GABRIEL ALBIERI QUIROGA

**Impacto da geração distribuída sobre o sistema de
proteção: considerações para o planejamento de
redes de distribuição**

São Paulo

2019

GABRIEL ALBIERI QUIROGA

**Impacto da geração distribuída sobre o sistema de proteção:
considerações para o planejamento de redes de distribuição**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frederico
Meschini Almeida

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Quiroga, Gabriel

Impacto da geração distribuída sobre o sistema de proteção: considerações para o planejamento de redes de distribuição / G. Quiroga -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

118 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Geração Distribuída 2.Sistemas de proteção 3.Planejamento de Redes de Distribuição I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Agradecimentos

Ao logo deste trabalho o apoio de algumas instituições e diversas pessoas foi imprescindível. Ao meu orientador Carlos Frederico, agradeço por me guiar ao longo de todo o percurso do desenvolvimento desta dissertação e por não me deixar esmorecer nos momentos mais difíceis.

Agradeço a Sinapsis Energia e à AES Eletropaulo pela oportunidade de trabalhar no Projeto Estruturante de Redes Inteligentes em Regiões Metropolitanas visando o Desenvolvimento e a Demonstração de Soluções Inovadoras utilizando o conceito de Living Labs e pela disponibilização dos valiosos dados necessários para o desenvolvimento dessa dissertação.

Ao amigo Henrique Kagan agradeço as valiosas contribuições e inspiração para produção desse trabalho. A minha noiva Bruna agradeço o apoio afetivo e a solidariedade nos momentos mais difíceis.

Resumo

Esta pesquisa apresenta metodologias para avaliar o impacto da geração distribuída sobre o sistema de proteção de redes de distribuição para um planejamento de rede integrado. A alternativa de geração distribuída é vista como uma mudança no paradigma da geração de energia no mundo. A adoção de fontes renováveis de energia para produção residencial ou comercial traz não apenas benefícios ambientais, mas também uma oportunidade para aliviar as dificuldades de abastecimento encontradas em muitos países. Entretanto, apesar de resolver alguns dos problemas de fornecimento de energia, esta mudança de paradigma causada pela inserção da geração distribuída em redes de distribuição pode trazer alguns impactos técnicos indesejados. Os impactos típicos avaliados no planejamento das redes de distribuição elétrica envolvem a expansão da rede, como perdas, fator de potência, carregamento de ativos e violação de limites de tensão. No entanto, uma inserção massiva da geração distribuída também pode causar problemas significativos para a proteção da rede, assim envolvendo o planejamento da proteção. Dessa forma, é necessário identificar potenciais problemas de proteção e desenvolver metodologias para modelar, diagnosticar e mitigar tais problemas. Este trabalho tem como objetivo descrever a importância da previsão dos impactos potenciais da alta penetração de fontes renováveis no sistema de proteção das redes de distribuição elétrica, a fim de alcançar um planejamento de rede integrado. Assim, no início deste trabalho são discutidos os principais problemas do sistema de proteção que podem surgir a partir da alta penetração da geração distribuída, como perda de coordenação da proteção, sobretensão, perda da sensibilidade da proteção, bidirecionalidade e queima inesperada de fusíveis. A pesquisa demonstra os possíveis modelos utilizados para avaliar esses impactos, como modelagem de rede e modelagem de fontes renováveis, possíveis abordagens, como as perspectivas probabilísticas e deterministas, em relação aos algoritmos de alocação da geração distribuída e as possíveis metodologias de avaliação, como análise de cenários e análise de sensibilidade. Os resultados apresentados representam a avaliação de tais impactos nas redes de distribuição elétrica. Para concluir, o estudo ilustra a aplicação das metodologias apresentadas com um estudo de caso usando uma rede de distribuição real.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Sistemas de proteção. Planejamento de Redes de Distribuição.

Abstract

This work presents methodologies to assess the impact of distribution generation on electric distribution network protection systems for an integrated network planning. The distributed generation alternative is seen as a shift in the paradigm of energy generation in the world. The adoption of renewable sources of energy for residential or commercial production brings not only environmental benefits, but also an opportunity to ease the supplying difficulties found in many countries. Despite solving some of the energy supplying problems, this paradigm change caused by the insertion of distributed generation in electric distribution networks can bring some undesired technical impacts. The typical impacts assessed in the electric distribution networks planning involve the expansion of the network, such as losses, power factor, line loading, and voltage profiles, among others. However, a massive insertion of distributed generation may also cause significant problems to the network protection, which involves the protection planning. In this way, it is necessary to identify potential protection issues and design means to model, diagnose and mitigate such issues. This work aims at describing the importance of predicting the potential impacts of high penetration of renewable sources on the protection system from electric distribution networks, in order to achieve an integrated network planning. Thus, in the beginning of this work it is discussed the main protection system issues that may arise from the high penetration of distributed generation, such as loss of protection coordination, overvoltage, loss of protection sensitivity, directional false tripping, unwanted fuse blowing, beside others. The work then demonstrates possible models utilized to assess those impacts, such as network modeling and renewable sources modeling, possible approaches such as the probabilistic and deterministic perspectives, regarding distributed generation allocation algorithms and the possible methodologies for assessment such as scenario analysis and sensitivity analysis. To conclude the work, there will be more discussions regarding the results presented and the potential benefits of including this analysis on the integrated distribution network planning. In the end, the partial results illustrate the application of the presented methodologies with a case study using a real distribution network.

Keywords: Distributed Generation. Protection Systems. Power Distribution Planning.

Lista de Figuras

Figura 1. Evolução da capacidade instalada de fontes fotovoltaicas no mundo.....	15
Figura 2. Evolução da capacidade instalada de fontes eólicas no mundo.	15
Figura 3. Evolução da capacidade instalada de fontes fotovoltaicas no Brasil.	16
Figura 4. Evolução da capacidade instalada de fontes eólicas no Brasil.....	16
Figura 5. Evolução da capacidade instalada de mini e micro GD no Brasil.	19
Figura 6. Distribuição da potência instalada de GD no Brasil.	20
Figura 7. Contribuição da GD a corrente de curto-circuito.....	25
Figura 8. Diagrama esquemático de uma coordenação fusível-fusível tradicional sem GD....	45
Figura 9. Diagrama esquemático de uma coordenação fusível-fusível tradicional com GD. ...	46
Figura 10. Corrente de curto-circuito através de alimentador adjacente sem GD.....	47
Figura 11. Corrente de curto-circuito através de alimentador adjacente com GD.	48
Figura 12. Corrente de curto-circuito através de alimentador adjacente com GD, considerando efeitos sobre os religadores.....	49
Figura 13. Contribuição à falta a montante do fusível F2 sem GD.....	50
Figura 14. Contribuição à falta a montante do fusível F2 com GD.....	51
Figura 15. Falta suprida apenas pela fonte principal.	52
Figura 16. Falta suprida tanto pela fonte principal, quanto pela GD localizada a montante da falta.	52
Figura 17. Falta suprida tanto pela fonte principal, quanto pela GD localizada a jusante da falta.	53
Figura 18. Exemplo de curva típica de carga de um consumidor residencial.	59
Figura 19. Exemplo de alocação conservadora para análise do impacto de perda de sensibilidade.	65
Figura 20. Modelo de curto-circuito trifásico.....	66
Figura 21. Exemplo de alocação conservadora para análise de bidirecionalidade.....	67
Figura 22. Exemplo da função de atratividade probabilística usada para avaliar os limites de inserção da GD.	68
Figura 23. Exemplo da utilização do método Monte Carlo em uma análise de sensibilidade.	69
Figura 24. Rede de distribuição elétrica real usada no estudo de caso.....	72
Figura 25. Disjuntor localizado no início da rede de distribuição elétrica.	73

Figura 26. Zona de proteção do disjuntor 060DJVGR018.....	74
Figura 27. Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade sob a ótica determinística.....	76
Figura 28. Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade sob a ótica probabilística.	77
Figura 29. Curto-circuito utilizado para avaliação da perda de sensibilidade.....	80
Figura 30. Localização da GD para avaliação da bidirecionalidade sob a ótica determinística.	82
Figura 31. Curto-circuito para avaliação da bidirecionalidade.	83
Figura 32. Fusível localizado em um ramal no meio do alimentador estudado.	84
Figura 33. Localização da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis sob a ótica determinística.....	85
Figura 34. Curto-circuito para avaliação da queima inesperada de fusíveis sob a ótica determinística.....	88
Figura 35. Curto-circuito mínimo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise determinística da GD acoplada por inversores	90
Figura 36. Curto-circuito mínimo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise determinística de máquinas rotativas	91
Figura 37. Curto-circuito mínimo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise determinística	92
Figura 38. Curto-circuito mínimo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise probabilística da GD acoplada por inversores	93
Figura 39. Curto-circuito mínimo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise probabilística de máquinas rotativas	94
Figura 40. Curto-circuito mínimo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise probabilística.....	95
Figura 41. Curto-circuito mínimo versus corrente de <i>pick-up</i>	96
Figura 42. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise determinística da GD acoplada por inversores	97
Figura 43. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise determinística de máquinas rotativas	98
Figura 44. Curto-circuito mínimo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise determinística	99
Figura 45. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise probabilística da GD acoplada por inversores	100
Figura 46. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise probabilística de máquinas rotativas	101

Figura 47. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> na análise probabilística	102
Figura 48. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i>	103
Figura 49. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> do fusível 387BF005500 na análise determinística da GD acoplada por inversores	104
Figura 50. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> do fusível 387BF005500 na análise determinística de máquinas rotativas	105
Figura 51. Curto-circuito mínimo versus corrente de <i>pick-up</i> do fusível 387BF005500 na análise determinística	106
Figura 52. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> do fusível 387BF005500 na análise probabilística da GD acoplada por inversores	107
Figura 53. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> do fusível 387BF005500 na análise probabilística de máquinas rotativas	108
Figura 54. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> do fusível 387BF005500 na análise probabilística	109
Figura 55. Curto-circuito máximo versus corrente de <i>pick-up</i> do fusível 387BF005500	110

Lista de tabelas

Tabela 1. Níveis de tensão considerados para a conexão de centrais geradoras.	39
Tabela 2. Requisitos mínimos em função da potência instalada.	41
Tabela 3. Transformadores de acoplamento para GD.	54
Tabela 4. Modelo de máquina rotativa utilizado para a avaliação do impacto da GD.	56
Tabela 5. Modelo conectado por inversores utilizado para a avaliação do impacto da GD.	57
Tabela 6. Modelo de rede utilizado para a avaliação do impacto da GD.	57
Tabela 7. Transformadores de acoplamento para GD.	58
Tabela 8. Dados do circuito utilizado para a análise de perda de sensibilidade.	75
Tabela 9. Potência nominal das GD para a análise de perda de sensibilidade.	78
Tabela 10. GD alocadas para a análise de perda de sensibilidade.	79
Tabela 11. Potência nominal das GD para a análise de queima inesperada de fusíveis.	87

Lista de abreviaturas e siglas

ADL	Arthur D. Little
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
DER	Distributed Energy Resources
EMTDC	Electromagnetic Transients including DC
EMTP	Electromagnetic Transients Program
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
IEA	International Energy Agency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MME	Ministério de Minas e Energia
OLTC	On Load Tap Changer
ONS	Operador Nacional do Sistema
USDOE	United States Department of Energy
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
PWM	Pulse Width Modulation
SDAT	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão
SDBT	Sistema de Distribuição de Baixa Tensão
TM	Tempo Mínimo de Fusão
TT	Tempo de Abertura Total

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	Evolução do paradigma do setor elétrico	14
1.2.	Geração distribuída e sua definição.....	17
1.3.	O Brasil e a geração distribuída	18
1.4.	Consequências da geração distribuída.....	20
1.5.	Motivação e Objetivo	26
1.6.	Organização do trabalho.....	27
2	ESTADO DA ARTE	29
2.1.	Revisão bibliográfica: Impacto da geração distribuída sobre a proteção de redes de distribuição	29
2.2.	Arcabouço regulatório brasileiro.....	35
2.2.1.	Definição dos conceitos da geração distribuída no Brasil.....	36
2.2.2.	Sistema de compensação de energia elétrica.....	37
2.2.3.	Procedimentos para conexão das unidades de geração distribuída	39
2.3.	Inovação	42
3	IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOBRE SISTEMAS DE PROTEÇÃO	44
3.1.	Geração distribuída e os sistemas de proteção	44
3.1.1.	Perda de coordenação da proteção	45
3.1.2.	Bidirecionalidade.....	47
3.1.3.	Queima inesperada de fusíveis	49
3.1.4.	Perda de sensibilidade	51
3.1.5.	Sobretensão	53
3.2.	Modelos elétricos	55
3.2.1.	Modelo elétrico da geração distribuída	56
3.2.2.	Modelo elétrico da rede	57
3.3.	Procedimentos para avaliação do impacto da GD	59
3.3.1.	Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para perda de coordenação	59
3.3.2.	Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para bidirecionalidade	61
3.3.3.	Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para queima inesperada de fusíveis	61
3.3.4.	Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para perda de sensibilidade.....	62
3.3.5.	Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para sobretensão	63
3.4.	Abordagens para definição dos níveis de penetração.....	64
3.4.1.	Abordagem determinística para a alocação da geração distribuída.....	64
3.4.1.1.	Abordagem determinística aplicada à perda de sensibilidade.....	64
3.4.1.2.	Abordagem determinística aplicada à bidirecionalidade e queima inesperada de fusíveis.....	66

3.4.2.	Abordagem probabilística para a alocação da geração distribuída	67
3.5.	Métodos utilizados	70
4.	METODOLOGIA	71
4.1.	Dados da rede de distribuição elétrica real	71
4.2.	Metodologia do estudo de caso de perda de sensibilidade	72
4.2.1.	Circuito utilizado para a análise de perda de sensibilidade	73
4.2.2.	Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade	75
4.2.2.1.	Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem determinística	75
4.2.2.2.	Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística	76
4.2.3.	Modelo elétrico da GD para avaliação da perda de sensibilidade	78
4.2.3.1.	Modelo elétrico da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem determinística	78
4.2.3.2.	Modelo elétrico da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística	79
4.2.4.	Método de avaliação da perda de sensibilidade	80
4.3.	Metodologia do estudo de caso de bidirecionalidade	81
4.3.1.	Circuito utilizado para a análise de bidirecionalidade	81
4.3.2.	Localização da GD para avaliação da bidirecionalidade	81
4.3.2.1.	Localização da GD para avaliação da bidirecionalidade na abordagem determinística	81
4.3.2.2.	Localização da GD para avaliação da bidirecionalidade na abordagem probabilística	82
4.3.3.	Modelo elétrico da GD para avaliação da bidirecionalidade	82
4.3.3.1.	Modelo elétrico da GD para avaliação da bidirecionalidade na abordagem determinística	82
4.3.3.2.	Modelo elétrico da GD para avaliação da bidirecionalidade na abordagem probabilística	83
4.3.4.	Método de avaliação da perda bidirecionalidade na abordagem determinística	83
4.4.	Metodologia do estudo de caso de queima inesperada de fusíveis segundo a abordagem determinística	84
4.4.1.	Circuito utilizado para a análise de queima inesperada de fusíveis	84
4.4.2.	Localização da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis	85
4.4.2.1.	Localização da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem determinística	85
4.4.2.2.	Localização da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem probabilística	86
4.4.3.	Modelo elétrico da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis	86
4.4.3.1.	Modelo elétrico da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem determinística	86
4.4.3.2.	Modelo elétrico da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem probabilística	87
4.4.4.	Método de avaliação da queima inesperada de fusíveis	87
5.	RESULTADOS	89
5.1.	Resultado da avaliação da perda de sensibilidade	89
5.1.1.	Perda de sensibilidade - inversores na abordagem determinística	89
5.1.2.	Perda de sensibilidade - máquinas rotativas na abordagem determinística	90

5.1.3.	Perda de sensibilidade - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem determinística	91
5.1.4.	Perda de sensibilidade - inversores na abordagem probabilística	92
5.1.5.	Perda de sensibilidade - máquinas rotativas na abordagem probabilística.....	93
5.1.6.	Perda de sensibilidade - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem probabilística	94
5.1.7.	Perda de sensibilidade - comparação entre as abordagens	95
5.2.	Resultado da avaliação da bidirecionalidade.....	96
5.2.1.	Bidirecionalidade - inversores na abordagem determinística.....	96
5.2.2.	Bidirecionalidade - máquinas rotativas na abordagem determinística	97
5.2.3.	Bidirecionalidade - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem determinística	98
5.2.4.	Bidirecionalidade - inversores na abordagem probabilística	99
5.2.5.	Bidirecionalidade - máquinas rotativas na abordagem probabilística.....	100
5.2.6.	Bidirecionalidade - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem probabilística	101
5.2.7.	Bidirecionalidade - comparação entre as abordagens	102
5.3.	Resultado da avaliação da queima inesperada de fusíveis	103
5.3.1.	Queima inesperada de fusíveis - inversores na abordagem determinística	103
5.3.2.	Queima inesperada de fusíveis - máquinas rotativas na abordagem determinística	104
5.3.3.	Queima inesperada de fusíveis - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem determinística.....	105
5.3.4.	Queima inesperada de fusíveis - inversores na abordagem probabilística.....	106
5.3.5.	Queima inesperada de fusíveis - máquinas rotativas na abordagem probabilística	107
5.3.6.	Queima inesperada de fusíveis - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem probabilística	108
5.3.7.	Queima inesperada de fusíveis - comparação entre as abordagens.....	109
6.	CONCLUSÃO.....	111
6.1.	Conclusões deste trabalho	111
6.2.	Sugestões de trabalhos futuros	112
6.3.	Considerações finais.....	113
7.	REFERÊNCIAS	114

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que a população mundial contará com 9,6 bilhões de habitantes no ano de 2050, representando um aumento de mais de 2 bilhões em relação a atual população (LIMA, 2015). Esse crescimento, aliado ao crescimento dos países caracterizados como em desenvolvimento, acarreta, em termos energéticos, a necessidade de um aumento de eficiência, de um significativo crescimento de demanda por novas fontes de suprimento e de busca por fontes energéticas que substituam as fontes baseadas em combustíveis fósseis.

Nesse contexto, o paradigma do atual setor elétrico, caracterizado por grandes centrais de geração elétrica, está se desenvolvendo na direção de um modelo de geração mista, tanto centralizada quanto descentralizada, visando à adoção de fontes de geração renováveis capazes de solucionar o problema da necessidade de suprimento, o atendimento ao apelo crescente da liberação dos mercados de energia elétrica e a resposta às preocupações com questões ambientais.

1.1. Evolução do paradigma do setor elétrico

A mudança no paradigma do setor elétrico é corroborada pela evolução da capacidade instalada de fontes renováveis. Isso, pois nos últimos 10 anos, estas fontes apresentaram evoluções significativas. De 2008 a 2018, a capacidade instalada de fontes fotovoltaicas no mundo passou de 15 GW para 505 GW. Isto representa um crescimento de 3261% (REN21, 2019). Além disso, estima-se que a participação da energia fotovoltaica no mix energético global aumentará para 37% em 2030 e para 69% em 2050 (METAYER; BREVER; FELL, 2015).

Já a capacidade instalada de fontes eólicas no mundo, por sua vez, passou de 121 GW para 591 GW, entre 2008 e 2018 (REN21, 2019). Isso representa um crescimento de 388% durante o período. Para ilustrar estas evoluções, a capacidade instalada das fontes fotovoltaica e eólica no mundo é apresentada nas Figura 1 e Figura 2.

Figura 1. Evolução da capacidade instalada de fontes fotovoltaicas no mundo.

Fonte: REN21, 2019.

Figura 2. Evolução da capacidade instalada de fontes eólicas no mundo.

Fonte: REN21, 2019.

No Brasil, a capacidade instalada de fontes fotovoltaicas ainda é representada por números pouco significativos. Somente em 2010 são encontrados valores de capacidade instalada não nulos. Contudo, entre 2010 e 2015, observa-se uma variação de 2000% da capacidade instalada fotovoltaica, que passa de 1 MW a 21 MW (EPE, 2016), como ilustrado na Figura 3. Por outro lado, a capacidade instalada, de fontes eólicas no Brasil, é representativa. Ela variou entre os anos de 2005 e 2015, de 237 MW e 7633 MW (EPE,

2016). Isso representa uma elevação de 3121% e 1,76% da capacidade eólica instalada no mundo. A evolução da potência instalada das fontes eólicas no Brasil é representada na Figura 4.

Figura 3. Evolução da capacidade instalada de fontes fotovoltaicas no Brasil.

Fonte: EPE 2019.

Figura 4. Evolução da capacidade instalada de fontes eólicas no Brasil.

Fonte: EPE 2019.

A partir deste novo paradigma, observa-se o desenvolvimento do setor em direção de um modelo de geração mista, dividido entre grandes centrais de geração elétrica centralizada e

distribuída. Assim, de forma a melhor embasar o presente estudo, a seção 1.2 apresentará as definições da GD.

1.2. Geração distribuída e sua definição

O CIGRÉ define a GD como geração caracterizada por não ser centralmente planejada e não ser despachada de forma centralizada. Além disso, o CIGRÉ também caracteriza a GD por ser usualmente conectada em sistemas de distribuição e possuir potência nominal inferior a 50 ou 100 MW (RUJULA; AMADA; BERNAL-AGUSTIN; LOYO; NAVARRO, 2005).

Segundo a IEA, GD refere-se a uma planta que supre um consumidor localmente, ou que auxilia uma rede de distribuição. As tecnologias de GD compreendem motores, pequenas turbinas, células combustíveis e fotovoltaicas. Não necessariamente inclui-se a tecnologia eólica, pois a maioria da energia eólica é produzida por parques eólicos (RUJULA; AMADA; BERNAL-AGUSTIN; LOYO; NAVARRO, 2005).

De acordo com o *United States Department of Energy* (USDOE), toda GD é composta por geradores de pequeno porte, modulares e próximos ao consumidor, os quais auxiliam na redução de investimentos das redes de distribuição e transmissão e que proveem ao cliente energia de qualidade superior, mais confiável e limpa (RUJULA; AMADA; BERNAL-AGUSTIN; LOYO; NAVARRO, 2005).

A empresa de consultoria ADL, descreve GD como a utilização integrada ou autônoma de recursos de geração elétrica modular e de pequeno porte, por distribuidoras, consumidores conectados a distribuidora ou terceiros, em aplicações que beneficiam o sistema elétrico e/ou o consumidor final. Ela inclui cogeração e consiste em uma instalação de unidade de geração que esteja localizada no consumidor final ou próximo ao mesmo, dentro de uma região industrial, edifício comercial ou comunidade (RUJULA; AMADA; BERNAL-AGUSTIN; LOYO; NAVARRO, 2005).

A ANEEL define que GD é caracterizada por centrais geradoras¹ de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas ou não pelo ONS (ANEEL, 2015a).

¹ Agente que explora a atividade de geração de energia elétrica e que pode deter instalações de interesse restrito. Incluem-se, neste conceito, autoprodutores, cogeneradores e produtores independentes (ANEEL, 2015a).

Neste trabalho, a GD será abordada sob a ótica e arcabouço regulatório brasileiro. Assim será adotada a interpretação de GD apresentada pela ANEEL. Por isso, a seção 1.3 abordará o posicionamento brasileiro quanto a GD.

1.3. O Brasil e a geração distribuída

O Brasil possui um grande potencial solar e eólico, principalmente no segmento residencial, impulsionado fortemente pelo decréscimo nos custos de implantação das tecnologias (FRANKEL; OSTROWSKI; PINNER, 2014). Com o objetivo de aproveitar esta potencialidade, a ANEEL publicou em 2012 a Resolução Normativa nº 482 (ANEEL, 2012a) e a sua atualização, a Resolução Normativa nº 687/2015 (ANEEL, 2015b), para o estabelecimento das condições gerais de acesso de micro e minigeração aos sistemas de distribuição, o que inclui as fontes de geração de energia fotovoltaicas residenciais.

Em adição a essas medidas, em 15 de dezembro de 2015 foi lançado o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica - ProGD (MME, 2015). Este programa tem o intuito de investir R\$ 100 bilhões até 2030 em ações como: criação e expansão de linhas de crédito e financiamento de projetos de sistemas de distribuição, incentivos à indústria de componentes e equipamentos, com foco no desenvolvimento produtivo, tecnológico e inovação, fomento à capacitação e formação de recursos humanos para atuar na área de GD e a promoção e atração de investimentos nacionais e internacionais e de tecnologias competitivas para energias renováveis.

Essas ações visam o estímulo à GD, com base em fontes renováveis, para ampliar produção energia elétrica baseada em fontes renováveis e em instalações residenciais, industriais e comerciais. Esse programa busca alcançar benefícios ao consumidor final, ao meio ambiente e ao setor elétrico. Para o consumidor final, destacam-se a redução dos custos com eletricidade, reforço da segurança energética e elétrica e redução dos custos do insumo energia (para indústria e comércio). No âmbito do meio ambiente, espera-se que o estímulo a GD acarrete a utilização de fontes limpas e renováveis, na atenuação do impacto ambiental dos projetos, na diminuição da necessidade de investimentos em fontes tradicionais e na redução de emissões de gases do efeito estufa. Para o setor elétrico, espera-se que a GD estimule a geração de emprego e renda, a redução de perdas de energia, a atenuação de investimentos em transmissão e a solução ao problema de suprimento de energia elétrica, pois a GD dispensa licenciamentos, reduzindo possíveis atrasos na entrega dos projetos de grandes centrais elétricas.

Nesse âmbito, projeta-se que até o ano de 2030 sejam reduzidas em 43% as emissões de gases do efeito estufa (MME, 2015), e que a matriz elétrica brasileira será composta por 23% de energias renováveis, além da energia hídrica. Para a última, espera-se alcançar 66% da matriz elétrica, contra os 65,2% observados em 2014 no Balanço Energético Nacional (EPE, 2015). Ademais, espera-se que o investimento na GD proporcione ganhos de eficiência de até 10% ao setor elétrico, no horizonte de planejamento 2015 até 2030. No mesmo horizonte, estima-se uma participação de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética, contra 39,4%, observados em 2014 no Balanço Energético Nacional (EPE, 2015). E que desse percentual, de 28% a 33% seja devido a fontes renováveis, excetuando-se a energia hídrica. Além dessas, acredita-se que seja possível atingir a meta de 16% de etanol carburante e demais biomassas derivadas da cana-de-açúcar no total da matriz energética, bem como a participação de bioenergia na matriz energética de aproximadamente 18%.

Ao observar a evolução da potência instalada da micro e mini GD no Brasil, não se observa até 2015 nenhuma evolução significativa. Por outro lado, entre os anos de 2015 e 2018, é observada evolução exponencial da capacidade instalada de mini e micro GD, que pode ser correlacionadas às ações apresentadas anteriormente. Entre 2011 e 2012, houve um aumento de 805 vezes a potência instalada das GD, passando de 0,5 kW para 403 kW. Já entre 2015 e 2018, o salto foi de 5173% %, passando de 12,5 MW para 669,6 MW de potência instalada (EPE, 2019). Esta evolução da potência instalada das GD no Brasil é detalhada na Figura 5. Apesar deste crescimento, a potência instalada das GD representa ainda 0,41% da potência instalada brasileira (EPE, 2019).

Figura 5. Evolução da capacidade instalada de mini e micro GD no Brasil.

Fonte: EPE, 2019.

Em 2018, a potência instalada das GD era composta por, 84% de centrais fotovoltaicas, 9% de centrais hidrelétricas, 6% de usinas termelétricas e 1% de centrais eólicas. A composição das GD por fonte é ilustrada na Figura 6.

Figura 6. Distribuição da potência instalada de GD no Brasil.

Fonte: EPE, 2019.

1.4. Consequências da geração distribuída

Percebe-se, através das definições apresentadas previamente, que a GD possui características que a distinguem do modelo centralizado de geração e que a fazem de extremo interesse ao novo paradigma do setor elétrico. As razões para a atual relevância da GD, que concernem o mercado de energia, são: o conceito de corte de picos, a qualidade da energia e as possibilidades de utilizá-la como alternativa para expansão da rede ou como serviço ancilar (DRIESEN; BELMANS, 2006).

Os cortes de picos são relevantes em virtude da flexibilidade da GD. Essa flexibilidade está relacionada tanto a operação da GD, quanto ao tamanho e viabilização da expansão da rede de distribuição. Dessa forma, a GD pode ser utilizada de maneira a amenizar, por exemplo, os efeitos da flutuação dos preços da energia. Ou até como alternativa de suprimento.

O impacto positivo da GD sobre a qualidade da energia se reflete tanto no que tange a qualidade do produto quanto do serviço. Isto se dá, pois a fonte de geração descentralizada pode ser utilizada durante interrupções do fornecimento de energia, de forma ilhada ou não,

para elevar os níveis de confiabilidade da energia ou até prevenir afundamentos de tensão. Ainda, a GD pode ser utilizada como alternativa a expansão da rede de distribuição, pois ao aproximar a geração da carga, reduzem-se os fluxos de potência na rede, diminuindo perdas, quedas de tensão e carregamento dos ativos da rede.

A GD pode também ser utilizada como serviço ancilar, ao manter o sistema estável durante variações de frequência ou ao suprir a demanda por reativos na rede, regulando possíveis problemas relativos ao nível de tensão.

Por fim, as políticas ambientais são a maior força motriz para a adoção da GD. Isto ocorre, pois a regulação ambiental, principalmente nos países europeus, incentiva a procura por fontes de energia limpas, as quais são constituídas em grande parte pelas fontes de GD (DRIESEN; BELMANS, 2006).

Todavia, a GD não traz somente impactos positivos à rede de distribuição. Tendo em vista a iminente e irrefreável mudança do paradigma do setor elétrico, entende-se a necessidade de estudar os impactos que podem ser acarretados devido à penetração da GD no âmbito dos sistemas de distribuição. A seguir são levantados alguns impactos negativos da GD aos sistemas de distribuição.

a) Regulação de tensão e controle de reativos

Em sistemas de distribuição é comum haver variações no perfil de tensão das redes. Para solucionar este problema, utiliza-se comumente a variação de taps de transformadores situados nas subestações, reguladores de linha ao longo dos alimentadores, ou até bancos de capacitores. Esses procedimentos são realizados para manter os níveis de tensão dentro dos limites estipulados na regulação vigente. Contudo, a inserção da GD introduz a rede fluxos de potência bidirecionais, os quais interferem na prática de regulação de tensão das redes de distribuição, que são projetadas para funcionamento considerando fluxo de potência unidirecional apenas.

Como exemplo, pode-se citar o caso de uma GD inserida a jusante de um regulador ou OLTC de uma subestação, que está compensando uma significativa queda de tensão ao final de uma rede. Nesta configuração a GD eleva a tensão próxima ao regulador ou OLTC e faz com que ele seja incapaz de medir adequadamente a demanda da rede, causando um possível problema de tensão no final do alimentador. Este problema pode ser solucionado, por meio da realocação do regulador, ou do gerador, ou até com a inserção de controles adicionais ao regulador (BAKER; MELLO, 2000).

Além disto, a GD pode, em alguns casos, resultar no efeito oposto ao supracitado, causando níveis de tensão superiores aos limites regulatórios para os consumidores. Esse efeito pode ser observado em redes de baixa tensão com alta penetração de GD. Isso ocorre, pois a GD, que compartilhe a mesma rede secundária com outros consumidores, pode elevar a tensão a níveis superiores ao limite regulatório.

b) Variação de tensão de curta duração

A presença de GD pode ser agente causador de anomalias como as VTCD. Isso ocorre, devido à entrada ou saída dos geradores da rede. Para mitigar esse problema, pode-se reduzir a tensão de entrada em geradores de indução e em geradores síncronos pode-se utilizar uma sincronização mais precisa. No caso da geração fotovoltaica e eólica, observa-se uma flutuação na energia gerada, devido principalmente aos insumos de geração (nível de irradiação, velocidade dos ventos, entre outros). Nesses casos, a variação causada fica mais suave, não ocasionando diretamente VTCD. Entretanto, ela pode influenciar reguladores a gerarem tais VTCD (VAZIRI; AFZAL; ZARGHAMI; YAZDANI; VADHVA; TAVATLI, 2013).

c) Introdução de correntes harmônicas

A GD pode introduzir correntes harmônicas às redes de distribuição. Isso depende diretamente do conversor utilizado e da tecnologia de interconexão. Esse problema possui relevância, visto que as correntes harmônicas introduzidas podem causar ressonância com bancos de capacitores ou problemas indesejados em equipamentos sensíveis a harmônicos.

No caso dos inversores, não são observados muitos problemas, visto que a tecnologia atual de conversores PWM é capaz de gerar correntes senoidais com boa qualidade. Assim, na maioria dos casos, essa tecnologia permite o atendimento aos limites de qualidade regulatórios. No caso da tecnologia de geradores síncronos, os harmônicos são gerados por diversos motivos, como projeto dos enrolamentos do gerador, não linearidades do núcleo, aterramento, entre outros. Dentre as soluções mais usuais está a utilização de transformadores elevadores.

d) *Sobretensão*

Dependendo da capacidade da GD, faz-se necessária a utilização de transformadores de acoplamento, de forma a controlar possíveis anomalias de tensão capazes de danificar ativos da distribuidora. Segundo o IEEE, um aterramento efetivo significa que a reatância de sequência positiva é superior à resistência de sequência zero e superior em três vezes à reatância de sequência zero (IEEE, 1992).

O não aterramento efetivo dos geradores pode resultar em sobretensões durante faltas monofásicas. Caso haja o ilhamento não intencional, esse problema torna-se perigoso, pois tem a capacidade de danificar equipamentos tanto dos clientes como da concessionária. Dessa forma, é requerido dos geradores com capacidade suficiente para sustentar ilhamentos, que possuam aterramento adequado. Em caso contrário, são necessários dispositivos adicionais de proteção, como relés com proteção instantânea contra curtos-circuitos monofásicos. A primeira solução é considerada mais promissora, uma vez que ela limita problemas de tensão pelo meio do próprio projeto da instalação, enquanto a segunda, caso não seja rápida o suficiente, ou eficaz, pode expor o consumidor a vários ciclos de sobretensão.

Apesar de ser uma solução eficaz contra sobretensões, o acréscimo de fontes de aterramento a rede pode causar a dessensibilização dos relés de falta a terra. Isso pode se tornar crítico para geradores de grande porte ou para o caso de muitos geradores de pequeno porte e por isso deve ser analisado com cautela podendo requerer mudanças nos estudos de proteção, principalmente nas configurações de corrente de sensibilização (*pick-up*) dos relés.

e) *Ilhamento*

O ilhamento ocorre quando uma GD, ou um conjunto delas, continua a energizar uma porção do circuito de distribuição, a qual foi separada da fonte principal do sistema. Essa separação pode ser originada pela operação de dispositivos de proteção como relés, fusíveis ou seccionadores. Isso ocorre quando o gerador ou conjunto de geradores é suficiente para manter a sustentação da carga referente à seção ilhada. O ilhamento é considerado indesejado principalmente em circuitos com utilização de religamento, pois pode causar problemas de sincronização durante este processo, tornando o processo passível de rejeição de carga, ou até de danos aos ativos da concessionária e dos clientes (BAKER; MELLO, 2000). Ademais, esse processo pode causar impactos na manutenção das redes de distribuição, visto que requer um

cuidado adicional quanto à desenergização dos circuitos ilhados, resultando em perda da qualidade do serviço.

Para prevenir o ilhamento, as GD devem possuir proteções sensíveis à perda de continuidade ou a afundamentos de tensão, as quais devem desconectar a GD durante estes eventos. Segundo (XU, MAUCH, MARTEL, 2004), as proteções contra ilhamento são divididas entre as baseadas em comunicação e as de detecção local.

As proteções baseadas em comunicação podem utilizar o esquema de *transfer trip* ou *power line signaling*. No esquema de *transfer trip* são monitorados todos os equipamentos de proteção que podem representar risco de ilhamento para a GD. Durante uma contingência um algoritmo central avalia a existência de ilhamento e envia um sinal de *trip* para a proteção da GD. No esquema de *power line signaling*, um sinal é enviado pela subestação a todos os alimentadores. A proteção da GD possui um detector deste sinal, que ao não ser mais recebido durante uma contingência, ativa a proteção anti-ilhamento.

As proteções de detecção local utilizam de esquemas de detecção passiva e ativa. No esquema detecção passiva a proteção analisa sinais de tensão e corrente para avaliar se há um ilhamento. No esquema de detecção ativa a proteção aplica perturbações a rede para detectar o ilhamento através das respostas medidas localmente.

f) Níveis de curto-circuito

Acredita-se que a GD de pequeno porte não causa impacto significativo para as contribuições de curto-circuito. Contudo, a contribuição agregada de um grande grupo de geradores de pequeno porte ou de um pequeno grupo de médio porte, tem a capacidade de influenciar nos níveis de curto-circuito, de forma a causar, entre outros, problemas na coordenação da proteção das redes de distribuição (BAKER; MELLO, 2000). Esse fenômeno afeta a confiabilidade, bem como a segurança das redes de distribuição. Um exemplo de problema causado a proteção da rede de distribuição é a variação dos níveis de curto-circuito oriunda da contribuição da GD, que pode ser observado na Figura 7.

Figura 7. Contribuição da GD a corrente de curto-circuito.

Fonte: Elaboração própria.

Os níveis de curto-circuito dependem diretamente das tecnologias de conversão. Segundo (IEEE, 2000), para geradores síncronos com excitação externa, a contribuição de curto-circuito inicia-se entre 500 e 1000% da corrente nominal por alguns ciclos, passando posteriormente para 200 a 400%. Já as contribuições, dos geradores síncronos e dos geradores de indução, iniciam-se nos mesmos patamares que os geradores síncronos com excitação externa, decaindo para níveis desprezíveis a partir de 10 ciclos. Por último, inversores contribuem com correntes entre 100 e 400%, sendo sua duração determinada por seus parâmetros de controle, podendo a corrente ser inferior a 100%. Esse último caso será mais bem detalhado em capítulo subsequente, referente aos modelos para cálculo da contribuição de inversores aos níveis de curto-circuito.

No caso da adição de um único gerador, podem ser realizados cálculos manuais para determinação das correntes de falta. Contudo com a inserção de múltiplos geradores dispersos na rede, faz-se necessária a utilização de ferramenta computacional com modelos de cálculo de curto-circuito capazes de determinar as reais contribuições destes geradores para as situações de contingência, de forma a alcançar um planejamento da proteção da rede mais apurado. Em capítulo posterior, referente aos impactos da geração distribuída à proteção, serão descritos mais impactos à proteção de redes de distribuição.

1.5. Motivação e Objetivo

No contexto do antigo paradigma de redes de distribuição elétrica, o planejamento de rede consiste em resolver os impactos causados pelo crescimento da demanda. Dessa forma são avaliados os impactos que possam surgir dentro de um horizonte de planejamento, como problemas de tensão e sobrecargas de linha, transformadores, entre outros. Esses horizontes de planejamento usualmente variam de 5 a 10 anos e consideram as projeções de demanda horizontal e vertical.

Assim, dentro do horizonte de planejamento, são realizadas projeções de crescimento da carga. Esses consistem em estudos estatísticos para prever o crescimento da demanda. Assim, no problema do planejamento de redes, o planejador avalia o impacto do crescimento da demanda, dentro de um horizonte de planejamento e propõe soluções, como reforços necessários, expansão de redes existentes ou o desenvolvimento de novas redes.

Os impactos típicos avaliados no planejamento são a sobrecarga de linhas, a sobrecarga de transformadores, a violação dos limites de tensão e perdas. As soluções usuais para esses impactos consistem em substituição de cabos, substituição de transformadores, instalação de reguladores de tensão, instalação de bancos de capacitores e até a construção de novos alimentadores e novas subestações, de forma a atender a nova demanda de energia elétrica.

No entanto, no novo paradigma das redes elétricas inteligentes, existem outros fatores que devem ser levados em consideração no planejamento, como DER, mais especificamente a aparição da GD. Nesse cenário, além da projeção do crescimento da demanda, é necessário também projetar o crescimento da oferta, que deriva da inserção da GD.

Sabe-se que a GD causa não apenas impactos para a expansão da rede, mas também para a proteção da rede. Portanto, durante o planejamento da rede de distribuição, tornou-se importante quantificar as ações para resolver eventuais problemas de proteção que possam acontecer devido à inserção de unidades de GD. Dentre os principais impactos na proteção das redes de distribuição elétrica, que também são discutidos nesse capítulo, destaca-se a perda de coordenação da proteção, a sobretensão, a perda de sensibilidade da proteção, a bidirecionalidade e a queima inesperada de fusíveis. Assim, novas ações devem ser atribuídas ao planejador, de forma prever esses impactos, tais como possível reajuste da sensibilidade de dispositivos de proteção, a instalação de novos dispositivos de proteção com função direcional, a substituição de fusíveis, a modificação de estudos de coordenação e seletividade,

e até mesmo o desenvolvimento de restrições de tamanho das GD em certas áreas da rede, incluindo os mesmos na elaboração de planos expansão e manutenção das redes de distribuição.

Assim, o objetivo desta pesquisa é apresentar meios possíveis para auxiliar na avaliação do impacto da GD nos sistemas de proteção de redes de distribuição. Dessa forma, esta pesquisa apresenta os principais impactos causados pela GD à proteção de redes de distribuição elétrica, procedimentos para avaliar tais impactos, modelos elétricos que ajudam na avaliação e possíveis abordagens que podem ser utilizadas no processo de planejamento de proteção. Para tanto foi elaborada uma metodologia probabilística para avaliação de cenários de inserção de pequenas unidades de GD em redes de média e baixa tensão e a análise de possíveis impactos nos sistemas de proteção de redes de média tensão.

1.6. Organização do trabalho

O capítulo 1 apresenta o conceito de GD, contextualiza as motivações para a adoção do novo paradigma, descreve o contexto da geração distribuída no Brasil e aborda o problema do planejamento e operação de redes de distribuição frente à presença da GD.

O capítulo 2 apresenta e analisa o estado da arte dos estudos relacionados aos impactos provenientes da GD sobre as redes de distribuição, com ênfase nos estudos focados no impacto sobre a proteção de redes com presença de GD. É dado destaque especial à mini e micro GD, bem como à penetração massiva dessas tecnologias no sistema de distribuição de baixa tensão. Posteriormente ele aborda o arcabouço regulatório brasileiro, apresentando as resoluções normativas 482 e sua sucessora, a 687, bem como os procedimentos e exigências em relação à conexão das GD, os quais dão direção ao trabalho.

O capítulo 3 detalha os modelos que serão utilizados na metodologia desenvolvida para determinação dos impactos da microgeração distribuída dispersa em redes de distribuição. Ela apresenta o modelo de inversor utilizado para cálculo das contribuições de falta da GD, os modelos de rede utilizados, os impactos analisados, bem como a métrica utilizada para aferição deles.

O capítulo 4 apresenta a metodologia e por consequência o estudo realizado para a validação dos modelos apresentados. Isso é realizado de forma a determinar os impactos sobre o planejamento da proteção tanto dos alimentadores (SDMT), mediante análise de sensibilidade quanto à localização das GD, quanto a redes de baixa tensão (SDBT).

O capítulo 5 apresenta os resultados do estudo realizado, de forma a embasar as conclusões do trabalho.

Por último, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões desta dissertação, considerações finais sobre o tema e sugestão de estudos futuros, os quais possam dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

2 ESTADO DA ARTE

De forma a servir como base ao desenvolvimento desta dissertação, foram estudados neste capítulo, os principais estudos focados no impacto da GD sobre a proteção de redes. Posteriormente, foi feita uma leitura crítica das resoluções que definem o arcabouço regulatório da conexão de GD as redes de distribuição. Por último, foram discutidas as normas e procedimentos para conexão de GD nas redes de distribuição.

2.1. Revisão bibliográfica: Impacto da geração distribuída sobre a proteção de redes de distribuição

A literatura desenvolvida no âmbito do estudo dos impactos decorrentes da inserção da GD aborda entre outros, os distúrbios no funcionamento dos dispositivos de proteção do sistema de distribuição elétrica. Dentre esses, podem ser destacados os estudos sobre os impactos no religamento automático de redes, da necessidade de adaptação da proteção frente à geração distribuída, da possibilidade de ilhamentos não intencionais, da possibilidade de perda de sensibilidade e coordenação pelos dispositivos de proteção, da modelagem dos conversores eletrônicos utilizados na geração fotovoltaica, da proposição de sistema multiagentes e proteção adaptativa, entre outros.

De forma a compreender tais impactos, a análise bibliográfica se inicia com estudos referentes à definição e descrição dos impactos da geração distribuída sobre os sistemas de proteção, passando posteriormente pelo aprofundamento no tema de impacto sobre o funcionamento dos equipamentos de proteção, seguindo pelo tema de ilhamento intencional e não intencional e por fim culminando nos impactos sobre os níveis de curto-circuito os quais serão abordados posteriormente neste trabalho.

a) Visão geral dos impactos da geração distribuída sobre os sistemas de proteção

Em (DRIESEN; BELMANS, 2006) são apresentados diversos impactos causados pela inserção da GD de pequeno porte nas redes de distribuição. Entre os temas abordados, estão impactos na proteção e segurança, na qualidade de tensão e na estabilidade dinâmica e estática das redes com penetração massiva de GD. Dentre as adversidades causadas pela penetração massiva de GD aos esquemas de proteção das redes de distribuição, destaca-se a bidirecionalidade, quando há a possibilidade de a corrente de falta seguir no caminho

contrário ao definido no esquema radial, podendo causar perda de seletividade da proteção. Dessa forma, os autores sugerem a adoção de sistemas de proteção ativos ou a desconexão automática das GD em condições de falta, evitando ilhamentos, exceto em casos intencionais. No caso dos ilhamentos intencionais, devem ser considerados limites técnicos, como capacidade para suprir serviços ancilares, e de segurança, como o não suprimento dos blocos de defeito isolados e a ressincronização das GD no momento de reconexão.

Também são levantados em (SUJO; ASHOK; BANDYOPADHYAY, 2013) os impactos da GD na proteção das redes de distribuição, principalmente no funcionamento incorreto dos relés de proteção. Dentre eles estão as variações nos níveis de curto-circuito, o fluxo de potência reverso, o ilhamento, a descoordenação da proteção, a perda de sensibilidade e a atuação indevida dos equipamentos de proteção.

No caso da variação dos níveis de curto-circuito, a conexão de GD na rede de distribuição pode ocasionar a ultrapassagem dos limites de proteção da rede, e como consequência colocar em risco os equipamentos, a segurança e interromper o suprimento de energia. Assim, a nova corrente de curto-circuito após a inserção das GD deve ser considerada para configuração dos equipamentos de proteção das redes de distribuição.

As correntes de curto-circuito reversas apresentam risco às redes de distribuição, visto que a proteção delas é projetada para redes radiais com fluxo unidirecional. Isso pode fazer com que dispositivos de proteção atuem de forma indevida. O ilhamento não intencional das redes de distribuição pode gerar uma variedade de perigos, como a segurança das equipes de manutenção e o mau funcionamento de religadores automáticos. A perda de coordenação ocorre quando o esquema inicial de coordenação, o qual deveria isolar o defeito no tempo mais curto-circuito possível, afetando o mínimo de clientes, não é obedecido, ocasionando o isolamento de uma área maior do que a necessária. A perda de sensibilidade da proteção ocorre quando a corrente de falta observada pela proteção é reduzida devido à presença das GD, resultando na não operação dos dispositivos.

b) Impacto da geração distribuída no funcionamento dos equipamentos de proteção

A partir dos estudos citados, observa-se que a GD pode acarretar o funcionamento incorreto dos relés de proteção e fazer com que os mesmos não consigam alcançar seus objetivos, que são: a prevenção de possíveis falhas que tragam a destruição de equipamentos, a mitigação das consequências das contingências, evitando a propagação das mesmas e prevenindo a operação indevida dos relés de proteção, os quais causam desligamentos

desnecessários de parte saudável das redes (ZAMORA; MAZON; VALVERDE; MARTIN; SAN; BUIGUES; DYSKO, 2005).

Assim, é defendida a utilização de conversores eletrônicos para o acoplamento das GD ao sistema de distribuição. Contudo esses também acarretam problemas na qualidade do produto, como flutuações de frequência e inserção de correntes harmônicas, as quais resultam na operação indevida dos relés de proteção.

Além disso, devido à intermitência da maioria das fontes de geração distribuída, como a fotovoltaica e a eólica, há uma variação na impedância das fontes, as quais não são perceptíveis aos relés de proteção. Para solucionar o problema é proposta a utilização de sistemas de proteção adaptativa para mitigação dos impactos das GD, a qual seja capaz de se adaptar as intermitências introduzidas pelas fontes alternativas (SUJO; ASHOK; BANDYOPADHYAY, 2013).

Quanto à atuação indevida de equipamentos, pode-se citar também o desligamento não intencional da GD devido a sua proteção de subtensão. Esse impacto se faz presente quando falhas em redes vizinhas não são extintas de forma rápida o suficiente pela proteção da rede. Para estudar esse impacto, são utilizados modelos do comportamento de inversores, visto que a maioria das GD de pequeno porte são conectadas via conversores, os quais demonstram alto risco, em cenários futuros, de desligamentos não intencionais. Assim, é proposta a mitigação do risco através da reavaliação dos parâmetros dos dispositivos de proteção das redes (JENNETT; BOOTH; COFFELE; ROSCOE, 2015).

c) Impacto da geração distribuída no ilhamento intencional e não intencional

Em (CHAITUSANEY; YOKOYAMA, 2005) é tratado o dimensionamento ideal de GD para a operação em ilhamento intencional, com o objetivo de melhoria dos indicadores de qualidade. Para tanto, a avaliação é realizada observando-se a coordenação entre os religadores e os fusíveis das redes de distribuição. Em seu trabalho os autores defendem que a introdução de GD em redes de distribuição irá alterar as características radiais dos alimentadores de distribuição, de forma a introduzir fluxos de potência bidirecionais nos mesmos. Contudo, a proteção convencional de redes de distribuição é baseada na proteção de sobrecorrente, o que significa que a modificação de suas características radiais com fluxo unidirecional fará com que a configuração da coordenação da proteção das redes não seja mantida e os dispositivos de proteção poderão operar de forma indesejável.

Quanto ao ilhamento não intencional, (KUMPULAINEN; KAUHANIEMI, 2004) aborda o perigo decorrente do religamento fora de fase devido ao ilhamento não intencional das GD. Em seu estudo ele afirma que a ampla utilização da GD é incompatível com a filosofia de proteção convencional das redes de distribuição, pois acarreta novos desafios. Dentre esses, destacam-se o ilhamento não intencional, que afeta tanto a confiabilidade da rede, quanto a segurança e a qualidade do produto; a perda de sensibilidade dos dispositivos de proteção, devido à redução das contribuições de curto-circuito do alimentador por parte da GD; a atuação não intencional dos dispositivos de proteção devido ao fluxo reverso introduzido pela GD; o flickering de unidades de produção, o qual tem a capacidade de causar perdas de produção consideráveis; a mudança dos níveis de curto-circuito das redes devido à introdução das GD; e as sobretenções causadas pelo fluxo reverso introduzido pelas mesmas. O autor ressalta a real possibilidade de compensação de carga devido a níveis consideráveis de penetração e termina por propor métodos desenvolvidos para a proteção anti-ilhamento passivos, ativos ou em abordagens baseadas na telecomunicação. Além disto, propõe a utilização de relés de tensão de linha morta ou de conferência de sincronismo como back-up da proteção anti-ilhamento para prevenir o religamento fora de fase.

Ainda no tema do ilhamento não intencional, a proteção anti-ilhamento é um requisito para a conexão da GD e é utilizada para impedir que sistemas possam ser supridos por uma ou mais GD em condições de isolamento. Usualmente os equipamentos utilizados para detecção e desconexão são relés de sub e sobrefrequência e relés de sub e sobretensão. Contudo, existe a possibilidade de equipamentos de proteção anti-ilhamento não serem acionados, gerando riscos para as equipes de manutenção. Isto pode ocorrer quando as condições ilhamento são propícias a não detecção ao que é chamado de zonas de não detecção dos relés. Esse impacto é considerado uma limitação dos relés baseados em frequência e tensão e devem ser levados em consideração na determinação das proteções anti-ilhamento (VIEIRA; FREITAS; XU; MORELATO, 2008).

Em (LISSANDRON; SGARBOSSA; SANTA; MATTAVELLI; TURRI; CERRETTI, 2015) também é avaliado o impacto do ilhamento não intencional das GD. Em seu trabalho o autor propõe uma abordagem analítica para definir áreas onde há a possibilidade de ilhamento não intencional e verificam experimentalmente via protótipo laboratorial. O estudo é limitado à operação em regime permanente e por isso outros trabalhos devem ser realizados para a investigação dos riscos de ilhamento considerando o comportamento transitório durante contingências.

Já (CHEN; WU; ZHANG; SINGH, 2015) defende que apesar dos desafios da inserção da GD nas redes de distribuição, a mesma pode ser utilizada no contexto do ilhamento intencional de forma a melhorar os indicadores de continuidade. Para tanto, ele apresenta um modelo analítico para avaliação dos índices de confiabilidade das redes de distribuição, utilizando dados históricos de ocorrências.

Em (PEDRINO; YAMADA; LUNARDI; VIEIRA, 2019) é argumentado que apesar dos benefícios oriundos da GD, a conexão dessas em sistemas de distribuição deve ser avaliada com cuidado, para minimizar impactos negativos a qualidade, proteção e operação das redes. Em seu trabalho apresenta técnicas de detecção de ilhamento através de um classificador inteligente baseado em programação genética. Ainda neste campo, (GOMES; VIEIRA; COURY; DELBEM, 2018) apresenta método de detecção de ilhamento de geradores síncronos através de técnica inovadora de mineração de dados (DAMICORE), capaz de identificar padrões e similaridades em bancos de dados. Também no mesmo campo, Em (MERLIN; SANTOS; GRILO; AHDA; VIEIRA; COURY; OLESKOVICZ, 2016) é descrita nova metodologia para detecção de ilhamento através de redes neurais. Estes três últimos trabalhos mostram como o campo dos estudos que tratam o chamado BIG DATA (grande acervo de dados para análise) vem se inserindo no paradigma dos estudos de proteção considerando a GD.

Para os autores, a maioria das distribuidoras possuem regulações quanto ao desligamento imediato das GD em situação de contingência. Caso estes requisitos regulatórios sejam respeitados, pode ser descartada parte considerável dos impactos causados pelas GD. Há trabalhos que indicam que mesmo respeitando estes requisitos pode haver problemas de afundamento de tensão (TRINDADE; NASCIMENTO; VIEIRA, 2013). Contudo, somente a regulação não pode garantir a prática correta da proteção anti-ilhamento. Além disto, mesmo havendo desconexão, não se pode garantir que a desconexão ocorrerá em tempo hábil para que não haja queima indesejável de fusíveis ou falsos trips de elementos de proteção.

d) Impacto da geração distribuída sobre os níveis de curto-circuito

O impacto da GD com relação aos níveis de curto-circuito das redes de distribuição está diretamente correlacionado ao tipo de GD, por ser ou não acoplada eletronicamente, ao seu tamanho e sua localização. Essas afirmações são amplamente suportadas por vários autores, como (GIRGIS; BRAHMA, 2001), (MCDERMOTT; DUGEN, 2002), (Doyle, 2002) e (GOMEZ; MORCOS, 2005), e será abordada também neste estudo, em capítulos

subsequentes. Dentre os impactos relacionados à mudança nos níveis de curto-circuito, podem ser citados, a perda de sensibilidade dos dispositivos de proteção, a perda de coordenação da proteção contra sobrecorrente, a queima indevida de fusíveis, entre outros.

Em (BRAVO; LY, 2015) são avaliadas a contribuição de GD acopladas eletronicamente, aos níveis de curto-circuito das redes de distribuição, mediante a utilização de cenários. Os autores ressaltam ainda a importância da modelagem da GD para melhor compreender os impactos causados pelas mesmas e para tanto, utilizaram dados de testes de curto-circuito realizados em geradores acoplados eletronicamente.

Segundo os autores, a geração fotovoltaica causa impactos nos disjuntores das redes de distribuição, mesmo com a reduzida contribuição dos inversores ao curto-circuito, pois grandes penetrações destes geradores podem fazer com que os disjuntores sofram o impacto de correntes de falta acima de seus limites. Isto ocorre, pois os disjuntores são escolhidos e parametrizados considerando a proteção de circuitos compostos somente por uma única fonte somada a elementos passivos e de acordo com as contribuições dos transformadores encontrados nas subestações. Por outro lado, as GD são fontes adicionais de contribuição para os curtos-circuitos, em paralelo a fonte convencional, e devem ser consideradas nos estudos de proteção, para que medidas mitigatórias sejam tomadas.

Dessa forma (BRAVO; LY, 2015) recomendam medidas mitigatórias para a acomodação de altas penetrações de GD nas redes de Distribuição. A primeira é a atuação da proteção anti-ilhamento das GD para tensões abaixo de 50%, minimizando o impacto das GD sobre os disjuntores em cenários de grande penetração de GD. A segunda medida mitigatória recomendada é a padronização da máxima contribuição das correntes de falta dos geradores acoplados eletronicamente em 1.2 p.u., para redução do impacto sobre os disjuntores. A terceira medida é a padronização das análises das correntes de curto-circuito segundo a norma (IEEE, 2003). A quarta medida proposta é sobrestimar os disjuntores quando repostos ou dimensionados para novos sistemas de distribuição, de forma a acomodar futuras GD.

Por último, os autores defendem a necessidade de modelar com precisão as tecnologias de geração integrada por inversores, como a solar fotovoltaica, eólica e células combustíveis. E para isso, a melhor forma de desenvolver, regular e validar os modelos computacionais, seria mediante a utilização de dados reais de inversores em laboratório e em campo. Desta forma, podem-se entender melhor os impactos potenciais e permitir as concessionárias a definirem melhor suas normas e processos quanto à conexão das GD.

De forma a mitigar tais impactos, (SIRSI; DASARATHAN, 2014) tratam da utilização de limitadores de corrente para a adaptação das proteções dos relés de distância. Eles

defendem a utilização dos limitadores de corrente devido ao efeito da GD sobre a coordenação dos relés de distância do tipo MHO. Em seu trabalho os autores descrevem os impactos relacionados à perda de sensibilidade dos relés de proteção de distância e propõem a utilização de limitadores de corrente resistivos, indutivos ou do tipo FLC, de forma a manter a configuração original das redes de distribuição.

e) Comentários acerca da bibliografia analisada

A literatura evidencia a existência de impactos da contribuição de GD de pequeno porte a proteção de redes de distribuição. Além disto, ela ainda apresenta modelos para avaliação e quantificação destes impactos. Contudo, os estudos neste tema ainda possuem limitações, principalmente quanto aos segmentos de análise, não possuindo uma análise integrada dos segmentos SDMT e SDBT, quanto aos dispositivos de proteção analisados, quanto à real contribuição dos inversores para os defeitos, quanto à arquitetura das redes brasileiras ou quanto ao arcabouço regulatório brasileiro. Assim, este trabalho possui o objetivo de oferecer uma metodologia capaz de avaliar o impacto da penetração massiva da GD, de pequeno porte e dispersa pela rede de distribuição, sobre os elementos de proteção do sistema de distribuição de energia brasileiro, avaliando a influência do tamanho, posição e tipo de GD.

2.2. Arcabouço regulatório brasileiro

Nesta seção é apresentado o arcabouço regulatório brasileiro, no que tange à geração distribuída de pequeno porte e contextualizada sua relevância ao presente trabalho. Assim, serão apresentados os conceitos de microgeração distribuída, minigeração distribuída, definição do mercado de empréstimo de energia, incentivos como os conceitos de empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada e o autoconsumo remoto, entre outros. Os temas são apresentados segundo a resolução normativa 482 (ANEEL, 2012a), a qual iniciou o processo de normatização do acesso de micro e minigeradores ao sistema elétrico brasileiro e resolução normativa 687 (ANEEL, 2015b), a qual revisa a resolução anterior e acrescenta as regras quanto aos novos conceitos como os empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras, a geração compartilhada e autoconsumo remoto.

2.2.1. Definição dos conceitos da geração distribuída no Brasil

a) Resolução Normativa 482

A resolução normativa 482, “estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica e dá outras providências”. Foi publicada no dia 17 de abril de 2012. Dela depreendem-se as normas necessárias para o funcionamento da mini e micro gerações distribuídas no Brasil, determinando direitos e deveres tanto do consumidor que deseja instalar uma fonte de geração distribuída, quanto da concessionária que o fará.

b) Resolução Normativa 687

A resolução normativa 687 foi desenvolvida considerando as contribuições recebidas na Audiência Pública nº 026/2015, realizada entre 7 de maio de 2015 e 22 de junho de 2015, que foram objeto de análise da ANEEL e permitiram o aperfeiçoamento da resolução normativa 482.

c) Microgeração distribuída

Central geradora² com potência instalada menor ou igual a 75 kW, que utiliza como fonte a energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada.

d) Minigeração distribuída

Central geradora com potência instalada superior a 75 kW e inferior a 3 MW, para fonte hidráulica e superior a 75 kW e inferior a 5 MW para fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada.

² Agentes que exploram a atividade de geração de energia elétrica. Incluem autoprodutores, cogeneradores e produtores independentes (ANEEL, 2015a).

e) Autoconsumo remoto

Autoconsumo remoto é definido como consumidor que compensa energia gerada em outra localidade, de mesmo CPF ou CNPJ.

f) Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras

Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras é definido como conjunto de múltiplas unidades consumidoras, dentro de uma mesma propriedade ou de propriedades contíguas, de responsabilidade de um condomínio, de um administrador, ou de um proprietário comum, na qual exista instalação de micro ou minigeração. Pode ser resumido como geração condominial.

g) Geração compartilhada

Geração compartilhada é definida como um grupo de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, que possua mini ou microgeração em local diferente de seu consumo. Pode ser resumido como geração cooperativa.

2.2.2. Sistema de compensação de energia elétrica

Sistema no qual energia ativa é injetada na rede por unidades de mini e microgeração, através de empréstimos gratuitos à distribuidora local, sendo posteriormente, o consumidor-gerador, compensado com o consumo de energia elétrica ativa da própria unidade geradora ou de outra unidade consumidora com a mesma titularidade (mesmo CPF ou CNPJ, junto ao Ministério da Fazenda).

a) Modelos de adesão

Os modelos de adesão são proprietários de empreendimentos de micro ou minigeração, integrantes de empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada e caracterizados por consumo remoto. Por outro lado, é inviabilizada a adesão

ao sistema, por parte de locatários com contrato em valores energéticos. Ademais, consumidores livres e especiais não podem aderir ao sistema.

b) Faturamento

O faturamento dos consumidores detentores de unidades de micro e minigeração, o qual deve considerar a energia consumida, deduzida a energia injetada e os créditos acumulados, por posto tarifário. Os clientes integrantes de empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras caracterizam-se por compensar percentuais de energia gerada concernentes a cada um dos clientes.

Caso a energia injetada em um determinado posto tarifário seja maior que a energia consumida, este excedente pode ser utilizado em outro posto, durante o mesmo ciclo de faturamento. Como definido no capítulo I, instalações de mesma titularidade e de mesma distribuidora podem ser compensadas, podendo o titular escolher a prioridade de compensação, contudo sendo a geradora a prioridade número um.

c) Valor mínimo de contribuição

O consumidor deverá pagar à concessionária, mesmo quando injetar mais energia do que consumir o valor mínimo referente ao custo de disponibilidade da potência instalada (classe B) ou demanda contratada (classe A). O prazo máximo de uso do empréstimo de energia em 60 meses.

d) Limites de acesso

O limite de potência instalada é limitado à potência disponibilizada pela concessionária. Segundo a resolução normativa 404, (ANEEL, 2010) potência disponibilizada é a potência que o sistema elétrico da distribuidora deve dispor para atender aos equipamentos elétricos da unidade consumidora, os quais são a demanda contratada para unidades consumidoras do grupo A e a multiplicação da capacidade nominal de condução de corrente elétrica do dispositivo de proteção geral da unidade consumidora pela tensão nominal, observado o fator específico referente ao número de fases, para unidades consumidoras do grupo B. Estando especificado o conceito de potência disponibilizada, caso o consumidor

deseje instalar unidade de geração com potência instalada superior a sua potência disponibilizada, o mesmo deve solicitar aumento de sua potência disponibilizada.

2.2.3. Procedimentos para conexão das unidades de geração distribuída

As definições para conexão de fontes de micro e minigeração distribuída são apresentadas no PRODIST, mais precisamente no módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição, na seção 3.7 – Acesso de Micro e Minigeração Distribuída (ANEEL, 2016). Nele são definidos os níveis de tensão considerados para a conexão de micro e minicentrais geradoras. As conexões podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1. Níveis de tensão considerados para a conexão de centrais geradoras.

Potência Instalada	Nível de Tensão de Conexão
< 10 kW	Baixa Tensão
10 a 75 kW	Baixa Tensão
76 a 150 kW	Baixa Tensão / Média Tensão
151 kW a 500 kW	Baixa Tensão / Média Tensão
501 kW a 10 MW	Média Tensão / Alta Tensão
11 MW a 30 MW	Média Tensão / Alta Tensão
> 30 MW	Alta Tensão

Fonte: ANEEL, 2016.

Além disto, o documento também define os requisitos mínimos do ponto de vista de conexão da micro e minigeração distribuída, os quais devem ser entregues pelo titular. Os mesmos podem ser vistos na Tabela 2. Nele é definido que o elemento de desconexão deve ser uma chave seccionadora visível e acessível, que a acessada³ possa usar durante a manutenção de seu sistema, para garantir a desconexão da central geradora, exceto para micro e minigeradores que se conectem através de inversores.

³ Conforme o artigo segundo, referente à Resolução normativa 506 (ANEEL, 2012b), acessada é a distribuidora detentora das instalações às quais o acessante conecta suas instalações próprias.

Para o caso de sistemas que se conectam à rede através de inversores, eles devem estar instalados em locais de fácil acesso, e as proteções necessárias podem estar inseridas no dispositivo, sem necessidade de redundância de proteções para os microgeradores. Ademais, para o caso de utilização de inversores, o acessante⁴ deve apresentar certificados nacionais ou internacionais, ou declaração do fabricante, que os equipamentos foram ensaiados conforme as normas técnicas brasileiras ou internacionais, ou o número de registro da concessão do Inmetro para o modelo e a tensão nominal de conexão constantes na solicitação de acesso, de forma a atender aos requisitos de segurança e qualidade.

O elemento de interrupção deve ser automático e acionado por proteção, para microgeradores e por comando e/ou proteção para minigeradores. O transformador de acoplamento, necessário para unidades com potência instalada entre 75 kW e 5 MW, deve ser um transformador de interface entre a unidade consumidora e a rede de distribuição. Nos casos de conexões acima de 300 kW, caso o transformador de acoplamento não possua aterramento do lado da acessada, deve-se usar uma proteção de sub e de sobretensão nos secundários de um conjunto de transformador de potência em delta aberto.

As proteções de sub e sobretensão e sub e sobrefrequência para centrais geradoras até 500 kW de potência instalada não necessitam de relé de proteção específicos, contudo, devem existir sistemas eletromecânicos que detectem tais anomalias e produzam saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção. A proteção de sincronismo, necessários a todas as unidades, assim como as proteções supracitadas, não necessita de relé específico, mas sim de sistemas eletromecânicos que detectem tais anomalias e produzam saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção, e de maneira que somente ocorra a conexão após o sincronismo ser atingido.

No caso de operação em ilhamento, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão das instalações elétricas internas à unidade, incluindo a carga e a geração, sendo vedada a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento. No caso dos medidores bidirecionais, eles devem no mínimo diferenciar a energia elétrica ativa consumida da energia elétrica ativa injetada na rede pelo microgerador.

⁴ Conforme o mesmo artigo segundo, acessante é a unidade consumidora relativa a consumidor livre ou especial, central geradora, importador, exportador ou distribuidora que conecta suas instalações próprias a instalações de propriedade de distribuidora.

Por fim, a acessada pode propor proteções adicionais, desde que justificadas tecnicamente em função de características específicas do sistema de distribuição acessado, sem custos para microgeração distribuída.

Tabela 2. Requisitos mínimos em função da potência instalada.

EQUIPAMENTO	POTÊNCIA INSTALADA		
	$P \leq 75 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} > P > 75 \text{ kW}$	$5 \text{ MW} > P > 500 \text{ kW}$
Elemento de desconexão	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Sim	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim
Relé de sincronismo	Sim	Sim	Sim
Anti-ilhamento	Sim	Sim	Sim
Medição	Sistema de Medição Bidirecional	Medidor 4 Quadrantes	Medidor 4 Quadrantes

Fonte: ANEEL, 2016.

Após a leitura da resolução normativa 482, podemos observar a importância de um bom planejamento das redes de distribuição por parte das concessionárias de energia elétrica. Chegamos a esta conclusão, pois cabe a estas empresas o fornecimento de toda a infraestrutura necessária para a conexão das unidades de mini e micro GD, bem como a

manutenção e operação das redes, para que possam suportar estas tecnologias, sobrando ao consumidor, o papel de comprar e instalar equipamentos que sigam as normas de estipuladas.

2.3. Inovação

A GD pode introduzir novas possibilidades para as redes de distribuição elétrica tornando as atividades de planejamento e operação mais desafiadoras. Entre essas possibilidades, a GD permite aos consumidores comerciais desfrutar de um amplo conjunto de combinações de Confiabilidade versus Preço. Portanto, a GD pode aparecer como uma rede de distribuição elétrica autônoma, que atenda aos requisitos do consumidor, como, por exemplo, a compensação de reativos, a compensação harmônica, o corte de demanda de pico e a correção do fator de potência, além de fornecer meios de geração de reserva e melhoria da confiabilidade (DEL MONACO, 2001).

No entanto, as redes de distribuição existentes não foram planejadas para acomodar essas novas tecnologias. Assim, a conexão da GD ao sistema elétrico pode violar as práticas operacionais e de planejamento existentes. Nesse sentido, deve notar-se que a integração da GD, bem como de outros dispositivos de armazenamento, nas redes de distribuição, pode alterar a prática existente de planejamento com um fluxo de energia unidirecional, o que pode afetar consideravelmente a coordenação dos sistemas de proteção das distribuidoras (BARKER, 2002), (MOZINA, 2006), (NAGPAL, M.; PLUMPTRE, F.; FULTON, R.; MARTINICH, 2006).

No contexto do impacto da GD sobre o sistema de proteção, podem surgir diversos problemas, como por exemplo, ilhamento não intencional, sobretensão, perda de sensibilidade, bidirecionalidade, e queima inesperada de fusíveis, os quais são identificados e documentados (BARKER, 2002), (MOZINA, 2006), (NAGPAL, M.; PLUMPTRE, F.; FULTON, R.; MARTINICH, 2006). No entanto, questões críticas, como o limite de inserção da GD, considerando a influência da localização, a capacidade e a tecnologia permanecem sem resposta.

A criticidade dessa questão decorre da enorme infraestrutura das distribuidoras, o que contribui para tornar qualquer mudança em grande escala impraticável para promover a acomodação da GD. Assim, o desenvolvimento de um procedimento genérico para determinar o impacto nas práticas de distribuição de energia, bem como para avaliar os limites de inserção em termos de localização, capacidade e tecnologia da GD torna-se preponderante.

Isso ajudará a facilitar a integração segura das unidades de GD nas redes existentes, através do melhor entendimento dos requisitos e melhorias necessárias para atingir esse objetivo. O resultado direto desse desenvolvimento é a expectativa de economia financeira para as distribuidoras ao capturar os principais aspectos da integração da GD em redes existentes.

As metodologias típicas utilizadas para analisar o impacto da GD que serão apresentadas inicialmente neste trabalho servem para orientar a avaliação dos possíveis impactos no sistema de proteção. Comumente, essas metodologias são baseadas em uma análise determinística, avaliando o impacto de algumas grandes unidades geradoras, geralmente com potência nominal de mais de 1 MW como observado em (DOYLE, 2002), (BRAHMA; GIRGIS, 2004), (KUMPULAINEN; KAUHANIEMI, 2004), (CHAITUSANEY; YOKOYAMA, 2005b), (OCHOA; PADILHA-FELTRIN; HARRISON, 2006). Desta forma, a inovação apresentada neste trabalho baseia-se no uso de uma metodologia probabilística para avaliação de cenários de inserção de pequenas unidades de GD em redes de média e baixa tensão e a análise de possíveis impactos nos sistemas de proteção de redes de média tensão.

No trabalho, a abordagem se difere das demais ao mostrar que as mesmas técnicas de análise podem ser utilizadas para avaliar os impactos da penetração maciça de pequenas unidades de geração distribuídas espalhadas pela rede. Assim, a inovação baseia-se na abordagem probabilística dada ao problema, já que no planejamento das redes de distribuição torna-se interessante ter uma metodologia capaz de simular diferentes cenários de penetração de pequenas unidades de GD, geralmente com potência nominal entre 1 kW e 1 MW.

3 IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOBRE SISTEMAS DE PROTEÇÃO

A alternativa de GD é vista como uma mudança no paradigma da geração de energia no mundo. A adoção de fontes renováveis de energia para produção residencial ou comercial traz não apenas benefícios ambientais, mas também uma oportunidade para aliviar as dificuldades de abastecimento encontradas em muitos países. Contudo, apesar de solucionar problemas de suprimento, esta mudança de paradigma causada pela inserção da GD pode trazer impactos técnicos indesejados.

Os impactos técnicos avaliados comumente no planejamento das redes de distribuição elétrica envolvem a expansão da rede. Dentre os impactos técnicos típicos podem-se citar perdas, fator de potência, carregamento de linhas, carregamento de transformadores e problemas de subtenção. No entanto, uma inserção massiva da GD também pode causar impactos técnicos significativos à proteção das redes de distribuição, envolvendo assim o planejamento da proteção. Desta forma, é necessário identificar potenciais problemas de proteção e desenvolver formas de modelar, diagnosticar e mitigar esses impactos.

Tendo em vista o problema supracitado, este capítulo pretende descrever a importância da previsão dos impactos potenciais da penetração massiva de fontes renováveis no sistema de proteção das redes de distribuição a fim de alcançar um planejamento de rede integrado. No início deste capítulo são discutidos os principais problemas do sistema de proteção que podem surgir a partir da penetração massiva da geração distribuída, como perda de coordenação da proteção, sobretensão, perda de sensibilidade, bidirecionalidade, queima inesperada de fusíveis, entre outras. O capítulo demonstra também os possíveis modelos utilizados para avaliar esses impactos, como a modelagem de rede e modelagem de fontes renováveis, possíveis abordagens ao problema da proteção, como as perspectivas probabilísticas e deterministas, em relação aos algoritmos de alocação de GD e as possíveis metodologias de avaliação, como cenarização e análise de sensibilidade.

3.1. Geração distribuída e os sistemas de proteção

Para determinar os limites de penetração da GD, capazes de causar impactos ao sistema de proteção, devem-se definir inicialmente quais são estes impactos. Assim, eles são discutidos nesta seção. Estes são a perda de coordenação da proteção, bidirecionalidade, queima inesperada de fusíveis, perda de sensibilidade e sobretensão.

Esta seção também apresenta métodos genéricos para avaliar os impactos da GD na proteção de redes de distribuição elétrica. A fim de orientar a avaliação de impacto, cada problema de proteção é discutido individualmente, possibilitando a determinação dos limites de inserção que desencadeiam os problemas abordados.

3.1.1. Perda de coordenação da proteção

Em operação normal, os dispositivos de proteção são coordenados para que o esquema de proteção primário seja acionado antes do esquema de retaguarda. Contudo, a interligação da GD eleva os níveis de curto-circuito. Desta forma, dependendo dos parâmetros de coordenação iniciais, juntamente com a localização, tamanho e tipo de GD, é possível chegar a uma situação em que a coordenação da proteção não possa mais ser alcançada. Nestes casos, o dispositivo de proteção de retaguarda atua antes da proteção primária, resultando em operação inadequada para parte das cargas da rede. Os principais dispositivos de proteção utilizados na coordenação da proteção são fusíveis, religadores e relés. A seguir, de forma a ilustrar a perda de coordenação, são demonstrados os efeitos da GD na coordenação entre fusíveis.

Figura 8. Diagrama esquemático de uma coordenação fusível-fusível tradicional sem GD.

Fonte: Elaboração própria.

Um fusível possui duas características que definem seu comportamento, que são o TM e TT. O TM determina o tempo desde o início de uma sobrecorrente até o arco instantâneo se inicie dentro de um fusível. O TT é o tempo de abertura total de um fusível, desde a ocorrência de uma sobrecorrente até o fusível extinga o fluxo de corrente. Isto é, a soma do tempo de fusão e de arco. Para ilustrar esse comportamento, a Figura 8 traz um exemplo de circuito onde há a coordenação de dois fusíveis.

Para que os fusíveis estejam coordenados para qualquer falta a jusante do fusível 2, ele deve atuar antes do fusível 1. Isso seria alcançado se curva TT do fusível 2 estiver abaixo da curva TM do fusível 1 por uma margem segura para qualquer falha.

O impacto do GD na proteção deriva da mudança nos valores das correntes de curto-circuito que fluem no sistema para qualquer falha. Esta mudança pode ocasionar até mesmo um fluxo reverso durante a falta, resultando em outros possíveis problemas, como bidirecionalidade e a queima inesperada de fusíveis, que serão abordados nas seções a seguir.

Voltando ao problema da coordenação, os valores de corrente de falta mínima e máxima podem ser elevados, devido à presença da GD a montante do fusível 2. Neste caso, a proteção de retaguarda acaba abrindo, em vez da proteção principal. Para ilustrar esse comportamento, é mostrado na Figura 9, como a coordenação entre fusíveis pode ser afetada, em um sistema de distribuição radial com a presença de GD (GIRGIS; BRAHMA, 2001).

Figura 9. Diagrama esquemático de uma coordenação fusível-fusível tradicional com GD.

Para que os fusíveis estejam coordenados, para qualquer falha a jusante do fusível 2, o fusível 2 deve funcionar antes do fusível 1. Assim, dependendo da configuração do sistema, pode-se ocorrer perda de coordenação entre qualquer par de dispositivos de proteção, seja entre fusíveis, entre religadores, entre fusível e religador, assim por diante. Em cada caso, a corrente mínima de curto-circuito que causa a perda de coordenação ajuda a identificar o nível máximo de penetração permitido para a instalação das GD.

3.1.2. Bidirecionalidade

A instalação da GD em redes de distribuição elétrica pode levar à bidirecionalidade de atuação dos dispositivos de proteção. Este problema ocorre quando há atuação indesejada de um dispositivo de proteção, acarretando a desconexão de uma parte "saudável" do sistema que é desnecessariamente interrompida. A bidirecionalidade é facilmente observada em sistemas em malha supridos por uma mesma fonte e torna-se também relevante em sistemas radiais, uma vez que permite que uma falta seja suprida por uma GD instalada em redes adjacentes.

Para ilustrar tal situação, considere dois alimentadores radiais e paralelos, alimentadas a partir de uma mesma fonte (mesmo transformador de subestação SDAT / SDMT). Sem a presença da GD, caso um curto-circuito ocorrer em um dos dois alimentadores, o curto-circuito será completamente alimentado pelo transformador da subestação e o outro alimentador não contribuirá para a corrente de curto-circuito, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10. Corrente de curto-circuito através de alimentador adjacente sem GD.

Fonte: Elaboração própria.

Neste exemplo a corrente que passa no relé do disjuntor D2 não será invertida e seu relé não atuará em resposta a um curto-circuito no alimentador A1.

Alternativamente, caso uma GD seja instalada no alimentador "saudável" A2, a contribuição de A2 para a corrente de curto-circuito, para uma falta no alimentador A1 não será nula. Isso é ilustrado na Queima inesperada de fusíveis

Figura 11. Corrente de curto-circuito através de alimentador adjacente com GD.

Fonte: Elaboração própria.

Nesse caso, se o relé de proteção do disjuntor D2 estiver parametrizado com uma curva de disparo de proteção mais rápida que o relé de proteção do disjuntor D1, o disjuntor D2 pode atuar mais rápido ao curto-circuito no alimentador A1, interrompendo desnecessariamente o alimentador A2.

Além disso, é possível que o problema de bidirecionalidade também ocorra na presença de religadores. Para ilustrar isso, considere dois alimentadores supridos pela mesma fonte, como mostrado na Figura 12.

Figura 12. Corrente de curto-circuito através de alimentador adjacente com GD, considerando efeitos sobre os religadores.

Fonte: Elaboração própria.

Ambos alimentadores possuem disjuntores e religadores, de forma a evitar que falhas temporárias queimem fusíveis em ramais adjacentes. Caso não haja uma GD no alimentador A2, tanto o relé do disjuntor D2 como o religador RA2 não atuarão devido a uma falha no alimentador A1. No entanto, caso haja a instalação de uma GD no alimentador A2, ela contribuirá para a corrente de curto-circuito em uma falha no alimentador A1. Esta contribuição pode ser percebida pelo religador RA2, que pode atuar rapidamente devido a correntes de curto-circuito acima de seus níveis de *pick-up*. Assim, o religador RA2 pode operar antes do religador RA1, causando uma interrupção desnecessária de uma porção "saudável" do sistema.

3.1.3. Queima inesperada de fusíveis

As estratégias de salvamento de fusíveis geralmente são aplicadas por concessionárias para evitar a queima de fusíveis devido a falhas temporárias. Para este fim, os religadores automáticos desenergizam e reenergizam a linha, a fim de impedir a queima de fusíveis. Esta estratégia é amplamente adotada em redes de distribuição com características suburbanas ou rurais. Muitas falhas são temporárias por natureza, então o papel do religador é tentar eliminar

as falhas temporárias sem a necessidade de uma interrupção permanente, além de salvar fusíveis, evitando o uso desnecessário de fusíveis.

No entanto, a instalação de GD em redes de distribuição pode afetar a coordenação entre o religador e os fusíveis, devido à contribuição adicional da GD para a corrente de curto-circuito. Nesses casos, a coordenação entre o religador e os fusíveis pode ser perdida e os fusíveis podem queimar antes da operação do religador. Ou ambos os fusíveis podem queimar e o religador pode operar ao mesmo tempo, adicionando mais dificuldade à localização da falha.

Para ilustrar tal situação, considere dois circuitos. O primeiro circuito é uma rede radial suprida por uma única fonte. O segundo circuito é a mesma rede, entretanto a mesma é suprida tanto pela fonte quanto por uma GD, como ilustrado nas Figura 13 e Figura 14.

Figura 13. Contribuição à falta a montante do fusível F2 sem GD.

Fonte: Elaboração própria.

Figura 14. Contribuição à falta a montante do fusível F2 com GD.

Fonte: Elaboração própria.

Sem a GD, uma falta a montante do fusível 2 é suprida apenas pela fonte da rede e não é necessária uma coordenação entre o religador R1 e o fusível F2, uma vez que não há corrente que passa pelo fusível F2. Na segunda situação, a contribuição do curto-circuito vem tanto da fonte como da GD. Isso pode causar uma perda de coordenação entre o religador R1 e o fusível F2 e fazer com que F2 funda sem necessidade.

3.1.4. Perda de sensibilidade

A adição de uma GD em um sistema de distribuição pode reduzir a contribuição da corrente de curto-circuito da fonte principal da rede. Isso afeta a operação de dispositivos de proteção de rede, como disjuntores, religadores e fusíveis, perturbando sua capacidade de "detectar" a corrente de falta. Este aspecto é bastante dependente do tipo, tamanho e localização da GD.

Para ilustrar o impacto da instalação GD na sensibilidade dos dispositivos de proteção, considere um sistema radial genérico, como mostrado nas Figura 15, Figura 16 e Figura 17. Um sistema radial genérico sem a instalação de qualquer GD é mostrado na Figura 15. Nesta rede, em condições de curto-circuito, a corrente de curto-circuito é completamente fornecida

pela subestação do utilitário. Neste caso, o relé de proteção de rede deve ser configurado para responder ao valor de corrente de curto-circuito mais baixo.

Figura 15. Falta suprida apenas pela fonte principal.

Fonte: Elaboração própria.

É mostrado na Figura 16 o mesmo circuito com uma GD instalada. Para uma falha a jusante da GD, a corrente de curto-circuito é fornecida tanto pela subestação como pela GD. A contribuição de cada fonte dependerá das impedâncias entre a fonte e o ponto de falha.

Figura 16. Falta suprida tanto pela fonte principal, quanto pela GD localizada a montante da falha.

Fonte: Elaboração própria.

Para uma falha localizada entre a subestação e a GD, como mostrado na Figura 17, a contribuição da subestação para a corrente de curto-circuito é independente da GD. O efeito extremo da GD é diminuir a sensibilidade da rede para um limite onde não "detecta" a falha.

Figura 17. Falta suprida tanto pela fonte principal, quanto pela GD localizada a jusante da falta.

Fonte: Elaboração própria.

3.1.5. Sobretensão

Os principais problemas relacionados à sobretensão associados à GD incluem, segundo (BARKER, 2002) e (IEEE, 2006):

- Sobretensão temporária devido a condições de curto-circuito fase terra, causadas pelo aterramento incorreto da GD ou do transformador de acoplamento.
- Sobretensão originada na concessionária e adjacências, que afeta o esquema de geração distribuída.
- Sobretensões ressonantes que podem surgir durante condições de ilhamento.
- Surtos que podem surgir devido à alta injeção de energia por recursos distribuídos.

Sobretensões temporárias devido às faltas para a terra, ocasionadas por condições inapropriadas de aterramento do GD ou do transformador de interface, são abordadas nessa seção. O dimensionamento correto dos para-raios pode prevenir danos à instalação do GD ocasionados pelos surtos de tensão elevada originados no ambiente adjacente.

As sobretensões ressonantes podem surgir por causa da interação entre a combinação da indutância do transformador de interface e com a do GD e a capacitância do sistema. Trata-se de um problema operacional complexo, o qual deve ser abordado em um contexto diferente, utilizando-se programas de simulação dinâmica detalhados, tal como EMTDC ou EMTP. De maneira similar, sobretensões originadas devido a uma elevada injeção de potência pelo GD também se trata de um problema operacional complexo, o qual deve ser abordado em um contexto diferente. Na Tabela 3 são apresentadas cinco conexões típicas de

transformadores, largamente empregadas para a interconexão de GD aos sistemas das concessionárias.

Tabela 3. Transformadores de acoplamento para GD.

SDMT – Lado da Concessionária	SDBT – Lado da GD
Delta	Delta
Delta	Estrela aterrado
Estrela	Delta
Estrela aterrado	Delta
Estrela aterrado	Estrela aterrado

Fonte: Elaboração própria.

Para as primeiras três conexões, as principais vantagens são:

- Não existem impactos na coordenação do relé de neutro da concessionária;
- Qualquer falta para a terra no lado do GD não será percebida pelo sistema de proteção da concessionária, i.e., a coordenação envolvendo defeitos para a terra não será afetada.

Entretanto, a principal preocupação das conexões de transformadores de acoplamento com o lado não aterrado da concessionária é que, depois da atuação do disjuntor do alimentador da concessionária devido a uma falta permanente, o sistema será alimentado por uma fonte não aterrada. Isso submete as fases sãs a sobretensões que irão aproximar-se do nível de tensão da linha do sistema.

Em relação ao quarto tipo de conexão, estrela aterrado (SDMT) / Delta (SDBT), para uma falha à terra no lado da GD, a concessionária não contribui para a corrente de sequência zero. Isso evita que a proteção da concessionária atue sem necessidade. No entanto, a desvantagem deste tipo de conexão é que ele atua como uma fonte de corrente de sequência zero, estabelecendo assim uma corrente de sequência zero para falhas envolvendo a terra no sistema de distribuição. Isso pode afetar significativamente a coordenação do relé responsável pela proteção neutra da concessionária.

Além disso, a circulação de corrente de sequência zero no primário do transformador de interconexão (lado da concessionária) provocará a circulação de uma elevada corrente no secundário (lado do GD), podendo acarretar problemas de aquecimento no transformador.

Uma solução comumente utilizada para contornar esse problema é a instalação de impedâncias de aterramento no neutro do lado primário, de modo a limitar o fluxo excessivo de corrente. Nesses casos, a impedância de aterramento deve ser suficientemente alta, para limitar a circulação de corrente, mas suficientemente baixa para garantir a efetividade do aterramento do GD.

Outro aspecto se refere à presença de cargas desequilibradas no circuito de distribuição. Normalmente, as correntes dessas cargas retornam para a terra através do aterramento do neutro do transformador da concessionária, localizado na subestação. Com a inserção de um transformador de interconexão com esse tipo de ligação, a corrente devido a esse desequilíbrio será dividida entre o transformador da concessionária e o transformador de interconexão do GD. Durante condições drásticas de desequilíbrio, tais como a queima de fusíveis em ramais do alimentador, a capacidade de carregamento do transformador de interconexão pode ser reduzida. O uso de uma ligação estrela-aterrada no lado da concessionária e de uma ligação delta no lado do GD tem a vantagem de limitar sobretensões que podem ser originadas quando o disjuntor da concessionária abre, consequentemente, impedindo que para-raios e cargas sejam danificados.

O quinto tipo de ligação para o transformador de interconexão, estrela aterrado (SDMT) / estrela aterrado (SDBT), têm como vantagem o fato de que sobretensões não serão originadas quando o disjuntor da concessionária abre (considerando o neutro solidamente aterrado). No entanto, a maior desvantagem deve-se ao fato desse tipo de ligação funcionar como uma fonte indesejável de corrente de sequência zero, similar àquela descrita para o tipo de ligação anterior.

3.2. Modelos elétricos

O objetivo deste capítulo é, além de demonstrar os possíveis impactos da GD na proteção das redes de distribuição, oferecer alternativas para a análise de tais impactos. Com esse objetivo, são utilizadas ferramentas de fluxo de potência e curto-circuito. Para utilizar tais ferramentas, faz-se necessária a modelagem elétrica das redes de distribuição, bem como dos prosumidores. Por simplicidade as avaliações levaram em consideração apenas a porção trifásica de sistemas de distribuição. Assim, esta seção apresenta os modelos utilizados nas avaliações.

3.2.1. Modelo elétrico da geração distribuída

A metodologia considera o uso de ferramentas tradicionais para análise de redes de distribuição elétrica, como o fluxo de potência e a simulação de curto-circuito. Sabe-se que a contribuição dos inversores durante falhas não é zero e varia de acordo com o projeto do inversor. Para a maioria das condições de falta, vários inversores continuam fornecendo corrente para a rede, por um período que varia de 4ms a 180ms. Para a maioria dos modelos de inversor, a corrente fornecida pelo inversor durante a falta pode variar de 100% a 200% da corrente nominal do inversor (TURCOTTE; KATIRAEI, 2009), (KATIRAEI; RAJDA, 2012). Assim, o modelo de GD para uma fonte acoplada por inversores, deve considerar, em uma análise conservadora, uma contribuição de curto-circuito em torno de 2 vezes sua relação de corrente nominal, enquanto a proporção considerada para máquinas rotativas é em torno de 10 vezes sua corrente nominal conforme definido em (TURCOTTE; KATIRAEI, 2009).

O modelo elétrico, baseado em componentes simétricas, para avaliação de curto-circuito usado para representar a GD acoplada por inversores não considera contribuição de sequência negativa ou zero como visto em (MULJADI; SINGH; BRAVO; GEVORGIAN, 2013). O modelo elétrico usado para representar as máquinas rotativas considera sua conexão, como por exemplo, delta ou estrela. Os modelos elétricos para máquinas rotativas, separados por enrolamento, podem ser vistos na Tabela 4. O modelo elétrico para o gerador baseado em inversor é detalhado na Tabela 5.

Tabela 4. Modelo de máquina rotativa utilizado para a avaliação do impacto da GD.

Ligação	Sequência zero	Sequência positiva	Sequência negativa
$Y_{\downarrow}$			
Y			
Δ			

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5. Modelo conectado por inversores utilizado para a avaliação do impacto da GD.

Fonte: Elaboração própria.

3.2.2. Modelo elétrico da rede

As ferramentas de cálculo elétrico dependem da modelagem elétrica dos equipamentos de rede, como linhas de média e baixa tensão, transformadores de distribuição de média e baixa tensão, dispositivos de proteção e consumidores, conforme representado em (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

As redes de média e baixa tensão são modeladas com base na teoria dos componentes simétricas e no modelo de circuito PI, como ilustrado na Tabela 6. Os transformadores de média e baixa tensão são modelados com base na teoria das componentes simétricas, como ilustrado na Tabela 7.

Tabela 6. Modelo de rede utilizado para a avaliação do impacto da GD.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7. Transformadores de acoplamento para GD.

Ligação	Sequência zero	Sequência positiva	Sequência negativa
$Y_{\downarrow} Y$
$Y_{\downarrow} Y_{\downarrow}$
$Y_{\downarrow} \Delta$
$Y \Delta$
$\Delta \Delta$

Fonte: Elaboração própria.

Os clientes do modelo de rede de distribuição são baseados em curvas de carga. As curvas de carga são calculadas com base no comportamento de carga típico dos clientes e seu consumo de energia mensal como visto em (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005). A Figura 18 ilustra uma curva característica residencial.

Figura 18. Exemplo de curva típica de carga de um consumidor residencial.

Fonte: Elaboração própria.

3.3. Procedimentos para avaliação do impacto da GD

As metodologias para avaliação dos impactos da GD na proteção das redes de distribuição baseiam-se no risco de não se considerar a contribuição da GD durante contingências. Para avaliar esse risco, é necessário avaliar cada um dos impactos previamente introduzidos, com e sem a presença da GD. Assim, as próximas seções apresentarão procedimentos genéricos para avaliação dos limites de penetração da GD para cada uma das questões de proteção levantadas.

3.3.1. Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para perda de coordenação

O objetivo desta seção é desenvolver um procedimento genérico para orientar a determinação dos limites de penetração das GD em termos de tamanho, localização e

tecnologia do ponto de vista da perda de coordenação. O procedimento consiste em cinco etapas como pode ser visto a seguir.

1. Em um determinado sistema, defina diferentes caminhos de coordenação. Um caminho de coordenação pode ser definido como o conjunto de dispositivos de proteção localizados ao longo do caminho do circuito que parte do disjuntor principal do alimentador até o dispositivo localizado mais a jusante. Como a maior parte dos fusíveis laterais (ou sub-laterais) são selecionados de forma a serem semelhantes (de modo facilitar a manutenção), um número de caminhos de coordenação é limitado.
2. Faça o estudo de coordenação e a construção dos diagramas de coordenação para os diferentes caminhos de coordenação determinados para o sistema em estudo.
3. Determine o menor valor de corrente de curto-circuito para o qual a perda de coordenação pode ocorrer entre todos os caminhos de coordenação. Esse valor de corrente é obtido a partir da intersecção das curvas de coordenação de dois dispositivos de proteção sucessivos. Deve ser observado que tal valor de corrente pode não existir caso não exista intersecção entre as curvas de coordenação. Nesses casos, não existirá limite para a instalação de GD capaz de promover a violação da coordenação do sistema.
4. Defina os pontos candidatos onde GD podem ser instalados tanto nas redes de média tensão, quanto nas redes de baixa tensão. Os limites de penetração deverão ser calculados para esses pontos em específico. Os pontos candidatos podem ser obtidos por meio de estudos de planejamento, cujo objetivo seria a alocação ótima de GD para promover a minimização das perdas e melhorar o perfil de tensão, ou podem ser determinados pelos consumidores, ou ainda podem ser determinados de forma aleatória, de forma a possibilitar o risco de instalação das GD.
5. Simule a instalação da GD no primeiro ponto candidato, aumentando o tamanho da GD e do seu transformador de conexão passo-a-passo até obter o menor valor de corrente de curto-circuito que promova a perda de coordenação. Em seguida, registre o tamanho do GD responsável pela perda de coordenação. Deve-se observar que se aumentando o tamanho do GD e do seu transformador de conexão, inerentemente, aumenta-se a capacidade MVA de curto-circuito do conjunto GD-transformador. É necessário repetir esse passo para cada ponto de instalação candidato. Para compreender a influência de diferentes tecnologias de GD, é

necessário repetir este passo para cada tecnologia, como por exemplo, gerador síncrono, gerador por indução e inversores.

3.3.2. Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para bidirecionalidade

O objetivo desta seção é desenvolver um procedimento genérico para orientar a determinação dos limites da inserção da GD em termos de tamanho, localização e tecnologia, do ponto de vista da bidirecionalidade dos dispositivos de proteção. O procedimento é muito semelhante ao desenvolvido para a coordenação e pode ser resumido da seguinte forma.

1. Defina os diferentes caminhos de coordenação no sistema em estudo.
2. Faça o estudo de coordenação e a construção dos diagramas de coordenação para os diferentes caminhos de coordenação determinados para o sistema em estudo, sem considerar a presença do GD.
3. Defina os pontos candidatos onde GD podem ser instalados.
4. Simule a instalação do GD nos pontos candidatos, aumentando o nível de penetração da GD até obter o maior valor de corrente de curto-circuito que promova a ocorrência do problema da bidirecionalidade. Caso necessário, deve-se repetir este passo para cada ponto candidato. Para o cálculo da corrente de curto-circuito máxima, deve-se aplicar o curto-circuito a montante do equipamento de proteção avaliado.

3.3.3. Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para queima inesperada de fusíveis

O objetivo desta seção é desenvolver um procedimento genérico para orientar a determinação dos limites de inserção da GD, do ponto de vista da queima inesperada de fusíveis. O procedimento pode ser resumido da seguinte forma.

1. Defina os diferentes caminhos de coordenação no sistema em estudo.
2. Execute o estudo de proteção e construa os diagramas de coordenação para os caminhos de coordenação sem considerar a instalação de GD.
3. Observe o nível de curto-circuito para o qual a queima inesperada de fusível possa ocorrer. Esse valor de corrente é obtido observando-se a intersecção entre a curva rápida do religador e a curva de extinção de arco do fusível.

4. Defina os pontos candidatos para a instalação do GD.
5. Simule a instalação do GD no primeiro ponto candidato e, em seguida, aumente o tamanho do GD passo-a-passo até que a corrente atinja o valor para a queima inesperada do fusível. Caso necessário, repita o procedimento para cada ponto candidato e tecnologia. Para o cálculo da corrente de curto-circuito máxima, deve-se aplicar o curto-circuito a montante do equipamento de proteção avaliado.

3.3.4. Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para perda de sensibilidade

O objetivo desta seção é desenvolver um procedimento genérico para orientar a determinação dos limites de inserção da GD do ponto de vista da perda de sensibilidade. O procedimento pode ser resumido da seguinte forma.

1. No sistema em estudo, determine o ponto com menor corrente de curto-circuito que é protegido pelo disjuntor/religador principal do alimentador. Para tanto devem ser calculadas as correntes de curto-circuito em todos os pontos de transição entre zonas de proteção e finais de ramais dentro da zona de proteção do equipamento de proteção.
2. Determine as correntes de *pick-up* (trifásica e fase-terra) para os dispositivos de proteção do alimentador.
3. Defina os pontos candidatos onde GD podem ser instalados. Os limites de penetração deverão ser calculados para esses pontos em específico. Os pontos candidatos podem ser obtidos por meio de estudos de planejamento, cujo objetivo seria a alocação ótima de GD, ou podem ser determinados pelos consumidores, ou ainda podem ser alocados de forma aleatória, de forma a calcular o risco da instalação da GD.
4. Simule a instalação do GD no primeiro ponto candidato e estabeleça as condições de defeito para o ponto definido no Passo 1. Em seguida, aumente nível de penetração da GD, observando a contribuição da subestação para a corrente de curto-circuito até que essa atinja o nível de sensibilização (valor de *pick-up*). A impedância do GD, bem como do transformador de conexão pode ser estimado de acordo com procedimentos de (BRAHMA; GIRGIS, 2004). Caso necessário, deve-se repetir este passo para cada ponto candidato. Para compreender a influência da

tecnologia de geração, é necessário repetir este passo para outras tecnologias, como geradores síncronos, a indução e acoplados por inversores.

3.3.5. Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para sobretensão

Como pode ser visto a partir da discussão apresentada na seção 3.1.5, não aterrar o transformador de acoplamento da GD expõe a rede e os consumidores conectados a ele a níveis perigosos de sobretensão temporária. Por outro lado, o aterramento sólido pode limitar a sensibilidade da proteção a níveis inaceitáveis durante falhas à terra. O aumento da impedância de aterramento deve atender esses dois aspectos simultaneamente. Ou seja, aumentar a impedância de aterramento pode ser feito de tal forma que o valor dimensionado permita que os níveis de sobretensão sejam aceitáveis com uma pequena redução de sensibilidade (cerca de 5%) para a menor corrente de falta.

Um procedimento genérico para orientar a determinação dos limites de inserção da GD do ponto de vista das sobretensões temporárias pode ser resumido conforme segue.

1. Defina os pontos candidatos onde a GD pode ser instalada, incluindo os detalhes para o transformador de interconexão e para aterramento.
2. Para os transformadores de acoplamento não aterrados, o segundo passo é definir o esquema de proteção da GD, que deve garantir que a GD seja desconectada do sistema antes da abertura do disjuntor, para cada ponto candidato.
3. Para conexões aterradas, o segundo passo é simular o curto-circuito fase-terra e calcular a variação percentual na sensibilidade à falta a terra. Se a mudança de sensibilidade for superior a 5%, deve-se inserir um reator de aterramento na ligação à terra do transformador de acoplamento.
4. Para conexões aterradas, o terceiro passo é calcular a sobretensão devido à inserção do reator de aterramento e verificar se está dentro da faixa aceitável (por exemplo, 25% maior do que a tensão nominal). Em seguida, repita o segundo passo até que o nível de sensibilidade e sobretensão seja aceitável, para cada ponto candidato.

3.4. Abordagens para definição dos níveis de penetração

As metodologias apresentadas levam em consideração o conceito de elevação dos níveis de penetração. Nas abordagens apresentadas nesta seção, a elevação dos níveis de penetração pode ser traduzida na elevação da potência dos geradores ou na alocação de mais geradores nas redes de distribuição. Isso é realizado para que os limites de penetração, prejudiciais ao sistema de proteção, sejam alcançados. As seções a seguir demonstrarão mecanismos para elevar esses níveis de penetração tanto do ponto de vista determinístico como probabilístico.

3.4.1. Abordagem determinística para a alocação da geração distribuída

Na abordagem determinística de alocação de GD, a elevação dos níveis de penetração significa o aumento da potência da GD instalada na rede. Contudo, isso não é suficiente para avaliar o impacto da GD, uma vez que a localização é uma variável importante para a análise.

Na abordagem de alocação determinística da GD, a localização da GD é determinada por meios arbitrários. Uma proposta possível para a alocação da GD seria a definição dos pontos candidatos, através de estudos de planejamento, cujo objetivo seria a alocação ótima da GD para promover a minimização de perdas e melhorar o perfil de tensão.

Outra proposta possível é a alocação da GD baseada no impacto que se deseja avaliar. Para o procedimento genérico de avaliação dos limites de penetração, pode-se, por exemplo, alocar a GD no local de maior impacto. Dessa forma, pode-se obter a análise mais conservadora possível. Ademais, este ponto conservador pode ser definido analiticamente.

3.4.1.1. Abordagem determinística aplicada à perda de sensibilidade

Na abordagem determinística aplicada à perda de sensibilidade deve-se definir o ponto de alocação da GD capaz de reduzir a corrente percebida pelo dispositivo de proteção a níveis inferiores à sua capacidade de sensibilização. Esse ponto pode ser calculado de forma analítica como demonstrado no exemplo a seguir. Considere o circuito mostrado na Figura 19.

Figura 19. Exemplo de alocação conservadora para análise do impacto de perda de sensibilidade.

Fonte: Elaboração própria.

Nela é detalhado um circuito, onde um disjuntor está parametrizado para proteger certa área de proteção, desde sua posição até o ponto B. Também é detalhado o ponto B, definido como a posição de falta onde pode ser observada a menor corrente de curto-circuito a qual o relé de proteção do disjuntor é sensível.

Nesse caso, o problema a ser resolvido é a posição da GD, alocada a um ponto denominado A. Nesse exemplo, a GD possui ligação Delta e nenhum transformador de acoplamento. A impedância equivalente da fonte é definida Como Z_{sup} (Ohm), a impedância da GD é definida como Z_{gd} (Ohm) e a impedância da linha é definida como Z_{linha} (Ohm / km). A distância entre o disjuntor e o ponto B é definida como L e a distância entre o disjuntor e a GD é definida como “a”.

Para exemplificar de forma simplificada o problema de alocação conservadora da GD para observação do impacto de perda de sensibilidade, considera-se um curto-circuito trifásico no ponto B. O modelo utilizado para o cálculo de curto-circuito é mostrado na Figura 20, a equação que define a corrente de curto-circuito vista pelo disjuntor é dada pela equação (1) e o ponto de impacto máximo é definido na equação (2), onde a derivada da equação (1) é igual a zero.

Figura 20. Modelo de curto-circuito trifásico.

Fonte: Elaboração própria.

$$I_{DJ} = \frac{V}{a^2 * \left(\frac{-Z_{linha}^2}{Z_{GD}} \right) + a * \left(\frac{Z_{linha}^2 * L - Z_{linha} * Z_{sup}}{Z_{GD}} \right) + \left(\frac{Z_{linha} * L * Z_{sup}}{Z_{GD}} + Z_{linha} * L + Z_{sup} \right)} \quad (1)$$

$$Minimum(I_{DJ}) = I_{DJ}' = 0 \rightarrow a = \frac{L - \frac{Z_{sup}}{Z_{linha}}}{2} \quad (2)$$

3.4.1.2. Abordagem determinística aplicada à bidirecionalidade e queima inesperada de fusíveis

Na abordagem determinística aplicada à bidirecionalidade e queima inesperada de fusíveis deve-se definir o ponto de alocação da GD capaz de elevar a corrente reversa percebida pelo dispositivo de proteção a níveis superiores à sua capacidade de sensibilização. Dessa forma, pode-se obter uma análise conservadora. O ponto de conexão conservador nesse caso é sempre o ponto mais próximo da falta logo à jusante do dispositivo de proteção. Esse ponto é assim encontrado como demonstrado no exemplo a seguir, ilustrado na Figura 21.

Figura 21. Exemplo de alocação conservadora para análise de bidirecionalidade.

Fonte: Elaboração própria.

Nela é detalhado um circuito, onde um dispositivo de proteção está localizado de forma a proteger um ramal. Também é detalhado o ponto B, definido como a posição de falta onde pode ser observada a maior corrente de curto-circuito reversa a qual o dispositivo de proteção é sensível. Neste caso, o problema a ser resolvido é a posição da GD, alocada a um ponto denominado A, logo após o dispositivo de proteção.

3.4.2. Abordagem probabilística para a alocação da geração distribuída

Apesar de sua viabilidade, a abordagem determinística nem sempre é suficiente para avaliar a influência da localização da GD nos impactos abordados. Desta forma, esta seção aborda este tópico com um ponto de vista estatístico para definir a influência da localização da GD sobre os impactos gerados pela mesma à proteção de redes de distribuição.

Na abordagem probabilística para a alocação da GD, o aumento dos níveis de penetração significa o aumento do percentual de prossumidores que instalam a GD em suas redes. O tamanho da GD pode ser determinado como um fator do consumo de energia dos prossumidores. Desta forma, qualquer procedimento genérico para definir o limite de inserção da GD é uma análise de sensibilidade.

Na abordagem probabilística da alocação da GD, a localização da GD é determinada aleatoriamente entre os consumidores da rede. A primeira possibilidade proposta para a

alocação da GD é definir a mesma probabilidade para cada possível prosumidor, como pontos candidatos.

Outra possibilidade é criar uma hipótese probabilística baseada na atratividade da alternativa da GD para cada cliente, de forma a modelar a distribuição da GD entre os estes. Essa suposição deve ser capaz de criar uma distinção na probabilidade de adoção dos prosumidores.

Em (QUIROGA; KAGAN; AMASIFEN; ALMEIDA; VICENTINI, 2015), e (QUIROGA; KAGAN; AMASIFEN; ALMEIDA; VICENTINI, 2016) esta suposição é feita observando-se as disparidades entre os consumidores da rede, como tipo de carga (rural, residencial, comercial, industrial etc.) e consumo de energia. Nestes estudos a função de atratividade desenvolvida é sensível não só ao perfil econômico dos clientes, representado pelo seu consumo, mas também aos benefícios financeiros decorrentes da instalação de geração distribuída, que podem variar para diferentes tipos de clientes. Na Figura 22 é mostrada a função de probabilidade de adoção da GD para cada consumidor de uma rede real, desenvolvida nestes estudos.

Figura 22. Exemplo da função de atratividade probabilística usada para avaliar os limites de inserção da GD.

Fonte: Quiroga & Kagan & Amasifen & Almeida & Vicentini, 2015.

Contudo, a simulação puramente probabilística, tal como apresentada previamente, não é necessariamente precisa, uma vez que a localização da GD influencia de forma relevante os impactos avaliados. Dessa forma, duas simulações com o mesmo nível de penetração podem resultar em resultados diferentes. Neste ponto, o método de Monte Carlo pode ajudar significativamente. O método de Monte Carlo é utilizado através da amostragem aleatória maciça das correntes de falta simuladas, de forma a se obter a distribuição dessas correntes para um nível de penetração previamente definido. Um exemplo da utilização do método de Monte Carlo em uma análise de sensibilidade para a avaliação da perda de sensibilidade pode ser visto na Figura 23.

Figura 23. Exemplo da utilização do método Monte Carlo em uma análise de sensibilidade.

Fonte: Elaboração própria.

3.5. Métodos utilizados

São diversos os impactos da GD sobre o sistema de proteção de redes de distribuição que poderiam ser avaliados neste trabalho. Entretanto, de forma a aprofundar melhor as análises, optou-se por limitar a análise à perda de sensibilidade, queima inesperada de fusíveis e a bidirecionalidade.

Dessa forma, serão utilizados neste estudo os procedimentos genéricos para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para a perda de sensibilidade, bidirecionalidade e queima inesperada de fusíveis, como apresentado nas seções 3.3.2, 3.3.3 e 3.3.4.

Estes impactos poderiam ser avaliados por vários métodos e abordagens, como por exemplo, a abordagem determinística. Contudo, tal abordagem sozinha poderia não representar bem a realidade do comportamento da penetração de novas GD em redes de distribuição e com isso resultar em uma subestimação dos impactos analisados. Dessa forma, optou-se pela utilização tanto da abordagem determinística, quanto da abordagem probabilística apresentadas nas seções 3.4.1 e 3.4.2.

Para aplicação dos procedimentos segundo as abordagens, foi desenvolvida ferramenta computacional na plataforma SINAPGRID. A ferramenta SINAPGRID é uma plataforma para a análise de redes elétricas na área de planejamento dos sistemas de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Nela é possível realizar a modelagem da rede elétrica que permite a representação integrada e completa de qualquer topologia, envolvendo todos os segmentos do sistema de distribuição elétrica, desde a geração até a carga (SINAPSIS, 2019).

4. METODOLOGIA

Apresentados meios possíveis para auxiliar na avaliação do impacto da GD nos sistemas de proteção de redes de distribuição, através da descrição dos principais impactos causados pela GD à proteção de redes de distribuição elétrica, de procedimentos para avaliar tais impactos, de modelos elétricos que ajudam na avaliação e de possíveis abordagens que podem ser utilizadas no processo de planejamento de proteção, é de interesse do trabalho em questão, demonstrar a utilização dos conceitos expostos.

Para apresentar a aplicação dos procedimentos e abordagens discutidas previamente, foi desenvolvido um estudo de caso. Assim, este capítulo ilustra a aplicação dos métodos apresentados, considerando tanto a abordagem determinística, quanto a abordagem probabilística para a análise do impacto causado pela penetração maciça de pequenas unidades de GD espalhadas por uma rede real. As principais características do estudo de caso são:

- Utiliza uma rede de distribuição elétrica real, composta por redes de média e baixa tensão e todos os seus possíveis prosumidores.
- Aborda três questões principais apresentadas no capítulo anterior, que são a bidirecionalidade, a queima inesperada de fusíveis e a perda de sensibilidade.
- Considera os modelos elétricos da GD abordados nas seções anteriores, tanto a GD acoplada a inversor quanto os modelos de máquinas rotativas.
- As abordagens utilizadas são tanto a abordagem determinística, onde a GD é alocada ao ponto de maior impacto, quanto à probabilística, onde os pressupostos probabilísticos, com base na atratividade da alternativa da GD para cada cliente, são utilizados para a alocação da GD.
- Os cenários simulados correspondem a uma análise de sensibilidade considerando os níveis de inserção de 0%, 1%, 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

4.1. Dados da rede de distribuição elétrica real

Os dados utilizados para construir as redes de média e baixa tensão foram obtidos do sistema GIS de uma concessionária brasileira. O ambiente de simulação do estudo de caso foi um alimentador real, que possui 26.589 barras, 9.481 clientes, a demanda máxima de 10,5 MW e 154 km de extensão. A rede de distribuição elétrica é mostrada na Figura 24. As linhas

azuis mostram as redes de média tensão, enquanto as linhas vermelhas detalham as redes de baixa tensão.

Figura 24. Rede de distribuição elétrica real usada no estudo de caso.

Fonte: Elaboração própria.

4.2. Metodologia do estudo de caso de perda de sensibilidade

No estudo de caso para a avaliação da perda de sensibilidade oriunda da penetração GD, será aplicado o procedimento descrito em 3.3.4. Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para perda de sensibilidade. Na seção a seguir será apresentado o circuito a ser analisado.

4.2.1. Circuito utilizado para a análise de perda de sensibilidade

O estudo de caso feito para demonstrar o impacto da perda de sensibilidade utiliza do disjuntor da rede de distribuição elétrica 060DJVGR018 e de toda sua zona de proteção. O circuito está localizado no início da rede de distribuição elétrica e pode ser visto na Figura 25.

Figura 25. Disjuntor localizado no início da rede de distribuição elétrica.

Fonte: Elaboração própria.

Sua zona de proteção se estende até a chave religadora 050RA041086. Ela é composta por 309 barras, 297 trechos de rede correspondentes a 10,2545 km, 11 chaves e 1 banco de capacitores. A zona de proteção referente ao disjuntor 060DJVGR018 pode ser vista na Figura 26.

Figura 26. Zona de proteção do disjuntor 060DJVGR018.

Fonte: Elaboração própria

Os dados do circuito utilizado para a análise de perda de sensibilidade que serão abordados nas seções a seguir são explicitados na Tabela 8.

Tabela 8. Dados do circuito utilizado para a análise de perda de sensibilidade.

Dado	Descrição	Utilizado para	Valor
S_{max}	Potência aparente máxima observada no circuito	Determinação da potência nominal das GD na abordagem determinística	13,137 MVA
L	Comprimento do circuito	Determinação da localização da GD na abordagem determinística	10,2545 km
Z_{sup}	Impedância do suprimento	Determinação da localização da GD na abordagem determinística	[0,08333; 1,25j] Ohms
Z_{linha}	Impedância da linha	Determinação da localização da GD na abordagem determinística	[0,000182; 0,000283j] Ohms/km
N_{cons}	Número total de consumidores da rede	Determinação da quantidade de GD alocadas na abordagem probabilística	13.407

Fonte: Elaboração própria.

4.2.2. Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade

4.2.2.1. Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem determinística

Na abordagem determinística a alocação da GD utiliza-se da metodologia apresentado na seção 3.4.1.1, como guia para a alocação da GD na zona de proteção da chave 060DJVGR018.

Segundo tal abordagem, para a determinação da localização da GD, deve-se considerar a impedância do suprimento, a impedância da linha e o comprimento do trecho a ser analisado. Para o circuito em questão, a impedância do suprimento é [0,08333; 1,25j] Ohms, a impedância de linha é [0,000182; 0,000283j] Ohms/km e a distância da zona de proteção considerada é 10,2545 km. Dessa forma, a localização da GD deve ser a uma distância de 3,27 km da chave 060DJVGR018, como visto na Equação (3).

$$a = \frac{L - \frac{Z_{sup}}{Z_{linha}}}{2} = \frac{10,2545 - \frac{0,0833 + 1,25j}{0,000182 + 0,000283j}}{2} = 3,265638km \quad (3)$$

Assim sendo, a GD deve ser alocada a barra mais próxima da distância de 3,27 km da chave 060DJVGR018. A barra mais próxima a esta distância é a barra B_959, apresentada na Figura 27.

Figura 27. Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade sob a ótica determinística.

Fonte: Elaboração própria

4.2.2.2. Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística

Para a determinação da localização das GD, foi inicialmente considerada a proposta de alocação aleatória entre os consumidores da rede, onde são definidas probabilidades para cada possível prosumidor de acordo com a curva de atratividade de cada carga, como apresentado em 3.4.2. Para calcular a atratividade de cada prosumidor é ponderado o custo associado à geração pelo custo que o prosumidor incorre em seu consumo. De posse da atratividade de cada prosumidor, sua atratividade é ponderada pela soma de todas as atratividades de todos

os prossumidores da rede, gerando uma probabilidade de alocação associada a este prossumidor. Assim, quanto maior o consumo, maior sua atratividade e maior a probabilidade de alocação de uma GD a ele. Posteriormente é sorteada a alocação das GD, baseada na probabilidade dos prossumidores e são alocadas GD até que a penetração definida seja alcançada. A GD é alocada a qualquer prossumidor, tanto em média quanto em baixa tensão. De forma a ser aderente a regulação brasileira, somente as GD com potência nominal superior a 75 kW são alocadas com transformador de acoplamento, as demais não o são. A seguir a alocação é exemplificada em uma imagem ilustrativa do processo de alocação.

Figura 28. Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade sob a ótica probabilística.

Fonte: Elaboração própria

4.2.3. Modelo elétrico da GD para avaliação da perda de sensibilidade

4.2.3.1. Modelo elétrico da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem determinística

No estudo de caso é considerada apenas uma GD de grande porte. A capacidade instalada da GD é definida pelo cenário de penetração escolhido. Além disso, as duas tecnologias apresentadas anteriormente, máquina rotativa e GD acoplada a inversor, foram avaliadas neste estudo de caso. Para a avaliação do problema da perda de sensibilidade, é realizada uma análise de sensibilidade, onde são simulados cenários considerando os níveis de inserção de 0%, 1%, 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Na abordagem determinística o nível de inserção corresponde à potência nominal da GD, por isso para calcular o nível de inserção de cada cenário, é utilizada a potência aparente máxima do circuito. Assim, considerando a potência máxima do circuito como 13,137 MVA, tem-se que a potência nominal da GD é:

Tabela 9. Potência nominal das GD para a análise de perda de sensibilidade.

Cenário	Penetração	Potência nominal (MVA)
1	0%	0,000
2	1%	0,131
3	3%	0,394
4	5%	0,657
5	10%	1,314
6	20%	2,627
7	30%	3,941
8	40%	5,255
9	50%	6,569

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3.2. Modelo elétrico da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística

No estudo de caso são consideradas apenas GD de pequeno porte. A potência nominal de cada unidade de GD é definida a partir da demanda energética do prosumidor escolhido para instalar a tecnologia. Assim, a potência nominal da GD deve ser tal que a energia produzida atenda ao consumo mensal de energia do prosumidor. Além disso, as duas tecnologias apresentadas anteriormente, máquina rotativa e GD acoplada a inversor, foram avaliadas nesse estudo de caso.

Para a avaliação do problema da perda de sensibilidade, é realizada uma análise de sensibilidade, onde são simulados cenários considerando os níveis de inserção de 0%, 1%, 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Na abordagem probabilística o nível de inserção corresponde à soma da potência nominal das GD a serem instaladas. Assim, considerando a potência máxima do circuito como 13,137 MVA, tem-se que a soma da potência nominal das GD é dada como na Tabela 10.

Tabela 10. GD alocadas para a análise de perda de sensibilidade.

Cenário	Penetração	Potência nominal (MVA)
1	0%	0,000
2	1%	0,131
3	3%	0,394
4	5%	0,657
5	10%	1,314
6	20%	2,627
7	30%	3,941
8	40%	5,255
9	50%	6,569

Fonte: Elaboração própria

4.2.4. Método de avaliação da perda de sensibilidade

Em cada cenário é simulado um curto-circuito a jusante do dispositivo de proteção, no final da zona de proteção, ou seja, a montante do religador 050RA041086. Em seguida, a corrente mínima de curto-circuito observada no disjuntor 060DJVGR018 é comparada à corrente de *pick-up* do mesmo dispositivo de proteção. No caso de a corrente mínima de curto-circuito ser inferior à corrente de *pick-up* do dispositivo, há um problema de perda de sensibilidade.

Figura 29. Curto-circuito utilizado para avaliação da perda de sensibilidade

Fonte: Elaboração própria.

4.3. Metodologia do estudo de caso de bidirecionalidade

No estudo de caso para a avaliação da bidirecionalidade oriunda da penetração GD, será aplicado o procedimento descrito em 3.3.2. Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para bidirecionalidade. Na seção 4.3.1 será apresentado o circuito a ser analisado.

4.3.1. Circuito utilizado para a análise de bidirecionalidade

Assim como no estudo de caso de perda de sensibilidade, o estudo de caso feito para demonstrar o impacto da bidirecionalidade também utiliza do disjuntor da rede de distribuição elétrica 060DJVGR018 e de toda sua zona de proteção.

4.3.2. Localização da GD para avaliação da bidirecionalidade

4.3.2.1. Localização da GD para avaliação da bidirecionalidade na abordagem determinística

Na abordagem determinística a alocação da GD utiliza-se do apresentado na seção 3.4.1.2 Abordagem determinística aplicada à bidirecionalidade e queima inesperada de fusíveis, como guia para a alocação da GD na zona de proteção da chave 060DJVGR018. Para a avaliação deste impacto, a abordagem proposta sugere a alocação da GD logo a jusante do equipamento de proteção a ser avaliado. Dessa forma, a GD deve ser alocada a barra B_4659, apresentada na Figura 30.

Figura 30. Localização da GD para avaliação da bidirecionalidade sob a ótica determinística.

Fonte: Elaboração própria

4.3.2.2. Localização da GD para avaliação da bidirecionalidade na abordagem probabilística

A metodologia de alocação das GD para avaliação da bidirecionalidade na abordagem probabilística é a mesma metodologia de alocação das GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística, assim como exposto em 4.2.2.2 Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística. Isto ocorre, pois na abordagem probabilística não há variação entre as metodologias de alocação da GD.

4.3.3. Modelo elétrico da GD para avaliação da bidirecionalidade

4.3.3.1. Modelo elétrico da GD para avaliação da bidirecionalidade na abordagem determinística

O modelo elétrico da GD para a avaliação da bidirecionalidade na abordagem determinística é o mesmo modelo elétrico para a avaliação da perda de sensibilidade na abordagem determinística, assim como exposto em 4.2.3.1 Modelo elétrico da GD para

avaliação da perda de sensibilidade na abordagem determinística. Isto ocorre, pois o circuito analisado é o mesmo.

4.3.3.2. Modelo elétrico da GD para avaliação da bidirecionalidade na abordagem probabilística

O modelo elétrico da GD para a avaliação da bidirecionalidade na abordagem probabilística é o mesmo modelo elétrico para a avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística, assim como exposto em 4.2.3.2 Modelo elétrico da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística. Isto ocorre, pois na abordagem probabilística não há variação entre os modelos de GD utilizados.

4.3.4. Método de avaliação da perda bidirecionalidade na abordagem determinística

Em cada cenário é simulado um curto-circuito no ponto a montante do dispositivo de proteção, em cenários com e sem a presença da GD. Em seguida, a corrente de curto-circuito reversa é comparada à corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção. No caso em que uma corrente de curto-circuito reversa é maior que a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção, pode haver bidirecionalidade, dependendo do dispositivo de proteção observado.

Figura 31. Curto-circuito para avaliação da bidirecionalidade.

Fonte: Elaboração própria.

4.4. Metodologia do estudo de caso de queima inesperada de fusíveis segundo a abordagem determinística

No estudo de caso para a avaliação da queima inesperada de fusíveis oriunda da penetração GD, será aplicado o procedimento descrito em 3.3.3. Procedimento genérico para avaliar os limites de penetração da geração distribuída para queima inesperada de fusíveis. Na seção a seguir será apresentado o circuito a ser analisado.

4.4.1. Circuito utilizado para a análise de queima inesperada de fusíveis

O estudo de caso feito para demonstrar o impacto da queima inesperada de fusíveis utiliza o fusível 387BF005500, usado para proteger um ramal do alimentador. O fusível está localizado no meio do alimentador e pode ser visto na Figura 32.

Figura 32. Fusível localizado em um ramal no meio do alimentador estudado.

Sua zona de proteção se estende até o final dos ramais que compõe seu circuito. Ela é composta por 41 barras, 38 trechos de rede correspondentes a 1,261 km, 1 chaves de proteção e potência aparente no horário de pico de 1,021 MVA.

4.4.2. Localização da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis

4.4.2.1. Localização da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem determinística

Na abordagem determinística a alocação da GD utiliza-se do apresentado na seção 3.4.1.2 Abordagem determinística aplicada à bidirecionalidade e queima inesperada de fusíveis, como guia para a alocação da GD na zona de proteção da chave 060DJVGR018. Para a avaliação deste impacto, a abordagem proposta sugere a alocação da GD logo a jusante do equipamento de proteção a ser avaliado. Dessa forma, a GD deve ser alocada a barra B_635, apresentada na Figura 33.

Figura 33. Localização da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis sob a ótica determinística.

4.4.2.2. Localização da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem probabilística

A metodologia de alocação das GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem probabilística é a mesma metodologia de alocação das GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística, assim como exposto em 4.2.2.2 Localização da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística. Isto ocorre, pois na abordagem probabilística não há variação entre as metodologias de alocação da GD.

4.4.3. Modelo elétrico da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis

4.4.3.1. Modelo elétrico da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem determinística

No estudo de caso é considerada apenas uma GD de grande porte. A capacidade instalada da GD é definida pelo cenário de penetração escolhido. Além disso, as duas tecnologias apresentadas anteriormente, máquina rotativa e GD acoplada a inversor, foram avaliadas neste estudo de caso. Para a avaliação do problema da perda de sensibilidade, é realizada uma análise de sensibilidade, onde são simulados cenários considerando os níveis de inserção de 0%, 1%, 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Na abordagem determinística o nível de inserção corresponde à potência nominal da GD, por isso para calcular o nível de inserção de cada cenário, é utilizada a potência aparente máxima do circuito. Assim, considerando a potência máxima do circuito como 1,021 MVA, tem-se que a potência nominal da GD é:

Tabela 11. Potência nominal das GD para a análise de queima inesperada de fusíveis.

Cenário	Penetração	Potência nominal (MVA)
1	0%	0,000
2	1%	0,010
3	3%	0,031
4	5%	0,051
5	10%	0,102
6	20%	0,204
7	30%	0,306
8	40%	0,408
9	50%	0,511

Fonte: Elaboração própria.

4.4.3.2. Modelo elétrico da GD para avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem probabilística

O modelo elétrico da GD para a avaliação da queima inesperada de fusíveis na abordagem probabilística é o mesmo modelo elétrico para a avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística, assim como exposto em 4.2.3.2 Modelo elétrico da GD para avaliação da perda de sensibilidade na abordagem probabilística. Isso ocorre, pois na abordagem probabilística não há variação entre os modelos de GD utilizados.

4.4.4. Método de avaliação da queima inesperada de fusíveis

Assim como para a avaliação da bidirecionalidade, para a avaliação do problema de queima inesperada de fusíveis, é simulado um curto-circuito no ponto a montante do dispositivo de proteção, em cenários com e sem a presença da GD. Em seguida, a corrente de curto-circuito reversa é comparada à corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção. No caso em que uma corrente de curto-circuito reversa é maior que a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção, pode haver a queima indesejada de fusíveis.

Figura 34. Curto-circuito para avaliação da queima inesperada de fusíveis sob a ótica determinística.

Fonte: Elaboração própria.

5. RESULTADOS

Os resultados serão apresentados segundo os três impactos avaliados, perda de sensibilidade, bidirecionalidade e queima inesperada de fusíveis. Serão apresentados os resultados com as simulações de geradores de tecnologia acoplada a inversores e máquinas rotativas, explicitando-se suas diferenças. Ademais, serão comparadas as abordagens determinísticas e probabilísticas. Por fim, quanto à abordagem probabilística, será discutida a variabilidade de resultados encontrados e sua precisão.

5.1. Resultado da avaliação da perda de sensibilidade

5.1.1. Perda de sensibilidade - inversores na abordagem determinística

O resultado da simulação do curto-circuito mínimo para a tecnologia de geração acoplada por inversores, segundo a abordagem determinística, apresentou resultados de impacto pouco significativo. Mesmo para o maior nível de penetração de 50%, o impacto observado foi de uma redução de 3,42% na corrente de curto-circuito mínima observada para esta zona de proteção, quando comparada à rede original sem GD. Acredita-se que este resultado pouco expressivo seja oriundo da elevada impedância de curto-circuito, quando comparada a outras tecnologias. Outra variável a ser analisada é o impacto da inserção de somente uma única impedância, visto que o efeito de diversas impedâncias em paralelo pode elevar a contribuição das GD para a redução do nível de curto-circuito da rede. O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito mínimas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 35.

Figura 35. Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* na análise determinística da GD acoplada por inversores

Fonte: Elaboração própria.

5.1.2. Perda de sensibilidade - máquinas rotativas na abordagem determinística

O resultado da simulação do curto-circuito mínimo para a tecnologia de geração por máquinas rotativas, segundo a abordagem determinística, apresentou resultados de impacto um pouco mais significativos. Vê-se nesta simulação que para penetrações entre 30% e 40%, a GD é capaz de alterar a sensibilidade do equipamento de proteção, fazendo com que ele possa não atuar em uma possível contingência. Acredita-se que este resultado um pouco mais expressivo seja oriundo da menor impedância de curto-circuito encontrada no modelo de geração por máquinas rotativas. Este resultado tem sua importância, pois delimita o limite de penetração para GD em uma rede de distribuição. O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito mínimas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 36.

Figura 36. Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* na análise determinística de máquinas rotativas

Fonte: Elaboração própria.

5.1.3. Perda de sensibilidade - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem determinística

É interessante reparar na diferença de impactos observados entre as duas tecnologias quando simuladas na abordagem determinística. Nessa, observa-se a diferença entre os impactos das tecnologias e pode-se até ficar tentado a dizer que o impacto da tecnologia acoplada a inversores é insignificante. Contudo, como será apresentado nas demais análises, esta simulação pode ser uma subestimação dos possíveis impactos. A comparação entre os impactos das tecnologias acopladas a inversores e máquinas rotativas segundo a abordagem determinística é observada na Figura 37.

Figura 37. Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* na análise determinística

Fonte: Elaboração própria.

5.1.4. Perda de sensibilidade - inversores na abordagem probabilística

O resultado da simulação do curto-circuito mínimo para a tecnologia de geração acoplada por inversores, segundo a abordagem probabilística, apresentou resultados de impacto mais significativo do que a simulação da mesma tecnologia segundo a abordagem determinística. Apesar de mesmo para o maior nível de penetração avaliado, de 50%, o impacto observado não ser suficiente para dessensibilizar o disjuntor do circuito primário, a corrente mínima de curto-circuito simulada apresentou uma redução de 12,32%, quando comparada a rede original sem GD. Acredita-se que este resultado se deva a um número expressivo de impedâncias em paralelo, capazes de reduzir os níveis de curto-circuito do circuito analisado. Ademais, é interessante reparar no comportamento assintótico da curva de corrente mínima de curto-circuito, induzindo a conclusão de que haja um limite para o impacto causado pela GD e que para este circuito, não há penetração possível que cause um impacto capaz de impedir a ação do dispositivo de proteção em caso de contingência. O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito mínimas simuladas para diversos

níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 38.

Figura 38. Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* na análise probabilística da GD acoplada por inversores

Fonte: Elaboração própria.

5.1.5. Perda de sensibilidade - máquinas rotativas na abordagem probabilística

O resultado da simulação do curto-circuito mínimo para a tecnologia de geração por máquinas rotativas, segundo a abordagem probabilística, apresentou resultados de impacto significativos. Vê-se nesta simulação que para penetrações entre 5% e 10%, a GD é capaz de alterar a sensibilidade do equipamento de proteção, fazendo com que ele possa não atuar em uma possível contingência. Acredita-se que este resultado um pouco mais expressivo seja oriundo da menor impedância de curto-circuito encontrada no modelo de geração por máquinas rotativas e da grande quantidade de GD em paralelo.

Ademais, como no resultado analisado anteriormente, há um comportamento assintótico da curva de corrente mínima de curto-circuito, dele pode-se inferir que caso a corrente de *pick-up* do circuito possa ser reprogramada para correntes próximas a 650 A, não

há penetração possível que cause um impacto capaz de impedir a ação do dispositivo de proteção em caso de contingência. O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito mínimas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 39.

Figura 39. Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* na análise probabilística de máquinas rotativas

Fonte: Elaboração própria.

5.1.6. Perda de sensibilidade - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem probabilística

Assim como na comparação entre as tecnologias na abordagem determinística, observa-se uma diferença significativa entre os impactos das tecnologias, porém não se pode dizer que o impacto da tecnologia acoplada a inversores é insignificante. É interessante notar que em ambas as análises, chega-se a um limite de impacto que poderia ser proporcionado pelas GD. A comparação entre os impactos das tecnologias acopladas a inversores e máquinas rotativas segundo a abordagem determinística é observada na Figura 40.

Figura 40. Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* na análise probabilística

Fonte: Elaboração própria.

5.1.7. Perda de sensibilidade - comparação entre as abordagens

Na simulação o impacto da GD sob a ótica probabilística, procura ser fiel à realidade das redes de distribuição, onde as GD são acopladas a diversos consumidores e não somente a um ponto específico da rede. Além disso, outro comportamento é simulado nesta abordagem, a adesão por consumidor, e não um determinado nível de potência dos geradores. Desta forma pode-se observar uma maior complexidade nas simulações, resultando em impactos similares para grandes penetrações, porém muito díspares para pequenas penetrações, quando comparados a aqueles observados nas simulações sob a ótica determinística. A comparação entre as abordagens dos impactos das tecnologias acopladas a inversores e máquinas rotativas é observada na Figura 41.

Figura 41. Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up*

(a) Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* na tecnologia acoplada a inversores

(b) Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* na tecnologia de máquinas rotativas

Fonte: Elaboração própria.

5.2. Resultado da avaliação da bidirecionalidade

5.2.1. Bidirecionalidade - inversores na abordagem determinística

O resultado da simulação do curto-circuito máximo para a tecnologia de geração acoplada por inversores, segundo a abordagem determinística, apresentou resultados de impacto pouco significativo. Mesmo para o maior nível de penetração de 50%, o impacto observado foi de uma corrente de curto-circuito reversa equivalente a 20% da corrente de *pick-up*. Assim como na análise do impacto na sensibilidade dos dispositivos de proteção, acredita-se que esse resultado pouco expressivo seja oriundo da elevada impedância de curto-circuito, quando comparada a outras tecnologias e da inserção de somente uma única impedância. O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito máximas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada à corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 42.

Figura 42. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* na análise determinística da GD acoplada por inversores

Fonte: Elaboração própria.

5.2.2. Bidirecionalidade - máquinas rotativas na abordagem determinística

O resultado da simulação do curto-circuito máximo para a tecnologia de geração por máquinas rotativas, segundo a abordagem determinística, apresentou resultados de impacto um pouco mais significativos. Vê-se nesta simulação que para penetrações entre 20% e 30%, a GD é capaz de acionar de forma equivocada o equipamento de proteção, fazendo com que ele atue de forma indevida em uma possível contingência em uma rede vizinha. Na penetração máxima avaliada (50%), observa-se uma corrente de curto-circuito reversa equivalente a 1,6 vezes a corrente de *pick-up* configurada para o dispositivo de proteção. Como na análise de perda de sensibilidade, acredita-se que este resultado um pouco mais expressivo seja oriundo da menor impedância de curto-circuito encontrada no modelo de geração por máquinas rotativas. Este resultado tem sua importância, pois delimita o limite de penetração para GD em uma rede de distribuição. O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito máximas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 43.

Figura 43. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* na análise determinística de máquinas rotativas

Fonte: Elaboração própria.

5.2.3. Bidirecionalidade - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem determinística

Como na avaliação do impacto de perda de sensibilidade, existem diferenças nos impactos observados entre as duas tecnologias quando simuladas na abordagem determinística. Nessa análise a tecnologia de geração por máquinas rotativas possui impacto 8 vezes superior à tecnologia acoplada por inversores. Como discutido acima, este fenômeno pode ser explicado pela diferença entre os modelos utilizados para simulação dos impactos das diferentes tecnologias. A comparação entre os impactos das tecnologias acopladas a inversores e máquinas rotativas segundo a abordagem determinística é observada na Figura 44.

Figura 44. Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* na análise determinística

Fonte: Elaboração própria.

5.2.4. Bidirecionalidade - inversores na abordagem probabilística

O resultado da simulação do curto-circuito máximo para a tecnologia de geração acoplada por inversores, segundo a abordagem probabilística, apresentou resultados de impacto significativos. Isto, pois nesta análise observou-se que para penetrações entre 20% e 30% de penetração, a GD tem a capacidade de induzir o equipamento de proteção ao erro, atuando de forma indevida. Diferentemente dos resultados observados na análise de impacto segundo a abordagem determinística, a corrente máxima de curto-circuito simulada chega a um ponto de saturação em aproximadamente 1 kA. Assim como na análise do impacto de perda de sensibilidade, acredita-se que este resultado se deva a um número expressivo de impedâncias em paralelo, capazes de aumentar os níveis de curto-circuito do circuito gerados pelas GD. Também como na análise supracitada, é interessante reparar no comportamento assintótico da curva de corrente máxima de curto-circuito, induzindo a conclusão de que haja um limite para o impacto causado pelas GD e que para este circuito uma solução possível para o impacto seria a elevação da corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção, ou até a inserção de uma proteção direcional. O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito

máximas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 45.

Figura 45. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* na análise probabilística da GD acoplada por inversores

Fonte: Elaboração própria.

5.2.5. Bidirecionalidade - máquinas rotativas na abordagem probabilística

O resultado da simulação do curto-circuito máximo para a tecnologia de geração por máquinas rotativas, segundo a abordagem probabilística, apresentou resultados de impacto muito elevado quando comparado a todas as análises realizadas até então. Vê-se nesta simulação que para penetrações entre 1% e 3%, a GD é capaz de sensibilizar o equipamento de proteção, fazendo com que ele atue de forma indevida em uma contingência em redes vizinhas. Ainda como na análise de perda de sensibilidade na abordagem probabilística, acredita-se que este resultado mais expressivo seja oriundo da menor impedância de curto-circuito encontrada no modelo de geração por máquinas rotativas e da grande quantidade de GD em paralelo.

Ademais, como no resultado analisado anteriormente, há um comportamento assintótico da curva de corrente máxima de curto-circuito, e dele pode-se inferir que com uma corrente máxima de curto-circuito próxima aos 3,3 kA, a opção viável para solução deste impacto seria a proteção direcional. O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito máximas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 46.

Figura 46. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* na análise probabilística de máquinas rotativas

Fonte: Elaboração própria.

5.2.6. Bidirecionalidade - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem probabilística

Assim como na comparação entre as tecnologias na abordagem determinística, observa-se uma diferença significativa entre os impactos das tecnologias, porém não se pode dizer que o impacto da tecnologia acoplada a inversores é insignificante. É interessante notar que em ambas as análises se chega a um limite do impacto que poderia ser proporcionado

pelas GD. A comparação entre os impactos das tecnologias acopladas a inversores e máquinas rotativas segundo a abordagem determinística é observada na Figura 47.

Figura 47. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* na análise probabilística

Fonte: Elaboração própria.

5.2.7. Bidirecionalidade - comparação entre as abordagens

Na simulação do impacto da GD sob a ótica probabilística, devido à fidelidade à realidade das redes de distribuição e seus prosumidores, observa-se resultados dispares a abordagem determinística. Contudo, os resultados significativamente discrepantes levantam a atenção quanto à coerência deles. Assim, acredita-se que em estudos futuros seja preponderante a avaliação dos porquês de os resultados serem tão dispares e quais são os fatores que resultam nessas diferenças. Isto, pois estas possuem uma maior complexidade nas simulações, resultando em impactos significativos para grandes penetrações, quando comparados a aqueles observados nas simulações sob a ótica determinística. Ademais, as diferenças são maiores quando comparada a tecnologia acoplada a inversores (5 vezes superior), do que a tecnologia de máquinas rotativas (2 vezes maior). A comparação entre as

abordagens dos impactos das tecnologias acopladas a inversores e máquinas rotativas é observada na Figura 48.

Figura 48. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up*

(a) Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* na tecnologia de máquinas rotativas

(b) Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* na tecnologia acoplada a inversores

Fonte: Elaboração própria.

5.3. Resultado da avaliação da queima inesperada de fusíveis

5.3.1. Queima inesperada de fusíveis - inversores na abordagem determinística

A avaliação da queima inesperada de fusíveis é similar à avaliação da bidirecionalidade. Desta forma, esperavam-se resultados semelhantes aos apresentados na seção 5.2. Este comportamento similar foi observado no resultado da simulação do curto-circuito máximo para a tecnologia de geração acoplada por inversores, segundo a abordagem determinística, visto que apresentou resultados de impacto pouco significativo. Mesmo para o maior nível de penetração de 50%, o impacto observado foi de uma corrente de curto-circuito reversa equivalente a 40% da corrente de *pick-up*. Assim como na análise do impacto na bidirecionalidade dos dispositivos de proteção, acredita-se que este resultado pouco expressivo seja oriundo da elevada impedância de curto-circuito, quando comparada a outras tecnologias e da inserção de somente uma única impedância. O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito máximas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 49.

Figura 49. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* do fusível 387BF005500 na análise determinística da GD acoplada por inversores

Fonte: Elaboração própria.

5.3.2. Queima inesperada de fusíveis - máquinas rotativas na abordagem determinística

O resultado da simulação do curto-circuito máximo para a tecnologia de geração por máquinas rotativas, segundo a abordagem determinística, apresentou resultados de impacto significativo. Vê-se nesta simulação que para penetrações entre 10% e 20%, a GD é capaz de acionar de forma equivocada o equipamento de proteção, fazendo com que ele atue de forma indevida em uma possível contingência em uma rede vizinha. Esta atuação seria desastrosa para a localização do defeito e poderia incorrer em elevação dos tempos de atendimento e piora da qualidade do serviço de distribuição. Na penetração máxima avaliada (50%), observa-se uma corrente de curto-circuito reversa equivalente a 3,4 vezes a corrente de *pick-up* do fusível. Como na análise de perda de bidirecionalidade, acredita-se que este resultado um pouco mais expressivo seja oriundo da menor impedância de curto-circuito encontrada no modelo de geração por máquinas rotativas. Este resultado tem sua importância, pois delimita o limite de penetração para GD em uma rede de distribuição. O gráfico com o resultado das

correntes de curto-circuito máximas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 50.

Figura 50. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* do fusível 387BF005500 na análise determinística de máquinas rotativas

Fonte: Elaboração própria.

5.3.3. Queima inesperada de fusíveis - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem determinística

Como na avaliação do impacto de bidirecionalidade, existem diferenças nos impactos observados entre as duas tecnologias quando simuladas na abordagem determinística. Nesta análise a tecnologia de geração por máquinas rotativas possui impacto 10 vezes superior à tecnologia acoplada por inversores. Como discutido, este fenômeno pode ser explicado pela diferença entre os modelos utilizados para simulação dos impactos das diferentes tecnologias. A comparação entre os impactos das tecnologias acopladas a inversores e máquinas rotativas segundo a abordagem determinística é observada na Figura 51.

Figura 51. Curto-circuito mínimo versus corrente de *pick-up* do fusível 387BF005500 na análise determinística

Fonte: Elaboração própria.

5.3.4. Queima inesperada de fusíveis - inversores na abordagem probabilística

O resultado da simulação do curto-circuito máximo para a tecnologia de geração acoplada por inversores, segundo a abordagem probabilística, apresentou resultados de impacto significativos. Nesta análise, observou-se que para penetrações próximas a 10%, a GD tem a capacidade de induzir o equipamento de proteção ao erro, atuando de forma indevida. Diferentemente dos resultados observados na análise de impacto segundo a abordagem determinística, a corrente máxima de curto-circuito simulada chega 0,65 kA quando a penetração da GD está em 50%. Assim como na análise do impacto de perda de sensibilidade, acredita-se que este resultado se deva a um número expressivo de impedâncias em paralelo, capazes de aumentar os níveis de curto-circuito do circuito gerados pelas GD. Diferentemente das análises anteriores, a curva de impacto possui um comportamento pouco convencional. Acredita-se que o comportamento possa ser explicado pelo impacto da localização da GD. Isto, pois GD alocadas dentro da zona de proteção do fusível tendem a elevar os níveis de curto-circuito dentro dela, enquanto a alocação de GD fora de sua zona de

proteção tende a minimizar os impactos das anteriores. Apesar deste comportamento, assim como nas simulações probabilísticas anteriores, pode-se notar um nível máximo de impacto, que nesta análise é de aproximadamente 0,14 kA.

O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito máximas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 52.

Figura 52. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* do fusível 387BF005500 na análise probabilística da GD acoplada por inversores

Fonte: Elaboração própria.

5.3.5. Queima inesperada de fusíveis - máquinas rotativas na abordagem probabilística

O resultado da simulação do curto-circuito máximo para a tecnologia de geração por máquinas rotativas, segundo a abordagem probabilística, apresentou resultados de impacto muito elevado. Vê-se nesta simulação que para penetrações entre 1% e 3%, a GD é capaz de sensibilizar o equipamento de proteção, fazendo com que ele atue de forma indevida em uma contingência em redes vizinhas. Como na análise de bidirecionalidade na abordagem probabilística, acredita-se que este resultado mais expressivo seja oriundo da menor

impedância de curto-circuito encontrada no modelo de geração por máquinas rotativas e da grande quantidade de GD em paralelo.

Ademais, como no resultado analisado anteriormente, há um comportamento errático da curva de corrente máxima de curto-circuito, oriundo das possibilidades de alocação das GD. Apesar deste comportamento, assim como nas simulações probabilísticas anteriores, pode-se notar um nível máximo de impacto, que nesta análise é de aproximadamente 0,65 kA.

O gráfico com o resultado das correntes de curto-circuito máximas simuladas para diversos níveis de penetração, comparada a corrente de *pick-up* do dispositivo de proteção é observada na Figura 53.

Figura 53. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* do fusível 387BF005500 na análise probabilística de máquinas rotativas

Fonte: Elaboração própria.

5.3.6. Queima inesperada de fusíveis - comparação entre as tecnologias avaliadas na abordagem probabilística

Assim como na comparação entre as tecnologias na abordagem determinística, observa-se uma diferença significativa entre os impactos das tecnologias, porém não se pode

dizer que o impacto da tecnologia acoplada a inversores é insignificante. É interessante notar o comportamento não convencional da corrente máxima de curto-circuito analisada, de forma a não incorrer em uma generalização do impacto que pode ser originado pela GD. A comparação entre os impactos das tecnologias acopladas a inversores e máquinas rotativas segundo a abordagem determinística é observada na Figura 54.

Figura 54. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* do fusível 387BF005500 na análise probabilística

Fonte: Elaboração própria.

5.3.7. Queima inesperada de fusíveis - comparação entre as abordagens

Na simulação do impacto da GD sob a ótica probabilística, devido à fidelidade à realidade das redes de distribuição e seus prossumidores, observa-se resultados dispares a abordagem determinística. Assim como na avaliação da bidirecionalidade, os resultados significativamente discrepantes levantam a atenção quanto à coerência deles. As diferenças são maiores quando comparada a tecnologia acoplada a inversores (6 vezes superior), do que a tecnologia de máquinas rotativas (3 vezes maior) A comparação entre as abordagens dos

impactos das tecnologias acopladas a inversores e máquinas rotativas é observada na Figura 55.

Figura 55. Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* do fusível 387BF005500

(a) Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* na tecnologia de máquinas rotativas

(b) Curto-circuito máximo versus corrente de *pick-up* na tecnologia acoplada a inversores

Fonte: Elaboração própria.

6. CONCLUSÃO

6.1. Conclusões deste trabalho

A crescente inserção de recursos energéticos distribuídos, como a GD, nas redes de distribuição elétrica é uma realidade do atual paradigma do setor elétrico. No entanto, a instalação dessa tecnologia nas mesmas pode prejudicar seus sistemas de proteção. Desta forma, é necessário avaliar os impactos da GD nos sistemas de proteção, mesmo durante o processo de planejamento da rede, para evitar problemas futuros. Neste contexto, este trabalho visou à apresentação de métodos para avaliar os limites de penetração das tecnologias de geração distribuída, de modo a ser facilmente associado aos processos inerentes à atividade de planejamento de rede e, assim, promover um planejamento integrado das redes de distribuição elétrica, tanto do ponto de vista da expansão como da proteção.

Ademais, foram apresentados métodos genéricos para a avaliação dos níveis seguros de inserção da GD, tanto do ponto de vista determinístico como probabilístico, enfatizando a influência da potência, localização e tecnologias da GD. Espera-se que este estudo possa auxiliar futuros planejadores de rede a compreender a importância de um planejamento da rede de distribuição integrado, neste novo contexto das redes inteligentes, onde novas tecnologias avançadas de automação e recursos energéticos distribuídos são cada vez mais presentes.

Dos resultados depreende-se que independentemente da abordagem adotada, a tecnologia da GD por máquinas rotativas possui impacto superior à tecnologia de geração acoplada por inversores. Além disso, entende-se também que a depender da abordagem utilizada, o impacto da GD acoplada por inversores não é insignificante, cabendo medidas de mitigação, dependendo do nível de penetração.

A avaliação dos impactos da GD acoplada por inversores torna-se imprescindível na atual mudança do paradigma de redes elétricas, com o crescimento exponencial da conexão destas fontes. Mais ainda quando se observa que existem níveis de penetração capazes de causar impactos nocivos a proteção de redes de distribuição. Desta forma, a utilização de uma metodologia capaz de identificar o impacto da GD acoplada por inversores de forma mais fiel à realidade das redes de distribuição é essencial e a abordagem probabilística vem de encontro a essa necessidade.

Outro resultado importante deste estudo é a identificação do comportamento assintótico das curvas de corrente de curto-circuito simuladas. Este comportamento indica que a depender da parametrização da proteção, é possível mitigar de forma permanente os impactos da GD sobre os sistemas de proteção analisados neste trabalho, visto que os impactos sobre os níveis de curto-circuito possuem um limite.

Outro aspecto importante a ser analisado é a relação de precisão versus tempo computacional de análise. Enquanto uma simulação dos impactos da GD sob a ótica determinística leva aproximadamente 10 segundos, a simulação dos impactos sob a ótica probabilística incorre em 33 minutos para a mesma análise. Considerando um estudo com uma análise de sensibilidade correspondendo a 10 cenários de penetração, temos uma comparação de 1,6 minutos contra quase 5 horas e meia de simulação. Isto somente para um alimentador. Extrapolando esta comparação para uma área de concessão com dois mil alimentadores, chega-se a uma relação de 2,3 dias contra 1,2 anos. Assim, o futuro planejador deve ter em mente que para encontrar meios de avaliar os impactos da GD de forma mais assertiva, deve empregar recursos tecnológicos para tanto.

6.2. Sugestões de trabalhos futuros

Acredita-se que este trabalho não traz em si todas as respostas necessárias a avaliação de impactos causados pela GD a proteção de redes de distribuição. Isto, pois ainda resta aprofundar o entendimento das fontes causadoras do comportamento do impacto quando utilizada a abordagem probabilística de simulação. Para aprofundar o estudo, seria interessante entender o porquê do comportamento assintótico das curvas, ou até porque o impacto observado na abordagem probabilística é tão superior aos resultados obtidos sob a ótica determinística.

Ademais, entende-se que seja de interesse a avaliação da precisão incorrida na abordagem probabilística. Isto, pois sendo uma avaliação probabilística, é importante avaliar o grau de precisão dos resultados, bem como a distribuição dos resultados e se há a possibilidade de alcançar os mesmos resultados com menor número de simulações.

Mesmo da conclusão do trabalho, não foram aprofundados outros impactos abordados neste estudo, como a perda de coordenação, a sobretensões oriunda de contingências, a geração de harmônicas e a proteção anti-ilhamento. Assim, a evolução deste estudo neste sentido deixaria o tema completo.

Por fim, outro ponto de interesse para evolução deste estudo seria a utilização das curvas de proteção comparadas as correntes de curto-circuito, de forma seria possível compreender como se daria a coordenação das proteções das redes e as proteções das GD, bem como gerar uma maior precisão dos reais impactos causados pela penetração da GD em redes de distribuição reais.

6.3. Considerações finais

Após todo o exposto, acredita-se que os objetivos deste trabalho foram alcançados, pois foram apresentados meios possíveis para auxiliar na avaliação do impacto da GD nos sistemas de proteção de redes de distribuição, de forma auxiliar na avaliação de possíveis impactos na proteção de redes de distribuição devido à penetração da GD no novo paradigma do setor elétrico brasileiro.

Ainda, as metodologias típicas utilizadas para analisar o impacto da GD servem para orientar a avaliação dos possíveis impactos no sistema de proteção. Comumente, essas metodologias são baseadas em uma análise determinística, avaliando o impacto de algumas grandes unidades geradoras, geralmente com potência nominal superior a 1 MW. Assim, este trabalho tem relevância, pois é inovador ao apresentar uma metodologia probabilística para avaliação de cenários de inserção de pequenas unidades de GD em redes reais de média e baixa tensão e a análise de possíveis impactos nos sistemas de proteção dessas redes.

A metodologia de alocação probabilística e seus impactos foram publicados em dois artigos de dois congressos:

- Evaluation of distributed generation impacts on distribution networks under different penetration scenarios (QUIROGA; KAGAN; AMASIFEN; ALMEIDA; VICENTINI, 2015);
- Study of the Distributed Generation Impact on Distributed Networks, Focused on Quality of Power (QUIROGA; KAGAN; AMASIFEN; ALMEIDA; VICENTINI, 2016);

O capítulo 3 desta dissertação foi publicado como capítulo do livro *Electric Distribution Network Management and Control* da editora Springer:

- Protection System Considerations in Networks with Distributed Generation (QUIROGA; ALMEIDA; KAGAN; KAGAN, 2018);

7. REFERÊNCIAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa nº 404 - Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada”, 9 de setembro de 2010.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa nº 482 - Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências”, 17 de abril de 2012 a.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa nº 506 - Estabelece as condições de acesso ao sistema de distribuição por meio de conexão a instalações de propriedade de distribuidora e dá outras providências”, 4 de setembro de 2012b.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 1 – Introdução. Resolução Normativa nº 664/2015a

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa nº 687 - Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST”, 24 de novembro de 2015b.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição”, Resolução Normativa nº 724/2016.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. BIG - Banco de Informações de Geração. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 21 nov. 2017.

BAKER, P. P.; MELLO, R. W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems. Power Technologies, Inc., 2000.

BARKER, P. Overvoltage Considerations in Applying Distributed Resources on Power Systems. Proc. of power engineering society summer meeting, 2002 IEEE, pp109- 114, vol.1, 2002.

BRAHMA, S.M.; GIRGIS, A.A. Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems with High Penetration of Distributed Generation. IEEE Transactions on Power Delivery, V.19, I.1, Jan. 2004.

BRAVO, R. J.; LY, C. “Electronic-Coupled Generators Short Circuit Impacts”, Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference, 2015.

CHAITUSANEY, S.; YOKOYAMA, A. An Appropriate Distributed Generation Sizing Considering Recloser-Fuse Coordination. Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES.

CHAITUSANEY, S.; YOKOYAMA, A. Impact of Protection Coordination on Sizes of Several Distributed Generation Sources, Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005.

CHEN, C.; WU, W.; ZHANG, B.; SINGH, C. An Analytical Adequacy Evaluation Method for Distribution Networks Considering Protection Strategies and Distributed Generators. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 30, Issue 3, 2015.

DEL MONACO, J. L. The role of distributed generation in the critical electric power infrastructure, Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting IEEE, vol. 1, 2001, 144–145.

DOYLE, M.T. Reviewing the impacts of distributed generation on distribution system protection. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE.

DRIESEN, J.; BELMANS, R. Distributed Generation: Challenges and Possible Solutions. Power Engineering Society General Meeting, 2006.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2015 – Ano base 2014: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2015 – Ano base 2015: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2019 – Ano base 2018: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

FRANKEL, D.; OSTROWSKI, K.; PINNER D. The disruptive potential of solar power. McKinsey Quarterly, 2014.

GIRGIS A.; BRAHMA, S. Effect of distributed generation on protective coordination in distribution system. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering Conference, 2001.

GOMES, E. A. P.; VIEIRA JUNIOR, J. C. M.; COURRY, D. V.; DELBEM, A. C. B.. Islanding Detection of Synchronous Distributed Generators using Data Mining Complex Correlations. IET Generation Transmission & Distribution, pp. 3935-3942, 2018.

GOMEZ, J. C.; MORCOS, M. M. Coordination of voltage sag and overcurrent protection in DG systems. IEEE Trans. Power Delivery, 2005.

IEEE, IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Power Systems, Parts 1-4, IEEE Std. C63.92 Parts 1-4, , Published by Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1992.

IEEE, Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, IEEE Std. 929-2000, Published by IEEE, 2000.

IEEE, IEEE 1547 National Standard for Interconnecting Distributed Generation. Published by IEEE, 2003.

IEEE Recommended Practice for Calculating Short Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems, IEEE Standard 551-2006.

JENNETT, K. I.; BOOTH, C. D.; COFFELE F.; ROSCOE, A. J.; Investigation of the sympathetic tripping problem in power systems with large penetrations of distributed generation. IET Generation, Transmission & Distribution, Volume 9, Issue 4, 2015.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Ed. Edgar Blucher. São Paulo. 2005.

KATIRAEI, F.; RAJDA J. “Investigation of Solar PV Inverters Current Contributions during Faults on Distribution and Transmission Systems Interruption Capacity”, Western Protective Relay Conference, October 2012.

KUMPULAINEN, L. K.; KAUHANIEMI, K.T. Analysis of the Impact of Distributed Generation on Automatic Reclosing. Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES.

LIMA, M. Energia Renovável e as Cidades. Connected Smart Cities, São Paulo, 2015.

LISSANDRON S.; SGARBOSSA R.; SANTA L. D.; MATTAVELLI P.; TURRI R.; CERRETTI, A. Impact of Non-Simultaneous P/f and Q/V Grid Code Requirements on PV Inverters on Unintentional Islanding Operation in Distribution Network. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2015.

MCDERMOTT, T.; DUGEN, R. C. Distributed generation impact on reliability and power quality indices. IEEE Rural Electric Power Conference, 2002.

MERLIN, V. L.; SANTOS, R. C.; GRILO, P.; AHDA, P.; VIEIRA, J. C. M.; COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.. A new artificial neural network based method for islanding detection of distributed generators. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, V. 75, pp.139-151, 2016.

METAYER, M; BREYER, C; FELL, H. J. The projections for the future and quality in the past of the world energy outlook for solar PV and other renewable energy. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2015, Hamburg, Germany.

MME – Ministério de Minas e Energia. Portaria PROGD: Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica. Portaria nº 538/2015

MOZINA, C. J. Update on the Current Status of DG Interconnection Protection-What IEEE 1547 Doesn't Tell You About DG Interconnection Protection. Beckwith Electric Co., Inc., Ninth Annual Protection Seminar Sept. 24-28, 2006, Florida, USA.

MULJADI, E.; SINGH, M.; BRAVO, R.; GEVORGIAN, V. Dynamic Model Validation of PV Inverters under Short Circuit Conditions. Green Technologies Conference, 2013 IEEE.

NAGPAL, M.; PLUMPTRE, F.; FULTON, R.; MARTINICH, T. G. Dispersed Generation Interconnection—Utility Perspective. IEEE Trans. Industry Applications, vol. 42, no. 3, pp. 864–872, May-June 2006.

OCHOA, L.F.; PADILHA-FELTRIN, A.; HARRISON, G.P. Evaluating Distributed Generation Impacts with a Multiobjective Index. IEEE Transactions on Power Delivery, V.21, I.3, July 2006.

PEDRINO, E. C.; YAMADA, T.; LUNARDI, T. R.; VIEIRA JUNIOR, J. C. M., Islanding Detection of Distributed Generation by Using Multi-gene Genetic Programming based Classifier, Soft Computing, V.74, pp. 206-215, 2019.

QUIROGA, G. A.; KAGAN, H.; AMASIFEN, J. C. C.; ALMEIDA, C. F. M.; VICENTINI, E. Evaluation of distributed generation impacts on distribution networks under different penetration scenarios, Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015.

QUIROGA, G. A.; KAGAN, H.; AMASIFEN, J. C. C.; ALMEIDA, C. F. M.; VICENTINI, E. Study of the Distributed Generation Impact on Distributed Networks, Focused on Quality of Power, International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016.

QUIROGA, G. A.; ALMEIDA, C. F. M.; KAGAN, H.; KAGAN, N; Protection System Considerations in Networks with Distributed Generation. In AREFI A., LEDWICH G. (eds) Electric Distribution Network Management and Control. Power Systems. Springer, Singapore, 2018.

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Global Status Report, 2019.

RUJULA, A. A. B.; AMADA, J. M.; BERNAL-AGUSTIN, J. L.; LOYO, J. M. Y.; NAVARRO, J. A. D. Definitions for Distributed Generation: A Revision. International Conference on Renewable Energy and Power Quality, 2005

SINAPSIS. SINAPgrid, 2019. Disponível em: <<http://sinapsisenergia.com>> Acesso em 03.09.2019.

SIRSI, R.; DASARATHAN, S. Application of Fault Current Limiter to Limit Distributed Generation Effect on Distance Relay Coordination. Annual IEEE India Conference (INDICON), 2014.

SUJO, P. G.; ASHOK, S.; BANDYOPADHYAY, M. N. Impact of Distributed Generation on Protective Relays. Renewable Energy and Sustainable Energy (ICRESE), 2013.

TRINDADE, F. C. L.; NASCIMENTO, K. V.; VIEIRA, J. C. M.. Investigation on Voltage Sags Caused by DG Anti-Islanding Protection. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 28 , Issue 2 , 2013.

TURCOTTE, D.; KATIRAEI, F. Fault Contribution of Grid-Connected Inverters. IEEE Electrical Power Conference, October 22–23, 2009, Montreal, Quebec, Canada.

VAZIRI, M.; AFZAL, M.; ZARGHAMI, M.; YAZDANI, A.; VADHVA, S.; TAVATLI, F. Voltage Impacts of DG on Distribution Grid with Voltage Regulators and SVCs. Green Technologies Conference, 2013.

VIEIRA, J. C. M.; FREITAS, W.; XU, W.; MORELATO, A. An Investigation on the Nondetection Zones of Synchronous Distributed Generation Anti-Islanding Protection. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, p. 593-600, 2008.

XU, W.; MAUCH, K.; MARTEL, S.. An assessment of Distributed Generation Islanding Detection Methods and Issues for Canada. Report CTEC-Varennnes, Natural Resources Canada, 2004.

ZAMORA, I.; MAZON, A.J.; VALVERDE, V.; MARTIN; J.I.SAN; BUIGUES, G.; DYSKO, A. Influence of power quality on the performance of digital protection relays. IEEE Russia, Power Tech, 2005.