e partida autônoma considerando a possibilidade cada vez maior de partes do SD serem desconectadas da rede.

Este trabalho busca contribuir também com esses esforços de modelagem e análise em tempo real de redes integradas de T&D, propondo novas metodologias e estratégias na formulação da EE, que sejam capazes de processar de forma eficaz redes elétricas integradas de T&D onde alimentadores de distribuição previamente selecionados pelo operador, possam ser explicitamente representados.

Este capítulo apresenta a metodologia proposta que se baseia igualmente no uso da *cpu* para lidar com as diferentes característica e relações X/R dos STs e SDs e viabilizar a aplicação das técnicas de desacoplamento. Conforme detalhado nas seções que seguem, diferentemente da proposta adotada para o problema de FP em redes de T&D, apresentada na Capítulo 4, uma nova abordagem é adotada na atribuição de diferentes normalizações complexas às partições/subsistemas da rede T&D. Essa nova estratégia elimina atribuir injeções fictícias nas barras de fronteira, tornando a ferramenta resultante mais robusta e eficaz.

5.2 Metodologia para estimação de estados desacoplada para sistemas T&D

O Estimador de Estados Desacoplado Rápido para sistemas T&D interligados (EEDR-T&D) proposto neste trabalho baseia-se numa releitura da aplicação da normalização complexa proposta em Tortelli et al. (2015). A rede integrada de T&D em estudo é particionada em áreas de transmissão e distribuição e distintas bases de potência complexa são adotadas para cada área, de acordo com as características de relação X/R média das porções da rede.

O sucesso dessa abordagem em estudos de FP (PORTELINHA *et al.*, 2021), onde utilizam-se distintas *cpu* para sistemas T&D a fim de permitir a solução do problema de FP pelo método Desacoplado Rápido, tem motivado e dado suporte na geração de um ambiente de simulação de medidas para a presente proposta.

Cabe ressaltar que, diferentemente da abordagem adotada no FPDR-T&D para sistemas unificados T&D proposta no capítulo anterior, a nova metodologia elimina a necessidade de adoção de injeções fictícias nas barras de fronteira entre os ST e SDs, trazendo robustez ao processo iterativo, conforme descrito a seguir.

5.2.1 Impacto da normalização complexa por unidade no EEDR-T&D proposto

Na abordagem proposta nesse trabalho a *cpu* é aplicada aos dados da rede interligada de T&D a partir da adoção de potências de base complexas distintas para o ST e os SDs previamente selecionados para serem explicitamente representados, visando viabilizar o uso do EE desacoplado rápido.

Como os STs não necessitam de ajustes virtuais na relação X/R dos seus condutores, é aplicada a normalização por unidade convencional *pu* para normalização de seus elementos e medidas, ou seja, $\phi_{base}^{ST} = 0°$. Já para o SD, é determinado um valor de ângulo de base, ϕ_{base}^{SD}, que será distinto de zero, de modo a ajustar a relação X/R de seus condutores para níveis adequados à utilização da EE desacopladas. Devido às distintas normalizações, os vetores de estados ativo e reativo são segregados em suas porções pertencentes ao ST e ao SD, conforme apresentado nas Eqs. (5.1) e (5.2).

$$x_A = \begin{bmatrix} \theta^{ST} \\ \theta^{SD} \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

$$x_R = \begin{bmatrix} V^{ST} \\ V^{SD} \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

Naturalmente, as diferentes normalizações *cpu* se refletem nos vetores de medidas, que passam a receber normalizações distintas conforme as medidas e elementos pertencem ao ST ou ao SD, determinado de acordo com a natureza da quantidade medida, resultando nestas a mesma partição do vetor de estados entre as regiões do ST e do SD. As Eqs. (5.3) e (5.4) apresentam a partição correspondente aos vetores de medidas ativas e reativas:

$$z_A = \begin{bmatrix} P_{fluxo}^{ST} \\ P_{fluxo}^{SD} \\ P_{inj}^{ST} \\ P_{inj}^{SD} \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

$$z_R = \begin{bmatrix} Q_{fluxo}^{ST} \\ Q_{fluxo}^{SD} \\ Q_{inj}^{ST} \\ Q_{inj}^{SD} \\ V_{mag}^{ST} \\ V_{mag}^{SD} \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

A conversão das grandezas medidas do tipo potência (fluxo de potência nas linhas e injeções de potência nas barras) para o sistema *cpu* pode ser obtida a partir da base de potência complexa, ou seja:

$$S_{[cpu]} = P_{[cpu]} + jQ_{[cpu]} = \frac{P_{[W]} + jQ_{[VAr]}}{S_{base[VA]} e^{-j\phi_{base}}} \tag{5.5}$$

Portanto, o valor *cpu* de uma medida de FP ativa e reativa através do ramo $k-m$, pode ser obtido através da Eq. (5.5) aplicando a identidade de Euler, de modo que:

$$z_{P_{km[cpu]}} = \frac{z_{P_{km[W]}}}{S_{base[VA]}} \cos\phi_{base} - \frac{z_{Q_{km[VAr]}}}{S_{base[VA]}} \operatorname{sen}\phi_{base} \tag{5.6}$$

$$z_{Q_{km[cpu]}} = \frac{z_{Q_{km[VAr]}}}{S_{base[VA]}} \cos\phi_{base} + \frac{z_{P_{km[W]}}}{S_{base[VA]}} \operatorname{sen}\phi_{base} \tag{5.7}$$

A partir das Eqs. (5.6) e (5.7), pode-se concluir que a conversão de grandezas em *pu* para *cpu* é dada por:

$$z_{P_{km[cpu]}} = z_{P_{km[pu]}} \cos\phi_{base} - z_{Q_{km[pu]}} \operatorname{sen}\phi_{base} \tag{5.8}$$

$$z_{Q_{km[cpu]}} = z_{Q_{km[pu]}} \cos\phi_{base} + z_{P_{km[pu]}} \operatorname{sen}\phi_{base} \tag{5.9}$$

Da mesma forma, as medidas de injeção de potência ativa e reativa na barra k podem ser convertidas para o sistema *cpu*, conforme descrito abaixo:

$$z_{P_{k[cpu]}} = \frac{z_{P_{k[W]}}}{S_{base[VA]}} \cos\phi_{base} - \frac{z_{Q_{k[VAr]}}}{S_{base[VA]}} \operatorname{sen}\phi_{base} \tag{5.10}$$

$$z_{Q_{k[cpu]}} = \frac{z_{Q_{k[VAr]}}}{S_{base[VA]}} \cos\phi_{base} + \frac{z_{P_{k[W]}}}{S_{base[VA]}} \operatorname{sen}\phi_{base} \tag{5.11}$$

$$z_{P_{k[cpu]}} = z_{P_{k[pu]}} \cos\phi_{base} - z_{Q_{km[pu]}} \operatorname{sen}\phi_{base} \tag{5.12}$$

$$z_{Q_{k[cpu]}} = z_{Q_{km[pu]}} \cos\phi_{base} + z_{P_{k[pu]}} \operatorname{sen}\phi_{base} \tag{5.13}$$

Com relação às grandezas de tensão, como as bases de tensão são mantidas reais, a medição de tensão na barra k no sistema *cpu* é equivalente ao valor *pu* convencional, ou seja:

$$z_{V_{k[cpu]}} = \frac{z_{V_{k[V]}}}{V_{base[V]}} = z_{V_{k[pu]}} \tag{5.14}$$

5.2.2 Formulação do EEDR-T&D via normalização complexa proposto

A aplicação direta do estimador de estados desacoplado rápido em redes integradas de T&D implicaria em problemas de condicionamento numérico das matrizes envolvidas, devido às discrepantes relações X/R entre o ST e os SD, e elevadas imprecisões, uma vez que as baixas relações X/R dos SDs comprometem a validade das aproximações adotadas nos métodos desacoplados.

A aplicação da normalização *cpu* conforme proposta nesse trabalho contorna os dois problemas citados acima. Para tanto, esta é incorporada às rotinas de EE, modificando a matriz de admitâncias de barras (Y_{barra}) e, consequentemente, as submatrizes Jacobiana e Ganho desacopladas da EE desacoplada. Assim como na forma original da normalização *cpu*, nessa metodologia as estimativas para as tensões complexas em todas as barras são idênticas àquelas obtidas com o uso da normalização *pu* convencional.

Para generalizar o procedimento proposto de uso de diferentes normalizações *cpu*, considere n SDs que se desejam representar explicitamente juntamente com o ST ao qual estão integrados, ou seja, SD_1, SD_2, ..., SD_n. A Figura 18 ilustra uma situação possível onde dois SDs, conectados a partir de duas subestações distintas nesse caso, são representados explicitamente (de forma integrada) ao ST.

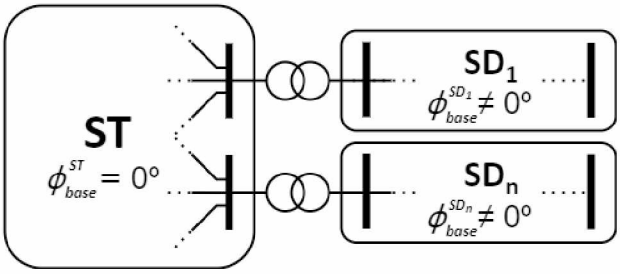


Figura 18 - Esquema ilustrativo para T&D

Para o ST, onde as relações X/R já atendem as premissas para o uso do estimador de estados desacoplado, um ângulo de base zero é considerado. Já para os SDs, diferentes potências de base complexas ($S_{base}\angle\phi_{base,n}$) são adotadas, seguindo as características de cada um deles. No sistema normalizado com múltiplas normalizações complexas, conforme proposto, as equações de injeção de corrente numa dada barra k são representadas considerando a *cpu* correspondente à localização da barra k, com a potência de base do subsistema (área) ao qual a referida barra pertence. Ou seja, considerando que a barra k pertencente ao subsistema SD_i, com cpu_i, a injeção de corrente nesta barra é dada por:

$$\mathbf{I}_k^{cpu_i} = \sum_{m \in \mathrm{K}} \mathbf{Y}_{km}^{cpu_i} \mathbf{V}_{km}^{cpu_i} \tag{5.15}$$

onde:

$\mathbf{Y}_{km}^{cpu_i}$: elemento $k-m$ da nova matriz Y_{barra}, com múltiplas *cpu*;

K: conjunto de barras adjacentes à barra k, incluindo a própria barra k.

Os valores da matriz de admitância (Y_{barra}) são obtidos conforme proposto na Equação (33), onde cada linha da matriz de admitância é normalizada de acordo com área (ST ou SD) e suas respectivas *cpu*.

$$\mathbf{Y}_{barra} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{barra_{ST}}^{cpu_0} \\ \mathbf{Y}_{barra_{SD_1}}^{cpu_1} \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{barra_{SD_n}}^{cpu_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{ST}^{cpu_0} \\ \mathbf{G}_{SD_1}^{cpu_1} \\ \vdots \\ \mathbf{G}_{SD_n}^{cpu_n} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{ST}^{cpu_0} \\ \mathbf{B}_{SD_1}^{cpu_1} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{SD_n}^{cpu_n} \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

A aplicação de múltiplas *cpu* na matriz Y_{barra} e na normalização das quantidades medidas se refletem nas matrizes Jacobiana e Ganho da formulação da EE, descrita no Capítulo 3. Considerando as partições ativa e reativa dos vetores e matrizes adotados na formulação desacoplada da EE (vide Seção 3.2), juntamente com a partição relativa ao ST e aos SDs, as matrizes Jacobiana e Ganho passam

a receber normalizações distintas conforme as medidas/elementos pertencentes ao ST ou a cada SD, apresentadas por:

$$H_{AA} = \begin{bmatrix} H_{AA}^{ST} \\ H_{AA}^{SD_1} \\ H_{AA}^{SD_2} \\ \vdots \\ H_{AA}^{SD_n} \end{bmatrix}; H_{AR} = \begin{bmatrix} H_{AR}^{ST} \\ H_{AR}^{SD_1} \\ H_{AR}^{SD_2} \\ \vdots \\ H_{AR}^{SD_n} \end{bmatrix} \tag{5.17}$$

$$H_{RA} = \begin{bmatrix} H_{RA}^{ST} \\ H_{RA}^{SD_1} \\ H_{RA}^{SD_2} \\ \vdots \\ H_{RA}^{SD_n} \end{bmatrix}; \; H_{RR} = \begin{bmatrix} H_{RR}^{ST} \\ H_{RR}^{SD_1} \\ H_{RR}^{SD_2} \\ \vdots \\ H_{RR}^{SD_n} \end{bmatrix} \tag{5.18}$$

$$G_{AA} = \begin{bmatrix} G_{AA}^{ST} \\ G_{AA}^{SD_1} \\ G_{AA}^{SD_2} \\ \vdots \\ G_{AA}^{SD_n} \end{bmatrix}; \; G_{RR} = \begin{bmatrix} G_{RR}^{ST} \\ G_{RR}^{SD_1} \\ G_{RR}^{SD_2} \\ \vdots \\ G_{RR}^{SD_n} \end{bmatrix} \tag{5.19}$$

onde as submatrizes associadas aos SDs contêm n partições que representam cada um dos n SDs explicitamente representados.

A partir dessa nova formulação, os algoritmos de EE desacoplada no algoritmo e no modelo, (discutidos na Seção 3.2), podem ser aplicados de forma eficiente e robusta para o processamento de redes interligadas de T&D.

Na metodologia proposta, primeiramente, os dados originais das linhas e barras são normalizados via *cpu*. Então, a matriz Y_{barra} com múltiplas *cpu* é montada. Os novos parâmetros/elementos normalizados alimentam o método de EE desacoplado escolhido. Embora a *cpu* beneficie principalmente os métodos desacoplados, ela também pode ser aplicada a qualquer outro método de EE.

A partir desse novo equacionamento, o algoritmo de EE desacoplado tradicional pode ser aplicado diretamente para redes interligadas T&D sem necessidade de qualquer alteração em sua rotina de solução.

5.3 Simulações e resultados

Com o objetivo de ilustrar o desempenho de tal abordagem, foi desenvolvido um programa computacional a partir da formulação do EEDR-T&D, detalhada na seção anterior, e alguns resultados são apresentados.

Com o objetivo de ilustrar o desempenho de tal abordagem, foi desenvolvido um programa computacional a partir da formulação do EEDR-T&D, detalhada na seção anterior, e alguns resultados são apresentados. Para validação do EEDR-T&D proposto três cenários de testes foram simulados.

O primeiro cenário trata-se sistema-teste T&D ilustrativo, já mencionado anteriormente, de 4 barras. Busca-se avaliar o comportamento do EEDR-T&D considerando distintas normalizações para o SD e comparando os distintos métodos de EE: Estimador de Estados Completo, o Estimador de Estados Desacoplado no Algoritmo e o Estimador de Estados Desacoplado no Modelo. Pode-se avaliar o desempenho do EEDR-T&D com *cpu* através da convergência de cada caso e da comparação do resultado dos estados estimados nas barras para todas as simulações com normalizações distintas. São, ainda, analisados os diferentes métodos de EE utilizando medidas com pequenos erros.

O segundo cenário traz as mesmas análises do cenário anterior, porém com um sistema-teste T&D de grande porte, onde o ST é representado pelo sistema IEEE 14 barras e o SD por dois alimentadores 69 barras conhecidos na literatura.

Por fim, o terceiro cenário apresenta um outro sistema-teste T&D de grande porte, com a junção do ST IEEE 14 barras com dois SDs 69 barras, com o objetivo de avaliar o desempenho do EEDR-T&D frente a diferentes conexões, topologias e condições operacionais considerando operações radial e malhada e inserção de GDs.

5.3.1 Aplicação do EEDR-T&D no sistema ilustrativo

O sistema-teste T&D ilustrativo de 4 barras, já apresentado anteriormente na Figura 9 e usado como um dos cenários das simulações do FPDR-T&D, é também utilizado para algumas simulações e validação do EEDR-T&D. O sistema-teste é novamente apresentado na Figura 19.

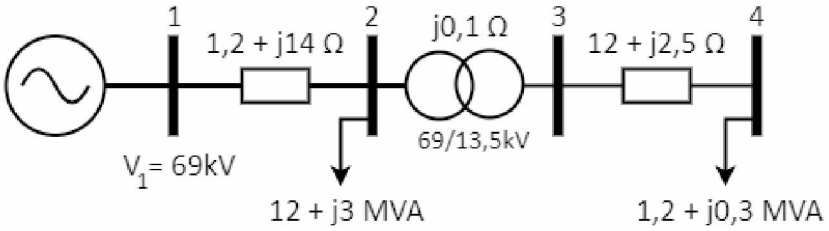


Figura 19 - Sistema T&D ilustrativo de 4 barras

5.3.1.1 Utilizando medidas perfeitas

A obtenção de medidas de grandezas elétricas do sistema-teste T&D ilustrativo de 4 barras a serem utilizadas para alimentar o processo de EE pode ser realizada a partir de resultados obtidos com a solução do FP. Neste caso, foi utilizado um algoritmo para solução do FP exato, realizado através do método de Newton-Raphson Tradicional. Os valores obtidos para as magnitudes e ângulos das tensões, assim como as injeções de potência ativa e reativa, são apresentados na Tabela 6, e os fluxos de potência ativo e reativo em cada uma das linhas são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6 - Medidas elétricas por barra para sistema T&D ilustrativo de 4 barras

Barra	$V_k(pu)$	θ_k(graus)	P_k(MW)	Q_k(MVAr)
1	1,000000	0,000000	13,382608	3,899227
2	0,985908	-2,230400	-12,000000	-3,000000
3	0,985901	-2,232051	0,000000	0,000000
4	0,887975	-2,006682	-1,200000	-0,300000

Tabela 7 - Medidas elétricas por linha para sistema T&D ilustrativo de 4 barras

De	Para	P_{km}(MW)	Q_{km} (MVAr)	P_{mk}(MW)	Q_{mk}(MVAr)
1	2	13,382608	3,899227	-13,333636	-3,327882
2	3	1,333636	0,327882	-1,333636	-0,327841
3	4	1,333636	0,327841	-1,200000	-0,300000

Foram consideradas todas as medidas tradicionais da EE para compor o plano de medição, sendo estas o fluxo de potência ativo e reativo em cada uma das linhas, tanto no sentido $k - m$ quanto no sentido $m - k$, as injeções de potência ativa e reativa em todas as barras do sistema, assim como a magnitude de tensão de cada uma das barras.

Além disso, a potência de base para o ST (S_{base}^{ST}) foi considerada com magnitude igual a 100 MVA e o ângulo de base (ϕ_{base}^{ST}) igual a zero graus, ou seja, S_{base}^{ST} = 100∠0° MVA, enquanto para o SD foi considerada magnitude de potência de base (S_{base}^{SD}) igual a 1 MVA e ângulo de base (ϕ_{base}^{SD}) variável entre 0° e 90°, ou seja, S_{base}^{SD} = 1∠ ϕ_{base}^{SD} MVA com 0° ≤ ϕ_{base}^{SD} ≤ 90°.

Os algoritmos testados foram o Estimador de Estados Completo (EE-Completo), o Estimador de Estados Desacoplado no Algoritmo (EE-Algoritmo) e o Estimador de Estados Desacoplado no Modelo (EE-Modelo), considerando uma tolerância de 10^{-6} em todos.

Com a utilização das medidas perfeitas no processo de EE, todos os algoritmos avaliados apresentaram estados estimados exatamente iguais aos valores provenientes do problema de FP até a precisão escolhida, mesmo com as distintas magnitudes de potência de base para o ST e SD, assim como para a variação do ângulo de base da normalização complexa aplicada ao SD, validando assim a metodologia proposta de EEDR-T&D, que corresponde à utilização de distintas potências base para o ST e para o SD.

Quanto à convergência dos distintos métodos, o EE-Completo convergiu em 7 iterações completas e a variação de ϕ_{base}^{SD} não alterou este valor, lembrando que cada iteração possui um elevado custo computacional quando comparado aos métodos desacoplados. Já para os estimadores de estado desacoplados, a variação do ângulo de base do SD alterou significativamente o número de iterações necessárias para convergência.

As convergências para o método desacoplado EE-Algoritmo são apresentadas nas Figura 20 e Figura 21, conforme variações BX e XB, respectivamente.

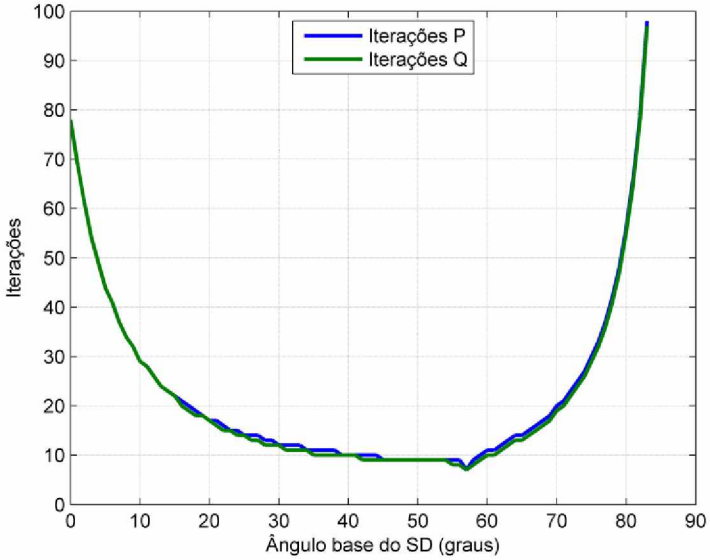


Figura 20 - EE-Algoritmo BX com medidas perfeitas - Convergência

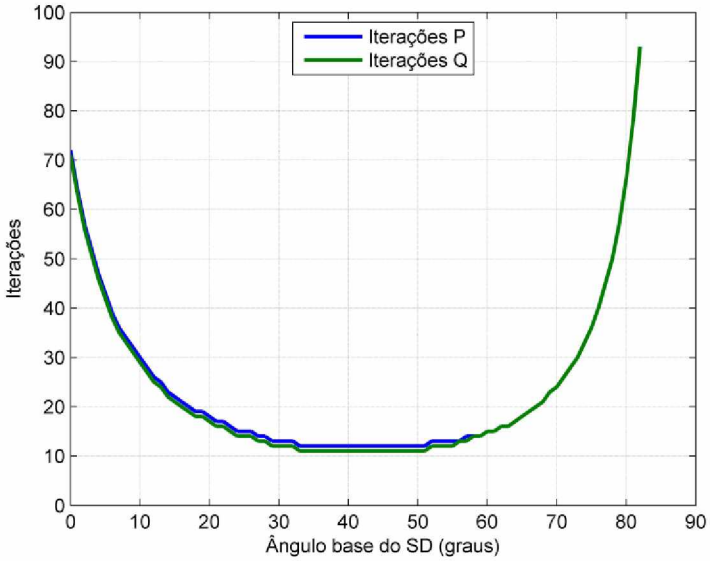


Figura 21 - EE-Algoritmo XB com medidas perfeitas - Convergência

O EE-Algoritmo teve o número de iterações necessárias para convergência reduzido de forma expressiva com a variação do ângulo de base, como mostrado na Tabela 8. Com ângulo de base igual a zero foram utilizadas 78 iterações ativas e reativas para a variação BX e foram utilizadas 73 e 72 iterações reativas para a variação XB. Contudo, o menor número necessário de iterações ocorreu quando ϕ_{base}^{SD} = 57˚ para a variação BX, utilizando 7 iterações ativas e reativas, e quando 33˚ ≤ ϕ_{base}^{SD} ≤ 51˚ para a variação XB, utilizando 12 e 11 iterações ativas e reativas, respectivamente, indicando uma redução drástica na faixa mais efetiva de ângulos base.

Tabela 8 - EE-Algoritmo com medidas perfeitas - Convergência

EE-Algoritmo								
Variação	**Versão BX**				**Versão XB**			
ϕ_{base}^{SD}	0°		57°		0°		33°— 51°	
Nº de iterações (i_P-i_Q)	78	78	7	7	73	72	12	11

As convergências para o método desacoplado EE-Modelo são apresentadas nas Figura 22 e Figura 23, também conforme variações BX e XB, respectivamente.

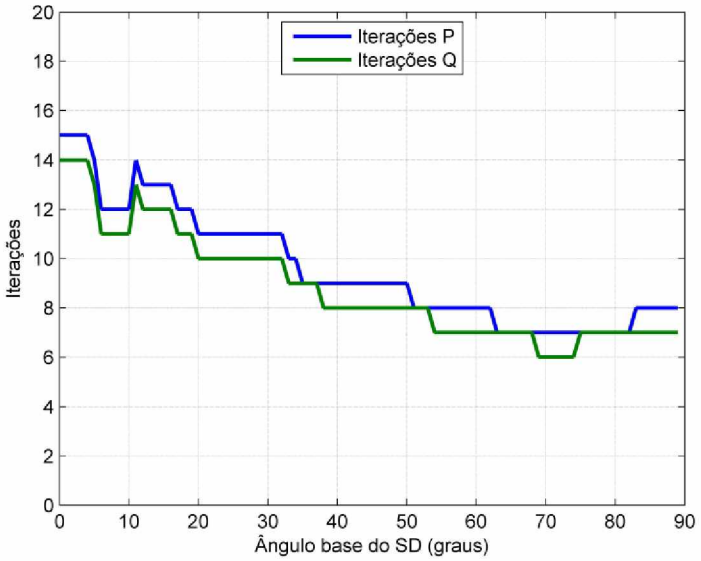


Figura 22 - EE-Modelo BX com medidas perfeitas - Convergência

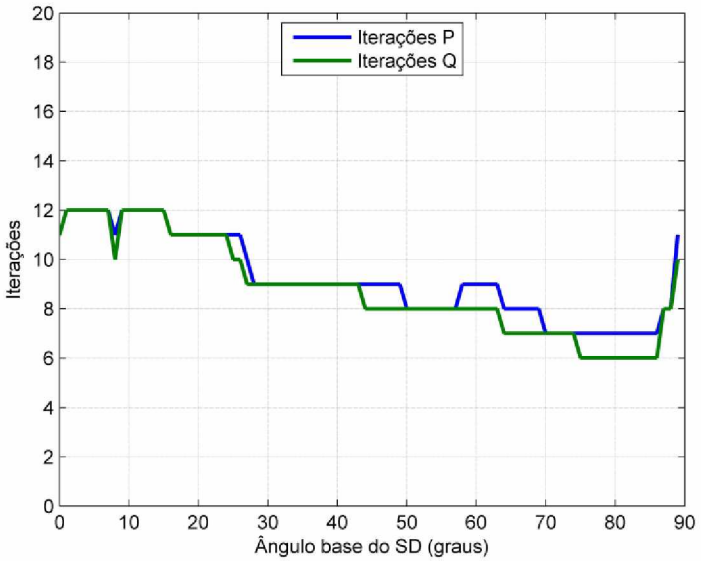


Figura 23 - EE-Modelo XB com medidas perfeitas - Convergência.

O EE-Modelo, por sua vez, apresentou variações menos drásticas conforme a variação do ângulo de base, mas ainda bastante significantes, como mostra a Tabela 9. A sua variação BX convergiu utilizando 15 e 14 iterações ativas e reativas, respectivamente, quando $\phi_{base}^{SD} = 0^{\circ}$, e teve esse número reduzido a 7 e 6 iterações ativas e reativas, respectivamente, quando $69^{\circ} \leq \phi_{base}^{SD} \leq 74^{\circ}$. Já a variação XB reduziu o número de iterações ativas e reativas necessárias de 11 iterações, quando $\phi_{base}^{SD} = 0^{\circ}$, para 7 e 6 iterações ativas e reativas, respectivamente, para $75^{\circ} \leq \phi_{base}^{SD} \leq 86^{\circ}$.

Tabela 9 - EE-Modelo com medidas perfeitas - Convergência

EE-Modelo								
Variação	**Versão BX**				**Versão XB**			
ϕ_{base}^{SD}	0°		69°— 74°		0°		75°— 86°	
Nº de iterações (i_P-i_Q)	15	14	7	6	11	11	7	6

5.3.1.2 Utilizando medidas imperfeitas

Após a análise da convergência dos distintos métodos conforme a variação do ângulo de base do SD, os algoritmos também foram avaliados quando são utilizadas medidas imperfeitas, ou seja, às medidas apresentadas pelas Tabela 6 e Tabela 7 foram adicionados pequenos erros que simulam a precisão e desvio padrão apresentados pelos distintos medidores. As medidas utilizadas para alimentar o processo de EE são apresentadas nas Tabela 10 e Tabela 11. Os erros adicionados a estas medidas segue a metodologia apresentada em Coelho et al. (2016).

Tabela 10 - Medidas elétricas por barra para sistema T&D ilustrativo de 4 barras - Com erros

Barra	V_k**(*pu*)**	P_k**(MW)**	Q_k**(MVAr)**
1	1,0042	13,3972	3,7799
2	0,9846	-11,8733	-2,9786
3	0,9809	0	0
4	0,8853	-1,1965	-0,2968

Tabela 11 - Medidas elétricas por linha para sistema T&D ilustrativo de 4 barras - Com erros

De	**Para**	P_{km}**(MW)**	Q_{km}**(MVAr)**	P_{mk}**(MW)**	Q_{mk}**(MVAr)**
1	2	13,6363	3,6865	-13,4187	-3,2083
2	3	1,3131	0,3419	-1,3321	-0,3212
3	4	1,3234	0,3193	-1,2248	-0,3238

As seguintes métricas de erro absoluto máximo (ε^{max}), erro absoluto médio ($\bar{\varepsilon}$) e desvio padrão (σ) foram usadas para avaliar os resultados obtidos:

$$\varepsilon^{max} = max|\bar{x}_k - x_k| \tag{5.20}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n_b}\sum_{k=1}^{n_b}\varepsilon \tag{5.21}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_b}|\varepsilon_k - \bar{\varepsilon}|^2}{n_b - 1}} \tag{5.22}$$

onde n_b representa o número de barras do sistema.

O EE-Completo convergiu em 6 iterações completas e a variação de ϕ_{base}^{SD} não alterou este valor. Independentemente do valor do ângulo de base utilizado, os valores obtidos para erro absoluto máximo, erro médio e desvio padrão permaneceram os mesmos. Os erros máximos absolutos para ângulo e magnitude de tensão foram de $3{,}48\cdot10^{-5}$ e $1{,}20\cdot10^{-3}$, respectivamente, os erros absolutos médios foram de $2{,}26\cdot10^{-5}$ e $3{,}81\cdot10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e os desvios padrão foram de $1{,}64\cdot10^{-5}$ e $5{,}46\cdot10^{-5}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente.

O EE-Algoritmo teve o número de iterações necessárias para convergência reduzido significativamente com a variação do ângulo de base, apresentando comportamento muito similar à simulação sem erros nas medidas. A Figura 24 e a Figura 25 apresentam a variação no número de iterações para convergência. Ressalta-se aqui um ponto positivo da *cpu*, como também pode-se constatar nas simulações anteriores com medidas perfeitas e nas próximas simulações que seguem esse documento, que há uma faixa de valores de ângulo de base em que os resultados são efetivos e não um único valor de ângulo de base.

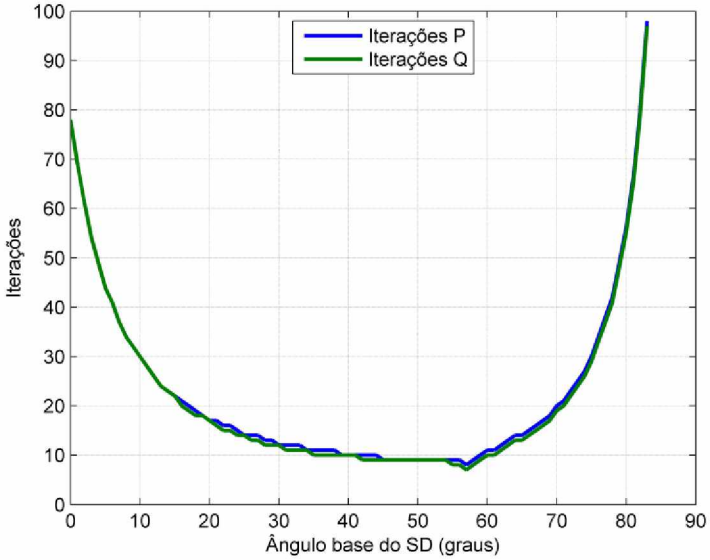


Figura 24 - EE-Algoritmo BX com medidas imperfeitas - Convergência

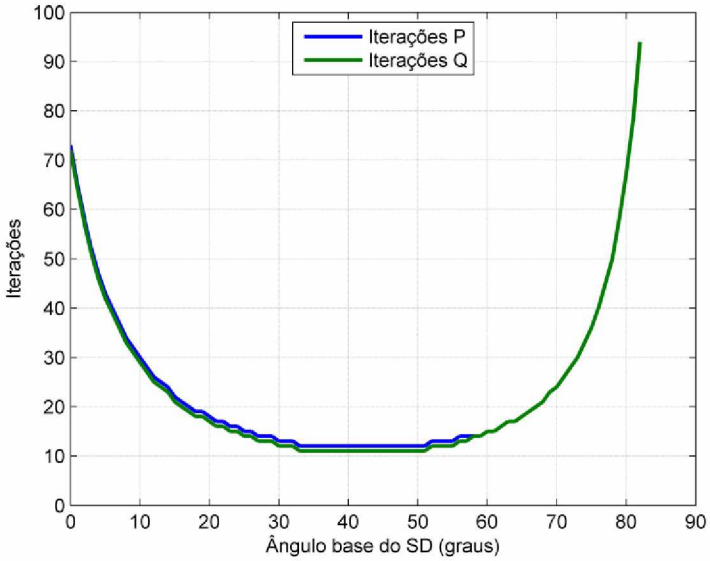


Figura 25 - EE-Algoritmo XB com medidas imperfeitas - Convergência

Os valores obtidos para erro absoluto máximo, erro absoluto médio e desvio padrão apresentaram variações pouco significativas. Para a variação desacoplada BX, os valores médios para os erros máximos absolutos do ângulo e magnitude de tensão foram de $2{,}58 \cdot 10^{-4}$ e $1{,}78 \cdot 10^{-3}$, respectivamente, a média dos erros absolutos médios foram de $7{,}48 \cdot 10^{-5}$ e $1{,}29 \cdot 10^{-3}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e a média dos desvios padrão foram de $1{,}22 \cdot 10^{-4}$ e $7{,}53 \cdot 10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente. Já para a variação desacoplada XB, os valores médios para os erros máximos absolutos do ângulo e magnitude de tensão foram de $3{,}56 \cdot 10^{-4}$ e $1{,}77 \cdot 10^{-3}$, respectivamente, a média dos erros absolutos médios foram de 9,84·10−5 e $1{,}30 \cdot 10^{-3}$ para

ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e a média dos desvios padrão foram de $1{,}72 \cdot 10^{-4}$ e $7{,}32 \cdot 10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente.

Já o EE-Modelo teve novamente o número de iterações necessárias para convergência reduzido para praticamente a metade na faixa mais efetiva da variação do ângulo de base, também apresentando comportamento similar à simulação sem erros nas medidas. As Figura 26 e Figura 27 apresentam a variação no número de iterações para convergência.

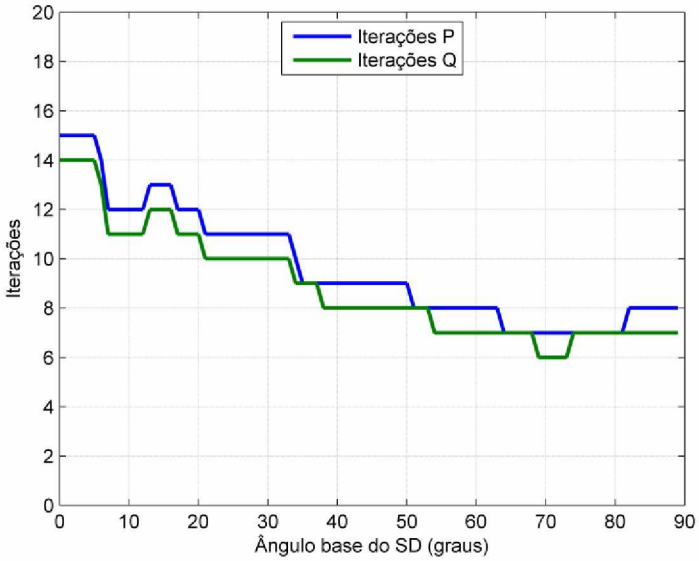


Figura 26 - EE-Modelo BX com medidas imperfeitas - Convergência

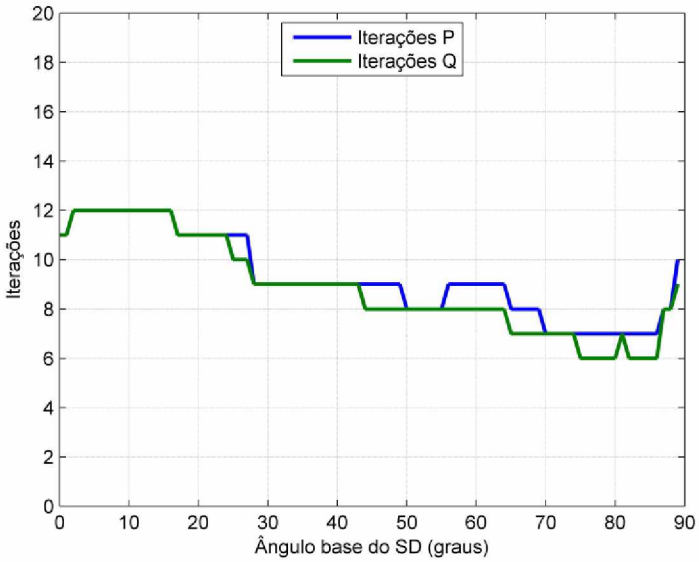


Figura 27 - EE-Modelo XB com medidas imperfeitas - Convergência

Assim como no método EE-Algoritmo, os valores obtidos para erro absoluto máximo, erro absoluto médio e desvio padrão para o método desacoplado no modelo apresentaram variações pouco significativas conforme o valor do ângulo de base da distribuição. Para a variação desacoplada BX, os valores médios para os erros máximos absolutos do ângulo e magnitude de tensão foram de $1{,}13{\cdot}10^{-4}$ e $1{,}84{\cdot}10^{-3}$, respectivamente, a média dos erros absolutos médios foram de $4{,}92{\cdot}10^{-5}$ e $1{,}31{\cdot}10^{-3}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e a média dos desvios padrão foram de $4{,}94{\cdot}10^{-5}$ e $7{,}33{\cdot}10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente. Já para a variação desacoplada XB, os valores médios para os erros máximos absolutos do ângulo e magnitude de tensão foram de $1{,}43{\cdot}10^{-4}$ e $1{,}83{\cdot}10^{-3}$, respectivamente, a média dos erros absolutos médios foram de $5{,}84{\cdot}10^{-5}$ e $1{,}31{\cdot}10^{-3}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e a média dos desvios padrão foram de $6{,}04{\cdot}10^{-5}$ e $7{,}30{\cdot}10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente.

5.3.2 Aplicação do EEDR-T&D em sistema de grande porte: Avaliação do desempenho

Visando avaliar o EEDR-T&D proposto com um sistema T&D interconectado de maior porte, foram unidos o ST IEEE 14 barras (ICSEG, 2013a) com dois SDs 69 barras, apresentados por Baran e Wu (1989). Os dois SDs de 69 barras foram conectados às barras 5 e 11 do ST, conforme esquema ilustrativo na Figura 28.

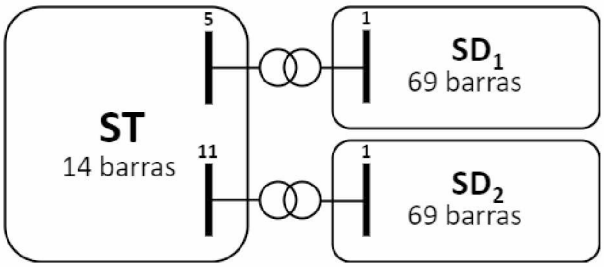


Figura 28 - Sistema-teste T&D de grande porte

Da mesma forma que o cenário anterior, os valores das medidas utilizadas (fluxo de potência ativo e reativo nos dois sentidos em todas as linhas, injeção de potência ativa e reativa e magnitude de tensão em todas as barras do sistema) são provenientes da solução do sistema pelo cálculo de FP exato e, aos valores provenientes desse, foram adicionados erros aleatórios às medidas reais, conforme adotado em Coelho et al. (2016).

Neste cenário de testes foram avaliados os métodos EE-Completo, EE-Algoritmo e EE-Modelo considerando a variação do ângulo de base da normalização complexa dos SDs $0^{\circ} \leq \phi_{base}^{SD} \leq 90^{\circ}$. Para o

ST o ângulo de base foi igual a zero. A magnitude da potência de base do ST é igual a 100 MVA enquanto a dos SDs é igual a 1 MVA.

O EE-Completo convergiu em 6 iterações completas e a variação de ϕ_{base}^{SD} não provocou alterações. O ângulo de base também não alterou os valores obtidos para erro absoluto máximo, erro médio e desvio padrão.

Os erros máximos absolutos para ângulo e magnitude de tensão foram de $5{,}08 \cdot 10^{-4}$ e $2{,}43 \cdot 10^{-3}$, respectivamente, os erros absolutos médios foram de $2{,}98 \cdot 10^{-4}$ e $6{,}62 \cdot 10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e os desvios padrão foram de $1{,}35 \cdot 10^{-4}$ e $5{,}39 \cdot 10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente.

O EE-Algoritmo teve o número de iterações necessárias para convergência reduzido com a variação do ângulo de base, as Figura 29 e Figura 30 apresentam a variação no número de iterações para convergência conforme as versões BX e XB, respectivamente.

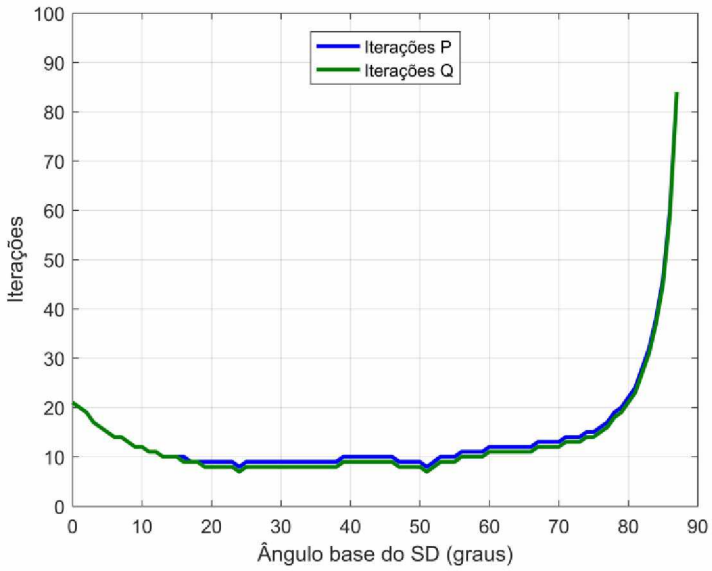


Figura 29 - EE-Algoritmo BX com medidas imperfeitas - Convergência

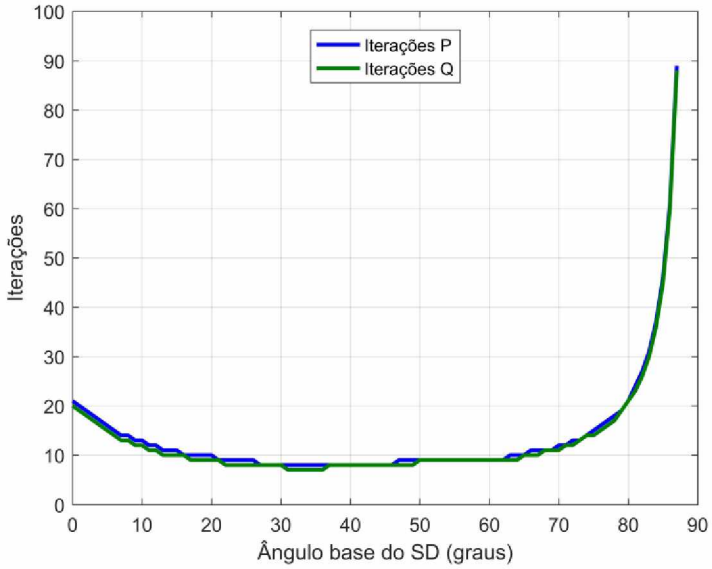


Figura 30 - EE-Algoritmo XB com medidas imperfeitas - Convergência

Ambas as versões apresentaram comportamento similar, como mostrado na Tabela 12. A convergência dos métodos se iniciou com 21 iterações ativas e reativas para a versão BX e com 21 iterações ativas e 20 reativas para a versão XB quando o $\phi_{base}^{SD} = 0^{\circ}$. O número de iterações atingiu seu mínimo para ambas as versões com 8 e 7 iterações ativas e reativas, respectivamente. Para a versão BX isto ocorreu com $\phi_{base}^{SD} = 51^{\circ}$ e para a versão XB quando $31^{\circ} \leq \phi_{base}^{SD} \leq 36^{\circ}$.

Tabela 12 - EE-Algoritmo com medidas imperfeitas - Convergência

EE-Algoritmo								
Variação	**Versão BX**				**Versão XB**			
ϕ_{base}^{SD}	0°		51°		0°		31°— 36°	
Nº de iterações (i_P-i_Q)	21	21	8	7	21	20	8	7

Já os valores obtidos para erro absoluto máximo, erro absoluto médio e desvio padrão apresentaram variações pouco significativas conforme a variação de ϕ_{base}^{SD}. Para a variação desacoplada BX, os valores médios para os erros máximos absolutos do ângulo e magnitude de tensão foram de $6{,}36 \cdot 10^{-4}$ e $2{,}28 \cdot 10^{-3}$, respectivamente, a média dos erros absolutos médios foram de $3{,}52 \cdot 10^{-3}$ e $5{,}08 \cdot 10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e a média dos desvios padrão foram de $1{,}78 \cdot 10^{-4}$ e $4{,}30 \cdot 10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente. Já para a variação desacoplada XB, os valores médios para os erros máximos absolutos do ângulo e magnitude de tensão foram de $6{,}81 \cdot 10^{-4}$ e $2{,}37 \cdot 10^{-3}$, respectivamente, a média dos erros absolutos médios foram de $3{,}89 \cdot 10^{-3}$ e $5{,}09 \cdot 10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e a média dos desvios padrão foram de $1{,}60 \cdot 10^{-4}$ e $4{,}36 \cdot 10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente.

Para o EE-Modelo, ao contrário do sistema-teste ilustrativo de 4 barras, a utilização da normalização complexa nos SDs foi essencial para permitir a convergência do método em ambas as suas versões, pois o método só passou a obter convergência quando foi utilizada a *cpu* com o ângulo de base dentro de uma certa faixa de abrangência, conforme pode ser observado nas Figura 31 e Figura 32.

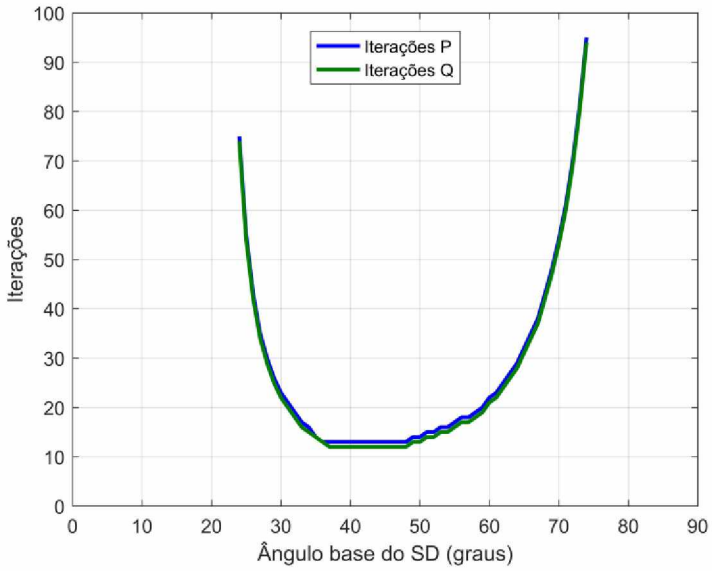


Figura 31 - EE-Modelo BX - Com erro - Convergência

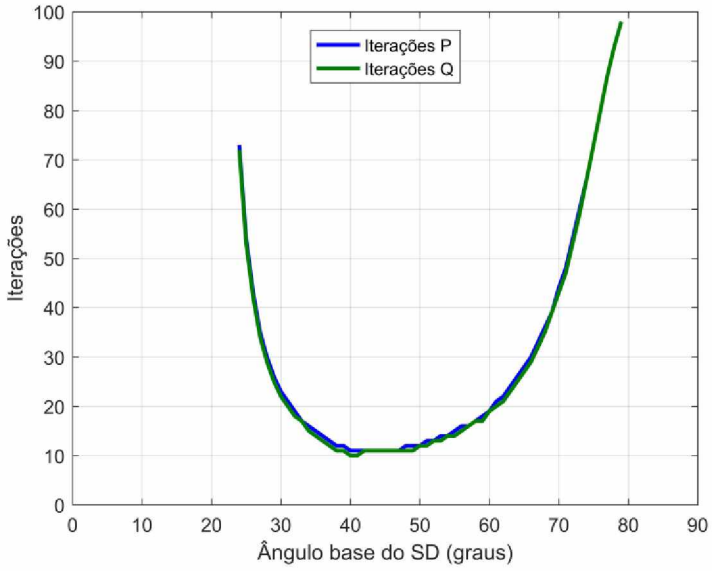


Figura 32 - EE-Modelo XB - Com erro - Convergência

O método passou a convergir a partir de $\phi_{base}^{SD} \geq 24^{\circ}$, sendo que a versão BX deixou de convergir quando $\phi_{base}^{SD} \geq 75^{\circ}$ e a versão XB quando $\phi_{base}^{SD} \geq 80^{\circ}$. Quanto ao mínimo, a versão BX atingiu o menor número de iterações ativa e reativa igual a 13 e 12, respectivamente, quando $37^{\circ} \leq \phi_{base}^{SD} \leq$

48˚, já a versão XB foi com 11 e 10 iterações ativa e reativa, respectivamente, quando 40˚ ≤ ϕ_{base}^{SD} ≤ 41˚.

Tabela 13 - EE-Modelo com medidas imperfeitas - Convergência

EE-Modelo								
Variação	**Versão BX**				**Versão XB**			
ϕ_{base}^{SD}	0˚		37˚— 48˚		0˚		40˚— 41˚	
Nº de iterações (i_P-i_Q)	NC	NC	13	12	NC	NC	11	10

NC - Não convergência

Assim como no EE-Algoritmo, os valores obtidos para erro absoluto máximo, erro absoluto médio e desvio padrão para o método desacoplado no modelo apresentaram variações pouco significativas conforme o valor do ângulo de base da distribuição. Para a variação desacoplada BX, os valores médios para os erros máximos absolutos do ângulo e magnitude de tensão foram de $1{,}06{\cdot}10^{-3}$ e $2{,}18{\cdot}10^{-3}$, respectivamente, a média dos erros absolutos médios foram de $5{,}84{\cdot}10^{-4}$ e $5{,}09{\cdot}10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e a média dos desvios padrão foram de $1{,}42{\cdot}10^{-4}$ e $4{,}24{\cdot}10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente. Já para a variação desacoplada XB, os valores médios para os erros máximos absolutos do ângulo e magnitude de tensão foram de $1{,}14{\cdot}10^{-3}$ e $2{,}28{\cdot}10^{-3}$, respectivamente, a média dos erros absolutos médios foram de $6{,}00{\cdot}10^{-4}$ e $5{,}12{\cdot}10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente, e a média dos desvios padrão foram de $1{,}40{\cdot}10^{-4}$ e $4{,}29{\cdot}10^{-4}$ para ângulo e magnitude de tensão, respectivamente.

A faixa de ângulos de base efetivos, apesar de mais estreita para o método desacoplado no modelo, não está restrita a um único valor, o que pode ser visto como um ponto positivo, já que não fragiliza a utilização do método por uma pequena diferença na definição do ângulo de base.

5.3.3 Aplicação do EEDR-T&D em sistema de grande porte: Avaliação de diferentes condições operacionais

Essa seção apresenta novos resultados que tem agora por objetivo avaliar o desempenho da ferramenta proposta frente a diferentes condições de operação, que envolvem desde operações radial e malhada até diferentes níveis de inserção de GDs, conforme descrito a seguir.

Para as simulações foram utilizados o ST IEEE 30 barras (ICSEG, 2013b) conectado a dois SDs IEEE 69 barras Baran e Wu (1989). A apresentação das simulações e dos resultados está dividida em quatro casos, A, B, C e D. O caso A considera uma topologia totalmente radial para os SDs e não há

inserção de GD. No caso B a topologia dos SDs continua sendo radial, porém há presença de GD nos SDs. No caso C, além da presença das GDs, a topologia passa a ter um anel fechado entre os SDs. Por fim, o caso D conta com as GDs e três malhas fechadas entre os SDs.

Assim como na seção anterior, os valores das medidas utilizadas vêm da solução do sistema pelo cálculo de FP exato e a esses valores (medidas perfeitas) foram adicionados erros aleatórios, conforme adotado em Coelho et al. (2016).

Foi avaliado o método EE-modelo, tendo em vista sua precisão considerável, demonstrada na seção anterior, aliada à sua alta eficácia computacional, discutida nos capítulos precedentes.

5.3.3.1 Caso A (base): SDs sem GD e com topologia radial

O caso A, definido como caso base, mostra os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta de EEDR-T&D para a condição de operação básica, isto é, sem a participação de GDs nos SDs e considerando a topologia dos SDs totalmente radial, sem malha fechada entre eles, como mostra a Figura 33.

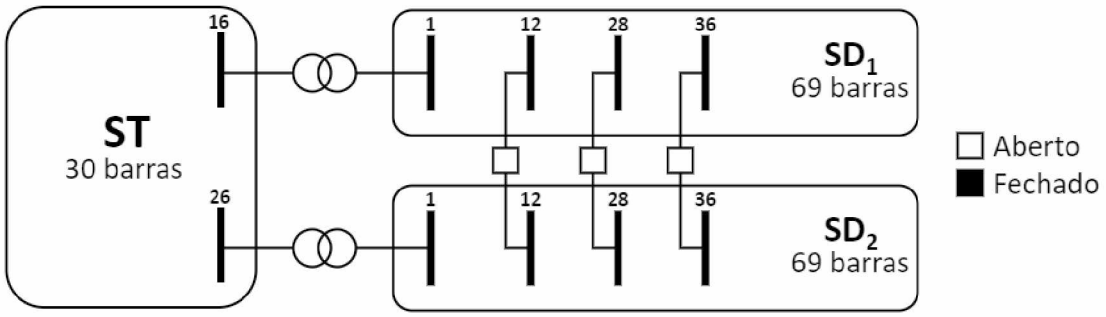


Figura 33 - Caso A (base): SDs sem GD e com topologia radial

Para o EE-modelo a utilização da normalização complexa nos SDs foi crucial para garantir a convergência do EEDR-T&D, conforme apresentado na Tabela 14. Observa-se que o EEDR-T&D passou a convergir quando $30^{\circ} \leq \phi_{base}^{SD} \leq 60^{\circ}$ para ambas as versões BX e XB. O melhor resultado foi obtido quando $\phi_{base}^{SD} = 50^{\circ}$ para a versão BX com 4 iterações ativas e 3 reativas e quando $40^{\circ} \leq \phi_{base}^{SD} \leq 50^{\circ}$ para a versão XB apresentando 4 iterações ativas e 4 reativas em toda essa faixa de ângulos de base.

Tabela 14 - Caso A: Convergência do EEDR-T&D em diferentes versões com o uso da *cpu*

Nº de iterações					
Versão BX			Versão XB		
Ângulo	Ativa	Reativa	Ângulo	Ativa	Reativa
0°	NC	NC	0°	NC	NC
10°	NC	NC	10°	NC	NC
20°	NC	NC	20°	NC	NC
30°	8	7	30°	8	7
40°	4	4	40°	4	4
50°	4	3	50°	4	4
60°	8	7	60°	7	7
70°	NC	NC	70°	NC	NC
80°	NC	NC	80°	NC	NC
90°	NC	NC	90°	NC	NC

NC - Não convergência

A Figura 34 mostra os fluxos de potência ativa nos transformadores de fronteiras do sistema T&D em análise. Verifica-se que o fluxo de potência segue seu curso tradicional, do ST para o SD, como é de se esperar de uma condição operacional que não há GDs nos SDs.

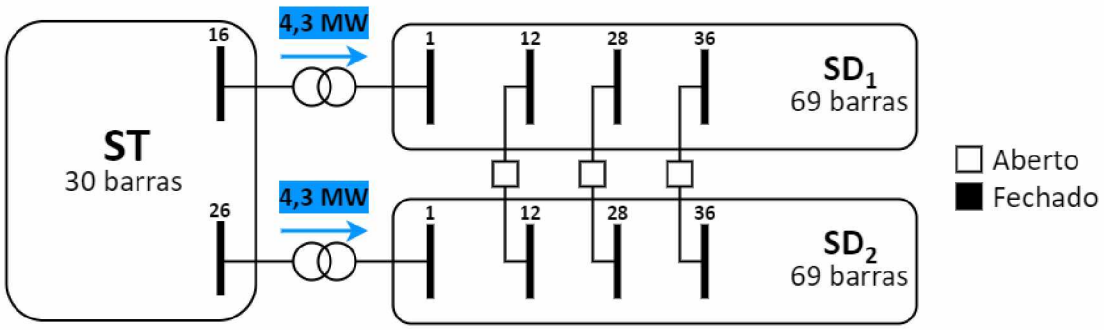


Figura 34 - Caso A (base): Fluxo de potência na fronteira T&D

5.3.3.2 Caso B: SDs com inserção de GDs e com topologia radial

O caso B considera a participação de GD nos SDs, porém ainda considerando operação radial para ambos os SDs. Às barras pares do SD_1 foram inseridas GDs com potência ativa injetada de 60 kW com fator de potência unitário, isso representa aproximadamente 50% do valor da carga total do SD_1. Já às barras pares do SD_2 foram inseridas GDs de 170 kW com fator de potência unitário, representando cerca de 150% do valor da sua carga total. A Figura 35 ilustra essa condição de operação do sistema T&D.

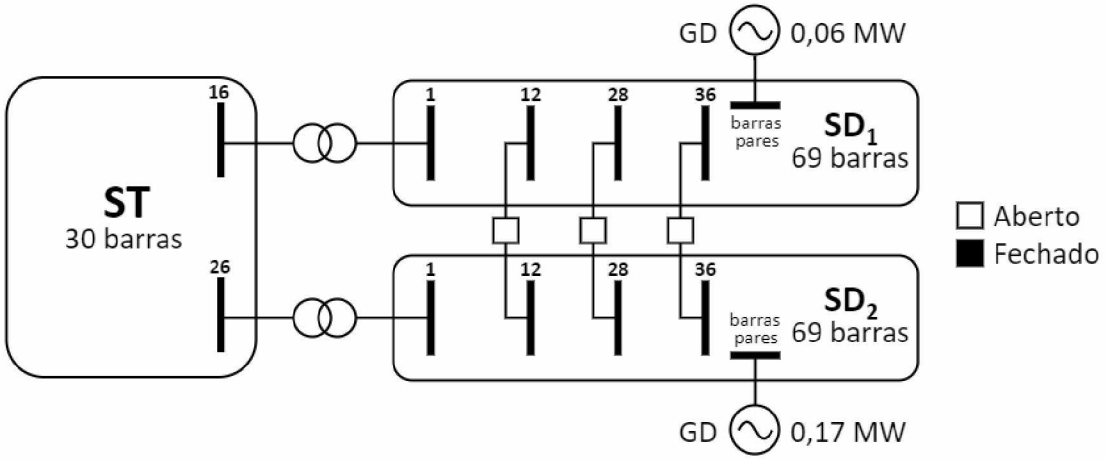


Figura 35 - Caso B: SDs com inserção de GDs e com topologia radial

Neste caso, observa-se na Tabela 15 que o método também passou a convergir quando 30° ≤ ϕ_{base}^{SD} ≤ 60° para ambas as versões BX e XB. O melhor resultado foi obtido quando ϕ_{base}^{SD} = 50° para a versão BX com 5 iterações ativas e 4 reativas e, também, quando ϕ_{base}^{SD} = 50° para a versão XB, porém apresentando 4 iterações ativas e 4 reativas.

Tabela 15 - Caso B: Convergência do EEDR-T&D em diferentes versões com o uso da *cpu*

Nº de iterações					
Versão BX			**Versão XB**		
Ângulo	**Ativa**	**Reativa**	**Ângulo**	**Ativa**	**Reativa**
0°	NC	NC	0°	NC	NC
10°	NC	NC	10°	NC	NC
20°	NC	NC	20°	NC	NC
30°	55	54	30°	54	53
40°	7	8	40°	7	6
50°	5	4	50°	4	4
60°	9	8	60°	8	7
70°	NC	NC	70°	NC	NC
80°	NC	NC	80°	NC	NC
90°	NC	NC	90°	NC	NC

NC - Não convergência

A Figura 36 mostra os fluxos de potência ativa nos transformadores de fronteiras do sistema T&D em análise. Verifica-se que o fluxo de potência na fronteira do SD_1 do sistema T&D segue seu curso tradicional, do ST para o SD. Contudo, o sentido fluxo da fronteira do SD_2 é impactado pela GD inserida, fazendo com que parte da geração produzida no SD_2 seja enviada ao ST.

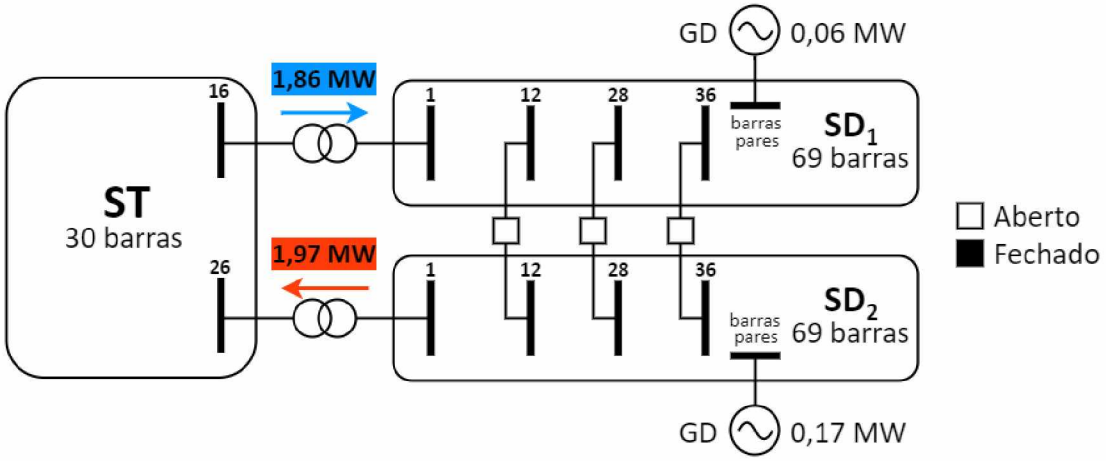


Figura 36 - Caso B: Fluxo de potência na fronteira T&D

5.3.3.3 Caso C: SDs com inserção de GDs e com uma malha fechada entre eles

O caso C consiste, também, na inserção de GD às barras pares dos SDs com as mesmas representações de potência ativa injetada que o caso B, isto é cerca de 50% do valor da carga total do SD_1 e cerca de 150% do valor da carga total do SD_2. Para este caso, entretanto, explora-se a condição operacional de anel fechado, uma malha é fechada entre os SDs, como pode ser visto na Figura 37.

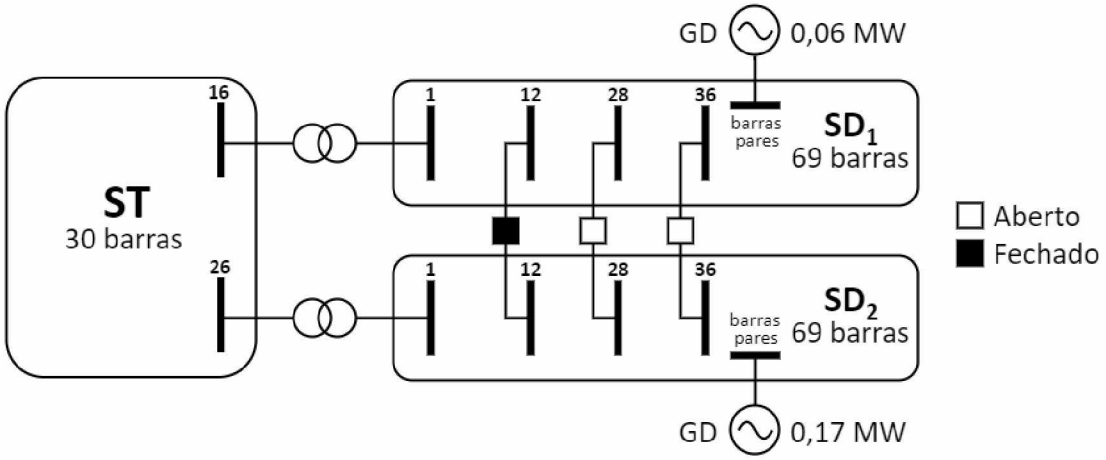


Figura 37 - Caso C: SDs com inserção de GDs e com uma malha fechada entre eles

Neste caso, observa-se na Tabela 16 que o método passou a convergir para a mesma faixa que os casos anteriores, quando $30^{\circ} \leq \phi_{base}^{SD} \leq 60^{\circ}$, para ambas as versões BX e XB. O melhor resultado obtido foi quando $\phi_{base}^{SD} = 50^{\circ}$ para ambas as versões BX e XB com 4 iterações ativas e 3 reativas.

Tabela 16 - Caso C: Convergência do EEDR-T&D em diferentes versões com o uso da *cpu*

Nº de iterações					
Versão BX			Versão XB		
Ângulo	Ativa	Reativa	Ângulo	Ativa	Reativa
0°	NC	NC	0°	NC	NC
10°	NC	NC	10°	NC	NC
20°	NC	NC	20°	NC	NC
30°	21	21	30°	21	20
40°	6	5	40°	6	5
50°	4	3	50°	4	3
60°	8	7	60°	7	6
70°	NC	NC	70°	NC	NC
80°	NC	NC	80°	NC	NC
90°	NC	NC	90°	NC	NC

NC - Não convergência

Nota-se que o fluxo de potência na fronteira do SD_1 do sistema T&D segue seu curso tradicional, do ST para o SD. Contudo, o sentido fluxo da fronteira do SD_2 é impactado pela GD inserida, fazendo com que parte da geração produzida no SD_2 seja enviado ao ST. Outra parcela da geração produzida no SD_2 é destinada ao SD_1, fechando assim o balanço de potência na malha fechada, como observa-se na Figura 38.

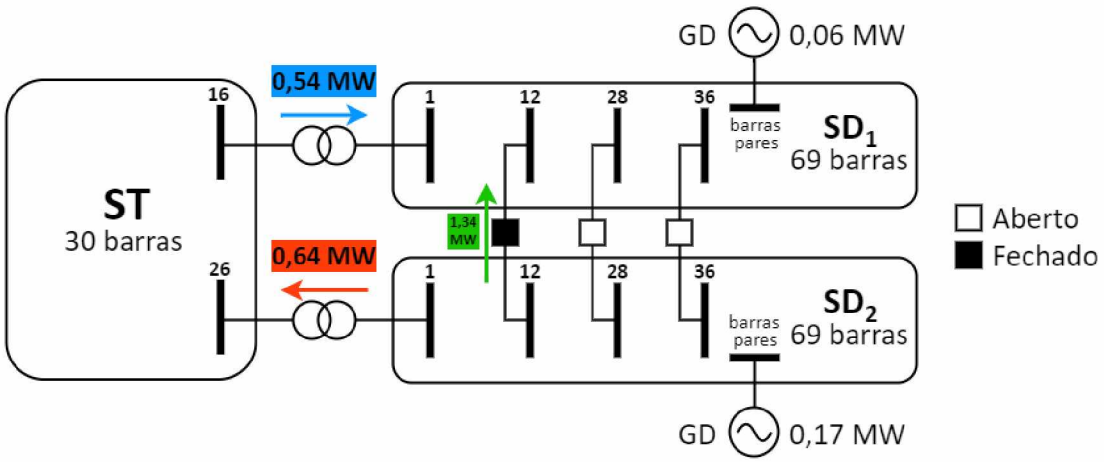


Figura 38 - Caso C: Fluxo de potência na fronteira T&D

5.3.3.4 Caso D: SDs com inserção de GDs e com três malhas fechadas entre eles

O caso D segue as mesmas premissas do caso C, isto é, inserção de GD às barras pares dos SDs com as mesmas representações de potência ativa injetada. No entanto, ao invés de apenas uma malha fechadas são consideradas três malhas fechadas entre os SDs. Esta condição operacional do T&D está representada na Figura 39.

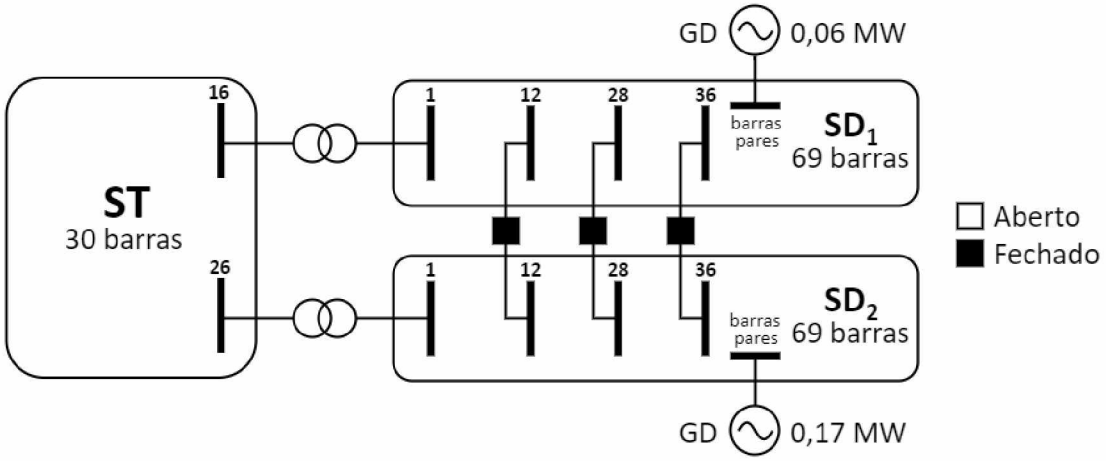


Figura 39 - Caso D: SDs com inserção de GDs e com três malhas fechadas entre eles

Neste caso, observa-se na Tabela 17 que o método passou a convergir para a mesma faixa que os caso anteriores, quando $30^{\circ} \leq \phi_{base}^{SD} \leq 60^{\circ}$, para ambas as versões BX e XB. O melhor resultado obtido foi quando $\phi_{base}^{SD} = 50^{\circ}$ para ambas as versões BX e XB com 4 iterações ativas e 3 reativas.

Tabela 17 - Caso D: Convergência do EEDR-T&D em diferentes versões com o uso da *cpu*

Nº de iterações					
Versão BX			**Versão XB**		
Ângulo	**Ativa**	**Reativa**	**Ângulo**	**Ativa**	**Reativa**
0°	NC	NC	0°	NC	NC
10°	NC	NC	10°	NC	NC
20°	NC	NC	20°	NC	NC
30°	19	18	30°	19	18
40°	6	5	40°	6	5
50°	4	3	50°	4	3
60°	7	6	60°	7	6
70°	NC	NC	70°	NC	NC
80°	NC	NC	80°	NC	NC
90°	NC	NC	90°	NC	NC

NC - Não convergência

O fluxo da fronteira do SD_2 com o ST voltou a ter sentido convencional, do ST para o SD. A GD do SD_2, que no caso anterior estava contribuindo tanto para o ST como para o SD_1, agora está impactando apenas o SD_1. O fluxo de potência na fronteira do SD_1 com o T&D, que nos casos anteriores manteve-se no sentido tradicional, neste cenário inverteu seu sentido configurando um fluxo reverso, como ilustra a Figura 40.

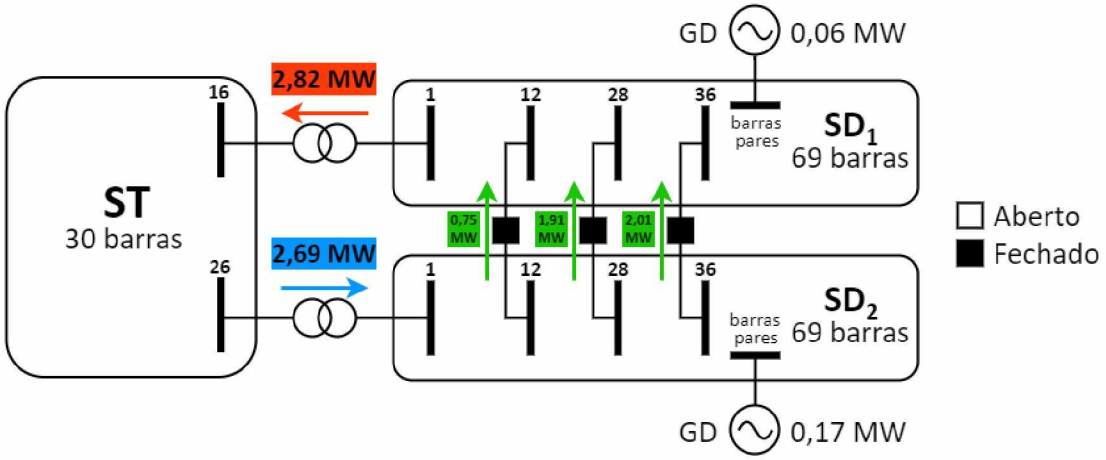


Figura 40 - Caso D: Fluxo de potência na fronteira T&D

5.4 Considerações Finais

Este trabalho desenvolve um Estimador de Estados baseado no método Desacoplado Rápido com capacidade para análise integrada redes integradas de T&D. A metodologia explora uma aplicação diferenciada da normalização complexa por unidade, gerando um novo modelo em tempo real para a rede elétrica. Este modelo permite que as premissas adotadas no método de estimador de estados desacoplado convencional, possam ser aplicados de forma efetiva às redes de T&D, sem necessidade de recorrer a técnicas de compensação nas barras de fronteira, representando um ganho significativo com relação à proposta apresentada para a solução do FPDR-T&D.

Essa nova abordagem acaba com o desequilíbrio nas injeções de potência nas barras de fronteira, descartando a necessidade de compensações fictícias. Dessa forma, se torna possível aplicar diferentes normalizações para distintas partes do SEP sem aumentar o número de variáveis do problema ou, então, alterar os métodos de Newton-Raphson e suas versões desacopladas na solução do problema de EE.

Assim, o Estimador de Estados Desacoplado Rápido para redes interligadas T&D proposto viabiliza uma avaliação precisa, em tempo real, da interação entre os SDs, cada vez mais ativos, e os STs, quando desejado. Resultados de testes e simulações envolvendo diferentes combinações de redes interligadas T&D com sistemas de transmissão de 14 e 30 barras e sistemas de distribuição de 69 barras, além de cenários de condições operacionais distintas, demonstram que o algoritmo proposto obtém uma redução significativa no número de iterações, sem comprometer a acurácia das estimativas, além de herdar o alto desempenho computacional do método Desacoplado Rápido.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

Esta tese apresenta os resultados da pesquisa realizada ao longo do doutorado, propondo uma abordagem inovadora para a análise integrada de sistemas interligados de transmissão e distribuição, tanto em estudos de fluxo de potência como em estimação de estados. O desenvolvimento das metodologias de FP e EE T&D fundamentam-se na aplicação da normalização complexa por unidade em conjunto com o método Desacoplado Rápido. A pesquisa demonstrou que a implementação dessas técnicas não só aprimora a eficiência computacional, como também garante a precisão e a robustez necessárias para a operação em tempo real de redes interligadas T&D.

A proposta inicial, que foi ponto de partida deste trabalho, envolve um fluxo de potência desacoplado rápido capaz de lidar com sistemas de transmissão e distribuição integrados. Essa abordagem utiliza a conhecida normalização por unidade convencional *pu* para o sistema de transmissão e a normalização complexa por unidade *cpu* para os sistemas de distribuição, com o recurso de injeções de potência fictícias para equilibrar o balanço de potência na fronteira entre o sistema de transmissão e os sistemas de distribuição. Essas compensações fictícias são introduzidas para ajustar numericamente o balanço de potência na barra de fronteira que conecta os sistemas de transmissão e distribuição, sendo tratadas como novas variáveis de estado na formulação do problema do fluxo de potência. Associando o método Desacoplado Rápido à normalização complexa por unidade, minimizam-se os desafios relacionados à baixa relação X/R, frequentemente encontrados em sistemas de distribuição. Isso resulta em uma convergência mais rápida e em estimativas de estados mais precisas. Os resultados demonstraram que essa metodologia proposta para sistemas T&D leva a uma redução significativa no número de iterações em comparação ao uso da normalização *pu* para todo o sistema interligado.

Em seguida, é apresentado um estimador de estados para análise de sistemas interligados T&D. Este método também tem como base o método Desacoplado Rápido e também utiliza das normalizações complexas para os distintos sistemas da rede em questão. Contudo, esta abordagem não utiliza o recurso de compensação fictícia para equilibrar as potências na fronteira dos sistemas T&D. Para viabilizar essa abordagem, foi realizada uma reinterpretação da normalização por unidade dos dados do sistema, reconhecendo que essa normalização pode ser considerada como constantes multiplicadoras diretas das correntes injetadas nas barras do sistema integrado T&D. Essa reinterpretação possibilita a aplicação diferentes normalizações para a impedância de uma linha de interconexão entre os sistemas ao construir as matrizes de admitância e demais matrizes relacionadas.

Analisando os resultados, observa-se que quando se aplica diversas normalizações complexas, cada uma adequada à área em questão, o número de iterações no processo da estimação de estados reduz significativamente e, assim, o esforço computacional. A normalização complexa é imprescindível para garantir a convergência em diversas situações, em especial no uso do método desacoplado no modelo na estimação de estados T&D proposta.

Assim, o método proposto representa uma evolução na área de estimação de estados, mostrando-se versátil para análises integradas de sistemas T&D e permitindo o uso de bases de potência com magnitudes e ângulos ajustáveis às características específicas de cada área.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Indicam-se alguns temas passíveis de darem sequência à pesquisa realizada neste trabalho, são eles:

• Incluir rotinas de processamento de erros grosseiros no estimador de estados T&D proposto;

• Estender a formulação de estimação de estados T&D proposta considerando modelagem monofásica-trifásica da rede elétrica;

• Estender a metodologia proposta para um estimador de estados híbrido que abranja medidas do SCADA e de PMUs;

• Aplicar a técnica de normalização complexa por unidade por barra para uma análise multinível (T&D, D&D);

• Estender a metodologia proposta para formulações de estimação de estados mais robustas, como método do Tableau Esparso, métodos ortogonais, entre outros.

6.2 Publicações

Artigos publicados em periódicos:

• PORTELINHA, R. K.; DURCE, C. C.; TORTELLI, O. L.; LOURENÇO, E. M. et al. Unified Transmission and Distribution Fast Decoupled Power Flow. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, Springer, v. 30, n. 6, p. 1051–1058, 2019.;

• PORTELINHA, R. K.; DURCE, C. C.; TORTELLI, O. L.; LOURENÇO, E. M. Fast-decoupled power flow method for integrated analysis of transmission and distribution systems. Electric Power Systems Research, v. 196, p. 107215, 2021.

Artigo publicado em anais de congresso:

• DURCE, C. C.; MONTEIRO, A. L.; PORTELINHA, R. K.; LOURENCO, E. M.; TORTELLI, O. L. . Estimação de Estados Desacoplada para Sistemas Interligados de Transmissão e Distribuição. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2023, Manaus. SBSE 2023, 2023.

REFERÊNCIAS

ABUR, Ali.; GÓMEZ EXPÓSITO, Antonio. **Power System State Estimation : Theory and Implementation**. [s.l.] Marcel Dekker, 2004. 327 p.

ALLEMONG, J. J.; RADU, L.; SASSON, A. M. **A Fast and Reliable State Estimation Algorithm for AEP's New Control CenterIEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. [s.l: s.n.].

BARAN, M. E.; KELLEY, A. W. State Estimation for Real-Time Monitoring of Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 3, p. 1601–1609, 1994.

BARAN, M. E.; KELLEY, A. W. A branch-current-based state estimation method for distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 1, p. 483–491, 1995.

BARAN, M.; MCDERMOTT, T. E. Distribution system state estimation using AMI data. Em: 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2009, 2009, [...]. I E E E, 2009.

BLAABJERG, F.; MA, K. Wind Energy Systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 105, n. 11, p. 2116–2131, 1 nov. 2017.

CATALAO, J. P. S.; HATZIARGYRIOU, N. D. **Guest Editorial Special Section on Real-World Challenges of TSO-DSO CoordinationIEEE Transactions on Power Systems**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 mar. 2023.

CELLI, G.; PILO, F.; PISANO, G.; ALLEGRANZA, V.; CICORIA, R.; IARIA, A. Meshed vs. radial MV distribution network in presence of large amount of DG. Em: 2004 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004, [...]. 2004. v. 2, p. 709–714.

DAVOUDI, M.; CECCHI, V.; AGUERO, J. R. Investigating the ability of meshed distribution systems to increase penetration levels of Distributed Generation. Em: Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON, 2014, [...]. IEEE, 2014.

DE ALMEIDA, M. C.; ASADA, E. N.; GARCIA, A. V. Effects of load imbalance and system asymmetry on three-phase state estimation. Em: 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES, 2006, [...]. 2006.

DELGADO DE MELO, I. **Estimação de Estados: Uma abordagem sistêmica sobre qualidade de energia**. [s.l: s.n.]

DURCE, C. C.; LOURENÇO, E. M.; TORTELLI, O. L. Power flow analysis for interconnected T&D networks with meshed topology. Em: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2011, [...]. 2011.

DURCE, C. C.; TORTELLI, O. L.; LOURENCO, E. M.; LOURENÇO, E. M.; LODDI, T. Complex normalization to perform power flow analysis in emerging distribution systems. Em: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2012, [...]. IEEE, 2012.

EL-KEIB, A. A.; SINGH, H. Fast linear programming state estimation using the dual formulation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 7, n. 2, p. 620–628, 1992.

EMINOGLU, U.; GÖZEL, T.; HOCAOGLU, M. H. DSPFAP: Distribution systems power flow analysis package using matlab graphical user interface (GUI). **Computer Applications in Engineering Education**, v. 18, n. 1, p. 1–13, mar. 2010.

FANTIN, C. dos A. **Metodologia para estimação de estado trifásica em sistemas de distribuição incorporando medidas SCADA, virtuais, pseudo-medidas e medidas fasoriais sincronizadas**. 2016. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2016.

GARCIA, A.; MONTICELLI, A.; ABREU, P. **Fast Decoupled State Estimation and Bad Data ProcessingIEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. [s.l: s.n.].

GUPTA, M.; ABHYANKAR, A. R. Examining Impact of Distribution System Characteristics on Transmission Security Assessment of Future Power Systems. **IEEE Access**, v. 10, p. 16388–16399, 2022.

HALEY, P. H.; AYRES, M. Super Decoupled Loadflow with Distributed Slack Bus. **IEEE Power Engineering Review**, v. PER-5, n. 1, p. 37, 1985.

HANSEN, C. W.; DEBS, A. S. Power System State Estimation Using Three-Phase Models. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 2, p. 818–824, 1995.

HORISBERGER, H. P.; RICHARD, J. . C.; ROSSIER, C. A Fast Decoupled Static State Estimator for Electric Power Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 95, p. 208–215, 1976.

HUANG, Q.; VITTAL, V. Integrated Transmission and Distribution System Power Flow and Dynamic Simulation Using Mixed Three-Sequence/Three-Phase Modeling. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 5, p. 3704–3714, 1 set. 2017.

HUANG, S. C.; LU, C. N.; LO, Y. L. Evaluation of AMI and SCADA Data Synergy for Distribution Feeder Modeling. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 4, p. 1639–1647, 1 jul. 2015.

HUANG, Y. F.; WERNER, S.; HUANG, J.; KASHYAP, N.; GUPTA, V. **State estimation in electric power grids: Meeting new challenges presented by the requirements of the future gridIEEE Signal Processing Magazine**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2012.

ISSICABA, D.; COSTA, A. S.; COLOMBO, J. L. Real-time monitoring of points of common coupling in distribution systems through state estimation and geometric tests. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 1, p. 9–18, 1 jan. 2016.

LANGNER, A. L.; ABUR, A. Formulation of Three-Phase State Estimation Problem Using a Virtual Reference. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 36, n. 1, p. 214–223, 1 jan. 2021.

LI, B.; YU, X.; BO, Z. Protection schemes for closed loop distribution network with distributed generator. Em: 1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09, 2009, [...]. 2009.

LO, K. L.; MAHMOUD, Y. M. A Decoupled Linear Programming Technique for Power System State Estimation. **IEEE Power Engineering Review**, v. PER-6, n. 2, p. 40–41, 1986.

LONDON, J. B. A.; PIERETI, S. A. R.; BENEDITO, R. A. S.; BRETAS, N. G. Redundancy and observability analysis of conventional and PMU measurements. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 3, p. 1629–1630, 2009.

LOURENÇO, E. M.; LODDI, T.; TORTELLI, O. L. Unified load flow analysis for emerging distribution systems. Em: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT Europe, 2010, [...]. 2010.

LOURENÇO, E. M.; TORTELLI, O. L.; PAL, B. C.; NOGUEIRA, E. M. M.; MONTEIRO, A. L. Fast-decoupled distribution system state estimation. *Em*: **Power Distribution System State Estimation**. [s.l: s.n.]p. 185–207.

LU, C. N.; TENG, J. H.; LIU, W. H. E. Distribution system state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 1, p. 229–240, 1995.

LUO, G. X.; SEMLYEN, A. Efficient load flow for large weakly meshed networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 4, p. 1309–1316, 1990.

MASSIGNAN, J. A. D. **A Bayesian Perspective for Distribution System State Estimation: Theoretical and Practical Considerations**. 2021. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2021.

MME; EPE. **Plano Nacional de Energia 2050**. [s.l: s.n.].

MONTICELLI, A. **State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach**. USA: Kluwer Academic Publishers, 1999. 1–394 p.

MONTICELLI, A. Electric Power System State Estimation. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, n. 2, p. 262–282, 2000.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Fast Decoupled State Estimators. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 2, p. 556–564, 1990.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A.; SAAVEDRA, O. R. Fast decoupled load flow: Hypothesis, derivations, and testing. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 4, p. 1425–1431, 1990.

MUNOZ-DELGADO, G.; CONTRERAS, J.; ARROYO, J. M.; SANCHEZ DE LA NIETA, A.; GIBESCU, M. Integrated Transmission and Distribution System Expansion Planning under Uncertainty. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 12, n. 5, p. 4113–4125, 1 set. 2021.

NANDA, J.; RAJU, V. B.; BIJWE, P. R.; KOTHARI, M. L.; JOMA, B. M. New findings of convergence properties of fast decoupled load flow algorithms. **IEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution**, v. 138, n. 3, p. 218–220, 1991.

NI, F.; NGUYEN, P. H.; COBBEN, J. F. G.; VAN DEN BROM, H. E.; ZHAO, D. Three-phase state estimation in the medium-voltage network with aggregated smart meter data. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 98, p. 463–473, 1 jun. 2018.

OCHOA, L. **Advanced Modelling of Smart Distribution Networks Using OpenDSS**. [s.l: s.n.].

PANDEY, A.; LI, S.; PILEGGI, L. Combined transmission and distribution state-estimation for future electric grids. *Em*: **Power Systems Operation with 100% Renewable Energy Sources**. [s.l: s.n.]p. 299–315.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S.; KARIMI, K. J. State estimation with phasor measurements. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 1, n. 1, p. 233–238, 1986.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S.; NUQUI, R. F.; ZHOU, M. Recent developments in state estimation with phasor measurements. Em: 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2009, 2009, [...]. I E E E, 2009.

PILATTE, N.; ARISTIDOU, P.; HUG, G. TDNetgen: An open-source, parametrizable, large-scale, transmission, and distribution test system. **IEEE Systems Journal**, v. 13, n. 1, p. 729–737, 1 mar. 2019.

PORTELINHA, R. K.; DURCE, C. C.; TORTELLI, O. L.; LOURENÇO, E. M. Fast-decoupled power flow method for integrated analysis of transmission and distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 196, 1 jul. 2021.

PRIMADIANTO, A.; LU, C. N. A Review on Distribution System State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 32, n. 5, p. 3875–3883, 1 set. 2017.

RAJICIC, D.; BOSE, A. MODIFICATION TO THE FAST DECOUPLED POWER FLOW FOR NETWORKS WITH HIGH R/X RATIOS. Em: 1987, [...]. 1987. p. 360–363.

REN, J.; KEZUNOVIC, M. Modeling and simulation tools for teaching protective relaying design and application for the smart grid. Em: Proceedings - International Symposium: Modern Electric Power Systems, MEPS'10, 2010, [...]. 2010.

ROY, L.; MOHAMMED, T. A. Fast super decoupled state estimator for power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 4, p. 1597–1603, 1997.

ROYTELMAN, I.; SHAHIDEHPOUR, S. M. State Estimation for Electric Power Distribution Systems in Quasi real-Time Conditions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 4, p. 2009–2015, 1993.

RUBEN, B.; CROSS, A.; STRICKLAND, D.; ATEN, M.; FERRIS, R. Meshing radial networks at 11kV. Em: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2011, [...]. 2011.

SAKIS MELIOPOULOS, A. P.; COKKINIDES, G. J.; STEFOPOULOS, G. K. Numerical experiments for three-phase state estimation performance and evaluation. Em: 2005 IEEE Russia Power Tech, PowerTech, 2005, [...]. 2005.

SCHWEPPE, F. C. Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation. **Transaction on power apparatus and systems**, v. PAS-89, n. 1, p. 130–135, 1970.

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

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

SHARMA, N. K.; CHAKRABARTI, S.; SHARMA, A. State Estimation of the Transmission System in the Presence of Unbalanced Load at the Transmission Distribution Boundary. Em: 2022 22nd National Power Systems Conference, NPSC 2022, 2022, [...]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. p. 130–135.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988.

SINHA, A. K.; ROY, L.; SRIVASTAVA, H. N. P. A Decoupled Second Order State Estimator for AC-DC Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 3, p. 1485–1493, 1994.

STOTT, B.; ALSAC, O. Fast decoupled load flow. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-93, n. 3, p. 859–869, 1974.

SUN, H.; GUO, Q.; ZHANG, B.; GUO, Y.; LI, Z.; WANG, J. Master-Slave-Splitting Based Distributed Global Power Flow Method for Integrated Transmission and Distribution Analysis. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 3, p. 1484–1492, 1 maio 2015.

TINNEY, W. F.; HART, C. E. Power Flow Solution by Newton's Method. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-86, n. 11, p. 1449–1460, 1967.

TORTELLI, O. L.; LOURENCO, E. M.; GARCIA, A. V.; PAL, B. C. Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex PU normalization. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 3, p. 1351–1358, 1 maio 2015.

VAN AMERONGAN, R. A. W. **A General-Purpose Version of the Fast Decoupled LoadflowIEEE Power Engineering Review**1989.

VON MEIER, A.; STEWART, E.; MCEACHERN, A.; ANDERSEN, M.; MEHRMANESH, L. Precision Micro-Synchrophasors for Distribution Systems: A Summary of Applications. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 6, p. 2926–2936, 1 nov. 2017.

WANG, J. W.; QUINTANA, V. H. A Decoupled Orthogonal Row Processing Algorithm for Power System State Estimation. **IEEE Power Engineering Review**, v. PER-4, n. 8, p. 73, 1984.

ZEGERS, A.; BRUNNER, H. **TSO-DSO interaction : An Overview of current interaction between transmission and distribution system operators and an assessment of their cooperation in Smart Grids ISGAN Discussion Paper Annex 6 Power T & D Systems , Task 5 September 2014 TSO-DSO interaAnnex 6 Power T&D Systems, Task 5**ISGAN Annex 6 Power T&D Systems, Task 5, 2014.

ASCHMONEIT, F., DENZEL, D., GRAF, R., AND SCHELLSTEDE, G., Development of an optimal state estimator and implementation in a real-time computer system, **Proc. CIGRE Meeting**, Paris, 1976.

IRVING M. R., OWEN R. C., STERLING M. J. H.. Power-system state estimation using linear programming. **In: Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**. vol. 125. IET; 1978. p. 879–885

NOGUEIRA, E M M; LOURENÇO, E M; TORTELLI, O. Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição via Normalização Complexa. **SIMPÓSIO de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica**. [S.l.: s.n.], 2014.

HAQUE, M. H. Novel decoupled load flow method. **IEE Proceedings C – Generation**, Transmission and Distribution, Vol. 140, No. 3, 1993

DURCE, C. C.; MONTEIRO, A. L.; PORTELINHA, R. K.; LOURENCO, E. M.; TORTELLI, O. L. . Estimação de Estados Desacoplada para Sistemas Interligados de Transmissão e Distribuição. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2023, Manaus. SBSE 2023, 2023.

Illinois Center for a Smarter Electric Grid – ICSEG. Literature-Based Power Flow Test Cases. IEEE 14-Bus System. 2013. Disponível em <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-14-bus-system/>. Acesso em: Set. 2024.

Illinois Center for a Smarter Electric Grid – ICSEG. Literature-Based Power Flow Test Cases., IEEE 30-Bus System. 2013. Disponível em: <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-30-bus-system/>. Acesso em: Set. 2024.

A. Bytyqi, S. Gandhi, E. Lambert, N. Petrovič. A Review on TSO-DSO Data Exchange, CIM Extensions and Interoperability Aspects. JOURNAL OF MODERN POWER SYSTEMS AND CLEAN ENERGY, VOL. 10, NO. 2, March 2022. pp 309-315

A. Gómez-Expósito, A. Abur, A. Villa Jaén, C. Gómez-Quiles. A Multilevel State Estimation Paradigm for Smart Grids. Proceedings of the IEEE | Vol. 99, No. 6, June 2011, pp 952-976.

Almeida, M. C.; Feltrin, A. P.; Bandória L. H. T. Current-based power flow calculation methods for distribution systems. Em: Power Distribution System State Estimation. Chapter 5. 2022.

AMERONGEN, R. A. M. V. A general-purpose version of the fast decoupled loadflow. IEEE Transaction on Power Systems, v. 4, n. 2, p. 760–770, mai. 1989.

ANDRETICH, R. G. et al. Piecewise load flows solutions of very large size networks. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, PAS-90, n. 3, p. 950–961, 1971.

ARRITT, Robert F; DUGAN, Roger C. Distribution system analysis and the future smart grid. IEEE Transactions on Industry Applications, IEEE, v. 47, n. 6, p. 2343–2350, 2011.

Baran, M.E., Wu, F.F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. IEEE Trans. on Power Delivery, 4(1), 725–734. 1989.

C. Chen, T. Zhang, H. Ma, S. Liu, Z. Zhang, H. Wang, X. Song, Z. Lin, F. Wen, Y. Xue. Triple-level Full-stage Adaptive Restoration Optimization for Coupled Transmission and Distribution Systems Considering Restoration Security Risks. IEEE Transactions on Power Systems. 2024.

Coelho, S.S.C., Portelinha, R.K., Lourenço, E.M., Tortelli, O.L. Gerador de medidas trifásico para estudos de estimação de estados em sistemas de distribuição emergentes. 12th International Conference on Industry Applications. 2016

DECKMANN, S. et al. Numerical testing of power system load flow equivalents. IEEE transactions on power apparatus and systems, IEEE, n. 6, p. 2292–2300, 1980.

DUGAN, Roger C; MCDERMOTT, Thomas E. An open source platform for collaborating on smart grid research. In: IEEE. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. P. 1–7.

DURCE, C. C.; LOURENÇO, E. M.; TORTELLI, O. L. Power flow analysis for interconnected T&D networks with meshed topology. In: 2011 IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Manchester - Inglaterra: [s.n.], dez. 2011. P. 1–7.

DURCE, C. C.; LOURENÇO, E. M.; TORTELLI, O. L.; LODDI, T. Complex normalization to perform power flow analysis in emerging distribution systems. In: 3A3 IEEE PES Innovative Smart-Grid Technologies Europe (ISGT Europe). Berlin - Alemanha: [s.n.], out. 2012. P. 1–6.

DYLIACCO, T. E.; RAMARAO, K. A. Discussion of "Wu, FF. Theoretical study of the convergence of the fast decoupled load flow". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, IEEE, v. 96, n. 1, p. 268–275, 1977.

EMINOGLU, U.; HOCAOGLU, M. H. Distribution systems forward/backward sweep-based power flow algorithms: a review and comparison study. Electric Power Components and Systems, Taylor & Francis, v. 37, n. 1, p. 91–110, 2009.

GARCIA, A.; MONTICELLI, A. Simulação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica através de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido e Rotação de Eixos. In: IX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI. Bahia, 1984

GARCIA, Paulo AN; PEREIRA, Jose Luiz R et al. Three-phase power flow calculations using the current injection method. IEEE Transactions on Power Systems, IEEE, v. 15, n. 2, p. 508–514, 2000.

H. Stott, O. Alsaç. Fast Decoupled Load-Flow. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 859-869, 1974.

H.B. Sun, B.M. Zhang. Global state estimation for whole transmission and distribution networks. Electric Power Systems Research 74 (2005) 187–195.

HALEY, P. H.; AYRES, M. Super decoupled loadflow with distributed slack bus. IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, IEEE, n. 1, p. 104–113, 1985

HAPP, H. H. Diakoptics and piecewise methods. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, PAS-89, n. 7, p. 1373–1382, 1970.

HUANG, Q.; VITTAL, V. Integrated Transmission and Distribution System Power Flow and Dynamic Simulation Using Mixed Three-Sequence/Three-Phase Modeling. IEEE Transaction on Power Systems, v. 32, n. 5, p. 3704–3714, 2017.

J. A. D. Massignan. A Bayesian Perspective for Distribution System State Estimation: Theoretical and Practical Considerations. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2021.

J. E. Van Ness, J, H. Griffin. Elimination Methods for Load-Flow Studies. AIEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-80, pp. 299-304, Jun. 1961.

L. Xie, D. Choi, S. Kar, H. V. Poor. Fully Distributed State Estimation for Wide-Area Monitoring Systems. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 3, NO. 3, SEPTEMBER 2012. pp 1154-1169.

L. Zhu, S. Chen, W. Mo, Y. Wang, G. Li, G. Chen. Integrated Power Flow Solution for Interconnected Transmission and Distribution Network. IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference, pp. 1076-1080, 2019.

LI, K. et al. Unified power flow algorithm of transmission and distribution network. IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. São Diego, pp. 257–261, 2017.

LOURENÇO, E. M.; LODDI, T.; TORTELLI, O. L. Unified load flow analysis for emerging distirbution systems. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Gothenberg, P. 1–7, 2010.

LOURENÇO, E. M.; TORTELLI, O. L.; PAL, B. C.; NOGUEIRA, E. M. M.; MONTEIRO, A. L. Fast-decoupled distribution system state estimation. Em: Power Distribution System State Estimation. Chapter 8, p. 185–207. 2022.

MARINHO, J. M. T.; TARANTO, G. N. A hybrid three-phase single-phase power flow formulation. IEEE Transactions on Power Systems, v. 23, n. 3, p. 1063–1070, 2008.

Massignan, J. A. D.; London Jr., J. B. A.; Hebling, G. M.; Lourenço, E. M.; Portelinha, R. K.; Tortelli, O. L. Three-phase network model for steady- state analysis of distribution systems. Em: Power Distribution System State Estimation. Chapter 4. 2022.

Mohseni-Bonab, 2020 não achei

N. Singh , E. Kliokys, H. Feldmann, R. Kiissel, R. Chrustowski, C. Jaborowicz. Power System Modelling and Analysis in a Mixed Energy Management and Distribution Management System. IEEE Transactions on Power System, Vol. 13, No. 3, August 1998

NANDA, J.; KOTHARI, D. P.; SRIVASTAVA, S. C. Some important observations on fast decoupled load flow algorithm. Proceedings of the IEEE, IEEE, v. 75, n. 5, p. 732–733, 1987. (Letter)

NOGUEIRA, E M M; LOURENÇO, E M; TORTELLI, O. Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição via Normalização Complexa. SIMPÓSIO de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2014.

PORTELINHA, R. K.; DURCE, C. C.; TORTELLI, O. L.; LOURENÇO, E. M. et al. Unified Transmission and Distribution Fast Decoupled Power Flow. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, Springer, v. 30, n. 6, p. 1051–1058, ago. 2019.

PORTELINHA, R. K.; DURCE, C. C.; TORTELLI, O. L.; LOURENÇO, E. M. Fast-decoupled power flow method for integrated analysis of transmission and distribution systems. Electric Power Systems Research, v. 196, p. 107215, 2021.

R. C. Dugan, R. F. Arritt, T. E. McDermott, S. M. Brahma, K. Schneider. Distribution System Analysis to Support the Smart Grid. IEEE. 2010

R. K. PORTELINHA. Fluxo de potência trifásico desacoplado rápido para análise unificada de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica incluindo dispositivos de controle. Universidade Federal do Paraná, 2021.

RAJICIC, D.; BOSE, A. A modification to the fast decoupled power flow for networks with high R/X ratios. IEEE Transaction on Power Systems, v. 3, n. 2, p. 743–746, mai. 1988.

S. Thakar, V. Vittal, R. Ayyanar. An Integrated Transmission-Distribution Co-Simulation for a Distribution System with High Renewable Penetration. IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2021.

SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. IEEE Transaction on Power Systems, v. 3, n. 2, p. 753–762, mai. 1988.

SUN, H.; GUO, Q. et al. Master-Slave-Splitting Based Distributed Global Power Flow Method for Integrated Treansmission and Distribution Analysis. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 6, n. 3, p. 1484–1492, mai. 2015.

SUN, H.; ZHANG, B. Distributed power flow calculation for whole networks including transmission and distribution. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago, EUA, pp 1-6, 2008.

Tortelli, O. L.; Lourenço, E. M.; Pal, B. C.; Garcia, A. V.; Portelinha, R. K. Fast-decoupled power flow method for active distribution systems. Em: Power Distribution System State Estimation. Chapter 7. 2022.

W. F. Tinney, C. E. Hart. Power Flow Solution by Newton's Method. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 11, pp. 1449-1460, Nov. 1967.

WANG, L et al. Novel decoupled power flow. In: IET, 1. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution). [S.l.: s.n.], 1990. v. 137, p. 1–7.

WANG, Y. et al. A General Fast Power Flow Algorithm for Transmission and Distribution Networks. IEEE Access, IEEE, v. 8, p. 23284–23293, 2020.

Ward, J. B., H. W. Hale. Digital Computer Solution of Power Flow Problems. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 75, pp. 398-404, Jun. 1956.

WU, F. F. Theoretical study of the convergence of the fast decoupled load flow. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, IEEE, v. 96, n. 1, p. 268–275, 1977.

Y. Tang , K. Tang , S. Dong. A parallel and asynchronous state estimation for coupled transmission-distribution networks. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Electrical Power and Enerdy Systems. 2022.

Y. Zhang, Y. Chen, J. Wang, Y. Meng, T. Zhao. Decentralized Coordinated State Estimation in Integrated Transmission and Distribution Systems. IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2022.

YANG, J.; YUN, Z. The Thevenin equivalent based power flow method for integrated transmission and radial distribution networks. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, v. 123, p. 106294, 2020.

ANEXOS

ANEXO A - Dados do sistema-teste de distribuição de 20 barras

As Tabelas A.1 e A.2 apresentam, respectivamente, os dados de barras e de linhas do sistema-teste do alimentador de distribuição de 20 barras de uma rede de distribuição real de uma concessionária brasileira.

Tabela A.1 - Dados de barra do SD teste de 20 barras

Barra	P_d (kW)	Q_d (kVAr)
1	80,7	54,5
2	27,0	17,7
3	0,0	0,0
4	-32,0	-21,5
5	44,2	30,4
6	23,1	15,2
7	1,0	0,0
8	74,9	50,7
9	-13,5	-9,2
10	25,9	17,7
11	33,6	22,8
12	1,0	0,0
13	20,2	13,9
14	64,4	43,1
15	28,9	19,0
16	41,3	27,9
17	52,8	35,5
18	40,3	26,6
19	-9,6	-6,3
20	1,0	0,0

Tabela A.2 - Dados de linha do SD teste de 20 barras (base=10 MVA)

Linha	**De**	**Para**	**R (*pu*)**	**X (*pu*)**
1	1	2	0,0762	0,0074
2	1	13	0,0333	0,0032
3	2	3	0,0514	0,005
4	3	4	0,059	0,0057
5	3	12	0,0905	0,0088
6	4	5	0,1086	0,0106
7	5	6	0,0924	0,009
8	6	7	0,0219	0,0022
9	6	8	0,0876	0,0086
10	8	9	0,0762	0,0074
11	9	10	0,0886	0,0088
12	10	11	0,0876	0,0086
13	13	14	0,1038	0,0102
14	13	17	0,0886	0,0087
15	13	19	0,0886	0,0087
16	14	15	0,0857	0,0084
17	15	16	0,0886	0,0087
18	17	18	0,1095	0,0107
19	19	20	0,0981	0,0096