

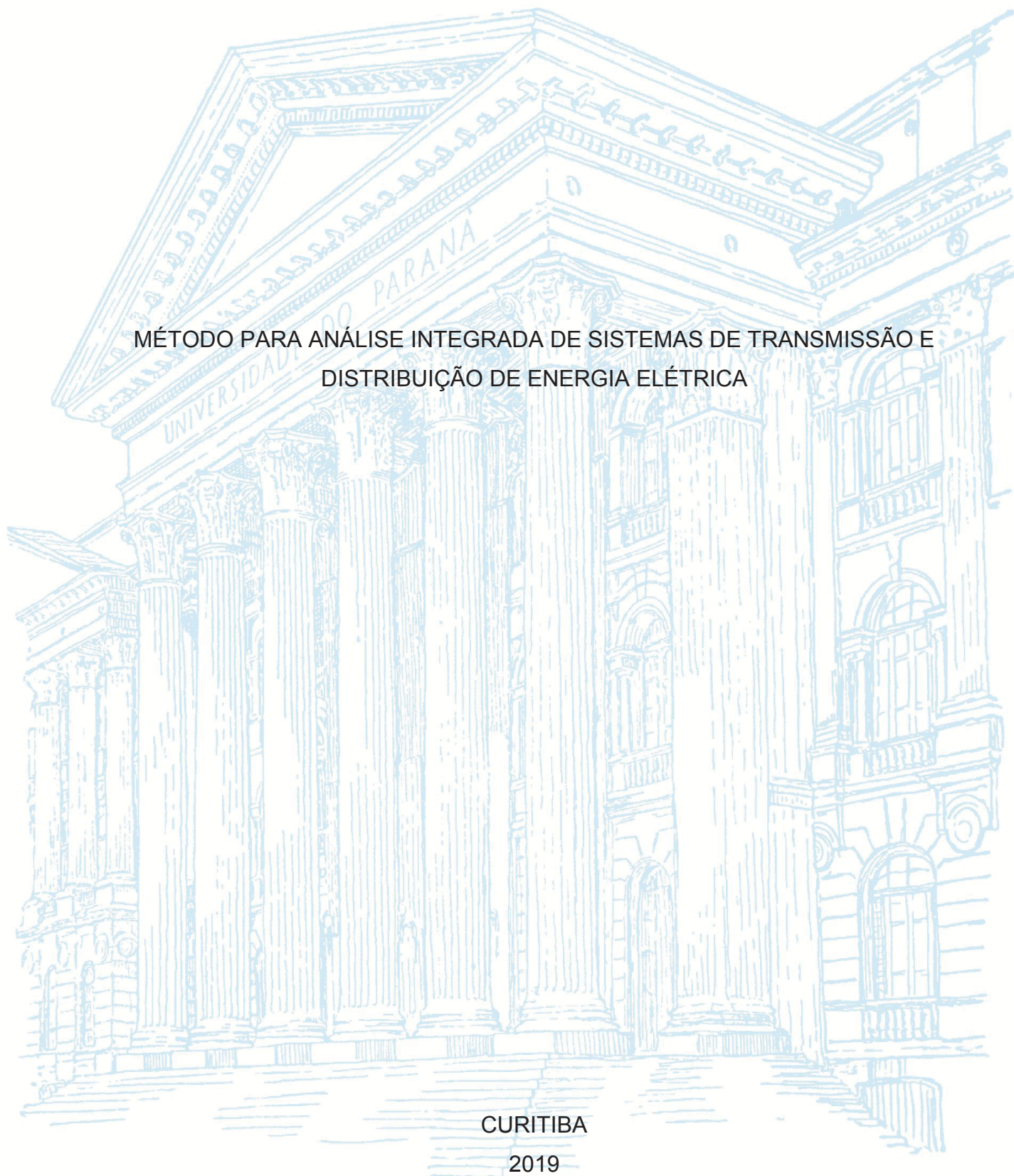
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JUCIELI FRENA

MÉTODO PARA ANÁLISE INTEGRADA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CURITIBA

2019



JUCIELI FRENA

MÉTODO PARA ANÁLISE INTEGRADA DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Odilon Luís Tortelli

Coorientadora: Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

F873m

Frena, Jucieli

Método para análise integrada de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica [recurso eletrônico] / Jucieli Frena. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

Orientador: Odilon Luís Tortelli. Coorientadora: Elizete Maria Lourenço.

1. Energia elétrica – Distribuição. 2. Geração distribuída de energia elétrica. 3. Sistemas de energia elétrica. 4. Redes elétricas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Tortelli, Odilon Luís. III. Lourenço, Elizete Maria. IV. Título.

CDD: 621.31912

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



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 em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de JUCIELI FRENA intitulada: **Método para Análise Integrada de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.**, sob orientação do Prof. Dr. ODILON LUIS TORTELLI, que após terem inquirido a atuna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre 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, 11 de Julho de 2019.




ODILON LUIS TORTELLI

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



CLODOMIRO UNSHUAY-VILA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



PAULO CICERO FRITZEN

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Odilon Luis Tortelli, meu orientador e exemplo profissional, por ter me motivado para que eu não interrompesse o processo, pela confiança, dedicação, paciência e compreensão nos momentos de dificuldade; a ele, a minha enorme admiração profissional e pessoal.

À minha co-orientadora, Professora Doutora Elizete Maria Lourenço, também pelo incentivo, amizade e pelas diversas conversas que muito me motivaram.

Aos meus amigos e colegas da pós-graduação Renan Kovalczuk Portelinha e Bryan Almeida Silva Ambrósio, que me ajudaram durante todo o processo; sem vocês, eu não teria conseguido.

Aos meus pais e aos verdadeiros amigos. Sempre.

À minha tia, Zuleide Andreia Frena da Costa, por ter sido a primeira pessoa a ter me incentivado a estudar.

À empresa CNS, que me recebeu de braços abertos e que sempre entendeu e permitiu que eu pudesse dar continuidade nos meus estudos.

Ao meu namorado, Vinicius Antunes Minello, pelo amor e companheirismo, pela ajuda, pela paciência e incentivo. Por trazer cor à minha vida.

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

“Do or do not. There is no try.”
(YODA, 1980, The Empire Strikes Back)

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para resolver o problema do fluxo de potência de redes de transmissão e distribuição (T&D) de energia elétrica de maneira unificada tendo em vista o novo contexto do setor elétrico. O desenvolvimento de novas tecnologias, tanto de geração de energia, a partir de fontes renováveis, como de controladores relacionados ao conceito Smart Grid, tem viabilizado esse processo de mudança, que incide fortemente no Sistema de Distribuição (SD). De uma estrutura tradicionalmente passiva, com fluxo de potência unidirecional, os SDs modernos tendem a incorporar cada vez mais fontes de geração, convertendo-se assim em redes ativas sujeitas a fluxos de potência bidirecionais. Além disso, tais avanços tecnológicos, que buscam ampliar a confiabilidade do fornecimento de energia com a utilização mais efetiva das fontes distribuídas, suscitam modificações na topologia das redes de distribuição, se encaminhando para arranjos em anel e mesmo em malha, típicos em sistemas de transmissão. Considerando esse novo contexto do setor elétrico, fica evidente a necessidade de rever a representação e a forma como a interação entre o sistema de transmissão e as redes de distribuição é avaliada. Ou seja, existe a necessidade do aperfeiçoamento das metodologias de análise aplicadas ao setor, como é o caso do cálculo do fluxo de potência, um estudo fundamental para a operação e o planejamento do sistema elétrico. A metodologia proposta baseia-se em uma inovadora associação do tradicional método Newton-Raphson Desacoplado Rápido com a técnica de normalização complexa. Os resultados apresentados neste trabalho demonstram a efetividade da proposta no sentido de avaliar de maneira precisa a influência dos alimentadores de distribuição ativos na rede de transmissão. São apresentados resultados da interação entre um sistema de transmissão e um sistema de distribuição sob diferentes condições operativas, tanto do ponto de vista topológico como de participação da geração distribuída, que atestam assim a relevância dessa ferramenta de análise para apoio aos estudos de operação e planejamento de redes elétricas.

Palavras-chave: Sistemas de Transmissão e Distribuição. Geração Distribuída. Fluxo de Potência Desacoplado.

ABSTRACT

This work aims to propose a methodology to solve the Power Flow on transmission and distribution network problem in a unified way, considering the new electric sector context. The development of new technologies, both power generations; from renewable sources; and controllers related to the Smart Grid concept, has enabled this process of changes, which strongly influences the Distribution System (SD). From a traditionally passive structure with unidirectional power flow, modern SDs tend to increasingly incorporate generation sources, thus converting into active networks subject to bidirectional power flows. In addition, such technological advances, seeking to increase the reliability of the supply with more effective use of the distributed sources, lead to modifications in the topology of the distribution networks, typical in transmission systems. Considering this new the electric sector context, it is evident the need to review the representation and the way the interaction between the transmission system and the distribution networks is evaluated, indicating therefore the need to improve the methodologies of analysis applied to the sector, as is the case of power flow calculation, a fundamental study for the operation and planning of the electric system. The proposed methodology is based on an innovative association of the traditional Newton-Raphson Rapid Decoupled method with the complex normalization technique. The results presented in this work demonstrate the effectiveness of the proposal in order to accurately evaluate the influence of the active distribution feeders in the transmission network. Results of the interaction between a transmission system and a distribution system under different operating conditions are presented, both from the topological point of view and from the participation of the distributed generation, which attest to the relevance of this analysis tool to support the operation and planning studies of electrical networks.

Keywords: Transmission and Distribution Systems. Distributed Generation. Decoupled Power Flow.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA DA NORMALIZAÇÃO <i>C.P.U.</i>	31
FIGURA 2 – INJEÇÃO DE POTÊNCIA NAS BARRAS	36
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DO FP ESTENDIDO VIA MÉTODO DE NEWTON	39
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DO FP ESTENDIDO VIA MÉTODO DE NEWTON	43
FIGURA 5 – ESQUEMAS TOPOLÓGICOS T&D	44
FIGURA 6 – ESQUEMÁTICO DO SISTEMA TESTE.....	46
FIGURA 7 – ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE 69 BARRAS - SD1	47
FIGURA 8 – ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE 33 BARRAS - SD2	47
FIGURA 9 – FLUXO DE POTÊNCIA NOS RAMOS DE CONEXÃO T&D – SEM GD	59
FIGURA 10 – FLUXO DE POTÊNCIA NOS RAMOS DE CONEXÃO T&D – COM GD	68

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – NÚMERO DE ITERAÇÕES EM RELAÇÃO A CADA CENÁRIO – VERSÃO XB	49
GRÁFICO 2 – NÚMERO DE ITERAÇÕES EM RELAÇÃO A CADA CENÁRIO– VERSÃO BX	50
GRÁFICO 3 – PERFIL DE TENSÃO DO ST	52
GRÁFICO 4 – PERFIL DE TENSÃO DO SD1 – SEM GD	53
GRÁFICO 5 – PERFIL DE TENSÃO DO SD2 – SEM GD	54
GRÁFICO 6 – PERFIL DE TENSÃO DO T&D – SEM GD	55
GRÁFICO 7 – FLUXO DE POTÊNCIA NAS BARRAS DE CONEXÃO ENTRE T&D	57
GRÁFICO 8 – PERFIL DE TENSÃO DO ST – COM GD	61
GRÁFICO 9 – PERFIL DE TENSÃO DO SD1 – COM GD	62
GRÁFICO 10 – PERFIL DE TENSÃO DO SD2 – COM GD	63
GRÁFICO 11 – PERFIL DE TENSÃO DO T&D – COM GD	63
GRÁFICO 12 – FLUXO DE POTÊNCIA NAS BARRAS DE CONEXÃO ENTRE T&D	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – NÚMERO DE ITERAÇÕES PARA O SISTEMA COM RELAÇÃO R/X ELEVADA – VERSÃO XB	50
TABELA 2 – NÚMERO DE ITERAÇÕES PARA O SISTEMA COM RELAÇÃO R/X ELEVADA – VERSÃO BX	51
TABELA 3 – TENSÃO NAS BARRAS EM CADA CENÁRIO (<i>p.u.</i>) – SEM GD	53
TABELA 4 – NÚMERO DE ITERAÇÕES NAS DIFERENTES TOPOLOGIAS – SEM GD	56
TABELA 5 – FLUXOS DE POTÊNCIA EM LINHAS DO ST (<i>MW/Mvar.</i>)	56
TABELA 6 – FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA NAS LINHAS DO ST (<i>p.u.</i>) – SEM GD	58
TABELA 7 – FLUXOS DE POTÊNCIA REATIVA NAS LINHAS DO ST (<i>p.u.</i>) – SEM GD	59
TABELA 8 – TENSÃO NAS BARRAS DO ST EM CADA CENÁRIO (<i>p.u.</i>) – COM GD	62
TABELA 9 – NÚMERO DE ITERAÇÕES NAS DIFERENTES TOPOLOGIAS – COM GD	64
TABELA 10 – FLUXOS DE POTÊNCIA NAS LINHAS DE CONEXÃO T&D (<i>MW/Mvar</i>)	65
TABELA 11 – FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA NAS LINHAS DO ST (<i>p.u.</i>) – COM GD	66
TABELA 12 – FLUXOS DE POTÊNCIA REATIVA NAS LINHAS DO ST (<i>p.u.</i>) – COM GD	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo geral	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
1.2 REVISÃO DE LITERATURA	15
1.3 CONTRIBUIÇÕES	18
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 FORMULAÇÃO BÁSICA DO FLUXO DE POTÊNCIA	20
2.2 MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA BASEADOS NO MÉTODO NEWTON-RAPHSON.....	22
2.2.1 MÉTODO NEWTON-RAPHSON.....	23
2.2.2 MÉTODO NEWTON-RAPHSON DESACOPLADO RÁPIDO	24
2.2.3 Algoritmo para solução do fluxo de potência via método Desacoplado Rápido 27	
2.2.3.1 Subsistema 1	27
2.2.3.2 Subsistema 2.....	28
2.3 NORMALIZAÇÃO CONVENCIONAL (<i>P.U.</i>).....	28
2.4 NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE (<i>C.P.U.</i>).....	29
2.5 CÁLCULO DO ÂNGULO DE BASE	31
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	33
3 METODOLOGIA PROPOSTA –ANÁLISE UNIFICADA DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO	34
3.1 FLUXO DE POTÊNCIA PARA REDES T&D COM COMPENSAÇÃO	34
3.2 FLUXO DE POTÊNCIA PARA REDES T&D SEM COMPENSAÇÃO	40
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	45
4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	46
4.1 SISTEMA TESTE	46
4.2 DESEMPENHO QUANTO À VARIAÇÃO DO ÂNGULO BASE.....	48
4.3 DESEMPENHO QUANTO À TOPOLOGIA – SEM GD.....	51
4.3.1 Perfil de Tensão	51

4.3.2 Número de Iterações	55
4.3.3 Fluxo de Potência	56
4.3.3.1 Fluxo de Potência no Sistema T&D	56
4.3.3.2 Fluxo de Potência no Sistema de Transmissão	58
4.4 DESEMPENHO QUANTO À TOPOLOGIA – COM GD	60
4.4.1 Perfil de Tensão	60
4.4.2 Número de Iterações	64
4.4.3 Fluxo de Potência	64
4.4.3.1 Fluxo de Potência no Sistema T&D	64
4.4.3.2 Fluxo de Potência no Sistema de Transmissão	65
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição (SD) de energia elétrica vem passando por um processo de mudanças significativas, orientadas pela busca do aumento da eficiência e segurança no fornecimento de energia elétrica. O desenvolvimento de novas tecnologias, tanto de geração, a partir de fontes de energia renovável, como de controladores relacionados ao conceito *SmartGrid*, tem viabilizado esse processo de mudança verificada no setor elétrico, e que incide fortemente nos SD. De uma estrutura tradicionalmente passiva, com fluxo de potência unidirecional, os SD modernos tendem a incorporar cada vez mais fontes de geração de energia, convertendo-se assim em redes ativas e sujeitas a fluxos de potência bidirecionais.

Tais avanços tecnológicos, que buscam ampliar a confiabilidade do fornecimento com a utilização mais efetiva das fontes distribuídas, suscitam modificações e variações na topologia das redes de distribuição, encaminhando arranjos em anel e mesmo em malha, que devem ser considerados nesse novo contexto, indicando, portanto, a necessidade do aperfeiçoamento das metodologias de análise aplicadas ao setor, como é o caso do cálculo do fluxo de potência, que é um estudo fundamental para a operação e o planejamento do sistema elétrico.

Tradicionalmente, as metodologias do fluxo de potência foram desenvolvidas considerando a divisão do sistema em redes de transmissão e de distribuição, devido às suas diferentes características, em termos de topologia e parâmetros. Esta abordagem levou a definição de diferentes técnicas de solução do fluxo de potência a serem aplicadas em cada parte da rede, de acordo com suas particularidades.

Os sistemas de transmissão, com sua típica topologia em malha e linhas com condutores com baixa relação R/X , têm no método de Newton-Raphson, e em especial suas versões desacopladas, metodologias efetivas e há muito consolidadas para a análise de fluxo de potência. Nesse panorama, é comumente adotada a representação das redes de distribuição como cargas equivalentes conectadas às respectivas subestações.

Já para os estudos de fluxo de potência envolvendo redes de distribuição, metodologias baseadas na técnica *Backward-forward*, desenvolvidas partindo da premissa de redes passivas com características radiais, são ainda bastante

disseminadas. Além disso, é prática corrente representar a conexão com o sistema de transmissão através de um gerador equivalente associado à subestação alimentadora.

Considerando o novo contexto do setor elétrico, fica evidente a necessidade de rever a representação e a forma como a interação entre o sistema de transmissão e as redes de distribuição são tratadas.

Assim, este trabalho propõe uma metodologia para resolver o problema do fluxo de potência de redes de transmissão e distribuição (T&D) de maneira unificada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Propor uma nova metodologia para resolver o problema do fluxo de potência de redes de transmissão e distribuição (T&D) de maneira unificada.

1.1.2 Objetivos específicos

- Revisar, no âmbito teórico, a literatura e levantar o estado da arte sobre o tema proposto;
- Fundamentar a metodologia proposta para o cálculo unificado do fluxo de potência de sistemas de transmissão e distribuição, baseado na abordagem desacoplada rápida associada à técnica de normalização complexa;
- Validar a metodologia proposta através de testes e comparações com outras técnicas, frente a redes T&D de diferentes dimensões e arranjos operativos.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção será apresentado o levantamento bibliográfico dos artigos relacionados ao tema desta dissertação, que direcionaram a proposta desse trabalho.

Para conseguir se realizar a análise do desempenho da rede elétrica de potência, é necessário que seja feito o diagnóstico da mesma para se realizar o

planejamento e operação, e parte deste diagnóstico é feito baseado no cálculo do fluxo de potência.

O método mais utilizado na solução do fluxo de potência até a década de 60 era o método de Gauss-Seidel. Neste método, o número de iterações cresce com o aumento da dimensão do problema, portanto, tem convergência lenta. A programação e os cálculos realizados a cada iteração eram simples e se necessitava de pouca memória, contudo, a demora na convergência não superava estas vantagens.

A aplicação de dispositivos de controle de fluxo de potência no sistema elétrico era bem limitado. Com a introdução de sistemas cada vez maiores e mais complexos, a necessidade de controle de fluxo de potência ficou mais evidente e o desenvolvimento de ferramentas analíticas mais avançadas se tornou fundamental.

Van Ness e Griffin então, em 1961, propuseram a utilização do método de Newton para a solução do problema do fluxo de potência para redes de transmissão. Além da não aplicabilidade às redes de distribuição, este método exigia um grande esforço computacional.

Em 1967, Tinney e Hart apresentaram o método de Newton acoplado à Eliminação de Gauss. Essa proposta melhorou o esforço computacional consideravelmente e se mostrou robusta para redes mal condicionadas.

Seguindo os acontecimentos, Stott e Alsac, em 1974, apresentaram o método Desacoplado Rápido, que se mostrou mais rápido que os métodos propostos até então, mantendo a precisão, a convergência e o uso de pouca memória, convergindo de maneira satisfatória e comparável em eficiência ao método de Newton. Mais detalhes deste método serão apresentados no próximo capítulo.

Todavia, as metodologias do fluxo de potência foram desenvolvidas considerando a divisão do sistema em redes de transmissão e de distribuição, devido às suas diferentes características, em termos de topologia e parâmetros.

Assim, em 1967, foi desenvolvido por Berg, Hawkins e Pleines, o primeiro método específico para sistemas de distribuição; o método da Soma das Impedâncias. Este método deu início à utilização do procedimento de varredura de redes de distribuição para análise do fluxo de potência; o Backward/Forward Sweep.

Kersting e Mendive apresentaram o método Escalonado em 1976, que resolve a rede à montante (em direção do nó fonte), supondo previamente um perfil

de tensão, aplicando diretamente as leis de corrente e tensão de Kirchhoff até chegar ao nó fonte. Deste modo é possível calcular a tensão do nó fonte. O erro obtido entre este valor e o especificado era somado ao perfil de tensão previamente suposto de tal modo que se obtinha um novo perfil de tensão para a próxima iteração. A convergência era atingida quando a tensão resultante do nó fonte era a especificada. O Método Escalonado tem como principal desvantagem o fato de limitar a profundidade dos ramais laterais do sistema, pois cada um deles necessita de sub-iterações. Além disso, sua característica de convergência não é boa para sistemas carregados.

Diferentes mudanças no método Newton e no Desacoplado Rápido foram propostas com o passar dos anos. Alguns para lidar com sistemas mal condicionados (Iwamoto; Tamura, 1981, Tripathy, 1982), outros para sistemas com relação R/X desfavoráveis (KAJICIC; BOSE, 1988).

Baran propôs em 1989 novas equações para o cálculo do fluxo de potência no método Newton, considerando as particularidades do SD. Ainda no mesmo ano, Van Amerongen apresentou outra versão para o método de cálculo, que se mostrou vantajoso nas redes de distribuição com convergência mais rápida.

Em 1990, Monticelli, Garcia e Saavedra comprovaram teoricamente as características do método Desacoplado Rápido.

Outros trabalhos foram propostos, alguns melhorando a eficiência computacional (LUO; SEMLYEN, 1990); outros com ênfase na modelagem de geração distribuída e de cargas desbalanceadas e distribuídas (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995).

Em 2002, Medeiros e Lucas propuseram a técnica chamada de Rotação Ótima dos Eixos. A técnica resulta em equações que chegam à mesma solução da rede original.

Em 2006 foi possível aliar as vantagens dos métodos de Garcia e Monticelli e de Medeiros e Lucas, pelo método proposto por Gomes: a rotação automática dos eixos, utilizando técnicas de otimização para o cálculo.

Lourenço, Loddi e Tortelli, em 2010 propuseram utilizar o método Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos para a solução do fluxo de potência para sistemas de distribuição. Partindo da normalização complexa por unidade, combinada à escolha de um ângulo de base adequado, pode-se redimensionar as

altas relações R/X (característica dos SD), para níveis típicos de redes de transmissão, possibilitando assim, avaliar sistemas interligados de transmissão e distribuição (T&D).

Em 2012, C.C. Durce et al. propôs um método de cálculo do fluxo de potência T&D com compensação. Este método resolve o problema do fluxo de potência da rede, possibilitando analisar a influência dos alimentadores de distribuição na operação de sistemas de transmissão, porém, são adicionadas injeções de potência fictícias de compensação, que entram na formulação do fluxo de potência como novas variáveis de estado, tornando o problema mais complexo de ser resolvido.

Hongbin Sun et al., em 2015, apresentaram uma proposta para análise integrada de fluxo de potência entre redes de transmissão e distribuição, baseado no método Master-Slave-Splitting. O método se mostrou vantajoso para redes radiais ou fracamente aneladas, mas para cenários em anel, a convergência deteriora e pode até não convergir.

No ano de 2017, Qihua Huang and VijayVittal propuseram uma estrutura de modelagem de fluxo de potência para T&D e simulação dinâmica. Nele, o sistema de transmissão é modelado por componentes simétricas (positiva, negativa e zero), já o sistema de distribuição é modelado pelas componentes de fase (fases a, b e c). Para a solução T&D é utilizada a abordagem multi-área do Equivalente de Thevenin. Este método não se mostrou eficaz para cenários que contenham redes malhadas.

Ainda em 2017, Keqiang Li et al., apresentaram um algoritmo para o cálculo unificado do fluxo de potência de redes de transmissão e distribuição. O algoritmo é baseado no método Newton-Raphson, onde paralelamente, se faz a divisão do problema em diversos sub-problemas. As análises foram feitas considerando redes malhadas, com e sem geração distribuída.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

A metodologia proposta baseia-se em uma inovadora associação do tradicional método Newton-Raphson Desacoplado Rápido com a técnica de normalização complexa, tornando possível avaliar sistemas interligados de

transmissão e distribuição e/ou distribuição e distribuição, sem a necessidade de incorporar equações ou variáveis adicionais.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho apresenta 5 capítulos:

O Capítulo 1 apresenta a introdução, os objetivos, a revisão bibliográfica, as contribuições e a estrutura do estudo em questão.

O Capítulo 2 elucida a formulação básica do fluxo de potência, que serve como base para teorizar os métodos Newton-Raphson, Newton-Raphson Desacoplado Rápido, seguidos da normalização complexa por unidade (*C.P.U.*) e Fluxo de Potência (FP) para redes de Transmissão e Distribuição (T&D) com compensação.

O Capítulo 3 disserta sobre a proposta deste trabalho: Cálculo do Fluxo de Potência para redes de Distribuição e Transmissão sem compensação – de maneira unificada.

No capítulo 4 são apresentados as simulações e os resultados. Este capítulo está dividido em sistemas e testes de casos simulados e análise dos resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FORMULAÇÃO BÁSICA DO FLUXO DE POTÊNCIA

O cálculo do fluxo de potência da rede é feito de acordo com a Primeira Lei de Kirchhoff: deve ser respeitada a condição de conservação das potências ativa e reativa em cada nó da rede.

Desta aplicação, obtém-se o conjunto de equações do problema de fluxo, garantindo que as potências ativas e reativas injetadas em uma barra são iguais à soma dos fluxos de potência que saem da mesma barra. Assim, tem-se (MONTICELLI,1983):

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2)$$

onde:

$k = 1, \dots, N_b$, sendo N_b o número de barras da rede;

Ω_k – conjunto das barras vizinhas à barra k ;

V_k, V_m – magnitudes das tensões das barras terminais do ramo $k - m$;

θ_k, θ_m – ângulos das tensões das barras terminais do ramo $k - m$;

P_{km} – fluxo de potência ativa no ramo $k - m$;

Q_{km} – fluxo de potência reativa no ramo $k - m$;

Q_k^{sh} – injeção de potência reativa devida ao elemento shunt da barra k .

As injeções de potência ativa e reativa são dadas por:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4)$$

onde:

G_{km}, B_{km} – coeficientes reais e imaginários da matriz admitância;

K – conjunto das barras vizinhas à barra k , incluindo k .

Para formulação básica do problema, são associadas a cada barra da rede elétrica quatro variáveis: V_k , θ_k , P_k e Q_k . Destas, em cada barra, duas entram como dados do problema e duas como incógnitas, onde:

V_k – magnitude da tensão nodal da barra k ;

θ_k – ângulo da tensão nodal da barra k ;

P_k – geração líquida de potência ativa da barra k ;

Q_k – geração líquida de potência reativa da barra k .

As barras podem ser classificadas como barras de carga (PQ), barras de geração (PV) e barra de referência (V θ):

PQ – fornece-se P_k e Q_k e calcula-se V_k e θ_k ;

PV – fornece-se P_k e V_k e calcula-se Q_k e θ_k ;

V θ – fornece-se V_k e θ_k e calcula-se P_k e Q_k .

De acordo com Garcia e Monticelli (1984), o problema do fluxo de potência pode ser dividido em duas etapas, Subsistema 1 e Subsistema 2.

O subsistema 1 permite encontrar, por método iterativo, V_k e θ_k de todas as barras. Já o subsistema 2, não é feito por processo iterativo (é resolvido de maneira direta) e possibilita calcular P_k e Q_k da barra V θ e Q_k das barras PV, além de outras variáveis de interesse.

Considera-se um sistema que possui N_{PQ} barras de carga, N_{PV} barras de geração e uma barra de referência. Nesta etapa são consideradas as barras do tipo PQ e PV, a fim de tornar conhecidos os valores de V e θ das barras PQ e Q e θ das barras PV. As barras V θ não entram nesta etapa já que sua solução é conhecida.

O vetor de estados deste sistema é dado por:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde θ é o vetor dos ângulos das tensões das barras PQ e PV de dimensão NPQ + NPV e V o vetor das magnitudes de tensões das barras PQ de dimensão NPQ. As incógnitas do sistema são calculadas respeitando as seguintes condições:

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{esp} - P(V, \theta) \\ Q^{esp} - Q(V, \theta) \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

onde:

ΔP e ΔQ - vetor dos desvios de potência ativa e reativa, respectivamente;

P^{esp} e Q^{esp} - vetor dos valores conhecidos de injeção de potência ativa e reativa, respectivamente;

P - vetor das injeções de potência ativa nas barras PQ e PV calculadas em (3);

Q - vetor das injeções de potência reativa nas barras PQ calculadas em (4).

O problema, conforme mostrado em (6), pode ser resolvido utilizando inúmeros métodos. Neste trabalho teorizam-se os métodos Newton-Raphson e sua versão Desacoplada Rápida, que serviram como base para a proposta desta dissertação.

2.2 MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA BASEADOS NO MÉTODO NEWTON-RAPHSON

Conforme citado na seção anterior, a necessidade de se utilizar das análises de problemas de fluxo de potência em sistemas de transmissão é reconhecida e evidente. A maioria dos métodos propostos e largamente utilizados faz uso das características dos sistemas de transmissão para poder tornar mais eficiente o processo de solução do problema, ou seja, são métodos desenvolvidos especificamente para análise de sistemas de transmissão.

Os métodos que melhor se destacaram para estas redes malhadas e de alta tensão, são o de Newton-Raphson e suas versões desacopladas. Destes, como o método de Newton-Raphson apresenta alto custo computacional, torna a versão desacoplada mais atraente.

Porém, os sistemas de distribuição estão se tornando cada vez mais ativos, através da presença da geração distribuída e de possíveis modificações em sua

topologia, que tendem a mudar de radial para anel ou malhado. Todos estes avanços influenciam na operação do sistema de transmissão e dificultam o processo de cálculo do fluxo de potência dos sistemas de distribuição.

Assim, até mesmo o conhecido método de Newton aplicado em redes de transmissão precisa passar por alterações em sua formulação para que se torne atraente na análise redes de distribuição.

2.2.1 MÉTODO NEWTON-RAPHSON

O método Newton-Raphson é um dos principais aplicados para a solução do cálculo do fluxo de potência em sistemas elétricos e é baseado na linearização de uma função em torno de um ponto inicial especificado.

Porém, a cada iteração, a matriz Jacobiana é reconstruída e recalculada, assim, a dimensão da rede interfere no armazenamento de memória e no tempo de processamento do método de Newton. No entanto, a velocidade da convergência depende mais do ponto de partida especificado do que do tamanho do problema.

Conforme citado na seção anterior, o Subsistema 1 do problema do fluxo de potência ($g(x) = 0$), pelo método de Newton, apresenta-se de acordo com o sistema linear a seguir:

$$g(x)^V = J(x^V)\Delta x^V \quad (7)$$

onde Δx éo vetor de correção de estado, v o contador de iterações e J a matriz Jacobiana, dada por:

$$J(x^V) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^V = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^V \quad (8)$$

Diversas modificações deste método foram propostas com a finalidade de aprimorar o método às particularidades dos sistemas em estudo. Neste sentido, surgiram os métodos desacoplados (método Desacoplado e método Desacoplado Rápido), que são variações do método de Newton.

Nestes métodos o processo de convergência é modificado, mas não altera a solução final uma vez que o sistema resolvido continua sendo o mesmo inicial.

Em seguida, é apresentada a teoria e desenvolvimento do método Newton-Raphson Desacoplado Rápido.

2.2.2 MÉTODO NEWTON-RAPHSON DESACOPLADO RÁPIDO

Este método, derivado do Método Newton-Raphson, apresenta uma taxa de convergência geométrica, o que resulta num maior número de iterações, entretanto, isto é compensado pelo baixo custo computacional, pois se desprezam as submatrizes M e N da matriz Jacobiana:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Realiza-se uma operação para a redução da não linearidade do sistema de equações, dividindo os valores dos desvios de potência e os elementos da matriz Jacobiana pelas tensões, com o objetivo de melhorar a convergência:

$$H' = \frac{H}{V} \quad (10)$$

$$L' = \frac{L}{V} \quad (11)$$

$$H'_{kk} = -V_k B_{kk} - \frac{Q_k}{V_k} Q_k \quad (12)$$

$$H'_{km} = V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (13)$$

$$H'_{mk} = -V_k (G_{km} \sin \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (14)$$

$$L'_{kk} = -B_{kk} + \frac{Q_k}{V_k^2} \quad (15)$$

$$L'_{km} = (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (16)$$

$$L'_{mk} = -(G_{km} \sin \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}). \quad (17)$$

Assim, tem-se:

$$\frac{\Delta P}{V} = H' \cdot \Delta \theta \quad (18)$$

$$\frac{\Delta Q}{V} = L' \cdot \Delta V. \quad (19)$$

Levando em consideração que:

- θ_{km} é pequeno, de tal forma que $\cos\theta_{km}$ é muito próximo de 1.
- B_{km} é, em magnitude, muito maior que $G_{km}\sin\theta_{km}$.
- $B_{kk} + \frac{Q_k}{V_k^2}$ é, em magnitude, muito maior que Q_k . Isso indica que as reatâncias shunt são, na grande parte dos casos, muito maiores que as reatâncias série (linhas e transformadores);
- As tensões V_k e V_m são próximas da unidade (em p.u.).

Aplicando estas aproximações às matrizes H' e L' chega-se a duas novas matrizes, chamadas de B' e B'' , respectivamente:

$$\left. \begin{array}{l} H'_{km} = -B_{km} \\ H'_{mk} = -B_{mk} \\ H'_{kk} = -B_{kk} \end{array} \right\} \rightarrow H' \cong B' \quad (20)$$

$$\left. \begin{array}{l} L'_{km} = -B_{km} \\ L'_{mk} = -B_{mk} \\ L'_{kk} = -B_{kk} \end{array} \right\} \rightarrow L' \cong B'' \quad (21)$$

As matrizes B' e B'' dependem apenas dos parâmetros da rede (impedâncias e susceptâncias dos ramos e elementos shunt), ficando, portanto, independentes das variáveis de estado do sistema (magnitudes e ângulos das tensões nodais). As novas matrizes aproximam-se bastante da matriz susceptância nodal B , com a ressalva de que em B' não constam as linhas e colunas referentes à barra $V\theta$, e em B'' não constam as linhas e colunas referentes às barras $V\theta$ e PV . Essas matrizes são constantes ao longo do processo iterativo (diz-se que o método apresenta "tangente fixa"), diminuindo o tempo computacional e a quantidade de memória antes usada para calcular e inverter H e L a cada iteração. Daí o método ser denominado desacoplado rápido, cujas equações são:

$$\frac{\Delta P}{V} = B' \cdot \Delta \theta \quad (22)$$

$$\frac{\Delta Q}{V} = B'' \cdot \Delta V. \quad (23)$$

Ou ainda:

$$[\Delta P] = [B'] \cdot \Delta \theta \quad (24)$$

$$[\Delta Q] = [B''] \cdot \Delta V. \quad (25)$$

Assim, obtém-se os dois sub-sistemas a serem resolvidos pelo método Desacoplado Rápido:

$$B' \Delta \theta^k = \frac{\Delta P^k(V^k, \theta^k)}{V} \quad (26)$$

para:

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

$$B' \Delta V^k = \frac{\Delta Q^k(V^k, \theta^{k+1})}{V} \quad (27)$$

para:

$$V^{k+1} = V^k + \Delta V^k.$$

As matrizes B' e B'' são quadradas. A matriz B' tem dimensão $(N_{PQ} + N_{PV})$ e a B'' tem dimensão (N_{PQ}) , para:

N_{PQ} = número de barras do tipo PQ do sistema

N_{PV} = número de barras do tipo PV.

Os elementos das matrizes B' e B'' podem ser compostos de duas formas:

- (a) pelas susceptâncias (B) das linhas;
- (b) pelo inverso da reatância (X) das linhas.

Assim, têm-se quatro versões possíveis do método DR tradicional: BB, BX, XB e XX, conhecidas em função do elemento considerado em sua constituição.

Foi observado um melhor desempenho do método quando, na construção da matriz B', foram desprezadas as resistências séries das linhas e os elementos da

rede relacionados à potência reativa. Essa versão do método Desacoplado Rápido é a versão XB.

Outra versão relevante é a BX, na qual as resistências são desprezadas na montagem da matriz B'' , ao invés da B' . Os elementos shunt continuam sendo ignorados em B' e em B'' passam a ser duplicados.

Ambas as versões apresentam convergências semelhantes quando se trata de sistemas de alta tensão. No entanto, a versão BX apresenta uma melhor convergência em sistemas que possuem linhas com baixas relações R/X. Assim, este método é capaz de lidar com redes malhadas e com presença de geradores, mas mostra dificuldade de convergência caso os sistemas de distribuição tenham altas relações R/X e topologia radial. Todavia, o Método Desacoplado Rápido unido à normalização complexa pode ser capaz de solucionar o problema de fluxo de potência mesmo em sistemas de distribuição com altas relações R/X, pois, através da normalização complexa, pode-se ajustar virtualmente a relação R/X das linhas para níveis desejáveis.

2.2.3 Algoritmo para solução do fluxo de potência via método Desacoplado Rápido

2.2.3.1 Subsistema 1

i. Iniciar os contadores de iteração $p = q = 0$ e os indicadores de convergência $KP = KQ = 1$. Escolher os valores iniciais das magnitudes das tensões das barras PQ e dos ângulos das tensões das barras PQ e PV (montagem do vetor de estados x).

ii. Calcular as matrizes B' e B'' .

iii. Calcular $P_k(V^Q, \theta^P)$ para as barras PQ e PV e o desvio ΔP^P .

iv. Testar a convergência:

- Se $\max\{|\Delta P_k^P|\} \leq \varepsilon_p$ a meia-iteração $P\theta$ convergiu, fazer $KP = 0$. Se $KQ = 0$, o processo convergiu para a solução (V^P, θ^Q) , ir para o passo (*xi*). Caso contrário, ir para o passo (*vii*).
- Caso contrário, seguir em frente.

v. Encontrar o novo valor de $\theta^{P+1} = \theta^P + \Delta\theta^P$ sendo $\Delta\theta^P$ determinado com a solução do sistema linear $\Delta\theta^P(V^Q, \theta^P) = B' \Delta\theta^P$.

vi. Incrementar o contador de iterações $p = p + 1$ e fazer $KP = 1$.

vii. Calcular $Q_k(V^Q, \theta^P)$ para as barras PQ e os desvios ΔQ^Q .

viii. Testar a convergência:

- Se $\max\{|\Delta Q_k^Q|\} \leq \varepsilon_p$ a meia-iteração QV convergiu, fazer $KQ = 0$. Se $KP = 0$, o processo convergiu para a solução $((V^P, \theta^Q)$, ir para o passo (xi). Caso contrário ir para o passo (ii).
- Caso contrário, seguir em frente.

ix. Encontrar o novo valor de $V^{Q+1} = V^Q + \Delta V^Q$ sendo ΔV^Q determinado com a solução do sistema linear $\Delta V^Q(V^Q, \theta^P) = B''\Delta V^Q$

x. Incrementar o contador de iterações $q = q + 1$ e fazer $KP = 1$. Voltar ao passo (iii).

2.2.3.2 Subsistema 2

xi. Calcular P_k para a barra V θ e Q_k para as barras V θ e PV.

2.3 NORMALIZAÇÃO CONVENCIONAL (p.u.)

Sistema por unidade é uma forma de expressar as grandezas elétricas em um circuito de forma normalizada, com base em valores pré-determinados e tem como objetivo a simplificação dos cálculos numéricos. Qualquer grandeza pode ser traduzida para a forma por unidade através da transformação:

$$\text{Valor da Grandeza}_{pu} = \frac{\text{Valor da Grandeza}_{real}}{\text{Valor da Grandeza}_{base}} \quad (28)$$

No caso específico de estudos realizados no Sistema Elétrico de Potência, são necessárias duas bases de grandezas independentes, a partir das quais as demais bases são calculadas. Uma vez estipulados dois valores de base os outros dois serão determinados através da relação:

$$V = Z.I \quad (29)$$

$$S = V.I. \quad (30)$$

Em uma rede com transformadores, diferentes bases de tensão são escolhidas para cada nível de tensão e são relacionadas pela relação de transformação dos transformadores. O valor escolhido da base de potência é comum para todo o sistema.

2.4 NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE (*c.p.u.*)

A técnica de rotação de eixos apresentada por Garcia e Monticelli (1984), sugere a aplicação de uma rotação de eixos nas admitâncias e nas potências da rede original a fim de obter uma rede com novas relações R/X. Em 2010, Lourenço, Loddi e Tortelli reapresentaram uma proposta, chamada normalização complexa por unidade (*c.p.u.*) que é uma extensão da normalização convencional das grandezas elétricas do sistema de potência (*p.u.*).

Para normalizar um sistema a fim de representá-lo em *p.u.* são adotados valores de base reais para tensão e potência. A normalização complexa por unidade (*c.p.u.*) consiste na aplicação de uma base de potência complexa, como indicado em (31):

$$S_{base} = |S_{base}|e^{-j\phi_{base}} \quad (31)$$

sendo ϕ_{base} o ângulo de S_{base} .

As bases de tensão seguem a normalização convencional:

$$V_{base} = |V_{base}|e^{-j} = V_{base} \quad (32)$$

Já a base de impedância terá um valor complexo, pois ela sofre influência do ângulo da base de potência:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}^*} = |Z_{base}|e^{-j(\phi_{base})}. \quad (33)$$

O ângulo da impedância de base varia, pois existe a influência do ângulo de base da potência na normalização. Já a magnitude da impedância de base é a mesma, independente do tipo de normalização (convencional ou complexo).

Assim, pode-se determinar:

$$R_{cpu} = |Z_{pu}| \cos(\theta + \phi_{base}) \quad (34)$$

$$X_{cpu} = |Z_{pu}| \sin(\theta + \phi_{base}) \quad (35)$$

onde θ é o ângulo de impedância da linha de distribuição.

De (34) e (35), tem-se a relação X/R:

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = \tan(\theta + \phi_{base}). \quad (36)$$

A relação mostrada em (33) mostra que a relação R/X das linhas de distribuição pode ser ajustada em função do ângulo base, ϕ_{base} .

Após a aplicação da normalização complexa em todo o sistema, as impedâncias assumem novos valores. Para conservar as tensões complexas das barras, faz-se necessário que as injeções de potência também sejam normalizadas pela mesma base:

$$S_{cpu} = \frac{|S_{VA}| e^{j\delta}}{|S_{base}| e^{-j\phi_{base}}} = |S_{pu}| e^{j(\delta + \phi_{base})} \quad (37)$$

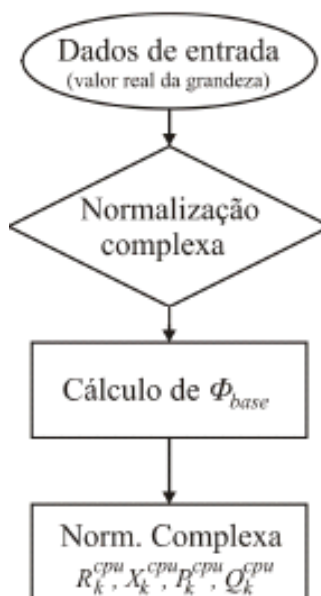
$$S_{cpu} = (P_{pu} + jQ_{pu}) e^{j\phi_{base}} \quad (38)$$

$$P_{cpu} = |S_{pu}| \cos(\delta + \phi_{base}) \quad (39)$$

$$Q_{cpu} = |S_{pu}| \sin(\delta + \phi_{base}). \quad (40)$$

A Figura 1 apresenta o fluxograma que descrevem as etapas da Normalização Complexa por unidade:

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA DA NORMALIZAÇÃO C.P.U.



FONTE: O autor (2019).

2.5 CÁLCULO DO ÂNGULO DE BASE

Na literatura encontram-se algumas técnicas de cálculo do ângulo, neste trabalho chamado de ângulo de base, voltadas para o problema do ajuste das altas relações R/X de sistemas de distribuição a fim de melhorar a convergência do método Desacoplado Rápido.

A técnica da rotação dos eixos, proposta por Garcia e Monticelli (1984), consiste em baixar as relações R/X da distribuição para o nível das redes de transmissão e, assim, torná-las mais adequadas ao desempenho do método Desacoplado Rápido, mantendo o estado de operação do sistema igual ao original. Neste caso, define-se, de maneira empírica, um ângulo comum a todos os ramos.

Sirait e Irisawa (1995) sugeriram algumas alterações na maneira de calcular o ângulo brevemente mencionada no anexo de Haley e Ayres (1985). A modificação mais relevante é a proposta de uma única rotação para todas as equações a fim de tornar a formulação mais simples e manter o sentido físico do sistema depois de rotacionado. O cálculo do ângulo de rotação proposto é dado pela média dos ângulos individuais de todos os elementos diagonais da matriz de admitâncias:

$$\varnothing_{base} = \frac{\sum tg^{-1}\left(\frac{G_{kk}}{B_{kk}}\right)}{N_b} \quad (41)$$

onde N_b o número de barras do sistema. Os autores validam esta equação comparando o ângulo calculado para uma dada rede com seu ângulo ótimo, encontrado por tentativa e erro.

A sugestão de Medeiros e Lucas (2002), chamada rotação ótima dos eixos, fundamenta-se no cálculo de ângulos de rotação individuais para cada barra da rede através de técnicas de otimização para minimizar os acoplamentos $P\theta$ - QV , ou seja, após a rotação as submatrizes M e N devem ser quase nulas. Neste caso, após a rotação, a rede perde seu significado físico. Além disso, as matrizes de rede perdem a simetria, aumentando o esforço computacional. Embora a técnica apresente tais particularidades, o estado da rede original é mantido.

Uma outra técnica, conhecida por rotação automática dos eixos, foi sugerida por Gomes (2006). Esta técnica reuniu os dois grandes benefícios vistos nos métodos de Garcia e Monticelli (1984) e de Medeiros e Lucas (2002), resultando no cálculo de apenas um ângulo de rotação utilizando a técnica de otimização de minimizar os acoplamentos $P\theta$ - QV . Assim, foi possível manter o sentido físico da rede após a rotação. O ângulo é calculado pela média dos ângulos individuais de cada ramo do sistema, resultado da aplicação da técnica dos mínimos quadráticos e da condição de otimalidade:

$$\varnothing_{base} = \frac{\sum 90^\circ - tg^{-1}\left(\frac{x_{km}}{r_{km}}\right)}{N_l} \quad (42)$$

onde x_{km} e r_{km} são a reatância e a resistência séries dos ramos, respectivamente, e N_l é o total de linhas.

Recentemente, foi feito um estudo comparativo entre o método proposto por Siraitelrisawa (1995), baseado nos valores diagonais da matriz de admitância de barras, e o método sugerido por Gomes (2006), baseado na impedância série das linhas do sistema. Este estudo mostrou que apesar das metodologias serem distintas, os ângulos determinados por ambos os métodos são muito similares (DURCE; LOURENÇO; TORTELLI,2010).

Desta maneira, para aplicar a *c.p.u.* neste trabalho, foi escolhida a metodologia de cálculo do ângulo de base proposta por Gomes (2006), dada pela Eq.42.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a formulação do problema do fluxo de potência e foi feito o detalhamento dos métodos iterativos aplicados à sistemas de transmissão em distribuição que nortearam a proposta do trabalho.

Foi apresentado o método de Newton-Raphson, um dos métodos mais tradicionais para o cálculo do fluxo de potência. Porém, apesar de sua grande importância, ele apresenta alto custo computacional, o que torna mais atraente os seus métodos Desacoplados mais interessantes.

Em seguida foi descrito o método Newton-Raphson Desacoplado Rápido, que tem a mesma precisão e confiabilidade do método tradicional, porém com menor custo computacional. Como os sistemas de distribuição estão se tornando cada vez mais ativos no sistema elétrico. Este método ainda precisa passar por alterações para se tornar atraente para a análise de sistemas de distribuição.

Neste capítulo também foram abordados temas relacionados à normalização convencional e normalização complexa. Com a realização das normalizações é possível simplificar os problemas de estudo do sistema elétrico de potência. A *c.p.u.* utiliza uma base de potência complexa, porém as bases de tensão da rede são conservadas reais.

A *c.p.u.* torna possível alterar a alta relação R/X dos sistemas de distribuição, ou seja, ela possibilita a transformação de uma rede original em uma rede normalizada com novos parâmetros de rede que condizem com os níveis típicos de redes de transmissão. Assim, torna viável o uso do método Newton-Raphson no cálculo do fluxo de potência em sistemas de distribuição, com algumas alterações.

Assim, foi apresentado todo o embasamento teórico, que torna possível o entendimento e desenvolvimento da proposta deste trabalho.

3 METODOLOGIA PROPOSTA –ANÁLISE UNIFICADA DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

Neste capítulo, será apresentada uma extensão da formulação convencional do fluxo de potência através do método Newton, a fim de adequar a representação física de alimentadores de distribuição em sistemas T&D interconectados. O método resolve o problema do fluxo de potência desta rede, possibilitando analisar a influência dos alimentadores de distribuição na operação de sistemas de transmissão, porém apresenta algumas limitações.

Em seguida, será apresentada a proposta deste trabalho, que consiste no cálculo do fluxo de potência integrado entre o sistema de transmissão e distribuição e também entre sistemas de distribuição, baseado na associação do método Desacoplado Rápido com a normalização complexa.

3.1 FLUXO DE POTÊNCIA PARA REDES T&D COM COMPENSAÇÃO

Em 2011, foi proposto por C.C. Durce et al., o cálculo do fluxo de potência para redes T&D com Compensação. Como o Sistema de Transmissão está normalizado em *p.u.* e o Sistema de Distribuição está normalizado em *c.p.u.*, faz-se necessário um ajuste entre o sistema normalizado em *c.p.u.* e a rede original. Os ajustes das injeções de potência ativa e reativa das barras de fronteira do sistema T&D são realizados de acordo com as Equações (43) e (44):

$$P_k^{nova} = P_k^{pu} - \sum_{i=1, nA} P_{k,j}^{cpu} \quad (43)$$

$$Q_k^{nova} = Q_k^{pu} - \sum_{i=1, nA} Q_{k,j}^{cpu} \quad (44)$$

Onde:

P_k^{nova} , Q_k^{nova} – novas injeções de potência ativa e reativa na barra de fronteira k , quando os alimentadores de distribuição são fisicamente representados, respectivamente;

P_k^{pu} , Q_k^{pu} – valores em *p.u.* das injeções de potência ativa e reativa na barra de fronteira k quando os alimentadores de distribuição não são fisicamente representados, respectivamente;

$P_{k,i}^{cpu}$, $Q_{k,i}^{cpu}$ – valores em *c.p.u.* das injeções de potência ativa e reativa exigidas pelo alimentador i , respectivamente;

nA – número de alimentadores de distribuição que são fisicamente representados.

A normalização *c.p.u.* é utilizada para ajustar os índices de R/X do alimentador de distribuição que foi selecionado para ser fisicamente representado no modelo da rede. A escolha de um ângulo de base adequado para cada alimentador garante que as relações R/X de todo o sistema T&D serão equivalentes aos níveis tradicionais dos sistemas de transmissão.

Aqui, estas discrepâncias entre as injeções de potência, causadas pelo uso de diferentes ângulos de base na *c.p.u.*, são tratadas através da inserção de injeções de potências fictícias de compensação em cada barra de fronteira entre as redes de transmissão e de distribuição. As potências de compensação ativa e reativa são modeladas como novas variáveis de estado.

Além disso, as relações entre os fluxos de potência ativa e reativa através das linhas adjacentes a cada barra de fronteira estão incluídas no problema do fluxo de potência como novas equações, resultando em um conjunto não-redundante de equações algébricas.

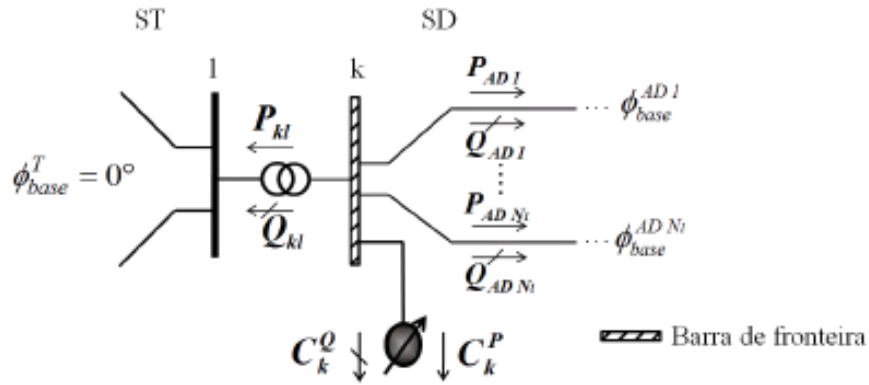
O vetor de estados é estendido para incluir as potências de compensação ativa e reativa em cada barra de fronteira.

Assim, a compensação na barra de fronteira k , ilustrada na Figura 2, é modelada pelo tratamento de suas potências ativa e reativa, C_k^P e C_k^Q como novas variáveis de estado. Isto resulta em um vetor de estados estendido, dado por:

$$\bar{x} = [\theta \ V \ C^P C^Q]^T \quad (45)$$

onde C^P e C^Q são os vetores das potências de compensação ativa e reativa, respectivamente, de dimensões $(N_{fr} \times 1)$, em que N_{fr} é o número de barras de fronteira.

FIGURA 2 – INJEÇÃO DE POTÊNCIA NAS BARRAS



FONTE: C.C. Durce (2011).

Assim, as expressões de injeções de potência nas barras de fronteira devem ser modificadas para adequar as mudanças no conjunto de variáveis de estado. Assim, as injeções de potência ativa e reativa em uma barra de fronteira k podem ser calculadas por:

$$P_k = C_k^P + V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (46)$$

$$Q_k = C_k^Q + V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (47)$$

onde K é o conjunto de barras adjacentes à barra k , incluindo a própria barra k .

Ao mesmo tempo, a informação da relação entre o fluxo de potência através da linha de distribuição conectada à barra de fronteira e o fluxo de potência através do transformador de fronteira, está incluída na formulação do fluxo de potência como novos conjuntos de equações a serem resolvidas juntamente com as equações da rede.

Deste modo, se o transformador de fronteira é conectado através dos nós k e l , onde k é a barra de fronteira e N_l as linhas de distribuição, são conectadas na barra k , as seguintes equivalências se aplicam:

$$PB_k = P_{kl}^{cpu}(V, \theta) + \sum_{m \in \Omega_k^D} P_{km}^{cpu}(V, \theta) = 0 \quad (48)$$

$$QB_k = Q_{kl}^{cpu}(V, \theta) + \sum_{m \in \Omega_k^D} Q_{km}^{cpu}(V, \theta) = 0 \quad (49)$$

onde:

PB_k, QB_k - balanço de fluxo de potência ativa e reativa na barra de fronteira, respectivamente, considerando os ramos adjacentes na mesma base de potência complexa;

$P_{km}^{cpu}, Q_{km}^{cpu}$ - fluxos de potência ativa e reativa através do transformador de fronteira convertidos para o mesmo ângulo de base dos alimentadores adjacentes, respectivamente;

Ω_k^D - conjunto das barras de distribuição adjacentes à barra de fronteira k.

Um ângulo de base igual a zero é a escolha mais adequada para a normalização do sistema de transmissão, enquanto que para cada alimentador de distribuição é calculado um ângulo de base ϕ_{base} .

Supondo que a mesma magnitude da base de potência é escolhida para o sistema de transmissão e para os alimentadores de distribuição, os fluxos de potência ativa e reativa através do transformador de fronteira podem ser convertidos para o ângulo da base dos alimentadores adjacentes aplicando as equações de potência em *c.p.u.*, tem-se:

$$P_{kl}^{cpu} = P_{kl}^{pu}(V, \theta) \cos \phi_{base} - Q_{kl}^{pu}(V, \theta) \sin \phi_{base} \quad (50)$$

$$Q_{kl}^{cpu} = Q_{kl}^{pu}(V, \theta) \cos \phi_{base} + P_{kl}^{pu}(V, \theta) \sin \phi_{base} \quad (51)$$

onde:

P_{kl}^{pu}, Q_{kl}^{pu} - são os fluxos de potência ativa e reativa através do transformador de fronteira no ângulo de base original do sistema de transmissão (normalmente zero), que são calculados pelas equações de fluxo de potência convencional.

Juntamente com a extensão do vetor de estados, mostrado na Equação 45, o conjunto de equações algébricas do fluxo de potência, composto pelos desvios de

potência usuais, é aumentado com a inclusão das novas equações representadas pelas Eqs. 48 e 49, as quais incluem no problema a representação das injeções de potência fictícias de compensação.

O conjunto final aumentado das equações de fluxo de potência é dado por:

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta P(V, \theta, C^p) \\ \Delta Q(V, \theta, C^p) \\ \Delta PB(V, \theta) \\ \Delta QB(V, \theta) \end{bmatrix} = 0 \quad \begin{cases} NPQ + NPV \\ NPQ \\ N_{fr} \\ N_{fr} \end{cases} \quad (52)$$

onde:

NPQ, NPV - número de barras PQ e PV, respectivamente;

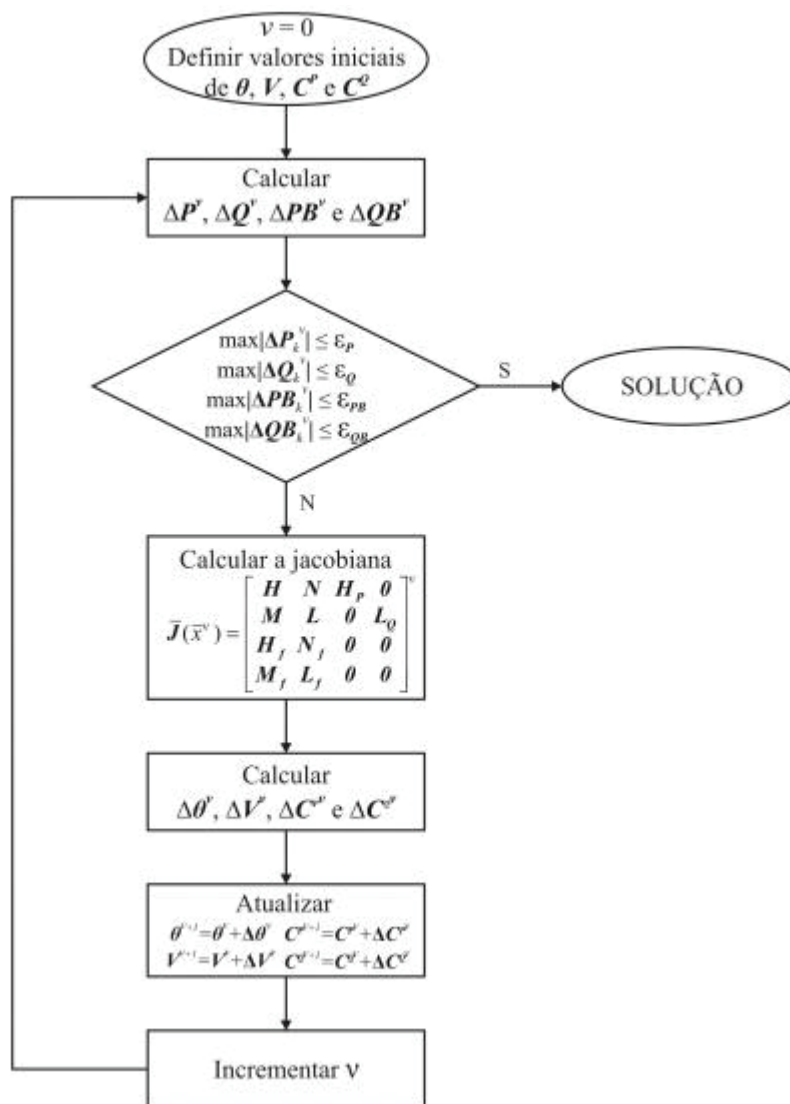
f(.) - função vetorial de dimensão n_x , onde n_x é o número de incógnitas do fluxo de potência estendido, ou seja, $n_x = 2NPQ + NPV + 2N_{fr}$;

ΔP , ΔQ - desvios de potência ativa e reativa para cada barra, respectivamente, calculados de acordo com as Equações 46 e 47 e considerando a existência da potência de compensação apenas nas barras de fronteira;

ΔPB , ΔQB - novas equações relacionadas aos fluxos de potência de transmissão e distribuição através das linhas de transmissão e distribuição adjacentes à barra de fronteira, descritas nas Equações 48 e 49.

O problema do fluxo de potência estendido, representado pela Equação 52, é resolvido pelo método Newton-Raphson. A Figura 3 apresenta o fluxograma do problema do fluxo de potência estendido resolvido pelo método de Newton.

FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DO FP ESTENDIDO VIA MÉTODO DE NEWTON



FONTE: C.C. Durce(2011).

Esta metodologia permite a análise do fluxo de potência T&D de maneira unificada, porém, são adicionadas injeções de potência fictícias de compensação - que entram na formulação do fluxo de potência como novas variáveis de estado - para permitir o ajuste do balanço de potência nas barras que conectam os SDs ao ST sob diferentes normalizações, atrelado a uma formulação dedicada.

Assim, tendo em vista a necessidade de um método mais simples, este trabalho propõe a resolução do fluxo de potência de maneira integrada entre T&D, sem utilizar-se do uso da compensação, conforme será detalhado na próxima seção.

3.2 FLUXO DE POTÊNCIA PARA REDES T&D SEM COMPENSAÇÃO

No método com compensação fictícia, apresentado anteriormente, as impedâncias dos transformadores de conexão entre o ST e os SDs são normalizadas conforme a normalização aplicada ao sistema de transmissão, ou seja, as impedâncias são normalizadas utilizando a normalização convencional em pu. Isto causa a seguinte estrutura na matriz Y_{barra} :

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} \dots & & & & \\ & y_{TD}^{pu} + \sum_{m \in \Omega_k^{ST}} y_m^{pu} & & -y_{TD}^{pu} & \\ & -y_{TD}^{pu} & & -y_{TD}^{pu} + \sum_{m \in \Omega_k^{SD}} y_m^{cpu} & \\ & & & & \dots \end{bmatrix} \quad (53)$$

Na qual:

- y_{TD} ; é a admitância da linha de conexão entre o ST e o SD;
- Ω_k^{ST} ; é o conjunto de barras conectadas à barra k pertencente ao ST;
- Ω_k^{SD} é o conjunto de barras conectadas à barra k pertencente ao SD.

Como se pode ver, no quarto elemento da matriz da Equação 53, há uma mistura entre as diferentes normalizações durante a montagem da matriz Ybarra, causando assimetria na mesma. Isto se reflete na matriz jacobiana e causa a necessidade da incorporação das injeções fictícias para o ajuste das potências calculadas para a primeira barra dos sistemas de distribuição.

Já na proposta sem a utilização de injeções de compensação, aplica-se a normalização complexa para todo o sistema T&D, como mostrado pela Equação 54:

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} \dots & & & & \\ & y_{TD}^{cpu} + \sum_{m \in \Omega_k^{ST}} y_m^{cpu} & & -y_{TD}^{cpu} & \\ & -y_{TD}^{cpu} & & -y_{TD}^{cpu} + \sum_{m \in \Omega_k^{SD}} y_m^{cpu} & \\ & & & & \dots \end{bmatrix} \quad (54)$$

Assim, Y_{barra} pode ser resumida como:

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} Y_{barra}^{cpu_1} \\ Y_{barra}^{cpu_2} \\ \vdots \\ Y_{barra}^{cpu_n} \end{bmatrix} \quad (55)$$

sendo $Y_{barra}^{cpu_1}, \dots, Y_{barra}^{cpu_n}$ as matrizes admitância dos subsistemas de transmissão (ST) e dos subsistemas de distribuição 1 até n do sistema T&D interligado, cada um normalizado conforme a normalização complexa.

Conseqüentemente o problema de fluxo de potência interligado não necessita mais de injeções fictícias de compensação, muito menos das novas equações de balanço de potência na barra inicial dos SD explicitamente representados. Assim, não há alteração no número de equações do problema e o sistema a ser resolvido é idêntico ao apresentado na Seção 2.2.2, contudo, a jacobiana associada ao problema segue a mesma estrutura da Equação 55, resultando no seguinte sistema a ser resolvido iterativamente pelo Método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{cpu_1} \\ \vdots \\ \Delta P^{cpu_n} \\ \Delta Q^{pu} \\ \Delta Q^{cpu_1} \\ \vdots \\ \Delta Q^{cpu_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{cpu_1} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ H^{cpu_n} & 0 \\ 0 & L^{cpu_1} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & L^{cpu_n} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Na qual:

- $\Delta P^{cpu_1}, \Delta Q^{cpu_1}, \dots, \Delta P^{cpu_n}, \Delta Q^{cpu_n}$: são os vetores de desvio de potência ativa e reativa relacionados aos diferentes subsistemas da rede elétrica;
- $H^{cpu_1}, L^{cpu_1}, \dots, H^{cpu_n}, L^{cpu_n}$: são as sub-matrizes jacobianas associadas ao problema do cálculo de fluxo de potência dos diferentes subsistemas da rede elétrica;

- $\Delta\theta$ e ΔV : são os vetores de desvios angulares e de tensão, respectivamente, da rede elétrica inteira.

Ou seja, mesmo com diferentes partes do sistema T&D normalizadas em *c.p.u.*, o Método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido permanece inalterado, seguindo os mesmos passos de solução apresentados na Seção 2.2.2. As matrizes jacobianas associadas aos subproblemas ativo e reativo também são subdivididas por subsistemas. Assim, os subsistemas a serem resolvidos são apresentados pelas Equações 57 e 58:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{cpu_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta P^{cpu_n} \end{bmatrix} / V = \begin{bmatrix} B'^{cpu_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ B'^{cpu_n} \end{bmatrix} \cdot [\Delta\theta] \quad (57)$$

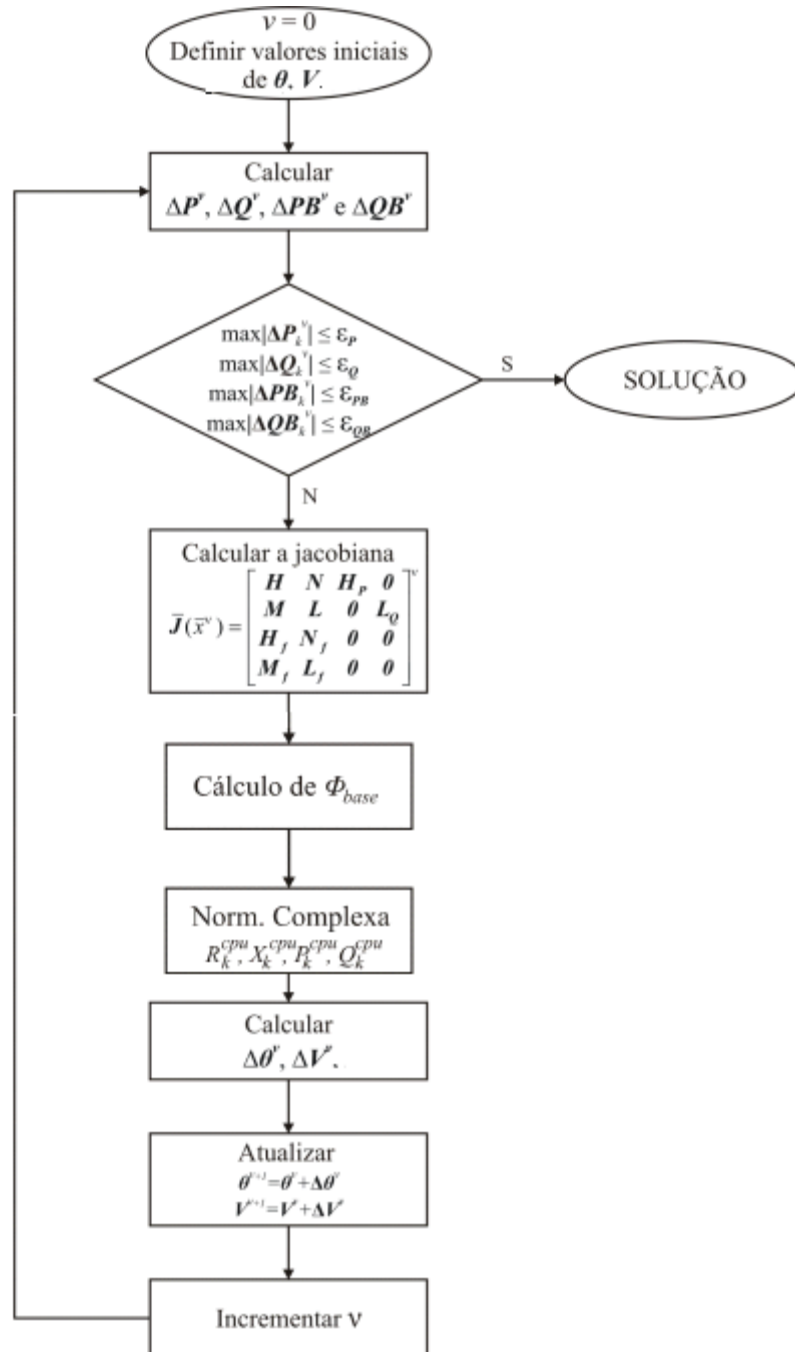
$$\begin{bmatrix} \Delta Q^{cpu_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta Q^{cpu_n} \end{bmatrix} / V = \begin{bmatrix} B''^{cpu_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ B''^{cpu_n} \end{bmatrix} \cdot [\Delta V]. \quad (58)$$

De forma resumida, esta abordagem torna o problema do fluxo de potência unificado T&D e/ou D&D uma simples questão de se aplicar corretamente as normalizações em todas as partes do sistema e, em seguida, solucionar o fluxo de potência através do Método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido.

Deve-se ressaltar que a metodologia aqui apresentada representa um avanço em relação às proposições anteriores tendo em vista que a mesma dispensa a utilização de injeção de potência fictícia na barra de fronteira entre o sistema de transmissão e o de distribuição, como proposto em trabalhos anteriores [C.C. Durce et al.].

A Figura 4 apresenta o fluxograma do problema do fluxo de potência estendido resolvido pelo método de Newton.

FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DO FP ESTENDIDO VIA MÉTODO DE NEWTON

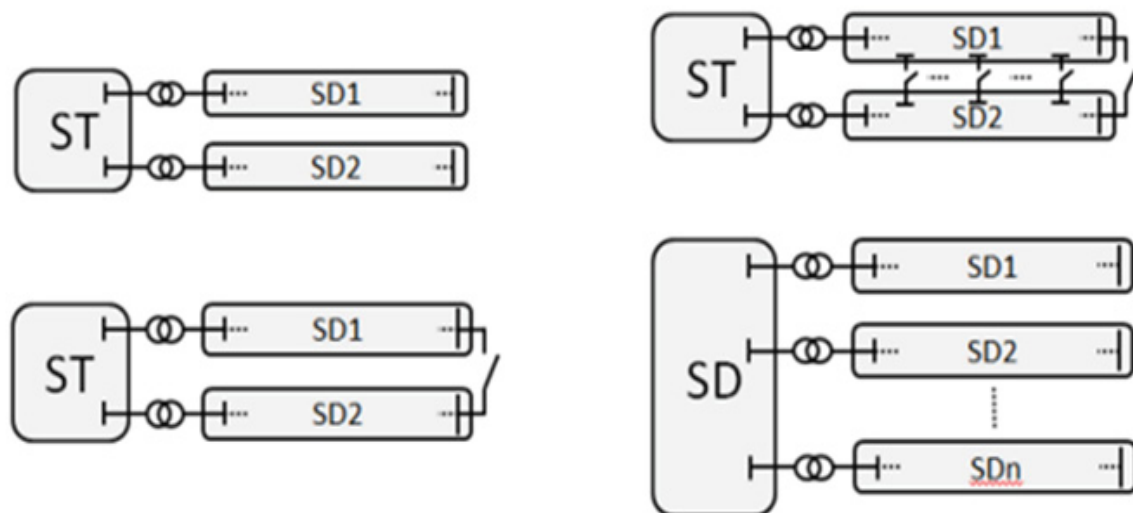


FONTE: O autor (2019).

Nessa nova proposta, nenhuma equação/variável de estado adicional é necessária para resolver o problema de fluxo de potência integrado T&D ou D&D.

Mesmo assim, essa abordagem continua capaz de resolver de maneira efetiva arranjos de qualquer natureza entre o sistema de transmissão e alimentadores de distribuição, bem como entre sistemas de distribuição como nos diferentes esquemas topológicos ilustrados na Figura 5:

FIGURA 5 – ESQUEMAS TOPOLÓGICOS T&D



FONTE: O autor (2019).

O advento da geração de energia próxima ao consumidor sugere que os alimentadores de distribuição passem a incorporar mudanças em sua estrutura a fim de aumentar a segurança, a eficiência e a confiabilidade na operação e no abastecimento de energia. Para atender este novo cenário, as redes de distribuição tenderão a adotar topologias com maiores níveis de redundância.

Assim, apresenta-se aqui, um método capaz de lidar com os sistemas de distribuição emergentes, pois este não possui dificuldade de solução em sistemas malhados e com presença de geração distribuída, além de possuir custo computacional reduzido ao manter a matriz jacobiana constante durante todo o processo iterativo, tornando-o atrativo para o cálculo de fluxo de potência em sistemas de grande porte, como é o caso de sistemas T&D.

De forma resumida, esta abordagem torna o problema do fluxo de potência unificado T&D e/ou D&D uma simples questão de se aplicar corretamente as normalizações em todas as partes do sistema e, em seguida, solucionar o fluxo de potência através do Método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentado o método de cálculo do fluxo de potência T&D com compensação. Este método resolve o problema do fluxo de potência da rede, possibilitando analisar a influência dos alimentadores de distribuição na operação de sistemas de transmissão, porém, são adicionadas injeções de potência fictícias de compensação, que entram na formulação do fluxo de potência como novas variáveis de estado, tornando o problema mais complexo de ser resolvido.

Em seguida, foi descrita a metodologia proposta neste trabalho. Foi apresentado um esquemático e a formulação do fluxo de potência através do método Newton-Raphson Desacoplado Rápido em conjunto com a normalização complexa.

Esta proposta pode aplicar diferentes normalizações para o ST e SDs. Contudo, estas diferenças se refletem na normalização da impedância do transformador de conexão T&D de forma a manter a simetria da matriz de admitância Y_{barra} . Esta simetria também se reflete na matriz Jacobiana associada ao problema de fluxo de potência e descarta a necessidade de variáveis de compensação nas conexões entre os diferentes sistemas, mantendo intacta a formulação do fluxo de potência tradicional.

A abordagem do fluxo de potência proposta neste trabalho é baseada na aplicação da *c.p.u.* para diminuir os índices R/X dos alimentadores de distribuição fisicamente representados aos mesmos níveis dos sistemas de transmissão, a fim de tornar possível o uso do método de Newton e suas versões desacopladas.

A metodologia proposta está orientada a acompanhar as mudanças pelas quais os sistemas de transmissão e de distribuição vêm atravessando, devido aos impactos resultantes do conceito *Smart Grid* em todo o sistema elétrico.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

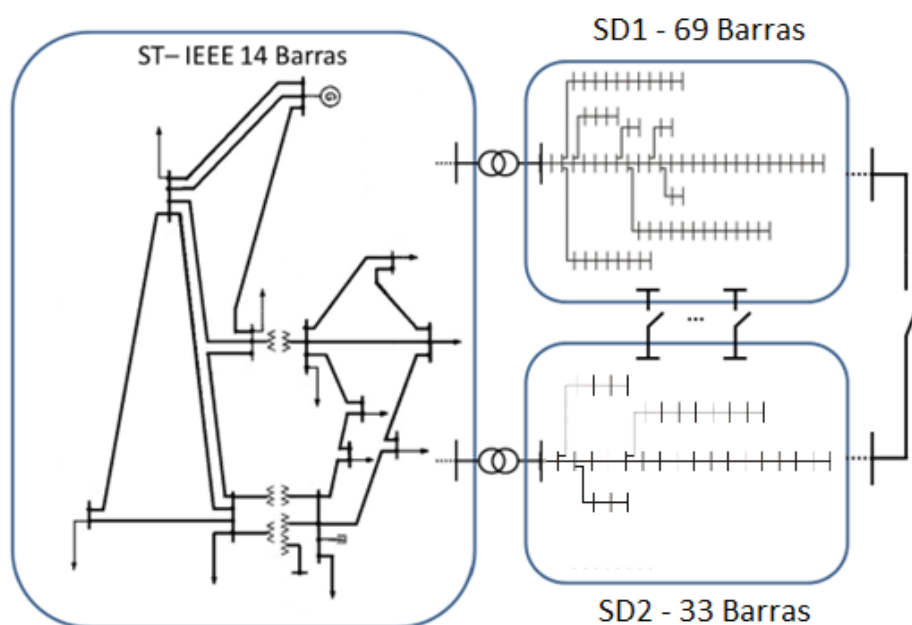
Neste capítulo faz-se a apresentação dos resultados de simulação computacional buscando demonstrar a efetividade da presente proposta no cálculo de fluxo de potência integrado de redes T&D, e sua relevância no sentido de permitir avaliar de modo consistente a influência das redes de distribuição ativas no sistema de transmissão.

Foi utilizado um sistema teste, com diferentes configurações de rede e conexão de GD.

4.1 SISTEMA TESTE

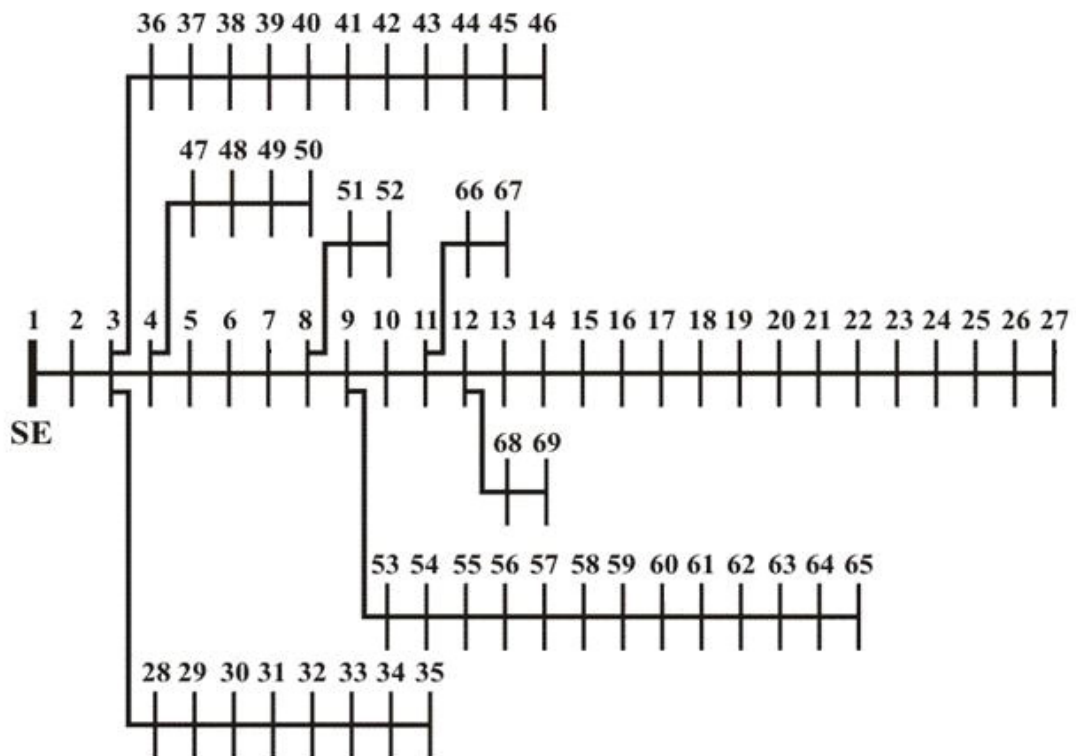
O sistema teste utilizado para a realização das simulações consiste na conexão de um alimentador de distribuição de 69 barras (SD1) ligado à barra 11 do sistema de transmissão do IEEE-14 barras e outro alimentador de distribuição de 33 barras (SD2) ligado à barra 12 do sistema de transmissão (ST), como ilustrado esquematicamente na Figura 6.

FIGURA 6 – ESQUEMÁTICO DO SISTEMA TESTE



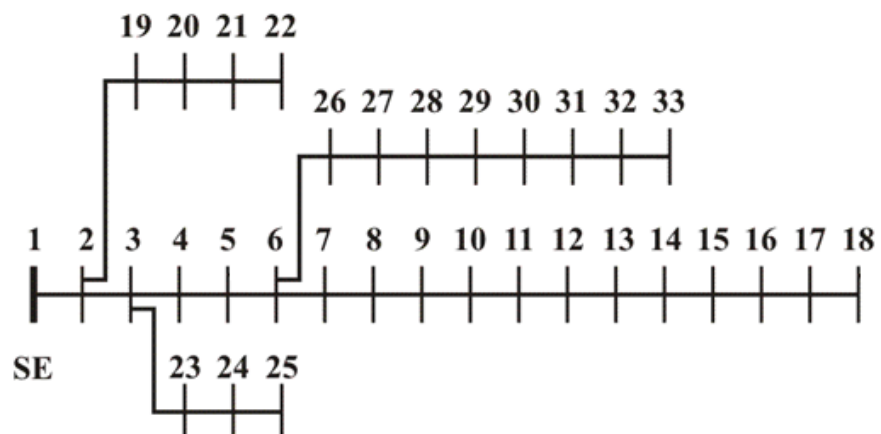
As Figuras 7 e 8 ilustram o esquemático detalhado dos Sistemas de Distribuição SD1 e SD2, respectivamente:

FIGURA 7 – ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE 69 BARRAS -SD1



FONTE: O autor (2019).

FIGURA 8 – ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE 33 BARRAS -SD2



FONTE: O autor (2019).

Para a análise do desempenho, são considerados diferentes casos, relativos aos arranjos topológicos e a participação de GD, e serão apresentados nas seções em seguida.

4.2 DESEMPENHO QUANTO À VARIAÇÃO DO ÂNGULO BASE

Nesta seção, o desempenho computacional da metodologia proposta é avaliado em relação ao número de iterações necessárias para convergência, considerando a variação dos ângulos base aplicado aos sistemas de distribuição e transmissão. Considerou-se três métodos para avaliação:

- a) Convencional - Todo o sistema normalizado em *p.u.*: ângulo do ST, SD1 e SD2 = 0°.
- b) CPU Com Compensação - Sistema de Transmissão normalizado em *p.u.* e sistemas de distribuição em *c.p.u.* (C.C. Durce et al.): ângulo do ST=0°, SD1=SD2=80°.
- c) CPU Sem Compensação - Todo o sistema normalizado em *c.p.u.*: ângulo do ST=17°, SD1=76° e SD2=49°.

O método proposto neste trabalho, é o método c, e nele, o cálculo do melhor ângulo, que traria os melhores resultados, foi feito calculando-se o ângulo médio de cada sistema. Ele serve para dar uma boa indicação de qual seriam os ângulos adequados. Assim, um ângulo adequado fica relacionado à diferença para 90 graus desse ângulo médio.

Utilizando a Equação 42, chegou-se aos seguintes resultados para os ângulos adotados nas simulações:

$$\phi_{base_ST}=14$$

$$\phi_{base_SD1}=76$$

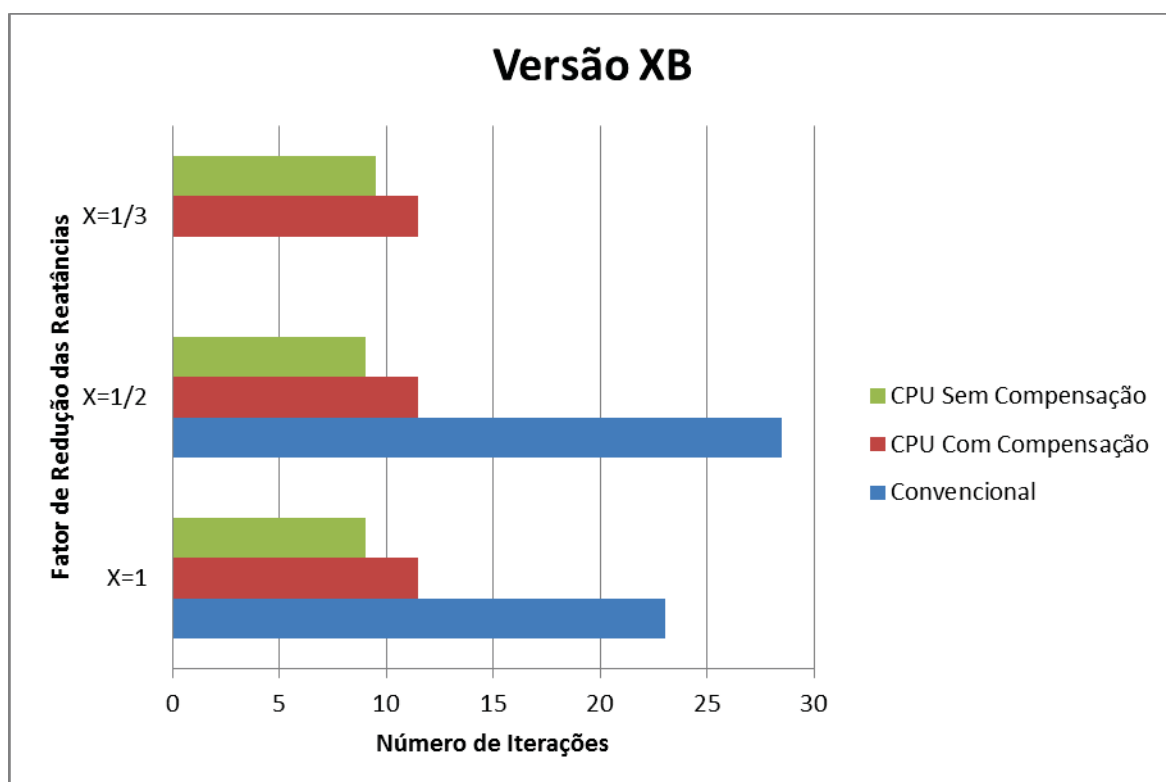
$$\phi_{base_SD2}=49$$

Ademais, a fim de demonstrar o efeito da aplicação da normalização complexa em redes de distribuição com relações R/X mais elevadas, o sistema teste

de 69 barras foi modificado, reduzindo-se o valor de suas reatâncias a $X=1/2$ e $X=1/3$ de seus valores originais, que chamaremos aqui, de fator de redução das reatâncias.

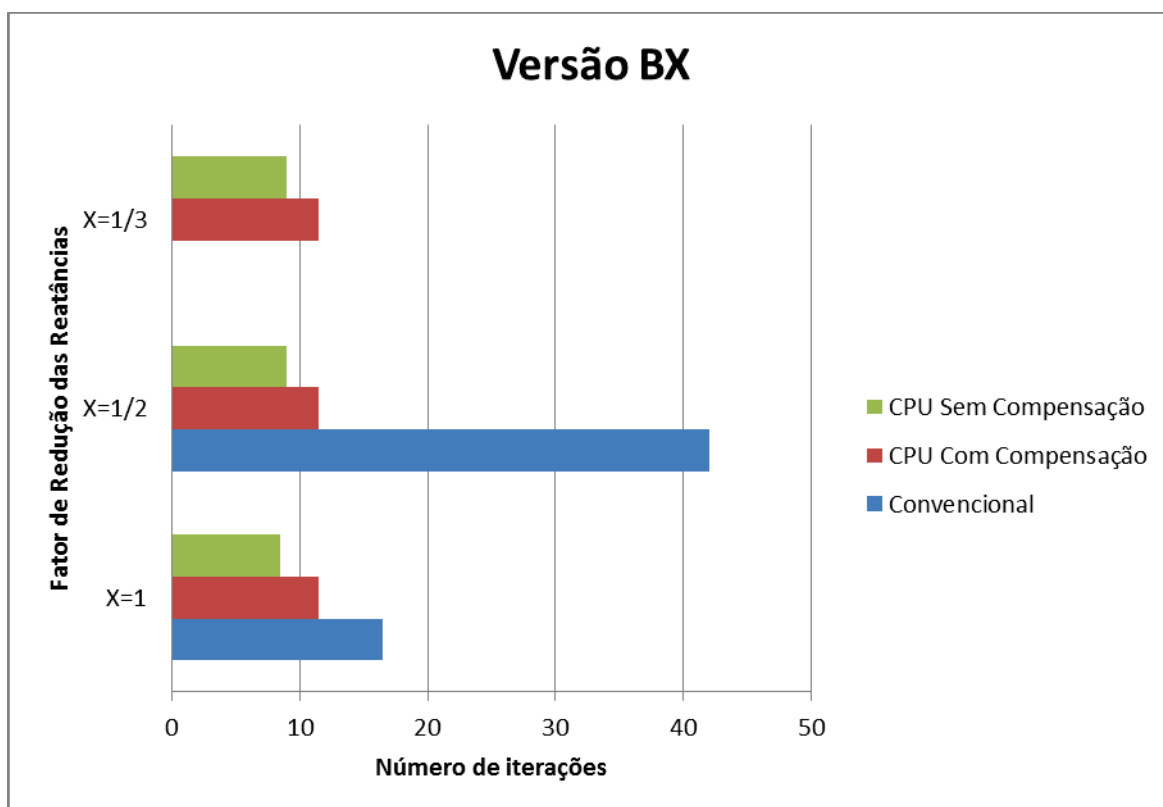
Os gráficos 1 e 2 apresentam o comparativo para as versões XB e BX do método desacoplado rápido, para os casos (a), (b) e (c) descritos anteriormente.

GRÁFICO 1 – NÚMERO DE ITERAÇÕES EM RELAÇÃO A CADA CENÁRIO – VERSÃO XB



FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 2 – NÚMERO DE ITERAÇÕES EM RELAÇÃO A CADA CENÁRIO– VERSÃO BX



FONTE: O autor (2019).

Nota-se que, para alimentadores com alta relação R/X ($X=1/3$), o método que não utiliza a *c.p.u.*, não converge. Ainda, as Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados quanto ao número de iterações para as versões do método desacoplado para os casos simulados.

TABELA 1 – NÚMERO DE ITERAÇÕES PARA O SISTEMA COM RELAÇÃO R/X ELEVADA – VERSÃO XB

	Versão XB		
	X=1	X=1/2	X=1/3
Convencional	23	28,5	NC
CPU Com Compensação	11,5	11,5	11,5
CPU Sem Compensação	9	9	9,5

NC: não-converge

FONTE: O autor (2019).

TABELA 2 – NÚMERO DE ITERAÇÕES PARA O SISTEMA COM RELAÇÃO R/X ELEVADA –
VERSÃO BX

	Versão BX		
	x=1	x=1/2	x=1/3
Convencional	16,5	42	NC
CPU Com Compensação	11,5	11,5	11,5
CPU Sem Compensação	8,5	9	9

NC: não-converge

FONTE: O autor (2019).

Pode-se perceber que a metodologia proposta é essencial para proporcionar convergência, além de assegurar a manutenção do bom desempenho do método desacoplado rápido na análise de sistemas T&D mesmo em face de alimentadores de distribuição com elevada relação R/X.

4.3 DESEMPENHO QUANTO À TOPOLOGIA – SEM GD

Nesta seção, são apresentados os resultados quando comparados os resultados de diferentes topologias, ainda sem a inserção de Geração Distribuída.

Considerou-se três topologias para avaliação:

- a) Radial
- b) Anel – Considera-se um anel fechado através da conexão entre a barra 69 do SD1 com a barra 33 do SD2.
- c) Malha - além do anel descrito acima, considera-se conexões entre as barras 11, 61 e 50 do SD1 com as barras 30, 24 e 7 do SD2, respectivamente.

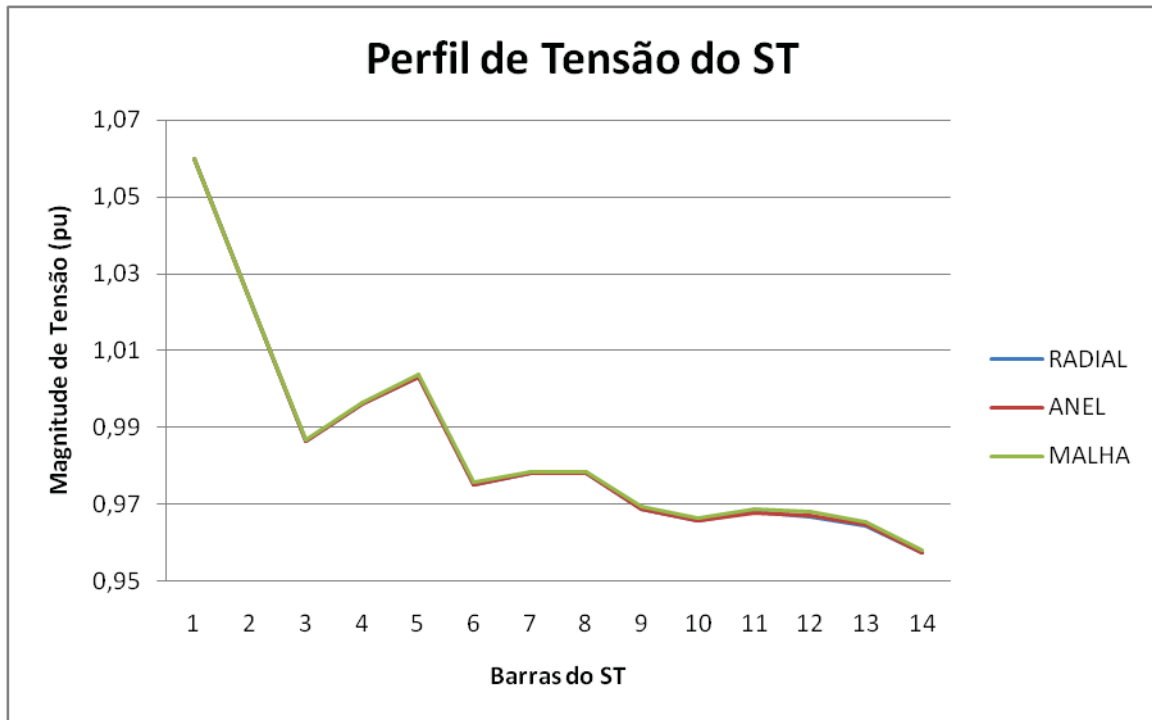
4.3.1 Perfil de Tensão

O Gráfico 3, apresenta o perfil de tensão para as barras do Sistema de Transmissão nos três casos simulados.

Pode-se observar que diferentes condições de operação dos alimentadores de distribuição, do ponto de vista topológico, modificam os níveis de tensão do

Sistema de Transmissão não apenas nas barras diretamente associadas aos alimentadores explicitamente representados, no caso, as barras 11 e 12.

GRÁFICO 3 – PERFIL DE TENSÃO DO ST



FONTE: O autor (2019).

Pode-se observar que para este caso operativo do Sistema de Distribuição, o impacto verificado nos níveis de tensão da transmissão é pequeno, mas, mesmo assim, o método de cálculo é capaz de identificar estas pequenas diferenças. Pode-se observar com mais detalhes na Tabela 3, os valores do perfil de tensão nas linhas do ST, para as diferentes condições operativas.

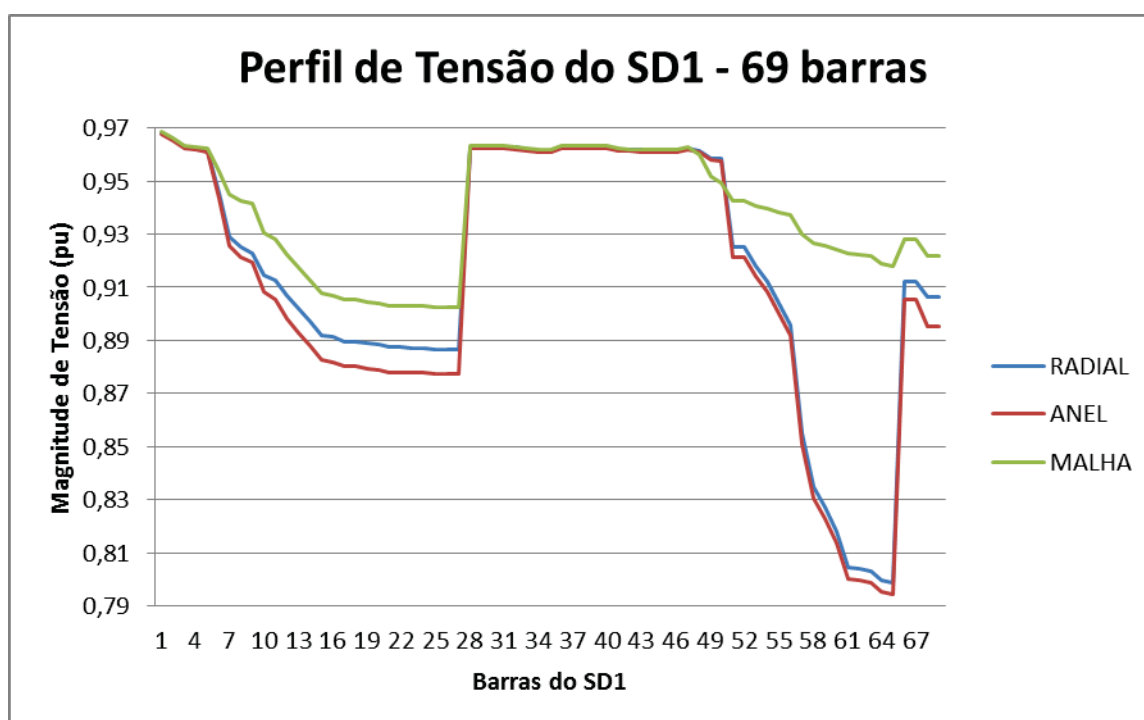
TABELA 3 – TENSÃO NAS BARRAS EM CADA CENÁRIO (p.u.) – SEM GD

BARRAS	Tensão (p.u.)		
	RADIAL	ANEL	MALHA
1	1,06	1,06	1,06
2	1,0234	1,0234	1,0235
3	0,9866	0,9866	0,9869
4	0,9961	0,9961	0,9964
5	1,0033	1,0033	1,0037
6	0,9751	0,9752	0,9758
7	0,978	0,978	0,9785
8	0,978	0,978	0,9785
9	0,9689	0,9689	0,9694
10	0,9659	0,9658	0,9664
11	0,9681	0,9679	0,9688
12	0,9667	0,9672	0,9682
13	0,9646	0,9648	0,9654
14	0,9574	0,9574	0,958

FONTE: O autor (2019).

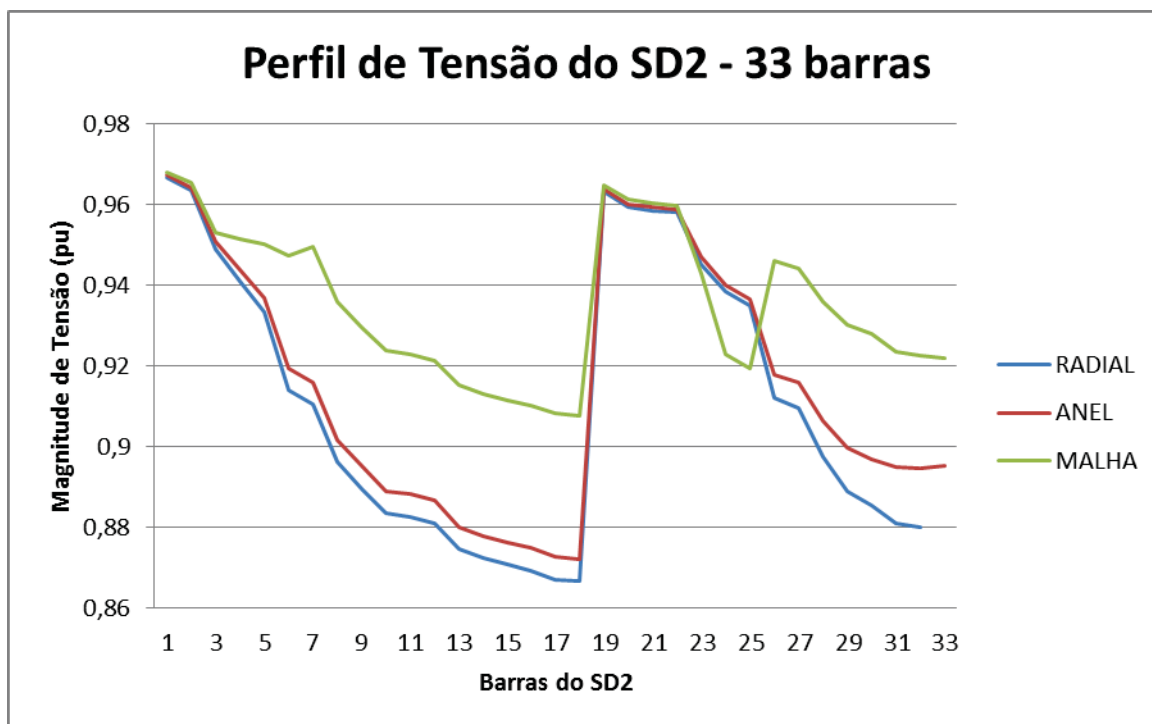
Os Gráficos 4 e 5 abaixo, apresentam o perfil de tensão nos Sistemas de Distribuição SD1 e SD2, respectivamente:

GRÁFICO 4 – PERFIL DE TENSÃO DO SD1 – SEM GD



FONTE: O autor (2019).

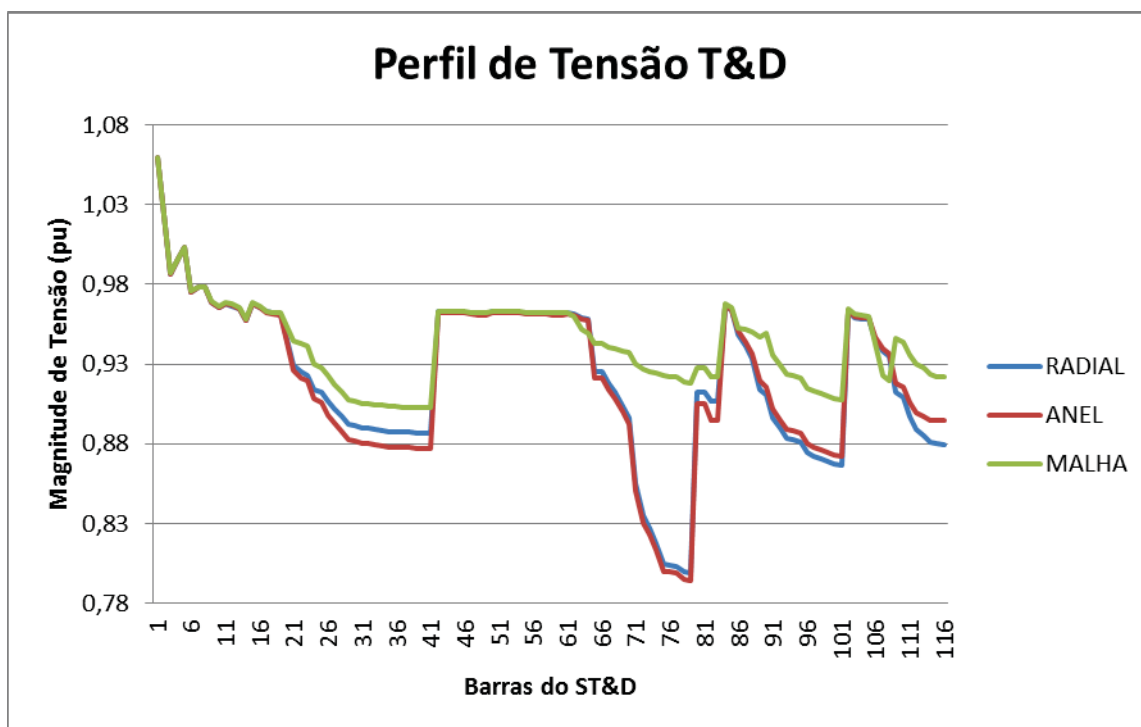
GRÁFICO 5 – PERFIL DE TENSÃO DO SD2 – SEM GD



FONTE: O autor (2019).

Já o Gráfico 6, mostra um panorama geral, apresentando o perfil de tensão em todas as barras do sistema T&D.

GRÁFICO 6 – PERFIL DE TENSÃO DO T&D – SEM GD



FONTE: O autor (2019).

Segundo os gráficos, observam-se valores de tensões abaixo de 0,9 *p.u.*, o que, para uma operação regular, seriam inadequados. No entanto, isso demonstra que o método é capaz de dar resposta mesmo nessas condições operativas mais extremas, e que pode ser usado como uma ferramenta computacional para apoio ao planejamento da operação/expansão.

Destaca-se assim, que a abordagem proposta permite identificar variações (mesmo que pequenas) no ST a partir de mudanças na operação do(s) SD(s), e que isso só é possível, pois essa ferramenta permite uma análise conjunta de T&D.

4.3.2 Número de Iterações

A Tabela 4 apresenta os resultados quanto ao número de iterações para cada topologia simulada, para as versões BX e XB do método.

TABELA 4 – NÚMERO DE ITERAÇÕES NAS DIFERENTES TOPOLOGIAS – SEM GD

	Radial	Anel	Malha
Versão BX	8,5	8,5	9,5
Versão XB	9	9,5	8,5

FONTE: O autor (2019).

Pode-se perceber que a metodologia proposta continua apresentando ótima convergência, mesmo quando a topologia é modificada.

4.3.3 Fluxo de Potência

4.3.3.1 Fluxo de Potência no Sistema T&D

A Tabela 5 registra o fluxo de potência nas barras de conexão entre o Sistema de Transmissão e os dois Sistemas de Distribuição, para as diferentes condições operativas.

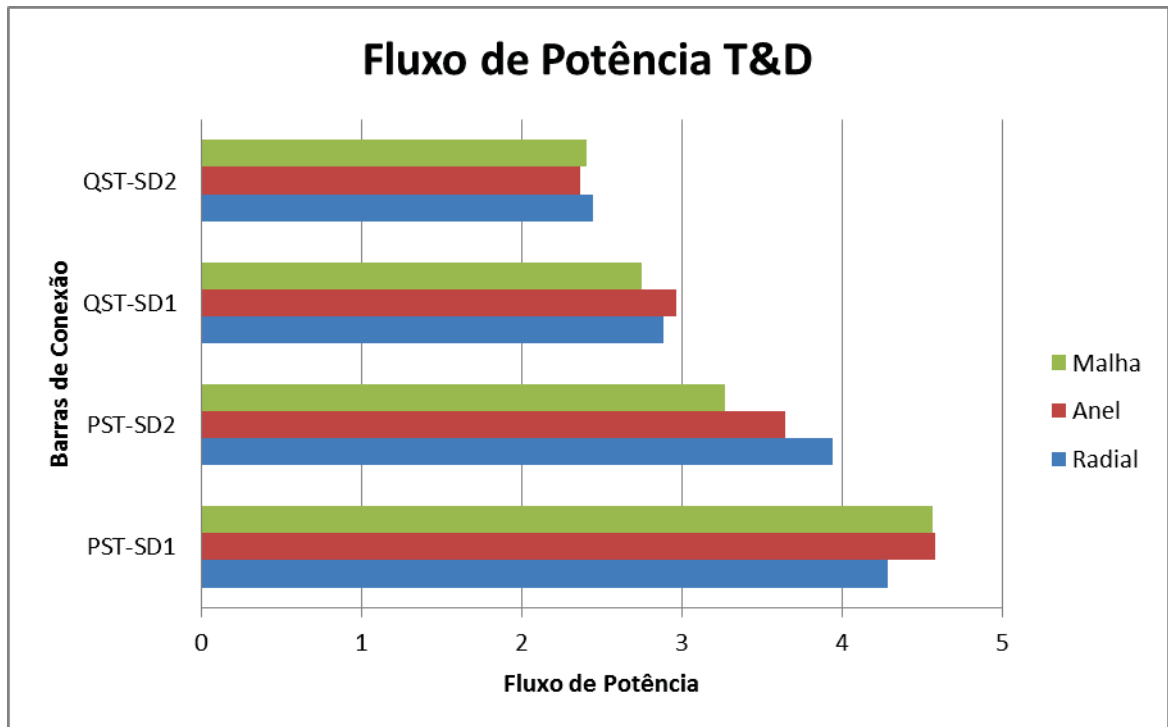
TABELA 5 – FLUXOS DE POTÊNCIA EM LINHAS DO ST (MW/Mvar.)

	Radial	Anel	Malha
P_{ST-SD1}	4,29	4,58	4,57
P_{ST-SD2}	3,94	3,65	3,27
Q_{ST-SD1}	2,89	2,97	2,75
Q_{ST-SD2}	2,45	2,37	2,41

FONTE: O autor (2019).

A carga dos Sistemas de Distribuição para estes casos não foi alterada, porém, o Sistema de Transmissão “enxerga” os mesmos Sistemas de Distribuição de maneira diferente, para as diferentes topologias, conforme resultados apresentados na Tabela 5 e no Gráfico 7.

GRÁFICO 7 – FLUXO DE POTÊNCIA NAS BARRAS DE CONEXÃO ENTRE T&D



FONTE: O autor (2019).

4.3.3.2 Fluxo de Potência no Sistema de Transmissão

Nesta seção, são apresentadas as variações do Fluxo de Potência no Sistema de Transmissão, conforme as Tabelas 6 e 7.

TABELA 6 – FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA NAS LINHAS DO ST (p.u.) – SEM GD

Ramos		Pkm		
De(k)	Para(m)	RADIAL	ANEL	MALHA
1	2	0,945	0,945	0,9423
1	5	0,4012	0,4012	0,3997
2	3	0,3534	0,3534	0,3529
2	4	0,2711	0,2712	0,2701
2	5	0,1943	0,1943	0,1932
3	4	-0,1238	-0,1238	-0,1243
4	5	-0,3274	-0,3277	-0,3278
4	7	0,1463	0,1465	0,1456
4	9	0,084	0,0841	0,0836
5	6	0,217	0,2166	0,2141
6	11	0,0349	0,037	0,0376
6	12	0,0394	0,0377	0,0355
6	13	0,0867	0,0859	0,085
7	8	0	0	0
7	9	0,1463	0,1465	0,1456
9	10	0,0327	0,0335	0,0328
9	14	0,0501	0,0496	0,0489
10	11	-0,0123	-0,0115	-0,0122
12	13	0,0063	0,0076	0,0093
13	14	0,025	0,0254	0,0262

FONTE: O autor (2019).

TABELA 7 – FLUXOS DE POTÊNCIA REATIVA NAS LINHAS DO ST (p.u.) – SEM GD

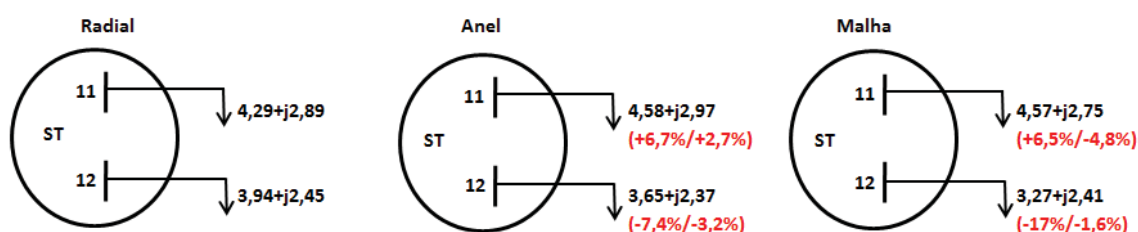
Ramos		Qkm		
De(k)	Para(m)	RADIAL	ANEL	MALHA
1	2	0,3654	0,3653	0,3632
1	5	0,1855	0,1855	0,1842
2	3	0,1165	0,1165	0,1161
2	4	0,0744	0,0744	0,0737
2	5	0,057	0,0569	0,0563
3	4	-0,0047	-0,0047	-0,005
4	5	-0,0657	-0,066	-0,0658
4	7	0,0883	0,0884	0,0878
4	9	0,0506	0,0507	0,0504
5	6	0,1184	0,1181	0,1167
6	11	0,0175	0,0181	0,0168
6	12	0,0132	0,0125	0,0124
6	13	0,0349	0,0348	0,0351
7	8	0	0	0
7	9	0,0821	0,0822	0,0817
9	10	0,0229	0,0232	0,0223
9	14	0,0182	0,0181	0,0182
10	11	-0,0062	-0,0059	-0,0068
12	13	0,0032	0,0034	0,0029
13	14	0,0079	0,008	0,0079

FONTE: O autor (2019).

Pode-se observar que diferentes condições de operação no Sistema de Distribuição, do ponto de vista topológico, modificam também os fluxos de potência do Sistema de Transmissão não apenas nas barras diretamente associadas aos alimentadores - barras 11 e 12.

Já a figura 9, representa a percepção que o Sistema de Transmissão tem do Sistema de Distribuição em cada condição de operação (carga ou gerador, com diferentes valores), nos ramos de conexão.

FIGURA 9 – FLUXO DE POTÊNCIA NOS RAMOS DE CONEXÃO T&D – SEM GD



FONTE: O autor (2019).

4.4 DESEMPENHO QUANTO À TOPOLOGIA – COM GD

Nesta seção, são apresentados os resultados quando comparados os resultados de diferentes topologias, com a inserção de Geração Distribuída. Consideraram-se três topologias para avaliação:

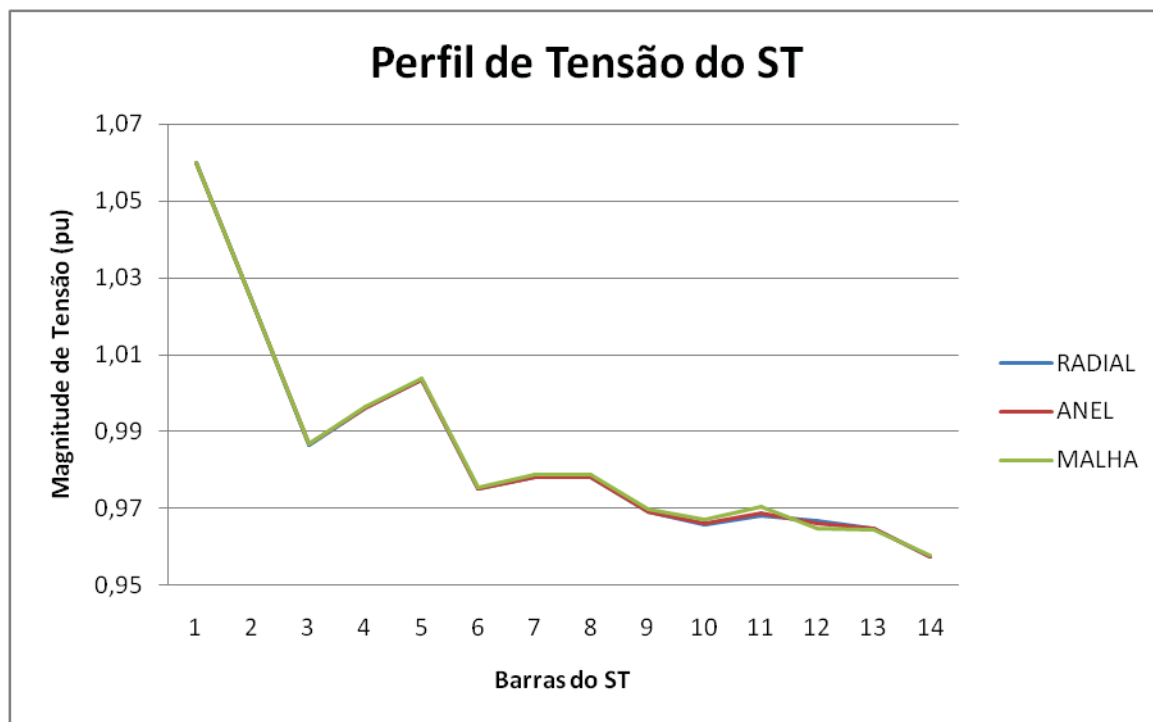
- a) Radial com GD - inclusão de GDs de 0,2 *p.u.* em 32 barras do SD2 – exceto a primeira.
- b) Anel com GD – além da inclusão das GDs descritas acima, considera-se um anel fechado através da conexão entre a barra 69 do SD1 com a barra 33 do SD2.
- c) Malha com GD - além do anel descrito acima e da inclusão das GDs, consideram-se conexões entre as barras 11, 61 e 50 do SD1 com as barras 30, 24 e 7 do SD2, respectivamente.

4.4.1 Perfil de Tensão

O Gráfico 8, apresenta o perfil de tensão para as barras do sistema de transmissão nos três casos simulados.

Pode-se observar que diferentes condições de operação dos alimentadores de distribuição, tanto do ponto de vista topológico quanto da inserção de GDs, modificam os níveis de tensão do sistema de transmissão não apenas nas barras diretamente associadas aos alimentadores explicitamente representados, no caso, as barras 11 e 12. Dentre os casos simulados, destaca-se a operação em malha dos dois alimentadores, que contribui de forma mais efetiva para a melhoria do perfil de tensão do ST, proporcionando valores de tensão significativamente maiores.

GRÁFICO 8 – PERFIL DE TENSÃO DO ST – COM GD



FONTE: O autor (2019).

Pode-se observar que também para este caso operativo do Sistema de Distribuição, o impacto verificado nos níveis de tensão da transmissão é pequeno, mas, mesmo assim, o método de cálculo é capaz de identificar estas pequenas diferenças.

Ao acrescentar GDs no sistema, a carga equivalente do SD se torna mais “leve” e, portanto, com menores desvios de tensão - quando comparada ao sistema sem GD - numa condição operativa mais favorável. O mesmo tende a ocorrer quando se fecham anéis.

A Tabela 8, mostra com mais detalhes, os valores do perfil de tensão nas linhas do ST, para as diferentes condições operativas.

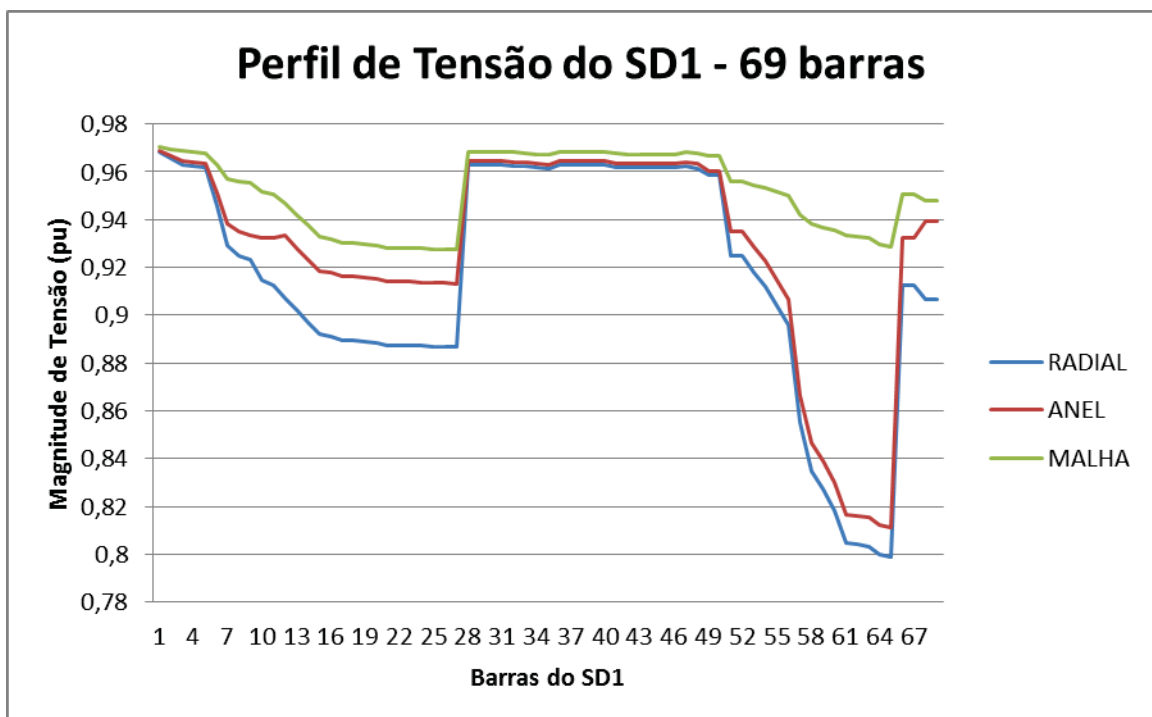
TABELA 8 – TENSÃO NAS BARRAS DO ST EM CADA CENÁRIO (p.u.) – COM GD

BARRAS	Tensão (p.u.)		
	RADIAL	ANEL	MALHA
1	1,06	1,06	1,06
2	1,0234	1,0234	1,0236
3	0,9866	0,9867	0,9869
4	0,9961	0,9962	0,9965
5	1,0034	1,0034	1,0037
6	0,9752	0,9752	0,9754
7	0,9781	0,9782	0,9788
8	0,9781	0,9782	0,9788
9	0,969	0,9692	0,9698
10	0,9659	0,9662	0,9672
11	0,9682	0,9688	0,9706
12	0,9669	0,9663	0,9648
13	0,9647	0,9647	0,9646
14	0,9574	0,9576	0,9579

FONTE: O autor (2019).

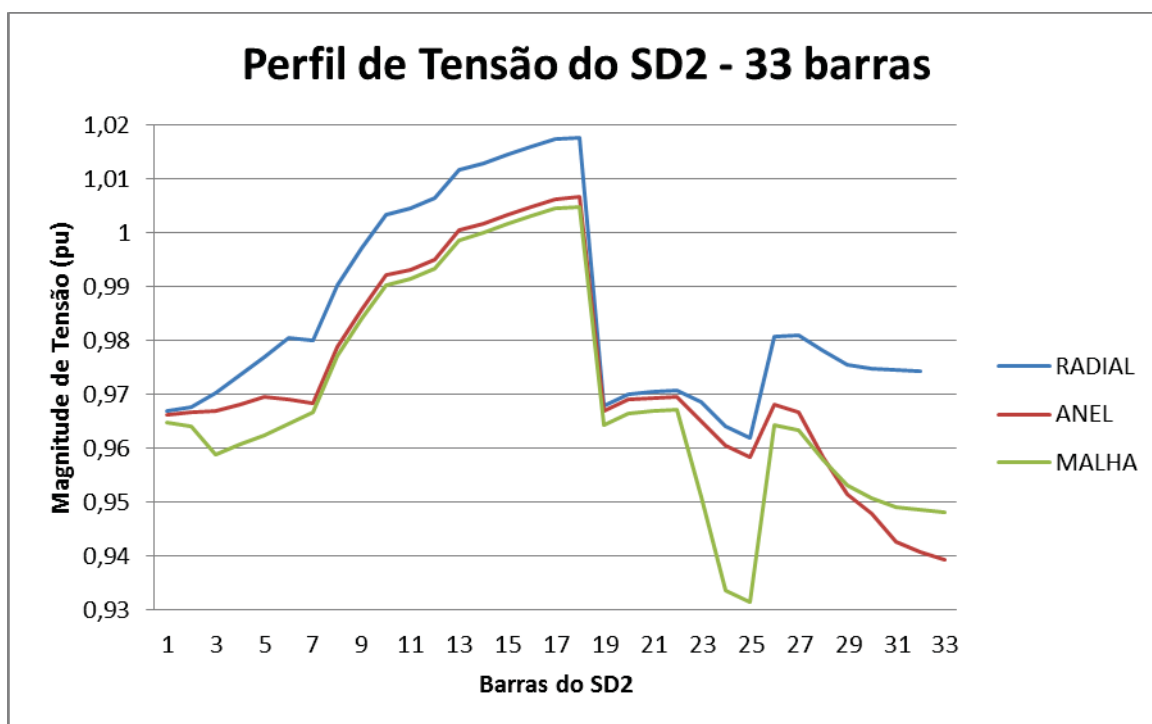
Os Gráficos 9 e 10, apresentam o perfil de tensão nas barras dos Sistemas de Transmissão SD1 e SD2, respectivamente:

GRÁFICO 9 – PERFIL DE TENSÃO DO SD1 – COM GD



FONTE: O autor (2019).

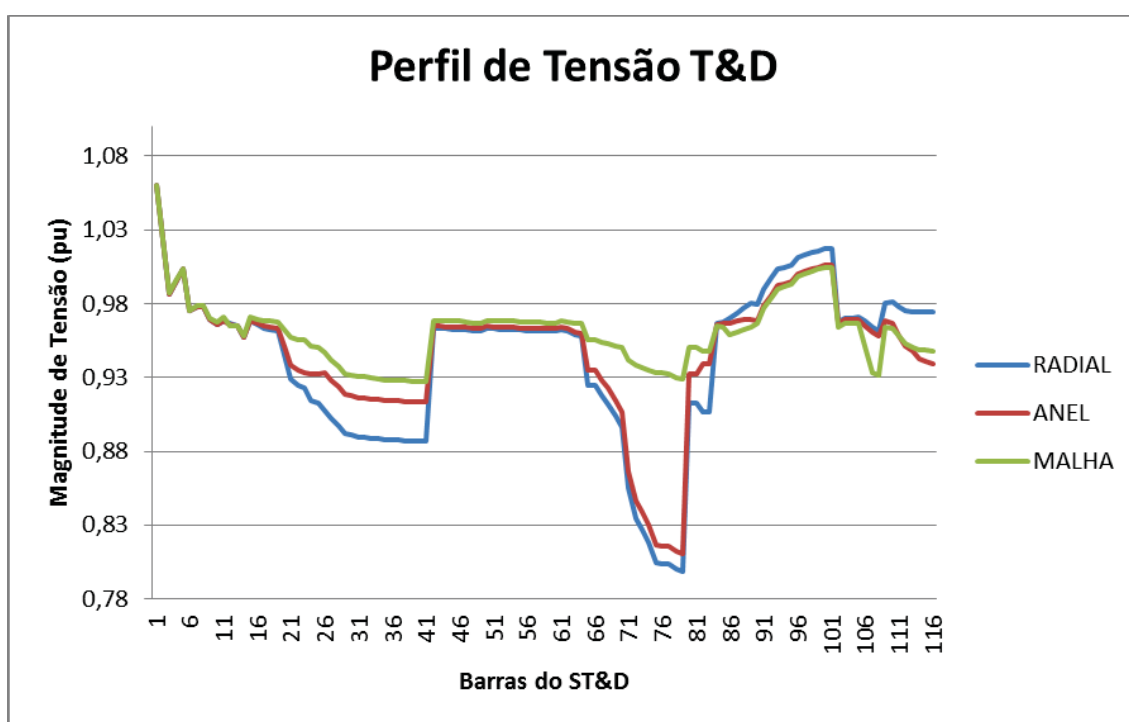
GRÁFICO 10 – PERFIL DE TENSÃO DO SD2 – COM GD



FONTE: O autor (2019).

No Gráfico 11, pode-se observar o perfil de tensão em todas as barras do sistema T&D.

GRÁFICO 11 – PERFIL DE TENSÃO DO T&D – COM GD



FONTE: O autor (2019).

Observando os resultados, da mesma maneira que para os cenários sem GD, são apresentados também nestes casos, valores de tensões abaixo de 0.9 p.u., o que, para uma operação regular, seria igualmente inadequado. E novamente, isso demonstra que o método é capaz de dar resposta mesmo nessas condições operativas mais extremas, e que ainda assim, pode ser usado como uma ferramenta computacional para apoio ao planejamento da operação/expansão.

Analogamente aos cenários sem GD, também conclui-se que a abordagem proposta permite identificar variações (mesmo que pequenas) no ST a partir de mudanças na operação do(s) SDs, e que isso só é possível, pois essa ferramenta permite uma análise conjunta de T&D.

4.4.2 Número de Iterações

A Tabela 7 apresenta os resultados quanto ao número de iterações para cada topologia simulada, para as versões BX e XB do método. Pode-se perceber que a metodologia proposta continua apresentando ótima convergência, mesmo com a topologia modificada e ainda, com a inserção de GD.

TABELA 9 – NÚMERO DE ITERAÇÕES NAS DIFERENTES TOPOLOGIAS – COM GD

	Radial	Anel	Malha
Versão BX	9,5	8,5	8,5
Versão XB	9	8,5	9

FONTE: O autor (2019).

4.4.3 Fluxo de Potência

4.4.3.1 Fluxo de Potência no Sistema T&D

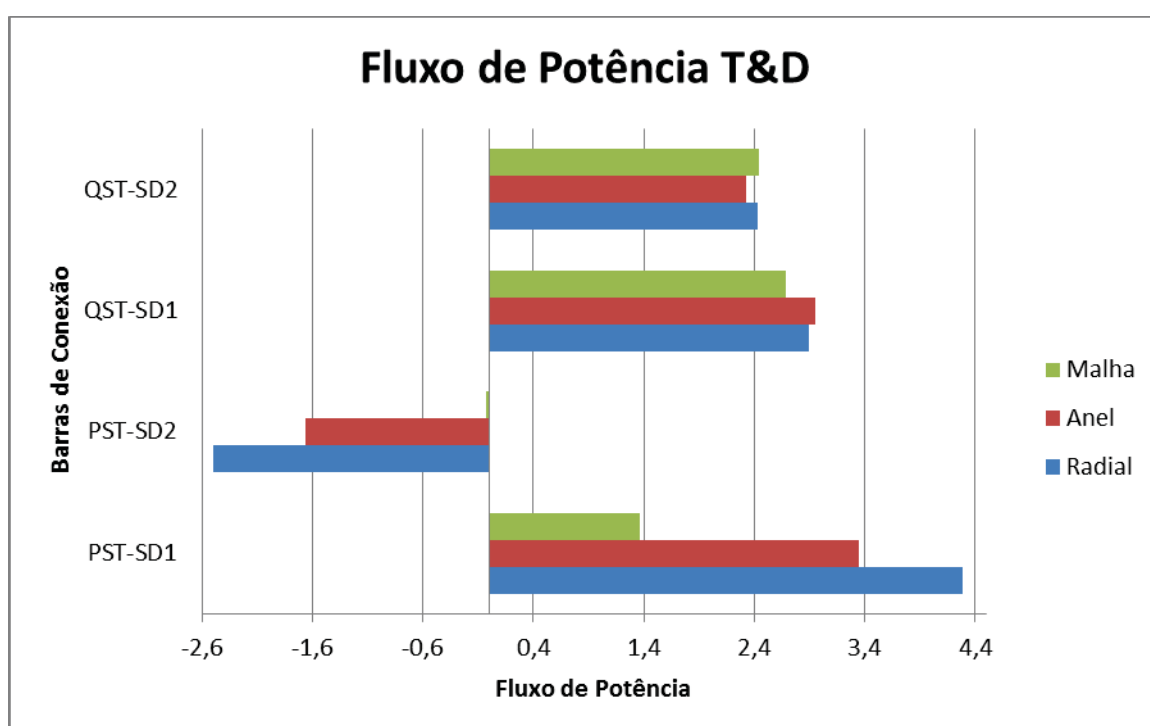
A Tabela 10 e o Gráfico 12 apresentam as diferenças observadas nos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos que conectam o ST aos SDs com relação às operações radial, anel e malha (todas com presença de GDs no alimentador conectado à barra 12 do ST). Cabe destacar que o valor desses fluxos caracteriza a percepção de “carga” que estes alimentadores exercem sobre o ST.

TABELA 10 – FLUXOS DE POTÊNCIA NAS LINHAS DE CONEXÃO T&D (MW/Mvar)

	Radial	Anel	Malha
P_{ST-SD1}	4,29	3,35	1,36
P_{ST-SD2}	-2,5	-1,66	-0,03
Q_{ST-SD1}	2,89	2,95	2,68
Q_{ST-SD2}	2,43	2,33	2,44

FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 12 – FLUXO DE POTÊNCIA NAS BARRAS DE CONEXÃO ENTRE T&D



FONTE: O autor (2019).

A carga dos Sistemas de Distribuição foi alterada pela inserção das GDs. Pode-se perceber que em alguns casos, apresentam-se valores de fluxo de potência negativos, isto significa que o Sistema de Transmissão enxerga o Sistema de Distribuição como um gerador, e não mais como carga.

4.4.3.2 Fluxo de Potência no Sistema de Transmissão

Nesta seção, são apresentadas as variações do Fluxo de Potência no Sistema de Transmissão, conforme as Tabelas 11 e 12.

TABELA 11 – FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA NAS LINHAS DO ST (p.u.) – COM GD

Ramos		Pkm		
De(k)	Para(m)	RADIAL	ANEL	MALHA
1	2	0.9447	0.9439	0.9414
1	5	0.4011	0.4008	0.3996
2	3	0.3533	0.3531	0.3525
2	4	0.2710	0.2706	0.2694
2	5	0.1942	0.1941	0.1934
3	4	-0.1239	-0.1241	-0.1246
4	5	-0.3274	-0.3263	-0.3242
4	7	0.1462	0.1452	0.1427
4	9	0.0839	0.0833	0.0819
5	6	0.2167	0.2174	0.2178
6	11	0.0349	0.0285	0.0149
6	12	0.0391	0.0441	0.0535
6	13	0.0866	0.0888	0.0934
7	8	-0.0000	-0.0000	-0.0000
7	9	0.1462	0.1452	0.1427
9	10	0.0326	0.0297	0.0234
9	14	0.0500	0.0512	0.0537
10	11	-0.0124	-0.0153	-0.0217
12	13	0.0065	0.0031	-0.0039
13	14	0.0250	0.0238	0.0213

FONTE: O autor (2019).

TABELA 12 – FLUXOS DE POTÊNCIA REATIVA NAS LINHAS DO ST (p.u.) – COM GD

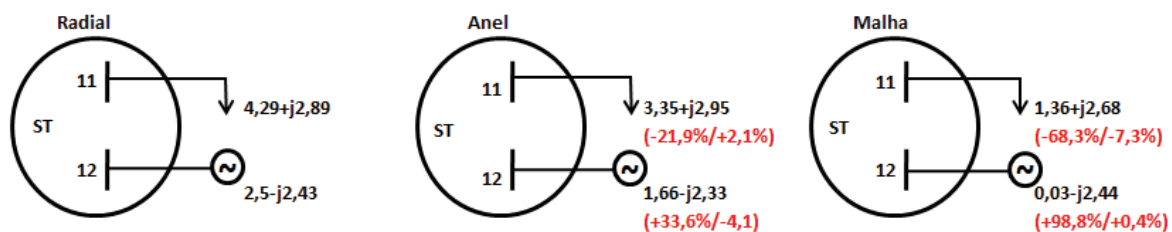
Ramos		Qkm		
De(k)	Para(m)	RADIAL	ANEL	MALHA
1	2	0.3651	0.3646	0.3630
1	5	0.1854	0.1851	0.1842
2	3	0.1164	0.1163	0.1160
2	4	0.0743	0.0741	0.0734
2	5	0.0569	0.0568	0.0564
3	4	-0.0047	-0.0048	-0.0050
4	5	-0.0657	-0.0654	-0.0643
4	7	0.0882	0.0878	0.0867
4	9	0.0506	0.0504	0.0497
5	6	0.1182	0.1183	0.1185
6	11	0.0176	0.0182	0.0167
6	12	0.0131	0.0131	0.0152
6	13	0.0349	0.0342	0.0337
7	8	0.0000	0.0000	0.0000
7	9	0.0821	0.0818	0.0808
9	10	0.0229	0.0228	0.0214
9	14	0.0181	0.0179	0.0178
10	11	-0.0062	-0.0063	-0.0076
12	13	0.0033	0.0043	0.0049
13	14	0.0079	0.0082	0.0083

FONTE: O autor (2019).

Através destes resultados, tem-se a percepção de como a condição de operação de GDs e a topologia dos sistemas de distribuição impactam na circulação dos fluxos de potência do sistema de transmissão. Embora esses efeitos sejam percebidos de maneira mais evidente nos ramos adjacentes às barras de conexão entre T&D, também são sentidos nos demais ramos do sistema de transmissão, conforme resultados detalhados nas Tabelas 11 e 12.

Já a figura 10, representa a percepção que o Sistema de Transmissão tem do Sistema de Distribuição em cada condição de operação (carga ou gerador, com diferentes valores), nos ramos de conexão.

FIGURA 10 – FLUXO DE POTÊNCIA NOS RAMOS DE CONEXÃO T&D – COM GD



FONTE: O autor (2019).

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos com o algoritmo do Newton_Raphson Desacoplado Rápido associado à normalização complexa por unidade, aplicado em sistemas de distribuição proposto para sistemas T&D interconectados.

Pode-se observar que a implementação da *c.p.u.* diminuiu o número de iterações no processo de convergência, contornando os problemas causados pela alta relação R/X das redes de distribuição e tornando o método mais rápido.

Observou-se que mesmo para simulações com alimentadores de distribuição com elevada relação R/X. A metodologia proposta é essencial para proporcionar convergência, além de assegurar a manutenção do bom desempenho do método desacoplado rápido na análise de sistemas T&D.

No sistema de testes, mesmo em operações extremas e que exigem mais iterações para convergir, o método se mostrou eficaz e melhor em relação à outras propostas já existentes.

Foi observado também, como a condição de operação de GDs e a topologia dos sistemas de distribuição impactam na circulação dos fluxos de potência do sistema de transmissão. Embora esses efeitos sejam percebidos de maneira mais evidente nos ramos adjacentes às barras de conexão entre T&D, também são sentidos em alguns ramos do sistema de transmissão.

Assim, esse conjunto de resultados ilustra claramente a importância de ferramentas de análise que permitam uma avaliação precisa do efeito que a operação de redes de distribuição ativas exerce sobre o sistema de transmissão, o que somente é possível quando as mesmas são explicitamente representadas, como proposto neste trabalho, e que não ocorre nas abordagens convencionais, em que os SDs são aglutinados nas barras de transmissão como cargas.

Essa metodologia se apresenta como uma ferramenta alternativa para a análise de redes atuais e futuras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a necessidade de aprimoramentos nas ferramentas de análise de sistemas elétricos de potência frente ao novo cenário do setor elétrico, esta dissertação descreve a proposta de uma metodologia de cálculo de fluxo de potência que permite uma análise integrada de sistemas de transmissão com a representação explícita de alimentadores de distribuição.

A metodologia proposta alia a eficiência e robustez do tradicional método desacoplado rápido ao emprego da técnica de normalização complexa (*c.p.u.*) aplicada às redes de transmissão e/ou distribuição. Convém destacar que tal associação aqui proposta não requer qualquer ampliação da estrutura matricial convencional típica da abordagem desacoplada rápida, o que representa um importante avanço frente a proposições anteriores.

Os resultados de simulação apresentados indicam que o ajuste da relação R/X das redes de distribuição aos níveis da transmissão assegura a manutenção da eficiência computacional característica do método desacoplado rápido ao tratar, de maneira integrada, sistemas T&D em diferentes arranjos topológicos e participação de geração distribuída.

Dessa forma, fica evidente a relevância de se buscar a determinação precisa da influência dos alimentadores ativos de distribuição sobre o sistema de transmissão, encaminhando assim a presente metodologia de análise como uma promissora alternativa para apoio ao planejamento e operação de sistemas de transmissão e distribuição de energia nesse novo contexto do setor elétrico.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia apresentada neste trabalho permite aprimoramentos e pode servir como base para trabalhos posteriores de análise de sistemas elétricos de potência.

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para a continuidade do método proposto:

- Aperfeiçoamento do processo de determinação do ângulo base adequado para cada subsistema
- Incorporação da análise do efeito de dispositivos de controle nos diversos níveis de tensão da rede elétrica.

REFERÊNCIAS

- Lourenço, E. M.; Loddi, T.; Tortelli, O. L. **Unified Load Flow Analysis for Emerging Distribution Systems**. 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), n. 1, p. 1-7, 2010.
- W. Tinney and C. Hart, **"Power flow solution by Newton's method"**, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-86, no. 11, pp. 1449–1460, Nov. 1967.
- A. Monticelli, **"Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica"**, Ed. Edgar Blücher Ltda., 1983.
- Pantuzi, A. V. **Desempenho de um Algoritmo Backward-Forward Sweep de Cálculo de Fluxo de Potência**. 2006. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Paulista – Julio Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2006.
- B. Stott and O. Alsac, **"Fast decoupled load flow"**, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, no. 3, pp. 859–869, May 1974.
- T. E. DyLiacco and K. A. Ramarao, **"Discussion of 'Theoretical Study of the Convergence of the Fast Decoupled Load Flow'"**, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-96, no. 1, pp. 268–275, Jan. 1977.
- L. Wang, N. Xiang S. Wang, B. Zhang and M. Huang, **"Novel decoupled power flow"** IEE Proc. Pt. C, Vo1.137, No.1, pp.1-7, 1990.
- S.P. Singh, G .S .Raju and V.S. SubbaRao. **"A Technique to Improve the Convergence of FDLF for Systems with High R/X Lines"**. TENCON'91 - IEEE Region 10 International Conference on Energy, Computer, Communication and Control Systems.
- O. L. Tortelli, E. M. Lourenço, A. V. Garcia and B. C. Pal, **"Fast Decoupled Power Flow to Emerging Distribution Systems via Complex pu Normalization,"** in IEEE Trans. Power Syst., vol. 30, no. 3, pp. 1351-1358, May 2015.
- C. C. Martins, O. R. Saavedra e V. L. Paucar, **"Fluxo de Carga em Redes Modernas de Distribuição de Eletricidade"**, Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, Nov. 2017.
- D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, e G. X. Luo, **"A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks,"** IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, no. 2, pp. 753-762, Maio 1988.
- Cespedes, R. **New method for the analysis of distribution networks**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 1, p. 391–396, 1990.
- Kersting, W. H. **Distribution system modeling and analysis**. Boca Raton, CRC Press, 2001.

Baub, G. H. S. **Cálculo de Fluxo de Carga em Sistemas de Transmissão com Alimentadores Primários de Distribuição**. 2005. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

G. X. Luo e A. Semlyen, "Efficient load flow for large weakly meshed networks," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, no. 4, pp. 1309-1316, Nov. 1990.

U. Eminoglu, T. Gözel, M. H. Hocaoglu. **DSPFAP: Distribution Systems Power Flow Analysis Package Using Matlab Graphical User Interface (GUI)**. Wiley Periodicals Inc, 2009.

M. E. Baran, F. F. Wu. **Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4. No. 1, pp. 735-743, Jan. 1989.

C. S. Cheng, D. Shirmohammadi. **A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10. No. 2, pp. 671-679, May 1995.

C. C. Durce, T. Loddi, E. M. Lourenço, O. L. Tortelli. **Normalização Complexa para Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Emergentes**. IX Congreso Latinoamericano de Generación y Transporte de la Energía Eléctrica - IX CLAGTEE, v. 1. p. 1-9, Mar del Plata, Argentina, 2011.

A. Garcia, A. Monticelli. **Simulação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica através de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido**. IX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, Bahia, Set. 1984.

S. Iwamoto, Y. Tamura. **A Load Flow Calculation Method for III-Conditioned Power Systems**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1736-1743, Abr. 1981.

W. H. Kersting, D. L. Mendive. **An application of Ladder Network Theory to the Solution of Three-phase Radial Load Flow Problem**. IEEE PES Winter Meeting, New York, Jan. 1976.

M. F. Medeiros Jr., J. A. Lucas. **Fast Decoupled Load Flow with Optimal Axes Rotation**. Proceedings of the IEEE/PES Transmission and Distribution 2002, Latin America, São Paulo, SP, 2002.

D. Rajcic, A. Bose. **A Modification to the Fast Decoupled Power Flow for Networks with High R/X Ratios**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3.No. 2, pp. 743-746, Mai. 1988.

D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semley, G. X. Luo. **A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, n. 2, pp. 753-762, Mai 1988.

R. A. M. Van Amerongen. **A General Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 760- 770, Mai. 1989.

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.

S. C. Tripathy, G. D. Prasad, O. P. Malik, G. S. Hope. **Load-Flow Solutions for Ill-Conditioned Power Systems by a Newton-Like Method.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 10, pp. 3648-3657, Out. 1982.

R. B. Gomes. **Resolução do problema de fluxo de carga para redes de distribuição utilizando o MDR com rotação automática de eixos.** Dissertação de mestrado, Universidade de Campinas, Mai. 2006.

A. Monticelli, A. Garcia, O. R. Saavedra. **Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations, and Testings.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, Nov. 1990.

SUN, H.; GUO, Q. et al. **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, maio 2015.

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.

Keqiang Li ; Xueshan Han ; Wenbo Li ; Rizwan Ahmed. **Unified power flow algorithm of transmission and distribution network.** 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA).