

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ÉMELI LAUANE DO CARMO DA SILVEIRA – GRR20153017

**MONITORAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO VIA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS**

CURITIBA

2019

ÉMELI LAUANE DO CARMO DA SILVEIRA – GRR20153017

**MONITORAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO VIA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Ênfase em Eletrotécnica, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, *Campus* Curitiba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a Dra. Elizete Maria Lourenço

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

ÉMELI LAUANE DO CARMO DA SILVEIRA

MONITORAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO VIA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

COMISSÃO EXAMINADORA

Professora Dra. Elizete Maria Lourenço
Departamento de Engenharia Elétrica

Professor Eng. Luiz Antônio Belinasso
Departamento de Engenharia Elétrica

Professora Dra. Thelma Solange Piazza Fernandes
Departamento de Engenharia Elétrica

Curitiba, 05 de Dezembro de 2019.

Dedico este trabalho à Deus, porque Dele e por Ele, e para Ele, são todas as coisas (Romanos 11:36). Aos meus pais, João Eliseu e Raquel, à minha orientadora, Elizete e a todos os envolvidos nesta árdua jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todo o bem que Ele tem me feito, pela sua misericórdia constante em minha vida e por me ensinar a cada vez mais confiar Nele. Aprendi com Ele que há um tempo determinado e um propósito para todas as coisas debaixo do céu (Eclesiastes 3:1). Sem Ele certamente não teria chegado aqui, sou muito grata por seu amor, carinho, por ser o meu lugar forte e por ter colocado em meu caminho pessoas tão especiais que não me deixaram desistir e me ajudaram a concluir este curso. Sei que os caminhos e pensamentos de Deus são infinitamente mais altos que os nossos (Isaías 55:9) e todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus (Romanos 8:28).

Agradeço aos meus pais João Eliseu e Raquel, que sempre investiram muito na minha educação, sonharam juntos comigo este sonho e se hoje eu sou uma pessoa de bem e que tem algo a contribuir com a humanidade foi graças aos esforços deles. Agradeço por todo o apoio, amor e carinho incondicional.

Agradeço ao meu namorado Bruno, por todo amor, carinho e paciência. Por todo o companheirismo e por trazer mais cores para a minha vida.

Agradeço a minha professora orientadora Elizete, por ter tido tanta paciência, ter me dado muito suporte, apoio e ter me incentivado tanto. Ela soube dizer as palavras certas que me deixaram mais confiante para terminar este trabalho.

Agradeço a Ellen por ter cedido o seu tempo e me ajudado com as simulações e os bugs do MATLAB.

Agradeço aos amigos que fiz durante a graduação e que me ajudaram muitas vezes. Enfrentar a faculdade de engenharia sem vocês seria muito mais difícil.

Agradeço a todos os professores que contribuíram para a minha formação e todos os envolvidos nesta jornada.

“Se você vai ser um vencedor na vida, tem que ir constantemente além do melhor que você pode dar.”

Robert Kiyosaki

RESUMO

A crescente inserção de unidades de Geração Distribuída (GD) nas redes de distribuição tem tornando cada vez mais complexa a operação deste sistema, visto que este passa a ter características do sistema de transmissão, podendo ocasionar a inversão dos fluxos de potência e sendo difícil a medição em tempo real das quantidades de potência ativa que estão sendo dispensadas na rede por meio das GDs. Este trabalho tem por objetivo principal fornecer, ao operador, as estimativas das quantidades de potência ativa geradas nas barras de distribuição por GD de modo a trazer maior confiabilidade a operação. Para atingir tal objetivo uma alternativa foi utilizar a estimação de estados, uma ferramenta já consagrada para sistemas de transmissão, fazendo-se necessária a elevação da relação X/R dos sistemas de distribuição utilizando a Normalização Complexa por Unidade (c.p.u.), ganhando assim características semelhantes aos sistemas de transmissão. Os sistemas-testes utilizados nas simulações foram dois, o primeiro de 12 barras e o segundo de 69 barras, ambos retirados da literatura. Ambos os dados dos sistemas passaram pela normalização complexa para então ser possível calcular os fluxos de potência e aplicar a estimação dos estados. De posse destes resultados, são estimadas as quantidades geradas por GD nas barras de distribuição a partir de um algoritmo desenvolvido em ambiente MATLAB. O pacote computacional MATPOWER faz os cálculos de fluxo de potência e a estimação de estados, que servem de dados de entrada para o estimador das quantidades de GD. Por fim, o algoritmo final apresenta como resultado final as quantidades de potência ativa geradas por GD nas barras em que há geração e nas que não há ele mostra como resultado zero.

Palavras – chaves: Estimação de Estados. Fluxo de Potência. Geração Distribuída.

ABSTRACT

The increasing insertion of Distributed Generation (DG) units in the distribution power grids is making it to become more complex in terms of operation, since it obtains characteristics from the transmission system, which may cause the inversion of power flows, delivering difficulties to real-time measurement of the amounts of active power being dispensed into the grid through DGs. The main objective of this monograph is to provide to the system's operator the estimates of the active power's quantities generated by DG in distribution's buses as a way to bring more confiability to the operation. To reach this main objective the best solution found was to use the state estimation. This tool has been used in transmission systems. To be possible its use in distribution systems, its necessary to elevate the X/R proportion using the complex per unit normalization (c.p.u.). So the systems gets similar characteristics as transmission systems. The test systems used in the simulations were two, the first of 12 bars and the second of 69 bars, both taken from the literature. Both systems data went through complex normalization so that it was possible to calculate power flows and apply state estimation. With these results, the power generated by DG in the distribution buses are estimated by using an algorithm developed in MATLAB environment. The MATPOWER computational package performs power flow calculations and state estimation, which serve as input data for the DG quantity estimator. Finally, the final algorithm presents as the final result the amounts of active power generated by DG in the bars where there is generation and in those which do not generate it shows zero as result.

Key – words: State Estimation. Power Flow. Distributed Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da Potência Instalada (MW) em Microgeração e Minigeração Distribuída por Tipo de Fonte (ABSOLAR, 2018).	15
Figura 2 - Potência Aparente de Base e Dados de Barra.....	27
Figura 3 - Dados de Geração	27
Figura 4 - Dados dos Ramos	27
Figura 5 - Barras válidas	31
Figura 6 - Medidas específicas	31
Figura 7 - Comparação entre os valores medidos e os valores estimados pelo software	31
Figura 8 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho	37
Figura 9 - Número de barras e linhas	42
Figura 10 - Dados de linha declarados em p.u.	42
Figura 11 - Dados de potência ativa demandada	42
Figura 12 - Entrada dos módulos das tensões e ângulos estimados	43
Figura 13 - Sistema teste de distribuição de 12 barras.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de Barra	28
Tabela 2 - Dados de Geração	29
Tabela 3 - Dados dos Ramos.....	29
Tabela 4 - Dados de linha do sistema - teste de 12 barras em diferentes representações	46
Tabela 5 - Medidas de injeção de potência ativa e reativa do sistema - teste de 12 barras em diferentes representações	47
Tabela 6 - Módulos e ângulos das tensões para o fluxo de potência linearizado e não linearizado	48
Tabela 7 - Comparativo entre módulos e ângulos das tensões obtidos a partir do cálculo do fluxo de potência e da estimação de estados	49
Tabela 8 - Medidas de injeção de potência ativa e reativa do sistema - teste de 12 barras com inserção de 2 unidades de GD em diferentes representações.....	50
Tabela 9 - Comparativo entre módulos e ângulos das tensões obtidos a partir do cálculo do fluxo de potência e da estimação de estados para o sistema - teste de 12 barras com 3 unidades de GD	52
Tabela 10 - Valores das potências ativas das unidades geradoras inseridas no sistema de 12 barras.....	53
Tabela 11 - Medidas de injeção de potência ativa e reativa do sistema - teste de 12 barras com inserção de 8 unidades de GD em diferentes representações.....	53
Tabela 12 - Comparativo entre módulos e ângulos das tensões obtidos a partir do cálculo do fluxo de potência e da estimação de estados para o sistema - teste de 12 barras com 8 unidades de GD	54

Tabela 13 - Comparativo entre os módulos das tensões e os ângulos para o caso do sistema - teste 12 barras sem GD.....	55
Tabela 14 - Comparativo entre os módulos das tensões e os ângulos para o caso do sistema - teste 12 barras com 3 unidades de GD.....	55
Tabela 15 - Comparativo entre os módulos das tensões e os ângulos para o caso do sistema - teste 12 barras com 8 unidades de GD.....	56
Tabela 16 - Comparação entre o número de iterações das simulações de fluxo de potência para o sistema-teste 12 barras	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
c.p.u.	<i>Complex Per Unit Normalization</i>
DELT	Departamento de Engenharia Elétrica
EESP	Estimação de Estados de Sistemas Elétricos de Potência
GD	Geração Distribuída
IMPA	Instituto de Matemática Pura e Aplicada
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
MT	Média Tensão
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
p.u.	Por Unidade
REN	Resolução Normativa
SD	Sistema de Distribuição
SEP	Sistema Elétrico de Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	INTRODUÇÃO	15
1.2	MOTIVAÇÃO	17
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos	19
1.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.4.1	Geração Distribuída.....	19
1.4.2	Estimação de Estados	21
1.5	CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	24
1.6	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	24
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
2.1	INTRODUÇÃO	25
2.2	MATLAB	26
2.2.1	MATPOWER	26
2.2.2	ESTIMADOR DE ESTADOS DO MATPOWER	30
2.3	MODELO LINEAR DA REDE	32
2.3.1	Fluxo de Potência Linearizado.....	32
2.4	NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE	33
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	37
3.1	DADOS DE ENTRADA ORIGINAIS.....	38
3.2	NORMALIZAÇÃO DOS DADOS VIA C.P.U.....	39
3.3	CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA.....	40
3.4	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS VIA MATPOWER	40
3.5	ESTIMAÇÃO DAS QUANTIDADES GERADAS POR GD NOS SISTEMAS TESTES	41
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	45
4.1	INTRODUÇÃO	45
4.2	SISTEMA TESTE DE DISTRIBUIÇÃO 12 BARRAS	45

4.2.1 Caso 1: Sistema - teste 12 barras sem inserção de GD na rede	45
4.2.2 Caso 2: Sistema - teste 12 barras com inserção de 3 unidades de GD na rede	50
4.2.3 Caso 3: Sistema - teste 12 barras com inserção de 8 unidades de GD na rede	52
4.3 COMPARATIVO ENTRE O MÓDULO DAS TENSÕES E ÂNGULOS NAS SIMULAÇÕES COM DADOS EM P.U. E EM C.P.U.....	54
4.4 COMPARATIVO ENTRE O NÚMERO DE ITERAÇÕES PARA SIMULAÇÕES DE ESTIMAÇÃO DE ESTADOS NO MATPOWER EM P.U. E EM C.P.U.	56
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	57
5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	59
5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	59
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A Geração Distribuída, GD, consiste na produção de energia, elétrica e/ou térmica, de forma descentralizada, no próprio ponto de consumo ou próximo deste (INEE). Desde 2012, a GD vem sofrendo expansão no Brasil apresentando um aumento gradativo em capacidade instalada ao longo dos anos e a diversificação na matriz energética nacional, conforme ilustra a Figura 1.

Da Figura 1, pode-se observar que em 2012 a capacidade instalada era de cerca de 0,4 MW, sendo que a única fonte utilizada na época era a fotovoltaica. Em 2013 ainda havia o pioneirismo da geração fotovoltaica, porém com um aumento de capacidade instalada, passando para 1,8 MW.

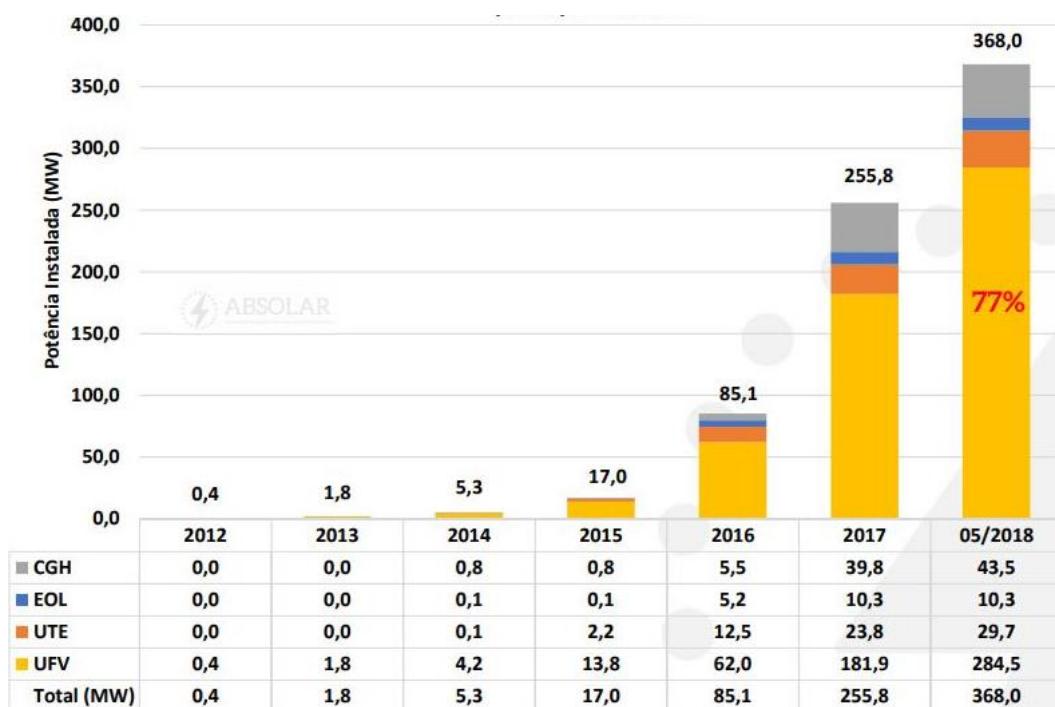


Figura 1 - Evolução da Potência Instalada (MW) em Microgeração e Minigeração Distribuída por Tipo de Fonte (ABSOLAR, 2018).

No ano de 2014 percebe-se que a matriz energética começa a se diversificar com a inserção de novas fontes de GD como a fonte eólica, as usinas termelétricas por combustão de biomassa, as centrais de geração hidráulica e a fotovoltaica que continuou em expansão. Somando a capacidade instalada de todas as fontes, no ano de 2014 a potência instalada foi de 5,3 MW.

No ano de 2015, a potência instalada foi de 17 MW levando em conta todas as fontes de GD. Porém no ano de 2016, bem como nos anos seguintes de 2017 e 2018, houve um crescimento bastante elevado em relação aos anos anteriores. Para os anos de 2016, 2017 e 2018 os dados de capacidade instalada levantados foram de 85,1 MW, 255,8 MW e 368,0 MW, respectivamente, sendo que no ano de 2018 do total de capacidade instalada a geração fotovoltaica fica representada por 77% do total.

Segundo a ANEEL, a classe residencial lidera como classe consumidora-geradora, com cerca de 16,2 mil ligações em dados de 2018. A classe de consumo residencial é responsável por 58,71% de conexões, seguida da classe comercial que representa cerca de 35,25% das instalações (ANEEL, 2018). Desta forma, o aumento do montante de energia gerada por essas fontes não pode ser ignorado, principalmente do ponto de vista dos impactos que a inserção destas causam na operação da rede elétrica.

De maneira positiva, a GD está associada a baixos impactos ambientais e a utilização de fontes renováveis de energia. Como está próximo da carga, dispensa o uso de linhas de transmissão, contribuindo assim para a redução de perdas associadas a transportes por longas distâncias, que seriam compensadas por uma geração adicional (SOUZA, 2008). Outras vantagens associadas à GD que podem ser citadas são: melhoria na qualidade e segurança de suprimento de energia elétrica, melhoria na curva de carga e a melhoria da estabilidade do sistema elétrico (CARVALHO; ARAÚJO; AMADO, 2004; e LEMOS; SPAIER, 2003). Além disso, o uso de GD possibilita a substituição e/ou prorrogação de altos investimentos na expansão do sistema de transmissão e distribuição (SOUZA, 2008).

O Operador do sistema de subtransmissão/distribuição é responsável por garantir a confiabilidade e segurança da operação, e para isto, é necessário que o mesmo obtenha em tempo real, de forma confiável, as informações a respeito das condições de operação do sistema. Ao inserir fontes de GD na rede, criam-se condições para alterações nos sentidos dos fluxos, aumentando assim os riscos operacionais. Além disso, o aumento expressivo da inserção dessas fontes associado à sua natureza intermitente e imprevisibilidade de operação trazem diversos desafios para a operação dos sistemas de distribuição.

Portanto, torna-se fundamental o aprimoramento das ferramentas computacionais de apoio, de forma que essas sejam capazes de auxiliar na

monitoração das fontes de GD inseridas nos sistemas que estão sob sua responsabilidade, visando garantir uma operação segura e confiável dessas redes.

No nível de transmissão, a modelagem em tempo real já é uma realidade e é acompanhada por diversas ferramentas capazes de possibilitar a operação dos sistemas de potência com altos níveis de confiabilidade. A modelagem em tempo real está associada à Estimação de Estados de Sistemas Elétricos de Potência (EESP), a partir da qual é possível estimar tensões complexas nos barramentos das subestações e as demais variáveis de interesse, como por exemplo, fluxos de potência ativa e reativa nos elementos da rede elétrica e injeções de potência ativa e reativa nos nós.

A EESP é uma ferramenta de base estatística que age como um filtro de ruídos na eliminação de erros associados ao processo de monitoração e medição da rede elétrica. Neste processo, a topologia e os parâmetros da rede são supostos conhecidos e utilizados juntamente com medidas adquiridas em tempo real para a obtenção da “melhor estimativa” das variáveis de estado do sistema. Os estados formam um conjunto de variáveis, usualmente as tensões complexas nos nós, as quais, se conhecidas, determinam todas as outras quantidades do sistema. Em suma, a EESP, determina o ponto de operação atual do sistema elétrico a partir de um conjunto de medidas e dados sujeitos a erros.

Este trabalho se encontra nesse contexto e envolve o estudo da utilização da EESP como forma de garantir a monitoração das fontes de GD, fornecendo ao operador dos sistemas de distribuição o estado atual de geração de cada unidade conectada em sua área de responsabilidade. Para tanto será utilizado o estimador de estados do pacote computacional MATPOWER (ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; GAN, 2011; ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011) em conjunto com a aplicação dos conceitos de normalização complexa por unidade (c.p.u.) (DURCE, 2012), desenvolvidos no grupo de pesquisa de sistemas de potência do DELT.

1.2 MOTIVAÇÃO

A inclusão de fontes de GD no SD contribuem de forma positiva, pois dentre as inúmeras vantagens que estas apresentam, pode-se destacar que o SD ganha

mais confiabilidade, visto que a presença de GD permite que os fluxos de potência dos alimentadores não dependam exclusivamente da subestação, e, por consequência, dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. Também, quando do desligamento do SD de uma região por ocorrência de algum evento na rede de transmissão ou na geração de energia elétrica, parte da demanda pode ser suprida pela geração local.

Em contrapartida, a inserção de GD em SD também apresenta desvantagens. Em geral, o sistema de GD tem como principais recursos para geração fontes alternativas de energia elétrica que dependem de fatores climáticos. Logo, intermitências climáticas podem levar a redução ou ao aumento da potência injetada na rede, não sendo uma geração contínua e levando a impossibilidade de precisar estes valores. Problemas de comunicação entre os produtores independentes e o operador do sistema também podem levar a falta de precisão quanto ao levantamento dos dados necessários para o monitoramento da rede.

Assim, surge a necessidade do uso de uma ferramenta que possibilite o levantamento em tempo real de informações de injeção de potência no SD. A EESD permite que o Operador do Sistema consiga determinar qual a condição atual do SD, independente da existência de outros sistemas estejam acoplados a este e sob sua responsabilidade. Também, o EESD permite o monitoramento de injeções de potência na rede pelas diversas fontes de GD espalhadas pelo sistema (COLOMBO, 2016).

Diante de tal problemática, surge a motivação para este trabalho, o estudo da utilização de EESD de forma a monitorar o SD, coletando informações mais precisas da condição atual do sistema quase que em tempo real, de forma a garantir uma maior segurança nas operações a serem realizadas no sistema, bem como um maior controle destas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em fornecer, do ponto de vista da concessionária, a estimativa da quantidade de geração em barras de distribuição utilizando o estimador de estados do pacote computacional MATPOWER em conjunto

com os conceitos de normalização complexa por unidade desenvolvidos no grupo de pesquisa do DELT.

1.3.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

1. Estudo da Estimação de Estados e dos conceitos de Normalização Complexa por Unidade;
2. Aprendizado do pacote computacional MATPOWER, com ênfase no estimador de estados;
3. Modelagem de redes de distribuição com a inserção de GD no MATPOWER;
4. Simulações, testes e análise dos resultados (levantamento das quantidades geradas em barras com GD no sistema elétrico de potência (SEP)).

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada uma breve revisão bibliográfica, levantando as contribuições atuais mais relevantes, a fim de abordar os temas centrais que permearão todo este trabalho, sendo eles: Geração Distribuída e Estimação de Estados.

1.4.1 Geração Distribuída

Como já destacado no item 1.1, a GD consiste na geração de energia, elétrica e/ou térmica, que ocorre no ponto de consumo ou próximo deste. É uma fonte de geração acoplada diretamente à rede de distribuição e pode ter como matéria-prima de sua geração fontes alternativas de energia elétrica, como exemplo destacam-se a geração eólica, as Pequenas Centrais Hidrelétricas, PCHs, a geração fotovoltaica e a geração por biomassa.

A GD também pode fazer o uso de combustíveis fósseis na geração, porém verifica-se um maior incentivo às fontes renováveis, visto que contribui positivamente

para a diversificação da matriz energética, além da redução das emissões dos gases do efeito estufa e a mitigação das mudanças climáticas. Outro aspecto que caracteriza a GD é a geração em pequena escala, o que possibilita a conexão próxima a diversos pontos da rede elétrica (alta, média e baixa tensão), injetando uma potência reduzida na rede em comparação à geração concentrada (BARBOSA FILHO; AZEVEDO, 2013).

Quanto aos níveis de potência instalada, a ANEEL estabelece na REN nº 482, de 17 de abril de 2012, a classificação em microgeração e minigeração distribuída. Conforme o artigo 2º da REN nº 482/2012, em sua redação fica definida a classificação:

- I – microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize a cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- II – minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Em resumo, o que difere a microgeração da minigeração é a potência instalada. O termo cogeração qualificada que aparece no texto da REN é um termo que é definido na REN nº 235, de 14 de novembro de 2016. De forma sucinta, a cogeração é o processo de geração simultânea de duas ou mais energias a partir do consumo de uma mesma fonte de energia (SILVA, 2009). Segundo a REN, seria a conversão da energia térmica e da energia mecânica em energia elétrica, podendo ser a conversão total ou parcial. A cogeração qualificada, segundo a REN nº 235, é aquela que atende aos requisitos definidos na mesma resolução.

Existem muitas vantagens quando da implementação de GD em SD. Para o consumidor de energia elétrica, a GD contribui para a melhora da qualidade e confiabilidade do abastecimento, principalmente para os consumidores próximos ao local de geração, visto que há redução de perdas, pois não passa pela rede de distribuição ou as longas linhas de transmissão (BARBOSA FILHO; AZEVEDO, 2013). Para o meio ambiente, quando do uso de fontes renováveis de energia, é uma geração de baixo impacto ambiental, reduz a emissão dos gases do efeito estufa e favorece a

diversificação da matriz energética (PENICHE; FERRAREZZI, 2018). Por fim, para o setor elétrico são, a implementação de GD reduz a dependência por geração centralizada, o que possibilita a postergação ou até mesmo a substituição de uma expansão do sistema elétrico de transmissão e distribuição (SOUZA, 2008).

Em contrapartida, a implementação de GD também levam a desvantagens. Tradicionalmente, a geração de energia elétrica é transportada da alta tensão (centenas de kV) para a baixa tensão quando chega ao cliente residencial. O que vale ressaltar é que o fluxo de potência é unidirecional. A inserção das GD vem trazendo mudanças significativas para a Operação do Sistema Elétrico, visto que este fica mais complexo, pois mostra a possibilidade de ocorrer à inversão do fluxo de potência (PEIXOTO, 2017), surgindo assim à necessidade da alteração de procedimentos de operação, controle e proteção de redes, além da dificuldade na tarifação e a eventual incidência de tributos (PENICHE; FERRAREZZI, 2018).

Diante de tais desvantagens, o Operador dos sistemas de subtransmissão e distribuição precisa garantir a confiabilidade e segurança nas operações, logo, este precisa ter acesso em tempo real a informações confiáveis sobre as condições do sistema. Assim, surge a necessidade de utilizar ferramentas computacionais para auxiliar na monitoração da rede, fornecendo informações a respeito das fontes de GD nos sistemas que estão sob sua responsabilidade (SOUZA, 2008). Uma ferramenta que já é empregada à nível de transmissão é o Estimador de Estados. Esta será a ferramenta de estudo neste trabalho e será abordada em um próximo item.

1.4.2 Estimação de Estados

Em busca de redes elétricas mais inteligentes, ao longo dos anos o sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica vêm passando por transformações devido a inserção de novas tecnologias de controle, medição e comunicação. O SD é o que mais tem sofrido os impactos destas transformações.

A operação do SD ainda depende de manobras manuais, sendo necessário o envio de técnicos para a verificação de falhas de abastecimentos quando da constatação de consumidores. Este procedimento também acontece quando de operações planejadas como chaveamentos. A inserção da tecnologia dos *smart grids* vem para mudar essa realidade, possibilitando assim a operação remota destas redes, bem como a verificação de falhas na operação.

Todavia, faz-se necessário que o SD seja mais confiável quanto à aquisição de informações, para garantir que estas técnicas de monitoração possam ser implementadas com êxito e a operação do mesmo possa ser feita da maneira segura.

A inserção de fontes de GD nas redes de distribuição, bem como a necessidade de aumentar a confiabilidade e a qualidade do serviço prestado aos consumidores incentivaram os estudos de desenvolvimento de metodologias específicas de estimadores de estados nestas redes. A inclusão de GDs na rede de distribuição, como foi salientado no item 1.4.1, pode acarretar a inversão do fluxo de potência, o que leva a uma complexidade maior na operação destas bem como uma proteção mais complexa das mesmas, tendo em vista a necessidade da adaptação às condições operativas em tempo real.

Estimadores de Estado têm sido desenvolvidos para sistemas de transmissão (SOUZA, 2008), pois facilitam o controle da rede e aumenta a observância da mesma. As metodologias e técnicas de Estimação de Estados desenvolvidas para sistemas de transmissão não podem ser aplicadas para sistemas de distribuição, devido a características típicas deste sistema, como baixas tensões, baixa relação X/R , topologia predominantemente radial e ausência de geração, antes da inserção das fontes de GDs. Tendo em vista tal realidade, muitos estudos vêm sendo realizados para possibilitar a implementação dos EEs a nível de distribuição, considerando principalmente a realidade destes sistemas (NOGUEIRA, 2014).

Assim, o número reduzido de medidas em tempo real e a inviabilidade econômica da instalação de um número suficiente de equipamentos de medição, acabam desafiando a resolução do problema de Estimadores de Estado em SDs. A falta de medidas é compensada então por estimativas de carga, baseada nos históricos. Logo, desenvolveu-se a técnica da estimação de carga em tempo real, para possibilitar a aplicação dos EEs.

Os EEs têm por objetivo determinar a melhor estimativa provável do estado atual do sistema, seja de transmissão ou de distribuição. Isso é importante para fazer a análise de segurança do sistema, pois se tratam de informações fornecidas quase que em tempo real sobre o estado operativo da rede, dando melhores condições para o Operador do Sistema atuar. Essas informações podem ser tensões nodais, correntes nos ramos e potência ativa e reativa demandada em cada uma das barras do sistema (OLIVEIRA, 2016).

Para fazer a estimação de estados, um dos métodos principais é o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados, que tem por objetivo a minimização das diferenças entre os valores medidos e os valores estimados. Na literatura, (MONTICELLI, 1999) apresenta a fundamentação teórica da estimação de estados baseada em tal método e inclui temas como fluxo de potência, teoria da observabilidade e análise de erros grosseiros (SOUZA, 2008).

(ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004) oferece uma visão geral ampla da operação do sistema de energia e o papel dos estimadores de estado no gerenciamento geral de energia elétrica. Para isso, utilizam-se modelos, exemplos, tabelas e diretrizes para avaliar os aspectos da estimativa de estados, teste da observabilidade da rede e métodos que garantam a eficiência computacional.

(SANTOS, 2006) aplica os estimadores de estado para fazer a monitoração em tempo real da GD em SD. Tal aplicação permite a comparação entre os níveis de GD estimados pelo método e os valores esperados pelo operador do sistema. Caso isso não se verifique, são fornecidas estimativas de potência gerada nas fontes de GD a partir de medições efetuadas ao longo dos alimentadores.

Da mesma forma, (SOUZA, 2008) apresenta proposta de estudo semelhante à de (SANTOS, 2006), porém a estimação de estados é tratada como um problema de otimização restrita. O algoritmo utilizado para a monitoração das fontes de GD é dividido em duas categorias: seleção de nós suspeitos e identificação de nós errôneos. Para identificar a primeira, faz-se a análise utilizando-se multiplicadores de Lagrange normalizados associados às restrições operacionais. Para a segunda são realizados testes geométricos de colinearidade entre os multiplicadores de Lagrange normalizados das restrições suspeitas e as colunas correspondentes da matriz de covariância destes multiplicadores.

(NOGUEIRA, 2014) apresenta a utilização do estimador de estados desacoplado rápido aplicando o conceito de normalização complexa por unidade, a fim de elevar a relação reatância sobre resistência (X/R) característica do SD a valores característicos do sistema de transmissão, aplicando assim estimadores de estado já existentes na literatura.

1.5 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

As contribuições do presente trabalho se dão na utilização de um software de código aberto para monitoração de geração distribuída, servindo de insumo e material gratuito para operadores de sistemas de distribuição e também de apoio para as pesquisas e projetos futuros do grupo de pesquisa em que está inserido.

1.6 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, incluindo este primeiro capítulo introdutório, que primeiramente faz uma contextualização do atual cenário da GD no Brasil e no mundo, apresenta as principais motivações para o desenvolvimento do mesmo, os objetivos gerais e específicos. Também neste capítulo foi feita a revisão bibliográfica, abordando os temas da GD e Estimação de Estados. Por fim este capítulo encerra apresentando as contribuições deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta quais os materiais e métodos adotados no desenvolvimento deste trabalho. Aqui são apresentadas informações gerais dos softwares utilizados, MATLAB e MATPOWER, com relação à entrada de dados para o cálculo do fluxo de potência e a estimação de estados. Também aborda os temas de modelo linear da rede e da normalização complexa, sendo esta última uma ferramenta essencial.

O capítulo 3 descreve os passos que foram desenvolvidos neste trabalho. Nele consta um fluxograma com todas as etapas. No capítulo consta a descrição etapa a etapa, desde a normalização dos dados até a obtenção das quantidades de potência ativa gerada por GD em cada barra de distribuição.

O capítulo 4 apresenta as simulações e os resultados obtidos. Também é feita uma conclusão em cima destes resultados. São apresentados os dois sistemas - teste que foram utilizados, o de 12 barras e o de 69 barras, ambos sistemas de distribuição. Nas simulações, foram criados diversos casos, variando o número de unidades de GD. São apresentadas simulações de cálculo de fluxo de potência e estimação de estados usando o MATPOWER, além da estimação das quantidades geradas por GD nas barras de distribuição por um algoritmo desenvolvido no MATLAB.

O capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e algumas sugestões de trabalhos futuros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 INTRODUÇÃO

Para atingir o objetivo de estimar as quantidades geradas por GD nos nós e nos ramos das barras de geração dos sistemas apresentados neste trabalho, será necessário o uso de ferramentas computacionais a fim de realizar simulações, obtendo assim os resultados desejados.

As ferramentas computacionais essenciais ao desenvolvimento das simulações serão o MATLAB e o MATPOWER. O MATPOWER é uma *toolbox* compatível com o MATLAB e com o OCTAVE, sendo este último um software livre. Neste trabalho será usado o MATLAB, porque há um maior domínio dos comandos e da interface do software.

A versão da *toolbox* que será usada para o desenvolvimento das simulações é o MATPOWER 6.0, compatível com o MATLAB R2016a.

A estimação das quantidades geradas será feita a partir do Estimador de Estados Linear do MATPOWER. A estimação de estados, como já apresentado anteriormente, é uma ferramenta amplamente aplicada à sistemas de transmissão, e para que seja possível a sua implementação nos sistemas de distribuição faz-se necessário o uso de ferramentas matemáticas, a fim de tornar este compatível ao uso do Estimador.

A normalização complexa por unidade, do inglês *complex per unit normalization* (c.p.u.), é a ferramenta que possibilitará a elevação da relação X/R , tornando viável a aplicação da Estimação de Estados, comumente usados para sistemas de transmissão, que apresentam uma relação X/R mais elevada em comparação à sistemas de distribuição.

Ainda, para que seja possível o uso do Estimador de Estados Linear, será usado o modelo linear da rede, que a partir de simplificações e aproximações, acaba por desprezar a parte reativa da potência, visto que neste estudo o que realmente importa é a potência ativa, tornando o sistema mais simples e de mais fácil compreensão.

2.2 MATLAB

O MATLAB (*Matrix Laboratory*) é um ambiente de programação que apresenta uma linguagem que possibilita a implementação e teste de soluções com facilidade e precisão, dentro de um ambiente amigável e de fácil aprendizado, principalmente se tratando de vetores.

O software também dispõe de uma biblioteca bastante vasta e abrangente de funções matemáticas, geração de gráficos e manipulação de dados. Possui ainda *toolboxes* específicas como: equações diferenciais ordinárias, estatística, processamento de sinais e imagens, dentre outros. Também permite a inserção de bibliotecas externas, como o MATPOWER, enriquecendo e incorporando novas funções (IMPA).

2.2.1 MATPOWER

O MATPOWER é uma *toolbox* de código aberto de um pacote de simulação muito usado por pesquisadores, educadores e estudantes, visando a obtenção de resultados quanto ao cálculo do fluxo de potência e fluxo de potência ótimo (ZIMMERMAN; MURILLO-SÁNCHEZ; THOMAS, 2011).

Como já destacado na introdução deste capítulo, esta ferramenta é compatível tanto com o MATLAB quanto com o OCTAVE. Esta *toolbox* conta com uma biblioteca de modelos IEEE e outros, que podem ser usados para simulações e teste iniciais.

2.2.1.1 Cálculo do Fluxo de Potência

Para o cálculo do fluxo de potência, tanto linear quanto não linear, a entrada de dados no MATPOWER é feita da mesma maneira. Em uma função é feita a declaração dos parâmetros de barra, geração, ramo e custo de geração. Este último só é necessário caso também se deseje calcular o despacho econômico.

Também é declarada a base de potência reativa de cada caso na entrada de dados.

A seguir, as Figura 2, Figura 3 e Figura 4, irão ilustrar como é feita esta entrada de dados no MATPOWER para o cálculo do fluxo de potência.

```

1 function mpc = caso_12bus
2 %% MATPOWER Case Format : Version 2
3 mpc.version = '2';
4
5 %%----- Power Flow Data -----%%
6 %% system MVA base
7 mpc.baseMVA = 1;
8
9 %% bus data
10 % bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
11 mpc.bus = [
12 1 3 0.00000 0.000000 0 0 1 1.0000 0.0000 11 1 1.10 0.90;
13 2 1 -3.671809 7.649694 0 0 1 0.9949 0.1042 11 1 1.10 0.90;
14 3 1 -1.504414 4.768306 0 0 1 0.9896 0.2140 11 1 1.10 0.90;
15 4 1 -3.365825 7.012219 0 0 1 0.9813 0.3840 11 1 1.10 0.90;
16 5 1 -1.835905 3.824847 0 0 1 0.9699 0.6208 11 1 1.10 0.90;
17 6 1 -0.752207 2.384153 0 0 1 0.9665 0.6913 11 1 1.10 0.90;
18 7 1 -3.365825 7.012219 0 0 1 0.9641 0.7491 11 1 1.10 0.90;
19 8 1 -2.753857 5.737270 0 0 1 0.9557 1.0004 11 1 1.10 0.90;
20 9 1 -2.447873 5.099796 0 0 1 0.9474 1.2526 11 1 1.10 0.90;
21 10 1 -1.670159 4.296576 0 0 1 0.9443 1.3428 11 1 1.10 0.90;
22 11 1 -1.504414 4.768306 0 0 1 0.9433 1.3707 11 1 1.10 0.90;
23 12 1 -0.917952 1.912423 0 0 1 0.9428 1.3824 11 1 1.10 0.90;
24 ];

```

Figura 2 - Potência Aparente de Base e Dados de Barra
Fonte: a Autora (2019)

```

26 %% generator data
27 % bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin
28 mpc.gen = [
29 1 0.00 0.00 300 -300 1.0 0.01 1 1040 0 ;
30
31 ];

```

Figura 3 - Dados de Geração
Fonte: a Autora (2019)

```

33 %% branch data
34 % fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status angmin angmax
35 mpc.branch = [
36 1 2 -0.000006 0.000098 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
37 2 3 -0.000006 0.000106 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
38 3 4 -0.000011 0.000187 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
39 4 5 -0.000017 0.000285 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
40 5 6 -0.000006 0.000098 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
41 6 7 -0.000002 0.000089 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
42 7 8 0.000025 0.000374 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
43 8 9 0.000030 0.000483 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
44 9 10 0.000015 0.000248 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
45 10 11 0.000008 0.000130 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
46 11 12 0.000006 0.000106 0.000000 0 0 0 0 0 0 1 -360 360;
47 ];

```

Figura 4 - Dados dos Ramos
Fonte: a Autora (2019)

Cada uma das colunas tem um significado. As Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3, esclarecem o que significa cada uma das colunas e também a respectiva unidade de cada grandeza para cada uma das entradas. Ressaltando que nas tabelas a seguir constam apenas as colunas presentes nas Figura 2, Figura 3 e Figura 4.

Tabela 1 - Dados de Barra

Nome	Coluna	Descrição
bus_i	1	Número da barra (inteiro positivo)
Type	2	Tipo da barra, onde: 1 = barra PQ 2 = barra PV 3 = barra de referência 4 = barra isolada
Pd	3	Potência ativa demandada (MW)
Qd	4	Potência reativa demandada (MVar)
Gs	5	Condutância shunt (MW)
Bs	6	Susceptância shunt (MVar)
Área	7	Número da área (inteiro positivo)
Vm	8	Módulo da tensão (p.u.)
Va	9	Ângulo da tensão (graus)
baseKV	10	Base de tensão (kV)
Zone	11	Zona de perdas (inteiro positivo)
Vmax	12	Módulo máximo da tensão (p.u.)
Vmin	13	Módulo mínimo da tensão (p.u.)

Tabela 2 - Dados de Geração

Nome	Coluna	Descrição
Bus	1	Número da barra (inteiro positivo)
Pg	2	Potência ativa injetada (MW)
Qg	3	Potência reativa injetada (MVar)
Qmax	4	Máxima potência reativa injetada (MVar)
Qmin	5	Mínima potência reativa injetada (MVar)
Vg	6	Máxima potência (p.u.)
mBase	7	Mase MVA padrão
Status	8	Status do gerador: > 0 máquina operando ≤ 0 máquina fora de operação
Pmax	9	Máxima potência ativa injetada (MW)
Pmin	10	Mínima potência ativa injetada (MW)

Tabela 3 - Dados dos Ramos

Nome	Coluna	Descrição
Fbus	1	“De” uma barra (<i>From</i>)
Tbus	2	“Para” outra barra (<i>To</i>)
R	3	Resistência (p.u.)
X	4	Reatância (p.u.)
B	5	Susceptância total da linha (p.u.)
rateA	6	Classificação A em MVA (classificação de longo prazo)
rateB	7	Classificação B em MVA (classificação de curto prazo)
rateC	8	Classificação C em MVA (classificação de emergência)
Ratio	9	Relação de transformação, proporção
Angle	10	Ângulo de mudança de fase do transformador (graus)

Status	11	Barra de ramificação inicial , 1 = em operação, 0 = fora de operação
Angmin	12	Mínima diferença angular (graus)
Angmax	13	Máxima diferença angular (graus)

Para rodar o fluxo de potência linear, usa-se o comando *rundcpf*. Neste, será obtido o fluxo de potência, desprezando-se a parte reativa, que é o suficiente para este trabalho, pois o que mais interessa é a parte ativa da potência.

Para rodar o fluxo de potência não linear, usa-se o comando *runpf*. Isso possibilitará a obtenção do resultado do fluxo de potência levando em consideração a parte ativa e reativa da potência, sem simplificações.

Será rodado tanto o fluxo de potência linear, quanto o não linear, a fim de comparar ambos os resultados, analisando o quão semelhantes são os valores obtidos. Assim, é possível certificar que o fluxo de potência linear é uma boa aproximação para o caso em estudo.

2.2.2 ESTIMADOR DE ESTADOS DO MATPOWER

O Estimador de Estados do MATPOWER é uma das principais ferramentas computacionais que será usada neste trabalho, a fim de atingir o objetivo geral deste trabalho que é o fornecimento da estimativa das quantidades geradas por GD nas barras de distribuição.

Assim, a entrada de dados desta ferramenta é feita de forma muito semelhante à entrada de dados para o fluxo de potência. Essencialmente, serão necessários os dados de linha e de barra, além das medidas dos fluxos e das injeções.

De dados de linha, são essenciais a resistência, a reatância e a susceptância total da linha. De dados de barra são essenciais as potências ativa e reativa gerada pela barra, bem como as potências ativa e reativa demandada.

Quanto às medidas de fluxo e das injeções, são essenciais para posteriormente traçar um comparativo entre as medidas reais, do medidor, e as estimadas pelo estimador de estados, a fim de analisar a proximidade das duas e poder calcular o erro percentual em cima delas.

```

17      %% which measurements are available
18 -    idx.idx_zPF = [1;2];
19 -    idx.idx_zPT = [3];
20 -    idx.idx_zPG = [1;2;3];
21 -    idx.idx_zVa = [];
22 -    idx.idx_zQF = [];
23 -    idx.idx_zQT = [];
24 -    idx.idx_zQG = [];
25 -    idx.idx_zVm = [2;3];

```

Figura 5 - Barras válidas
Fonte: A Autora

```

27      %% specify measurements
28 -    measure.PF = [0.12;0.10];
29 -    measure.PT = [-0.04];
30 -    measure.PG = [0.58;0.30;0.14];
31 -    measure.Va = [];
32 -    measure.QF = [];
33 -    measure.QT = [];
34 -    measure.QG = [];
35 -    measure.Vm = [1.04;0.98];

```

Figura 6 - Medidas específicas
Fonte: A Autora

Comparison of measurements and their estimations			
NOTE: In the order of PF, PT, PG, Va, QF, QT, QG, Vm (if applicable)			
Type	Index (#)	Measurement (pu)	Estimation (pu)
PF	1	0.1200	0.1474
PF	2	0.1000	0.0783
PT	3	-0.0400	-0.0399
PG	1	0.5800	0.5757
PG	2	0.3000	0.3034
PG	3	0.1400	0.1336
Vm	2	1.0400	1.0258
Vm	3	0.9800	0.9790

Figura 7 - Comparação entre os valores medidos e os valores estimados pelo software
Fonte: A Autora

As Figura 5 e Figura 6 ilustram como é feita a entrada de dados para usar o Estimador de Estados no MATPOWER. Na Figura 5 são declaradas quais barras estão sendo consideradas para o estudo. O exemplo que é ilustrado na Figura 5 é um

modelo padrão do software, um modelo teste de 3 barras. Por isso, ali são declaradas apenas 3 barras válidas. Neste mesmo item é feita a declaração da topologia do sistema, quando se refere o PF (*From* – de onde parte o fluxo) PT (*To* – para onde chega o fluxo).

Na Figura 6 são declaradas as medidas coletadas dos medidores com relação às injeções. No exemplo em questão, a parte reativa está sendo desprezada.

A Figura 7 mostra o comparativo entre as medidas coletadas e as estimadas. Percebe-se que elas são bem próximas, em alguns casos diferindo apenas na terceira casa decimal, indicando assim que a ferramenta é eficaz para esta aplicação.

2.3 MODELO LINEAR DA REDE

O modelo linear da rede, ou acoplamento P- θ , através de aproximações e simplificações, permite tornar o problema linear, pois elimina a análise da parte reativa, fornecendo assim uma boa estimativa da distribuição do fluxo de potência ativa na rede.

A seguir será abordado o fluxo de potência linearizado, que faz uso direto do acoplamento P- θ e é essencial ao trabalho proposto.

2.3.1 Fluxo de Potência Linearizado

O fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão é proporcional à abertura angular ($\theta_k - \theta_m$), sendo que o sentido do fluxo, o deslocamento, vai do maior ângulo para o menor. Esta relação vale para as linhas de transmissão se estendendo para os defasadores e transformadores em fase (MONTICELLI, 1983).

O fluxo de potência entre barras pode ser definido conforme a equação (1) a seguir.

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m \sin \theta_{km} \quad (1)$$

Com base na equação (1), pode-se desenvolver um modelo linearizado para o estudo do fluxo de potência. Vale ressaltar que a linearização permite a obtenção do fluxo de potência de forma mais simplificada, não havendo a necessidade de recorrer a métodos iterativos (PINTO JR., 2005).

São necessárias algumas aproximações para determinar a formulação do fluxo de potência linearizado. As barras operam com tensão muito próximas a nominal, assim, adota-se o módulo das tensões nas barras igual à $V_k = 1,0 \text{ p.u.}$, onde k varia de 1 ao número total de barras.

Como a abertura das barras é pequena, pode-se usar a aproximação trigonométrica que $\sin \theta_{km} = \theta_{km}$.

As perdas ativas da linha também são desprezadas para que seja possível fazer a linearização, logo, matematicamente tal simplificação é representada pela equação (2).

$$b_{km} = -\frac{1}{x_{km}} \quad (2)$$

Assim, a equação (1) apresentada é simplificada e pode ser representada pela equação 3, para o cálculo do fluxo de potência linearizado.

$$P_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} = \frac{\theta_{km}}{x_{km}} \quad (3)$$

2.4 NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE

Das mudanças ocorridas no setor elétrico, surgiu a necessidade de adaptação a estas, assim, em (GARCIA; MONTICELLI, 1984) há a apresentação da técnica da rotação de eixos. Esta sugere que seja feita uma rotação de eixos nas admitâncias e nas potências de rede original a fim de obter uma nova rede com novos valores para as relações X/R (DURCE, 2012).

A partir desta técnica apresentada, desenvolveu-se em (LOURENÇO; LODDI; TORTELLI, 2010) e em (DURCE, 2012) a Normalização Complexa por Unidade (cpu), a partir da análise do uso da técnica do Fluxo de Potência de sistemas interligados de transmissão e distribuição, T&D.

Através do uso de uma base de potência complexa associada à escolha do ângulo de base apropriado, as relação X/R das redes de distribuição são ajustadas, tendo os valores muito semelhantes às relações X/R das redes de transmissão, possibilitando assim a aplicação de técnicas de cálculo de Fluxo de Potência que já foram consolidadas para os sistemas de transmissão, tendo sucesso assim quanto a

aplicação. Em (NOGUEIRA, 2014) é utilizado o estimador de estados desacoplado rápido, aplicando o conceito de cpu, a fim de conseguir a elevação das relações X/R dos sistemas de distribuição a valores característicos do sistema de transmissão, possibilitando assim a aplicação de estimadores de estados já existentes na literatura.

Em (TORTELLI et al., 2015) a proposta da normalização complexa por unidade foi finalizada e levantou-se uma forma eficaz da determinação do ângulo de base para a normalização.

A técnica do cpu está baseada na adoção de um ângulo de base de potência complexa, conforme exposto na equação (3)

$$\dot{S}_{base} = |\dot{S}_{base}| \cdot e^{-j\phi_{base}} \quad (3)$$

sendo ϕ_{base} o ângulo de base.

De forma a manter o estado original da rede, as bases de tensão são normalizadas da forma convencional e são mantidas reais conforme equação (4).

$$\dot{V}_{base} = |\dot{V}_{base}| \cdot e^{j0} = V_{base} \quad (4)$$

Assim, a impedância pode ser determinada através da equação (5).

$$\dot{Z}_{base} = \frac{V_{base}^2}{\dot{S}_{base}^*} = |\dot{Z}_{base}| \cdot e^{-j\phi_{base}} \quad (5)$$

A magnitude da impedância base (Z_{base}) é a mesma, independente do tipo de normalização, convencional ou complexa. Porém, na cpu, o ângulo da impedância base vai variar sofrendo influência do ângulo de base da potência de normalização, como ilustrado na equação (6).

$$\dot{Z}_{cpu} = \frac{R_{\Omega} + jX_{\Omega}}{\dot{Z}_{base}} = \frac{|\dot{Z}_{\Omega}| \cdot e^{j\theta}}{|\dot{Z}_{base}| \cdot e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{Z}_{pu}| \cdot e^{j(\theta + \phi_{base})} \quad (6)$$

Na equação (4) θ representa o ângulo de fase original da impedância.

Na sequência, é possível determinar a resistência e a reatância normalizadas de forma complexa. Estas são ilustradas pelas equações (7) e (8), respectivamente.

$$R_{cpu} = |\dot{Z}_{pu}| \cdot \cos(\theta + \phi_{base}) \quad (7)$$

$$X_{cpu} = |\dot{Z}_{pu}| \cdot \sin(\theta + \phi_{base}) \quad (8)$$

A partir das equações (7) e (8), é possível obter a relação X/R normalizada de forma complexa, conforme equação (9).

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = \tan(\theta + \phi_{base}) \quad (9)$$

Na Figura 2 observa-se a aplicação da cpu em um ramo com baixa relação X/R .

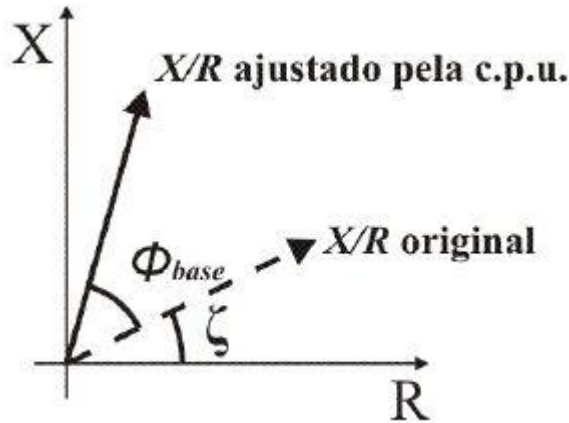


Figura 2 – Aplicação da Normalização Complexa por Unidade (DURCE, 2012)

Uma vez aplicada a normalização complexa no sistema, novos valores para os parâmetros da rede são obtidos, bem como novos valores de injeção de potência ativa e reativa, que podem ser calculados. Estes são obtidos da mesma forma que a normalização convencional (TORTELLI et al., 2015), conforme demonstram as equações (10) e (11).

$$\dot{S}_{k_{cpu}} = \frac{|\dot{S}_{k_{VA}}| \cdot e^{j\theta_k}}{|\dot{S}_{k_{base}}| \cdot e^{-j\theta_{base}}} = |\dot{S}_{k_{pu}}| \cdot e^{j(\theta_k + \phi_{base})} \quad (10)$$

$$\dot{S}_{k_{cpu}} = (P_{k_{pu}} + jQ_{k_{pu}}) \cdot e^{j\phi_{base}} \quad (11)$$

As injeções de potência ativa e reativa sofrem alteração e então são dadas pelas equações (12) e (13).

$$P_{k_{cpu}} = \frac{P_{k_W}}{S_{k_{base}}} = |\dot{S}_{k_{pu}}| \cdot \cos(\theta_k + \phi_{base}) \quad (12)$$

$$Q_{k_{cpu}} = \frac{Q_{k_{var}}}{S_{k_{base}}} = |\dot{S}_{k_{pu}}| \cdot \sin(\theta_k + \phi_{base}) \quad (13)$$

Em ambas as equações, (12) e (13), θ_k representa o ângulo de fase original da potência complexa.

Para o fluxo de potência, a partir da normalização complexa, tem-se a equação (14) e (15).

$$\dot{S}_{km_{cpu}} = \frac{|\dot{S}_{km_{VA}}| \cdot e^{j\theta_{km}}}{|\dot{S}_{km_{base}}| \cdot e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{S}_{km_{pu}}| \cdot e^{j(\theta_{km} + \phi_{base})} \quad (14)$$

$$\dot{S}_{km_{cpu}} = (P_{km_{pu}} + jQ_{km_{pu}}) \cdot e^{j\phi_{base}} \quad (15)$$

Os fluxos de potência ativa e reativa são dados pelas equações (16) e (17).

$$P_{km_{cpu}} = \frac{P_{km_W}}{S_{km_{base}}} = |\dot{S}_{km_{pu}}| \cdot \cos(\theta_{km} + \phi_{base}) \quad (16)$$

$$Q_{km_{cpu}} = \frac{Q_{km_{var}}}{S_{km_{base}}} = |\dot{S}_{km_{pu}}| \cdot \sin(\theta_{km} + \phi_{base}) \quad (17)$$

Em ambas as equações, (16) e (17), θ_{km} representa o ângulo de fase original da potência complexa.

A base de corrente pode ser descrita pela equação (18).

$$\dot{I}_{base} = \frac{V_{base}}{|\dot{Z}_{base}| \cdot e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{I}_{base}| \cdot e^{j\phi_{base}} \quad (18)$$

A partir da equação (18), obtém-se a equação (19).

$$\dot{I}_{cpu} = \frac{|\dot{I}_A| \cdot e^{j\beta}}{|\dot{I}_{base}| \cdot e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{I}_{pu}| \cdot e^{j(\beta + \phi_{base})} \quad (19)$$

Na equação (19), β representa o ângulo de fase original da corrente.

Na equação (18) observa-se que $\dot{I}_{base}$ tem o mesmo ângulo de $\dot{S}_{k_{base}}$, porém em sentido oposto. Assim, o valor real para a base de tensão é garantido, mantendo o sistema em seu estado original. A verificação pode ser feita ao aplicar as equações (3) e (18) em $\dot{S} = \dot{V} \cdot \dot{I}^*$, resultando assim nas equações (20), (21), (22) e (23).

$$\dot{S}_{k_{base}} = \dot{V}_{base} \cdot \dot{I}_{base}^* \quad (20)$$

$$|\dot{S}_{k_{base}}| \cdot e^{-j\phi_{base}} = V_{base} \cdot |\dot{I}_{base}| \cdot e^{-j\phi_{base}} \quad (21)$$

$$V_{base} = \frac{|\dot{I}_{base}| \cdot e^{-j\phi_{base}}}{|\dot{S}_{k_{base}}| \cdot e^{-j\phi_{base}}} \quad (22)$$

$$V_{base} = \frac{I_{base}}{S_{base}} \quad (23)$$

Em suma, pode-se concluir que a normalização complexa, cpu, aplicada em uma rede implica em valores de tensões complexas das barras idênticos aos valores resultantes da normalização convencional em pu. Ou seja, o estado do sistema encontrado em ambas as normalizações são equivalentes (NOGUEIRA, 2014).

$$V_{cpu} \equiv V_{pu} \quad (24)$$

$$\theta_{cpu} \equiv \theta_{pu} \quad (25)$$

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Nesta seção será relatado o desenvolvimento do trabalho, os métodos e procedimentos adotados, entradas de dados, softwares utilizados, porém os resultados serão apresentados na seção seguinte.

Para estruturar melhor as ideias deste capítulo, a Figura 8 apresenta um fluxograma esquematizando as etapas do desenvolvimento do trabalho.



Figura 8 - Fluxograma do desenvolvimento do trabalho

A seguir será descrita cada etapa de maneira mais detalhada, tomando como base a sequência lógica do fluxograma representado na Figura 8.

3.1 DADOS DE ENTRADA ORIGINAIS

Para o desenvolvimento deste trabalho, primeiro definiu-se o escopo do mesmo. A rede de distribuição é dividida em primária e secundária. A rede primária, também denominada de média tensão (MT), vai de 13,8 kV a 34,5 kV. Enquanto que a rede secundária, ou rede de baixa tensão (BT), é a rede de 127 V, segundo dados da COPEL e considerando a região de Curitiba.

É comum a microgeração (potência instalada de até 75 kW) ser conectada à rede secundária, ou seja, baixa tensão. Enquanto que a minigeração (potência instalada maior que 75 kW e menor ou igual a 5 MW) ser conectada à rede primária.

Ao realizar as simulações, foi definido caso a caso se seria adotada microgeração ou minigeração, pois era levada em consideração qual a potência de base, as injeções de potência, bem como as potências ativas demandadas pelas cargas. Neste caso considerou-se principalmente a potência ativa, pois as fontes de GD tem fator de potência unitário, sendo a parte reativa igual a zero.

Tomando essas informações como base, procurou-se sistemas testes que se adequassem dentro das especificações definidas. Assim, foram escolhidos dois sistemas como objetos deste estudo.

O sistema inicial utilizado, foi um sistema de 12 barras retirado de (EMINOGLU; GÖZEL; HOCAOGLU, 2010) e um sistema de 69 barras retirado de (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000), ambos em níveis de tensão adequados para o sistema de distribuição. Mais detalhes de ambos os sistemas serão apresentados no capítulo 4, de simulações e resultados.

De ambos os sistemas foram obtidos os dados de barra e linha. Os dados originais foram normalizados com a normalização complexa. Tal etapa foi necessária para elevar a relação X/R , sendo X e R dados de linha, para que o sistema passasse a ter esta característica similar ao sistema de transmissão, possibilitando assim a aplicação do estimador de estados.

Conforme a Figura 8, de posse destes dados, tem então início o processo para realização dos testes e simulações.

3.2 NORMALIZAÇÃO DOS DADOS VIA C.P.U.

Conforme a proposta deste trabalho, para ser possível a aplicação do estimador de estados no sistema de distribuição, faz-se necessária a elevação da relação X/R , de forma que fique semelhante aos sistemas de transmissão. Assim, o primeiro passo é fazer a normalização dos dados.

Para ambos os sistemas, primeiro foi obtido o ângulo de base, a partir da relação matemática representada pela equação (26) a seguir (NOGUEIRA, 2014).

$$\phi_{base} = \frac{\sum(90^\circ - \tan^{-1}(\frac{x_{km}}{r_{km}}))}{N_l} \quad (26)$$

Da equação (26) tem-se que x_{km} e r_{km} representam a reatância e a resistência da linha, respectivamente, bem como N_l representa o número total de linhas ou ramos. Assim, o ângulo de base é obtido a partir de uma média aritmética.

Para dar continuidade as normalizações, foi necessário obter os dados de linha em p.u. também, pois conforme ilustram as equações (7) e (8), é necessário o módulo da impedância em p.u. para normalizar os dados em c.p.u.

De posse do ângulo de base e dos dados de linha normalizados da forma convencional, os dados de linha foram normalizados através da normalização complexa, elevando a relação X/R .

Na sequência foram normalizados os dados de barra, que são as injeções das potências aplicando as equações (12) e (13), que ilustram a normalização da potência ativa e reativa respectivamente.

Vale ressaltar que para a normalização dos dados foi usado apenas o Excel do pacote office, tornando a implementação da normalização complexa por unidade bastante simples e rápida de ser realizada.

De posse destes dados, foi então possível fazer a entrada de dados no MATPOWER para obter o fluxo de potência a partir deste software.

3.3 CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Para obter o fluxo de potência, foi usado o software MATPOWER. No item 2.2.1.1. foi apresentado, de forma sucinta, a interface do software e a entrada de dados. Nesta seção será detalhado o processo para que os resultados do fluxo de potência fossem obtidos a partir do software.

Seguindo os passos ilustrados na Figura 8, de posse dos dados normalizados via c.p.u., são entrados os dados de linha e barra, bem como os dados de geração no MATPOWER.

Nas Figura 2, Figura 3 e Figura 4 foi ilustrada a interface para a declaração de dados no MATPOWER, a fim de calcular o fluxo de potência.

Para calcular o fluxo de potência, na declaração de dados primeiro é informada a base MVA do sistema. Como a proposta do trabalho é usar os dados normalizados via c.p.u., nos dados de barra, ao invés de entrar os dados no padrão estabelecido pelo MATPOWER (MW, MVAR), os dados são declarados no formato $MW^{c.p.u.}$, pois são os dados normalizados de maneira complexa, multiplicados pela base. Neste caso, os dados não voltam a sua forma padrão, pois não está sendo considerado dentro do software o ângulo de base utilizado para normalizar os dados originais. Assim, os resultados finais do fluxo de potência são dados em $MW^{c.p.u.}$ e $MVAR^{c.p.u.}$. Eles são calculados a partir de dados com c.p.u. e não os dados originais. A vantagem disso é que precisamos dos dados normalizados para entrar no estimador, logo, a saída do fluxo de potência do MATPOWER já está no padrão adequado para a metodologia proposta, pois basta multiplicar pelo inverso da base e os dados voltam a estar apenas em c.p.u.

O fluxo de potência foi calculado para os dois sistemas teste utilizados, 12 barras e 69 barras, bem como para as modificações propostas neles ao inserir a GD nas barras. De posse dos módulos das tensões e dos ângulos o próximo passo foi enfim a utilização do estimador de estados do MATPOWER.

3.4 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS VIA MATPOWER

Com os resultados da simulação do fluxo de potência é possível então estimar os estados dos sistemas teste. Nesta etapa serão declarados os valores do inverso da base do sistema teste, quais as medidas que estão disponíveis, que seria o plano

de medição e a especificação das medidas obtidas a partir da etapa anterior (medidas de fluxo de potência e geração).

A proposta deste trabalho era utilizar o estimador linear do MATPOWER, porém este software não dispõe ainda de uma *toolbox* específica para estimar estados de maneira linear, esta ainda está em fase de desenvolvimento. Ao tentar utilizar o estimador que já existe de maneira linear, não foi possível obter resultados satisfatórios, pois a entrada de dados é feita para receber as informações de potência ativa e reativa, ao deixar de declarar a parte reativa ou assumir zero no lugar desta, o algoritmo não converge, pois o programa acaba se perdendo, visto que não foi feito para esta finalidade.

Assim, utilizou-se o estimador de estados não-linear padrão do MATPOWER a fim de obter os módulos das tensões e os ângulos estimados, comparando assim com os obtidos na etapa do cálculo do fluxo de potência.

Desta forma, as etapas do cálculo do fluxo de potência e da estimação de estados do pacote computacional MATPOWER serviram de fato para gerar medidas para só então ser possível fazer a estimação das quantidades de geração a partir de GD nas barras de distribuição a partir de um algoritmo desenvolvido no próprio MATLAB.

Em um caso real, os dados gerados a partir do MATPOWER seriam fornecidos diretamente pela concessionária, e então seria aplicado o algoritmo do próximo passo para fazer a estimativa proposta.

3.5 ESTIMAÇÃO DAS QUANTIDADES GERADAS POR GD NOS SISTEMAS TESTES

Nesta etapa foi desenvolvido um algoritmo para estimar as quantidades geradas por GD na rede de distribuição, que é o principal objetivo deste trabalho.

Os dados a serem recebidos por este programa são essencialmente o número de barras, número de linhas, dados de linha em p.u., dados de barra em p.u. (potência ativa demandada) e o resultado obtido no estimador de estados que seriam os módulos das tensões estimadas e os ângulos estimados. A forma como é feita a entrada de dados está ilustrada nas Figura 9, Figura 10, Figura 11 e Figura 12.

```

%
%  Dados Originais da rede (em pu) + Resultados do EE
%

nb = 12; %(preencher com numero de barras);
nl = 11; %(preencher com numero de linhas);

```

Figura 9 - Número de barras e linhas

```

% Dados de linha em originais (em p.u)
%      de      para      r      x      b      (em pu)
Linhas = [ 1      2      0.000090  0.000038  0.000000;
           2      3      0.000098  0.000041  0.000000;
           3      4      0.000173  0.000072  0.000000;
           4      5      0.000263  0.000110  0.000000;
           5      6      0.000090  0.000038  0.000000;
           6      7      0.000083  0.000034  0.000000;
           7      8      0.000364  0.000100  0.000000;
           8      9      0.000466  0.000132  0.000000;
           9     10      0.000239  0.000068  0.000000;
          10     11      0.000125  0.000035  0.000000;
          11     12      0.000102  0.000029  0.000000;
];

```

Figura 10 - Dados de linha declarados em p.u.

```

% Dados das Potências Demandadas nas barras de distribuição
%      originais (em p.u.)
% (Barra de referência - barra 1 sempre declarar como zero)

% barra 1  2    3    4    ...
Pd = [ 0; 6; 4; 5.5; 3; -2; 5.5; 4.5; 4; 3.5; 4; -3.5];

```

Figura 11 - Dados de potência ativa demandada

```

% Resultados do Estimador

%      V      theta      (valores estimados: V em pu e theta em graus)

EE = [ 1.000    0.000;
      0.995    0.136;
      0.991    0.264;
      0.984    0.485;
      0.976    0.766;
      0.973    0.852;
      0.971    0.922;
      0.965    1.203;
      0.960    1.463;
      0.958    1.562;
      0.958    1.596;
      0.958    1.614;
      ];

```

Figura 12 - Entrada dos módulos das tensões e ângulos estimados

De posse destes dados, o algoritmo estima primeiro os fluxos nos ramos a partir dos estados estimados. Para tal, este usa as equações (27), (28), (29) e (30).

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (27)$$

$$b_{km} = -\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (28)$$

$$\hat{P}_{km} = g_{km} \hat{V}_k^2 - \hat{V}_k \hat{V}_m (g_{km} \cos \hat{\theta}_{km} + b_{km} \sin \hat{\theta}_{km}) \quad (29)$$

$$\hat{P}_{mk} = g_{km} \hat{V}_m^2 - \hat{V}_k \hat{V}_m (g_{km} \cos \hat{\theta}_{km} - b_{km} \sin \hat{\theta}_{km}) \quad (30)$$

Onde:

- g_{km} é a condutância série em p.u.;
- b_{km} é a susceptância série em p.u.;
- r_{km} é a resistência série em p.u.;
- x_{km} é a reatância série em p.u.;
- $\hat{P}_{km}$ é o fluxo de potência ativa estimado em p.u. da barra k para a barra m ;
- $\hat{P}_{mk}$ é o fluxo de potência reativa estimado em p.u. da barra m para a barra k ;
- $\hat{\theta}_{km} = \hat{\theta}_k - \hat{\theta}_m$ é a abertura angular estimada do ramo em graus.

Na sequência são calculadas as injeções de potência ativa a partir dos fluxos estimados e por fim a potência gerada em todas as barras de distribuição GD, onde esta é dada pela equação (31).

$$\hat{P}_{GD} = \hat{P}_k + P_D \quad (31)$$

Onde $\hat{P}_{GD}$ potência total gerada, por GD, na barra de distribuição, $\hat{P}_k$ são as injeções de potência estimada a partir dos fluxos e P_D é a potência demandada pela carga na barras de distribuição.

Assim, $\hat{P}_{GD}$ é a resposta a problemática inicial, sendo esta a estimação das quantidades geradas por GD em todas as barras.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo irá apresentar os sistemas testes utilizados para aplicar a estimação de estados, os resultados obtidos em cada etapa do processo e a análise dos mesmos.

4.2 SISTEMA TESTE DE DISTRIBUIÇÃO 12 BARRAS

Para realizar as simulações foi adotado o sistema teste de distribuição de 12 barras, presente em (EMINOGLU; GÖZEL; HOCAOGLU, 2010) e que é ilustrado na Figura 13.

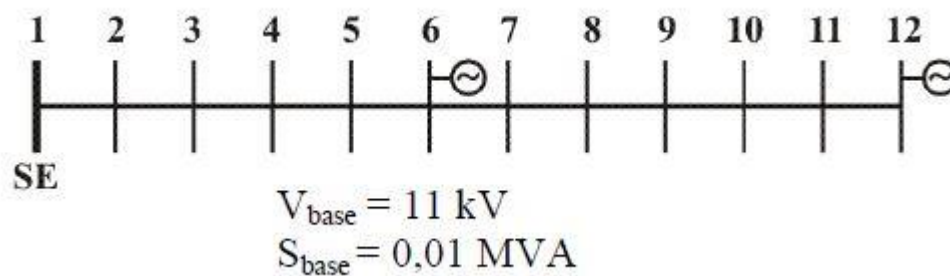


Figura 13 - Sistema teste de distribuição de 12 barras
Fonte: NOGUEIRA, 2014

Foram implementados três casos diferentes no ambiente de simulação. O primeiro deles é o caso em que não há a inserção de GD na rede, o segundo caso é com a inserção de três fontes de GD e o terceiro caso com a inserção de oito fontes de GD.

4.2.1 Caso 1: Sistema - teste 12 barras sem inserção de GD na rede

O primeiro caso pode ser ilustrado pela Figura 13, porém sem a inserção dos geradores nas barras 6 e 12. Este sistema apresenta uma topologia radial.

O primeiro passo para iniciar as simulações é fazer a normalização complexa dos dados afim de elevar a relação X/R . Para fazer tal normalização, usou-se o ângulo de base $\phi_{base} = 70,4886^\circ$, calculado a partir da equação (26).

A Tabela 4 apresenta os dados de linha do sistema – teste de 12 barras em três representações: a original, em Ω , a normalização convencional, em p.u., e a normalização complexa, em c.p.u.

Tabela 4 - Dados de linha do sistema - teste de 12 barras em diferentes representações

Linhas			Dados Originais			Normalização Convencional			Normalização Complexa		
Ramo	De	Para	r (Ω)	x (Ω)	x/r	r (p.u.)	x (p.u.)	x/r	r (c.p.u.)	x (c.p.u.)	x/r
1	1	2	1,0890	0,4598	0,4222	0,00009	0,000038	0,4222	-5,76E-06	9,75E-05	-16,9362
2	2	3	1,1858	0,4961	0,4184	0,000098	0,000041	0,4184	-5,91E-06	1,06E-04	-17,9346
3	3	4	2,0933	0,8712	0,4162	0,000173	0,000072	0,4162	-1,01E-05	1,87E-04	-18,5550
4	4	5	3,1823	1,3310	0,4183	0,000263	0,00011	0,4183	-1,58E-05	2,85E-04	-17,9666
5	5	6	1,0890	0,4598	0,4222	0,00009	0,000038	0,4222	-5,76E-06	9,75E-05	-16,9362
6	6	7	1,0043	0,4114	0,4096	0,000083	0,000034	0,4096	-4,33E-06	8,96E-05	-20,7098
7	7	8	4,4044	1,2100	0,2747	0,000364	0,0001	0,2747	2,73E-05	3,76E-04	13,7826
8	8	9	5,6386	1,5972	0,2833	0,000466	0,000132	0,2833	3,12E-05	4,83E-04	15,4804
9	9	10	2,8919	0,8228	0,2845	0,000239	0,000068	0,2845	1,57E-05	2,48E-04	15,7655
10	10	11	1,5125	0,4235	0,2800	0,000125	0,000035	0,2800	8,76E-06	1,30E-04	14,7857
11	11	12	1,2342	0,3509	0,2843	0,000102	0,000029	0,2843	6,73E-06	1,06E-04	15,7183

Da Tabela 4 observa-se que os dados obtidos via c.p.u. elevaram a relação X/R em comparação a mesma relação obtida a partir dos dados originais e dos dados com a normalização convencional. Até a linha 6 são observados valores negativos para X/R , porém vale ressaltar que estes são tomados em módulo, assim, pode-se verificar que a normalização complexa se mostrou eficaz em sua proposta de elevar a relação X/R de um sistema de distribuição, passando a ser semelhante ao sistema de transmissão, possibilitando assim a aplicação do estimador de estados.

A Tabela 5 a seguir apresenta as medidas de injeção de potência ativa e reativa do sistema em questão. Apresenta os dados originais em MW e MVar, com a normalização convencional em p.u. e a normalização complexa em c.p.u. Para chegar na potência normalizada via c.p.u., usou-se as equações (12) e (13).

Tabela 5 - Medidas de injeção de potência ativa e reativa do sistema - teste de 12 barras em diferentes representações

Barras	Dados Originais		Normalização Convencional		Normalização Complexa	
	p (MW)	q (MVar)	p (p.u.)	q (p.u.)	p (c.p.u.)	q (c.p.u.)
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0600	0,0600	6,0000	6,0000	-3,6515	7,6594
3	0,0400	0,0300	4,0000	3,0000	-1,4917	4,7723
4	0,0550	0,0550	5,5000	5,5000	-3,3472	7,0211
5	0,0300	0,0300	3,0000	3,0000	-1,8257	3,8297
6	0,0200	0,0150	2,0000	1,5000	-0,7459	2,3861
7	0,0550	0,0550	5,5000	5,5000	-3,3472	7,0211
8	0,0450	0,0450	4,5000	4,5000	-2,7386	5,7446
9	0,0400	0,0400	4,0000	4,0000	-2,4343	5,1063
10	0,0350	0,0300	3,5000	3,0000	-1,6587	4,3010
11	0,0400	0,0300	4,0000	3,0000	-1,4917	4,7723
12	0,0150	0,0150	1,5000	1,5000	-0,9129	1,9149

De posse destes dados, primeiro foi calculado o fluxo de potência linear e não linear no MATPOWER, a partir dos comandos *rundcpf* e *runpf* respectivamente. Isso teve por finalidade a comparação dos ângulos obtidos, para verificar a possibilidade da implementação de um estimador linear. Quanto mais próximos os valores dos ângulos, significa que uma aproximação linear seria eficaz para modelar o sistema. Na Tabela 6 constam os valores obtidos para o módulo das tensões e ângulos ao rodar o fluxo de potência linear e não linear no MATPOWER.

Tabela 6 - Módulos e ângulos das tensões para o fluxo de potência linearizado e não linearizado

Barra	Fluxo de Potência Linearizado		Fluxo de Potência Não Linearizado	
	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	1,000	0,133	0,944	0,116
3	1,000	0,255	0,989	0,223
4	1,000	0,453	0,981	0,402
5	1,000	0,700	0,970	0,627
6	1,000	0,775	0,966	0,695
7	1,000	0,840	0,964	0,757
8	1,000	1,039	0,955	1,010
9	1,000	1,219	0,947	1,241
10	1,000	1,276	0,944	1,317
11	1,0000	1,294	0,944	1,340
12	1,0000	1,300	0,943	1,347

Da Tabela 6 pode-se observar que como resultado do fluxo de potência linearizado, os módulos das tensões são iguais a 1, o que já é esperado. Ao comparar os ângulos, percebe-se que a diferença entre os dois é grande, com um erro percentual acima de 5%, sendo um indício de que a aproximação linear não é a modelagem mais adequada para este sistema.

De posse destes dados é possível então estimar as tensões e os ângulos nas barras a partir do estimador de estados. Usou-se o estimador de estados não linear do MATPOWER, pois, o estimador linear ainda está em fase de desenvolvimento e não há possibilidade de usar o estimador não linear de forma linear, visto que o algoritmo foi desenvolvido para trabalhar com valores de potência reativa. Assim, foram declaradas as informações necessárias para usar o estimador, sendo estas barras com medidas disponíveis, medidas específicas de fluxo de potência ativo e reativo, potência ativa e reativa gerada pela barra de referência e a covariância das medidas, que para este caso foi declarado 1.

O plano de medição utilizado para este caso contou com 47 medidas, sendo os fluxos de potência ativo e reativo nas duas extremidades de cada barra, a potência ativa e reativa gerada na barra de referência e o módulo da tensão da barra de referência.

Como resultado, o estimador de estados forneceu os módulos das tensões estimados e os ângulos estimados de todas as barras. Assim, a Tabela 7 apresenta a comparação entre os módulos das tensões e os ângulos, mostrando o estado do sistema de 12 barras considerando a operação radial.

Tabela 7 - Comparativo entre módulos e ângulos das tensões obtidos a partir do cálculo do fluxo de potência e da estimação de estados

Barra	Fluxo de Potência		Estimação de Estados	
	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,994	0,116	0,994	0,117
3	0,989	0,223	0,989	0,225
4	0,981	0,402	0,981	0,405
5	0,970	0,627	0,970	0,632
6	0,966	0,695	0,967	0,700
7	0,964	0,757	0,964	0,762
8	0,955	1,010	0,955	1,017
9	0,947	1,241	0,947	1,249
10	0,944	1,317	0,944	1,325
11	0,944	1,340	0,944	1,349
12	0,943	1,347	0,943	1,356

De posse destes resultados, foi declarado então no estimador de GD, para obter o que seria gerado por GD em cada barra, que neste caso esperaria ser zero, porém nesta etapa foram encontrados alguns problemas no sistema-teste utilizado que não permitiu que o algoritmo desenvolvido fizesse a estimativa de forma correta. Logo, este sistema serviu para atingir alguns dos objetivos específicos propostos no trabalho, como o estudo, não apenas teórico, mas também prático, da estimação de estados e da normalização complexa por unidade. Também o aprendizado do pacote computacional MATPOWER, principalmente a ferramenta da estimação de estados, que é bastante nova ainda. O estimador de GD será utilizado para o sistema-teste de 69 barras que será apresentado ainda neste capítulo.

Nota-se que os dados obtidos a partir do MATPOWER servem de entrada para estimar as medidas de GD nas barras, assim, esta *toolbox* serve como um gerador de medidas para a estimação de GD. Como salientado no capítulo 3, em um

caso real, estas medidas seriam fornecidas diretamente pela concessionária de energia.

4.2.2 Caso 2: Sistema - teste 12 barras com inserção de 3 unidades de GD na rede

Este caso pode ser ilustrado fielmente pela Figura 13, pois foram adotadas duas fontes de GD no sistema, uma na barra 6 e outra na barra 12, além da barra de referência. Assim, o primeiro passo foi a normalização dos dados. Os dados de linha permanecem inalterados. Nos dados de barra há alteração apenas nos dados das barras 6 e 12, que são as barras em que há inserção de GD, conforme apresenta a Tabela 8.

Tabela 8 - Medidas de injeção de potência ativa e reativa do sistema - teste de 12 barras com inserção de 2 unidades de GD em diferentes representações

Barras	Dados Originais		Normalização Convencional		Normalização Complexa	
	p (MW)	q (MVar)	p (p.u.)	q (p.u.)	p (c.p.u.)	q (c.p.u.)
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0600	0,0600	6,0000	6,0000	-3,6515	7,6594
3	0,0400	0,0300	4,0000	3,0000	-1,4917	4,7723
4	0,0550	0,0550	5,5000	5,5000	-3,3472	7,0211
5	0,0300	0,0300	3,0000	3,0000	-1,8257	3,8297
6	-0,0200	0,0150	-2,0000	1,5000	-2,0819	-1,38416
7	0,0550	0,0550	5,5000	5,5000	-3,3472	7,0211
8	0,0450	0,0450	4,5000	4,5000	-2,7386	5,7446
9	0,0400	0,0400	4,0000	4,0000	-2,4343	5,1063
10	0,0350	0,0300	3,5000	3,0000	-1,6587	4,3010
11	0,0400	0,0300	4,0000	3,0000	-1,4917	4,7723
12	-0,0350	0,0150	-3,5000	1,5000	-2,5828	-2,7980

Para chegar nos resultados da Tabela 8, primeiro além de definir em quais barras seriam inseridas GD, também se definiu arbitrariamente a capacidade de cada um dos geradores. Como a potência aparente de base é de 10 kVA, ou 0,01 MVA, foi chegado a um consenso de que seria melhor adotar a microgeração, pois os valores de potência são muito baixos levando em conta que a entrada de dados do MATPOWER é padrão MW e MVAR, logo, a microgeração já satisfaz a necessidade.

Assim, foi adotado que haveria na barra 6 a capacidade total de geração de 40 kW, ou 0,04 MW, para fins de entrada de dados no MATPOWER. Na barra 12 foi adotada uma potência total de 50 kW, ou 0,05 MW. Assim, ambas as capacidades ficam dentro do limite máximo da minigeração, que é de 75 kW.

Desta forma, a potência demandada pela barra sofreu alteração, pois conforme a equação (32) esta é dada pela diferença entre a potência demandada pela carga e a potência gerada por GD.

$$P_k = P_D - P_{GD} \quad (32)$$

Outro detalhe interessante é que as fontes de GD tem fator de potência unitário, logo, em sua forma original, os dados não sofrem alteração de potência reativa, porém, conforme demonstração a seguir, mesmo que elas não tenham parte reativa, alteram a parte reativa da potência em c.p.u.

Sabendo que:

$$P_{GD}^{cpu} = \frac{P_{GD}^{MW}}{S_{base}} \cdot \cos \phi_{base} + \frac{Q_{GD}^{MVar}}{S_{base}} \cdot \sin \phi_{base} \quad (33)$$

$$Q_{GD}^{cpu} = \frac{Q_{GD}^{MVar}}{S_{base}} \cdot \cos \phi_{base} - \frac{P_{GD}^{MW}}{S_{base}} \cdot \sin \phi_{base} \quad (34)$$

Como $Q_{GD}^{MVar} = 0$

$$P_{GD}^{cpu} = \frac{P_{GD}^{MW}}{S_{base}} \cdot \cos \phi_{base} \quad (35)$$

$$Q_{GD}^{cpu} = -\frac{P_{GD}^{MW}}{S_{base}} \cdot \sin \phi_{base} \quad (36)$$

Das equações (33), (34), (35) e (36), P_{GD}^{cpu} representa a potência ativa da GD em c.p.u., Q_{GD}^{cpu} a potência reativa em c.p.u., P_{GD}^{MW} representa a potência ativa da GD em MW, Q_{GD}^{MVar} representa a potência reativa da GD em MVar, S_{base} representa a base de potência aparente e ϕ_{base} o ângulo base calculado a partir da equação (26).

Desta forma, as equações (33), (34), (35) e (36) provam que, mesmo que a GD em seus dados originais não apresente parte reativa, quando da normalização dos dados a parte reativa aparece, sendo apenas um artifício matemático.

No estimador de estados, o plano de medição contou desta vez com 51 medidas, sendo novamente o fluxo de potência ativo e reativo em ambas as

extremidades das barras, a potência ativa e reativa gerada pela barra de referência e as duas unidades de GD e o módulo da tensão na barra de referência.

Assim, foram obtidos os módulos das tensões e seus respectivos ângulos a partir do cálculo do fluxo de potência no MATPOWER e no estimador de estados, conforme apresenta a Tabela 9.

Tabela 9 - Comparativo entre módulos e ângulos das tensões obtidos a partir do cálculo do fluxo de potência e da estimação de estados para o sistema - teste de 12 barras com 3 unidades de GD

Barra	Fluxo de Potência		Estimação de Estados	
	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,995	0,135	0,995	0,136
3	0,991	0,263	0,991	0,264
4	0,984	0,479	0,984	0,485
5	0,976	0,762	0,976	0,766
6	0,973	0,851	0,973	0,852
7	0,971	0,922	0,971	0,922
8	0,965	1,201	0,965	1,203
9	0,959	1,467	0,960	1,463
10	0,958	1,562	0,958	1,562
11	0,957	1,597	0,958	1,596
12	0,958	1,612	0,958	1,613

Da Tabela 9 percebe-se que mesmo com a inserção da GD, a ferramenta de estimação de estados do MATPOWER apresentou valores bastante condizentes, muito próximos dos calculados a partir do fluxo de potência. Logo, o estimador de estados não linear do MATPOWER se mostrou bastante eficiente.

4.2.3 Caso 3: Sistema - teste 12 barras com inserção de 8 unidades de GD na rede

O último caso a ser simulado foi a inserção de 8 unidades de GD no sistema - teste de 12 barras. Assim como no caso 2, primeiro foi necessária a normalização dos dados. Para isso adotou-se as seguintes barras e os seguintes valores para as unidades de GD, também seguinte os critérios para a microgeração, conforme ilustra a Tabela 10.

Tabela 10 - Valores das potências ativas das unidades geradoras inserias no sistema de 12 barras

Barra	Potência da Unidade de GD (kW)
3	50
5	45
6	40
7	70
9	65
11	50
12	50

Usando o mesmo procedimento do caso anterior, foram então normalizados os dados de barra, conforme ilustra a Tabela 11.

Tabela 11 - Medidas de injeção de potência ativa e reativa do sistema - teste de 12 barras com inserção de 8 unidades de GD em diferentes representações

Barras	Dados Originais		Normalização Convencional		Normalização Complexa	
	p (MW)	q (MVar)	p (p.u.)	q (p.u.)	p (c.p.u.)	q (c.p.u.)
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0600	0,0600	6,0000	6,0000	-3,6515	7,6594
3	-0,0100	0,0300	4,0000	-1,0000	-3,1617	0,0594
4	0,0550	0,0550	5,5000	5,5000	-3,3472	7,0211
5	-0,0150	0,0300	3,0000	-1,5000	-3,3287	-0,4119
6	-0,0200	0,0150	-2,0000	-2,0000	-2,0819	-1,38416
7	-0,0150	0,0550	5,5000	-1,5000	-5,6852	0,4231
8	0,0450	0,0450	4,5000	4,5000	-2,7386	5,7446
9	-0,0250	0,0400	4,0000	-2,5000	-4,6053	-1,0205
10	0,0350	0,0300	3,5000	3,0000	-1,6587	4,3010
11	-0,0100	0,0300	4,0000	-1,0000	-3,1617	0,0594
12	-0,0350	0,0150	-3,5000	-3,5000	-2,5828	-2,7980

Conforme procedimento utilizado no caso 2, de posse destes dados foi executado o cálculo do fluxo de potência no MATPOWER a fim de obter o resultado necessário para estimar os estados do sistema. O plano de medição para este caso contou com 61 medidas, sendo elas o fluxo de potência ativo e reativo em ambas as

extremidades das barras, a potência ativa e reativa gerada pela barra de referência e pelas unidades de GD e o módulo da tensão na barra de referência.

Assim, após a simulação foram obtidos do estimador de estados os módulos e ângulos das tensões que constam na Tabela 12.

Tabela 12 - Comparativo entre módulos e ângulos das tensões obtidos a partir do cálculo do fluxo de potência e da estimação de estados para o sistema - teste de 12 barras com 8 unidades de GD

Barra	Fluxo de Potência		Estimação de Estados	
	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,998	0,196	0,998	0,195
3	0,996	0,389	0,996	0,387
4	0,994	0,698	0,994	0,693
5	0,992	1,122	0,992	1,120
6	0,991	1,248	0,991	1,248
7	0,990	1,354	0,990	1,353
8	0,988	1,689	0,988	1,690
9	0,988	2,030	0,988	2,029
10	0,988	2,139	0,988	2,134
11	0,988	2,182	0,988	2,179
12	0,989	2,196	0,989	2,195

4.3 COMPARATIVO ENTRE O MÓDULO DAS TENSÕES E ÂNGULOS NAS SIMULAÇÕES COM DADOS EM P.U. E EM C.P.U.

A grande vantagem da normalização complexa é, conforme abordado no capítulo 2, a simplificação ilustrada pelas equações (24) e (25) de que o módulo das tensões em c.p.u. e em p.u. são iguais, bem como os ângulos.

Tendo em vista o objetivo específico deste trabalho de estudar a normalização complexa, foi rodado novamente os fluxos de potência no MATPOWER, porém desta vez com dados de entrada em p.u. e em c.p.u., para verificar esta simplificação. Foram reexecutados todos os casos para o sistema de 12 barras, a fim de verificar se a GD impactaria nesta relação também.

As Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 trazem estas informações, de forma que seja mais fácil a análise dos resultados e a comparação.

Tabela 13 - Comparativo entre os módulos das tensões e os ângulos para o caso do sistema - teste 12 barras sem GD

Barra	Fluxo de Potência (p.u.)		Fluxo de Potência (c.p.u.)	
	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,994	0,114	0,994	0,114
3	0,989	0,221	0,989	0,223
4	0,981	0,400	0,981	0,403
5	0,970	0,626	0,970	0,630
6	0,967	0,694	0,967	0,699
7	0,964	0,760	0,964	0,762
8	0,955	1,010	0,955	1,015
9	0,947	1,241	0,947	1,247
10	0,945	1,316	0,944	1,323
11	0,944	1,340	0,944	1,347
12	0,944	1,347	0,943	1,354

Tabela 14 - Comparativo entre os módulos das tensões e os ângulos para o caso do sistema - teste 12 barras com 3 unidades de GD

Barra	Fluxo de Potência (p.u.)		Fluxo de Potência (c.p.u.)	
	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,995	0,134	0,995	0,135
3	0,991	0,262	0,991	0,263
4	0,984	0,479	0,984	0,479
5	0,976	0,761	0,976	0,762
6	0,973	0,849	0,973	0,851
7	0,971	0,920	0,971	0,922
8	0,965	1,200	0,965	1,201
9	0,959	1,466	0,959	1,467
10	0,958	1,561	0,958	1,562
11	0,957	1,595	0,957	1,597
12	0,958	1,611	0,958	1,612

Tabela 15 - Comparativo entre os módulos das tensões e os ângulos para o caso do sistema - teste 12 barras com 8 unidades de GD

Barra	Fluxo de Potência (p.u.)		Fluxo de Potência (c.p.u.)	
	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)	Módulo da Tensão (p.u)	Ângulo da Tensão (graus)
1	1,000	0,000	1,000	0,000
2	0,998	0,195	0,998	0,196
3	0,996	0,389	0,996	0,389
4	0,994	0,697	0,994	0,698
5	0,992	1,120	0,992	1,122
6	0,991	1,246	0,991	1,248
7	0,990	1,351	0,990	1,354
8	0,988	1,687	0,988	1,689
9	0,988	2,028	0,988	2,030
10	0,988	2,137	0,988	2,139
11	0,988	2,179	0,988	2,182
12	0,989	2,194	0,989	2,196

Conforme é possível observar nas Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15, é verdadeira a relação de igualdade que existe entre os módulos das tensões e ângulos nas normalizações convencionais e complexas. As pequenas diferenças que aparecem, principalmente nos ângulos, são em função dos arredondamentos internos do software, e podem ser desprezados, visto que majoritariamente os que apareceram alteraram apenas a terceira casa decimal.

Sendo assim foi verificada a relação de igualdade e o objetivo específico de aprender a normalização complexa por unidade, estimação de estados e domínio do software MATPOWER foram atendidos.

4.4 COMPARATIVO ENTRE O NÚMERO DE ITERAÇÕES PARA SIMULAÇÕES DE ESTIMAÇÃO DE ESTADOS NO MATPOWER EM P.U. E EM C.P.U.

Considerando os testes realizados para o sistema-teste de 12 barras, na Tabela 16 buscou-se apresentar a quantidade de iterações necessárias para a convergência do algoritmo, bem como o tempo que o mesmo levou para convergir.

Tabela 16 - Comparação entre o número de iterações das simulações de fluxo de potência para o sistema-teste 12 barras

Caso	Tipo de Normalização	Nº de Iterações	Tempo de Convergência (s)
Caso 1	p.u.	4	0,15
	c.p.u.	3	0,12
Caso 2	p.u.	3	0,10
	c.p.u.	3	0,07
Caso 3	p.u.	3	0,08
	c.p.u.	3	0,03

Da Tabela 16 pode-se observar que na maior parte dos casos, o número de iterações das duas normalizações foi praticamente o mesmo, apresentado diferença apenas no caso 1. Logo, levou-se em consideração o tempo de convergência informado pelo software em segundos para fazer a comparação. Desta forma, em todos os casos, a normalização complexa se mostrou mais eficiente computacionalmente que a normalização convencional, pois a máquina demanda menos processamento para entregar o resultado final.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados obtidos com as simulações de fluxo de potência e estimação de estados do pacote computacional MATPOWER.

O diferencial deste trabalho é a proposta da entrada de dados no MATPOWER em c.p.u., visto que desta forma o algoritmo se torna computacionalmente mais eficiente em comparação ao padrão original de entrada do software, conforme apresenta a Tabela 16.

Também foram apresentadas tabelas comparativas de módulos das tensões e ângulos obtidas a partir das simulações de fluxo de potência e da estimação de estados do pacote computacional MATPOWER, mostrando que o estimador consegue calcular os módulos das tensões e os ângulos de forma bastante precisa. Este resultado obtido do estimador de estados possibilita a estimação da GD a partir de um algoritmo desenvolvido em ambiente MATLAB. Assim, as etapas desenvolvidas

usando o pacote computacional MATPOWER servem para gerar os dados de entrada do estimador de GD. Em um caso real, estes dados seriam fornecidos pela concessionária.

O algoritmo para a estimação da potência gerada por GD requer como dados de entrada o número de barras e de linhas, os dados de linha em p.u., as potências ativas demandadas nas barras de distribuição em p.u. e o resultado dos módulos das tensões e dos ângulos obtidos a partir do estimador de estados. Com isso, a partir das equações (29) e (30) este é capaz de estimar a potência ativa gerada por cada unidade de GD na rede de distribuição. No sistema-teste de 12 barras não foi possível implementar este algoritmo, pois é um sistema de estudo que apresenta algumas medidas inusuais, fazendo com que o algoritmo não opere corretamente. O algoritmo será usado para estimar as quantidades geradas de GD no sistema teste de 69 barras que apresenta dados mais consistentes.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste trabalho foi apresentada a estimação de estados com a normalização complexa a fim de obter as medidas de potência ativa geradas por unidade de GD na rede de distribuição.

A normalização complexa por unidade (c.p.u.) tem por finalidade o ajuste das relações X/R , elevando estas, possibilitando assim a aplicação da estimação de estados, visto que as características do sistema de distribuição passam a ser semelhantes ao sistema de transmissão.

Foram verificadas por simulações de fluxo de potência via MATPOWER a relação de igualdade que existem entre os módulos das tensões e os ângulos obtidos a partir de simulações com entrada de dados normalizados de maneira convencional e complexa. Também se verificou a eficácia do estimador de estados não linear do MATPOWER que estimou corretamente os módulos e ângulos das tensões, os estados, dos sistemas testes e com isso, possibilita a estimação das quantidades geradas por GD em cada barra.

Também foram atingidos os objetivos específicos deste trabalho que eram o estudo da estimação de estados e do conceito de normalização complexa, o aprendizado do pacote computacional MATPOWER, enfatizando o estimador de estados, a modelagem de redes de distribuição com a inserção de GD no MATPOWER.

A proposta inicial era usar o estimador de estados linear do MATPOWER, porém este ainda se encontra em fase de desenvolvimento, e o estimado não linear do pacote computacional não consegue operar de maneira linear, visto que foi desenvolvido para trabalhar com os dados de fluxo de potência reativo.

O principal diferencial do trabalho, como já abordado anteriormente, é a entrada de dados normalizada de forma complexa, possibilitando assim um desempenho computacional melhor nas simulações.

Também, como contribuição principal, o desenvolvimento de um algoritmo que possibilita, de maneira simplificada, a obtenção das quantidades de potência ativa gerada por GD nas redes de distribuição.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresentada a metodologia do presente trabalho, faz-se sugestões de trabalhos futuros, levando em conta as possíveis modificações na operação do sistema. Da mesma forma, a abordagem deste trabalho poderá ser usada como referência para trabalhos posteriores.

Para dar continuidade aos estudos iniciados, sugere-se:

- Desenvolver um estimador de estados linear para estimar as quantidades de potência ativa gerada por GD na rede de distribuição;
- Realizar testes com as técnicas desenvolvidas neste trabalho, bem como usando o estimador de GD aqui desenvolvido, com dados de sistemas reais;
- Adaptar conceitos e métodos obtidos neste trabalho para aplicar a estimação de estados a sistemas interligados de distribuição e transmissão.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Geração Distribuída Solar Fotovoltaica: Benefícios Líquidos ao Brasil**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/16832773/4+-+ABSOLAR+GD+Solar+Fotovoltaica.pdf/f0d41ea4-4bba-8cf8-fb02-b864dc83c293>>. Acesso em: 15 de julho de 2019.

ABUR, A.; GÓMEZ EXPÓSITO, A.. **Power system state estimation: theory and implementation**. New York, NY: CRC Press, Taylor & Francis, 2004. 327 p.

ANEEL. **Resolução Normativa 482/2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em 10 de junho de 2019.

ANEEL. **Geração Distribuída Ultrapassa 20 mil conexões**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877>. Acesso em 15 de julho de 2019.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 235, de 14 de Novembro de 2006**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>>. Acesso em 28 de agosto de 2019.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em 28 de agosto de 2019.

BARBOSA FILHO, W. P.; AZEVEDO, A. C. S. **Geração Distribuída: Vantagens e Desvantagens**. II Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia, 2013.

CARNEIRO, M. **Monitoração em Tempo Real da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

CARVALHO, C. B.; ARAÚJO, R.; AMADO, T. F. **Análise dos Impactos da Conexão da Geração Distribuída na Rede de Distribuição**. X Congresso Brasileiro de Energia, Vol. 4, 2004, pp. 1831-1836.

COLOMBO, J. L. **Monitoração em Tempo Real de Sistemas de Distribuição Considerando os Efeitos de Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

DURCE, C. C. **Normalização Complexa e Cálculo de Fluxo de Potência para Sistemas Elétricos Emergentes**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2012.

GARCIA, A.; MONTICELLI, A. **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.

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

IMPA. **O que é MATLAB?** Disponível em: <<http://w3.impa.br/~zubelli/tutorial/node1.html>>. Acesso em 14 de novembro de 2019.

INEE. **O que é Geração Distribuída**. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em 10 de junho de 2019.

LEMONS, A. B.; SPAIER, E. B. **Redução de Perdas Elétricas em Alimentadores através da Conexão de Produtores Independentes e Autoprodutores de Energia Elétrica**. XVI CRICTE – Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Ijuí – RS, 2001.

SANTOS, M. C. **Monitoração em Tempo Real da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

LOURENÇO, E. M.; LODDI, T.; TORTELLI, O. L. **Unified Load Flow Analysis for Emerging Distribution Systems**. IEEE PES ISGT Europe 2010, Gothenburg, Suécia, Out. 2010.

MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. **Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando o Critério de Queda de Tensão**. Disponível em: < <http://www.sba.org.br/revista/vol11/v11a261.htm>>. Acesso em: 12 de nov. de 2019.

MATPOWER. **Free, Open-Source Electric Power System Simulation and Optimization Tools for MATLAB and Octave**. Disponível em: <<https://www.pserc.cornell.edu/matpower/>>. Acesso em 10 de junho de 2019.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1983.

MONTICELLI, A. J. **State Estimation in Electric Power Systems – A Generalized Approach**. 1999. 394 p.

NOGUEIRA, E. M. M. **Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição Emergente**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2014.

OLIVEIRA, B. C. **Estimação de Estados em Sistemas de Distribuição: uma Abordagem Trifásica e Descentralizada**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.

PEIXOTO, J. D. S. **Geração Distribuída e Seus Impactos Sob as Óticas da Concessionária e do Prosumer**. Monografia, Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

PENICHE, S. P.; FERRAREZI, S. C. **Estudo de Viabilidade e Impacto de um Sistema Fotovoltaico Via Softwares ETAP e MATPOWER: Planta Atual e Expansão**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, 2018.

PINTO JR., R. R. **Fluxo de Potência em Redes Modeladas no Nível de**

Subestação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2005.

SILVA, W. D. **A Cogeração de Energia Elétrica a Partir da Biomassa Inserida na Matriz Energética Brasileira.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo, 2009.

SOUZA, A. T. **Monitoração da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição via Testes Geométricos de Colinearidade.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

TORTELLI, O. L.; LOURENÇO, E. M.; GARCIA, A. V.; PAL, B. C. **Fast Decoupled Power Flow to Emerging Distribution Systems via Complex *pu* Normalization.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 30, n. 3, p. 1351 – 1358, Mai. 2015.

ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SÁNCHEZ, C. E.; GAN, D. **MATPOWER, A MATLAB Power System Simulation Package.** IEEE Trans. Power Sys., v. 26, n. 1, p. 12–19, 2011.

ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SÁNCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. **MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 26, n. 1, p. 12–19, 2011.