Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEL

Associação Ampla UFSJ / CEFET-MG

Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Alocação de Geradores Distribuídos em Microrredes

Aluno: Fabrício Carlos Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. Wesley Peres

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Aparecido de Assis

São João del-Rei, 16 de dezembro de 2022

Alocação de Geradores Distribuídos em Microrredes

Fabrício Carlos Gonçalves

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Peres

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Aparecido de Assis

São João del-Rei, 16 de dezembro de 2022

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G635a

Gonçalves, Fabrício Carlos .
Alocação de Geradores Distribuídos em Microrredes / Fabrício Carlos Gonçalves ; orientador Wesley Peres ; coorientador Fernando Aparecido de Assis. -- São João del-Rei, 2022.
63 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) -- Universidade Federal de São João del-Rei, 2022.

1. Alocação de Geradores Distribuídos. 2. Microrredes. 3. Operação Ilhada e Conectada. 4. Minimização de Perdas. I. Peres , Wesley, orient. II. de Assis, Fernando Aparecido , co-orient. III. Título.

ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS EM MICRORREDES

Fabrício Carlos Gonçalves

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Apresentada em 16 de dezembro de 2022.

Prof. Dr. Wesley Peres (Orientador)
Universidade Federal de São João del-Rei

Prof. Dr. Fernando Aparecido de Assis (Coorientador)
Universidade Federal de São João del-Rei

Profa. Dra. Isabela Miranda de Mendonça
Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Eduardo Nunes Gonçalves
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Por isso, por amor de Cristo, regozijo-me nas fraquezas, nos insultos, nas necessidades, nas perseguições, nas angústias. Porque, quando sou fraco, é que sou forte.

2 Coríntios 12:10.1

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela Vossa infinita bondade. Por me conceder saúde, sabedoria e paciência. Por me conduzir em segurança pelas estradas da minha casa para UFSJ.

A minha mãe, Lúcia, por acreditar, apoiar e me encorajar desde que eu era criança. Tenho muito orgulho de ser seu filho!

A minha filha Melina, meu agradecimento e desculpas pelas vezes que fiquei tão ausente.

A minha irmã, Mara, pelo colo amigo nos momentos de dificuldades.

Aos amigos, Felipe, Rafael e Arnaldo, pela amizade e companhia nas estradas.

A minha esposa Diane pela compreensão. Pelas vezes que acabei te sobrecarregando nos afazeres de casa.

Ao amigo Guilherme por flexibilizar horários de trabalho na empresa para que eu pudesse realizar uma disciplina no horário diurno.

Aos demais professores e colegas do programa de pós-graduação, pelos ensinamentos.

Aos meus orientadores, Wesley e Fernando, por todas as orientações, disponibilidade e principalmente por não me deixar desistir. Foram verdadeiramente mestres. Ficarão sempre na minha memória!

Sumário

Resumo i

Abstract ii

Lista de Figuras iii

Lista de Tabelas iv

Lista de Siglas v

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO 6

1.1 Considerações Iniciais 6

1.2 Contribuições da Dissertação 7

1.3 Publicação Decorrente da Dissertação 7

1.4 Organização do texto 8

Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9

2.1 Considerações Iniciais 9

2.2 Microrredes 9

2.3 Estruturas das Microrredes 10

2.3.1 Geração Distribuída, Sistema de Armazenamento e Cargas 11

2.3.2 Rede Física para Distribuição da Energia 12

2.3.3 Controles Avançados 13

2.4 Vantagens das Microrredes 13

2.4.1 Econômicos 14

2.4.2 Técnicos 15

2.4.3 Ambientais 15

2.4.4 Sociais 15

2.5 Potenciais Desafios na Implantação das Microrredes 16

2.6 Modos de Operação de Microrredes 16

2.6.1 Operação Conectada à Rede 16

2.6.2 Operação Ilhada 17

2.7 Modelagem do Problema de Alocação de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição 18

2.8 Métodos de Otimização para Solução de Problemas de Alocação de GD 19

2.9 Considerações Finais 22

Capítulo 3 – METODOLOGIA PROPOSTA **24**

3.1 Considerações Iniciais 24

3.2 Visão Geral da Metodologia Proposta 24

3.3 Característica de *Droop* das Unidades de Geração 25

3.4 Modelos de Otimização para Alocação de GD em Microrredes 26

3.4.1 Modelo para Microrrede Ilhada 26

3.4.2 Modelo para Microrrede Conectada à Rede Principal 29

3.5 Solução do Problema de Alocação de GD em Microrredes 30

3.5.1 Tratamento dos Modelos de Otimização 30

3.5.2 Metaheurística Algoritmo Genético 31

3.5.3 Algoritmo Genético Aplicado ao Subproblema de Alocação de GD 32

3.5.3.1 Algoritmo Proposto 32

3.5.3.2 Representação das Soluções 35

3.6 Considerações Finais 36

Capítulo 4 – RESULTADOS **37**

4.1 Considerações Iniciais 37

4.2 Parâmetros Gerais 37

4.3 Microrrede de 33 barras 38

4.3.1 Descrição do Sistema 38

4.3.2 Alocação de GD Considerando o Sistema Ilhado 38

4.3.3 Alocação de GD Considerando o Sistema Conectado à Rede Principal 42

4.3.4 Avaliação da Solução Considerando o Sistema Conectado à Rede Principal 43

4.3.5 Aplicabilidade das Soluções em Ambos os Modos de Operação 46

4.3.6 Análise das Barras Candidatas à Alocação 47

4.4 Microrrede de 69 barras 48

4.4.1 Descrição do Sistema 48

4.4.2 Alocação de GD Considerando ambos os Modos de Operação 49

4.4.3 Avaliação da Solução Ótima Considerando o Sistema Ilhado 50

4.4.4 Avaliação da Solução Considerando o Sistema Conectado à Rede Principal 52

4.4.5 Aplicabilidade das Soluções em ambos os Modos de Operação 53

4.5 Considerações Finais 54

Capítulo 5 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE 55

5.1 Considerações Finais 55

5.2 Propostas de Continuidade 56

Referências Bibliográficas 57

Resumo

Esse trabalho apresenta uma metodologia para a alocação de geradores distribuídos em microrredes em ambos os modos de operação, ilhado e conectado à rede principal. A metodologia é formulada como um problema de programação não linear inteira mista, que é dividido em dois subproblemas na etapa de solução: um de planejamento e outro de operação. O subproblema de planejamento é resolvido através do Algoritmo Genético para tratamento das variáveis inteiras do problema (associado à alocação ou não de geradores nas barras). O subproblema de operação é resolvido por um Fluxo de Potência Ótimo (FPO) para minimização de perdas elétricas considerando restrições de balanço de potência, tensões nodais e geração de potência (ativa, reativa e aparente). Ademais, quando a microrrede opera ilhada, consideram-se também as variáveis da curva de *droop* das unidades bem como a frequência da microrrede em regime permanente no FPO. A fim de avaliar o desempenho da metodologia proposta, o problema de alocação é resolvido para duas microrredes da literatura (com 33 e 69 barras) tanto para a operação ilhada quanto conectada e, com base no resultado obtido, busca-se uma solução de compromisso que atenda ambos os modos de operação.

Palavras-chave: Alocação de Geradores Distribuídos; Microrredes; Operação Ilhada e Conectada; Minimização de Perdas.

Abstract

This work presents a methodology to place optimally distributed generators in islanded and grid-connected microgrids. The method considers a mixed-integer nonlinear problem with two subproblems in the solution stage: planning and operation. The Genetic Algorithm resolves the planning subproblem to handle the discrete variables associated with the generator placement at the system nodes. An Optimal Power Flow (OPF) solves the operation subproblem to minimize the power losses, considering the power balance constraints and limits for nodal voltages and generation powers. Additionally, for the islanded operation, the droop characteristic of generators and the steady-state frequency of the microgrid are considered in the OPF. Finally, to evaluate the performance of the proposed methodology, the problem is solved for two microgrids from the literature (33 and 69 bus systems) for both operating modes to identify suitable solutions for islanded and grid-connected operation.

Keywords: Distributed Generation Allocation; Microgrids; Islanded and Grid-Connected Operation; Power Losses Minimization.

Lista de Figuras

Figura 1: Estrutura geral de uma microrrede. Fonte: (Falcão, 2009, adaptado). 10
Figura 2: Ilustração da característica de *droop*. 25
Figura 3: Fluxograma de etapas do AG para alocação de GD em microrredes. 34
Figura 4: Sistema ilustrativo para representação das soluções do AG. 36
Figura 5: Microrrede ilhada de 33 barras. 38
Figura 6: Comparações entre as soluções (sistema de 33 barras ilhado). 40
Figura 7: Magnitude das tensões nodais (sistema de 33 barras ilhado). 41
Figura 8: Potência ativa, reativa e aparente gerada (sistema de 33 barras ilhado). 42
Figura 9: Magnitude das correntes nos ramos (sistema de 33 barras ilhado). 42
Figura 10: Magnitude das tensões nodais (sistema de 33 barras conectado). 44
Figura 11: Potência ativa, reativa e aparente gerada com Solução 1 (sistema de 33 barras conectado). 45
Figura 12: Potência ativa, reativa e aparente gerada com Solução 2 (sistema de 33 barras conectado). 45
Figura 13: Magnitude das correntes nos ramos (sistema de 33 barras conectado). 46
Figura 14: Microrrede ilhada de 69 barras. 48
Figura 15: Comparação das soluções para 10 execuções (sistema de 69 barras). 50
Figura 16: Magnitude das tensões nodais (sistema de 69 barras ilhado). 51
Figura 17: Magnitude das correntes nos ramos (sistema de 69 barras ilhado). 51
Figura 18: Magnitude das tensões nodais (sistema de 69 barras conectado). 52
Figura 19: Magnitude das correntes nos ramos (sistema de 69 barras conectado). 53

Lista de Tabelas

Tabela 1: Limites das variáveis. 37
Tabela 2: Caso 1 – número de gerações igual a 50 (sistema de 33 barras ilhado). 39
Tabela 3: Caso 2 - número de gerações igual a 60 (sistema de 33 barras ilhado). 39
Tabela 4: Solução Ótima Global (Busca Exaustiva). 39
Tabela 5: Comparativo do tempo computacional. 39
Tabela 6: Perdas de potência ativa e frequência. 40
Tabela 7: Coeficientes de *droop* ajustados e *setpoints* (frequência e tensão a vazio). 41
Tabela 8: Caso 3 - 40 indivíduos e 60 gerações (sistema de 33 barras conectado). 43
Tabela 9: Perdas de potência ativa (sistema de 33 barras conectado). 44
Tabela 10: Potências absorvidas da rede e geradas (sistema de 33 barras conectado). 44
Tabela 11: Avaliação das soluções em ambos os modos de operação. 47
Tabela 12: Combinações das soluções (sistema de 33 barras). 47
Tabela 13: Alocação de geradores para o sistema operando ilhado. 49
Tabela 14: Alocação de geradores para o sistema operando conectado à rede principal. 49
Tabela 15: Melhor solução (sistema 69 ilhado). 50
Tabela 16: Geração de potência na solução 1 (sistema de 69 barras ilhado). 50
Tabela 17: Coeficientes de *droop* ajustados e *setpoints* – solução 1 (frequência e tensão a vazio). 50
Tabela 18: Geração de potência na solução 2 (sistema de 69 barras ilhado). 51
Tabela 19: Coeficientes de *droop* ajustados e *setpoints* – solução 2 (frequência e tensão a vazio). 52
Tabela 20: Perdas de potência ativa (sistema de 69 barras conectado). 52
Tabela 21: Potências absorvidas da rede e geradas (sistema de 69 barras conectado). 53
Tabela 22: Avaliação das soluções em ambos os modos de operação (sistema de 69 barras). ... 53

Lista de Siglas

GD – Geração Distribuída

AG – Algoritmo Genético

FPO – Fluxo de Potência Ótimo

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

PCC – Ponto de Conexão Comum

CGMR – Centro de Gerenciamento da Microrrede

CHP – Combinação de Calor e Energia

VE – Veículo Elétrico

REDs – Recursos Energéticos Distribuídos

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

HFAC – *High-Frequency Alternate Current*

VSI – *Voltage Source Inverters*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ECM – *Empirical Continuous Metaheuristic*

PSO – *Particle Swarm Optimization*

GWO – *Gray Wolf Optimizer*

SA – *Simulated Annealing*

DE – *Differential Evolution*

FPO – Fluxo de Potência Ótimo

SAE – Sistema de Armazenamento de Energia

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Microrredes são sistemas de baixa e média tensão, podendo operar em corrente alternada, contínua ou híbrida. São compostos por unidades de geração distribuídas (GD) despacháveis (como as baseadas em microturbinas a gás) ou não despacháveis (como as renováveis), sistemas de armazenamento de energia (SAE), cargas controláveis ou não controláveis e sistemas de controle.

As microrredes podem operar em dois modos distintos: conectado à rede principal ou ilhado. Quando operando conectada à rede principal, a frequência da microrrede é mantida pela rede no valor nominal (60 ou 50 Hz) e os geradores (despacháveis ou não) operam no modo PQ, isto é, injetando um determinado valor de potência na rede. Nesse caso, a rede principal efetua o balanço de potência, suprindo as variações de carga e perdas.

Por outro lado, na operação ilhada (seja momentânea ou não), a ausência da conexão com a rede faz com que o controle de frequência e tensão seja realizado dentro da própria microrrede, o que impõe características importantes para a sua operação. Nesse caso, os geradores despacháveis (isto é, com despacho controlado) operam no modo *droop*, compartilhando as variações de potência conforme suas características $P - f$ e $Q - V$. Por outro lado, os geradores não despacháveis (como os eólicos e painéis fotovoltaicos), operam no modo PQ injetando um valor de potência na microrrede. Devido à essas características, a frequência da microrrede pode ser diferente da nominal e, quanto maior o valor da carga, maior o desvio negativo de frequência. Paralelamente, diante de um excesso de energia renovável, um desvio positivo de potência ocorre.

Por permitirem um suprimento localizado das cargas, as microrredes trazem uma série de benefícios sociais, técnicos, econômicos e ambientais. Entretanto, deve-se atentar para um planejamento adequado desses sistemas e, nesse contexto, a alocação ótima de geradores despacháveis é importante para a minimização das perdas elétricas e manutenção das grandezas elétricas dentro das faixas permitidas. Embora o problema de alocação de geradores distribuídos em sistemas de distribuição esteja bem consolidado

na literatura, cita-se que a alocação de geradores em microrredes ilhadas é um tema relativamente novo.

1.2 Contribuições da Dissertação

A presente dissertação apresenta um problema de otimização não linear inteira mista para a alocação de geradores distribuídos visando à minimização de perdas de potência ativa em microrredes de corrente alternada operando ilhadas ou conectadas à rede principal. O problema é desacoplado em dois subproblemas: o de planejamento e o de operação. O subproblema de planejamento é resolvido pelo Algoritmo Genético que trata as variáveis discretas associadas à alocação ou não de geradores em barras do sistema. O subproblema de operação é resolvido por um Fluxo de Potência Ótimo (FPO) que trata as variáveis contínuas tais como tensões nodais e potências geradas. No caso da operação ilhada, o FPO também considera as variáveis da curva de *droop* dos geradores despacháveis ($P - f$ e $Q - V$) e a frequência da microrrede em regime permanente. Ressalta-se que a metodologia proposta é aplicável em etapas iniciais do problema de planejamento e não considera aspectos dinâmicos (resposta transitória), os quais devem ser considerados em etapas posteriores.

Assim sendo, o objetivo geral da presente dissertação é resolver o problema de alocação de geradores distribuídos em microrredes ilhadas ou conectadas à rede principal. Como objetivos específicos, citam-se:

i. a análise das características de reprodutibilidade do Algoritmo Genético para um conjunto de soluções;
ii. a identificação de uma solução adequada que minimize as perdas em ambos os modos de operação. Isso é importante porque são feitas alocações distintas para cada modo de operação e, a melhor solução na operação ilhada pode não ser aquela para a operação conectada (e vice-versa). Nesse sentido, como uma importante contribuição da dissertação, é feita uma análise posterior das soluções após a solução do Algoritmo Genético visando definir uma solução única para ambos os modos de operação.

1.3 Publicação Decorrente da Dissertação

No decorrer da pesquisa o seguinte trabalho foi aceito e publicado:

- Fabrício C. Gonçalves, Wesley Peres, Fernando A. Assis, Francisco C. R. Coelho, Bruna C. Ferreira, e Raphael P. B. Poubel, "Alocação Ótima de Geradores Distribuídos em Microrredes Ilhadas Considerando Controle *Droop* de Frequência". Apresentado e publicado nos anais do XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2021. DOI: 10.20906/sbai.v1i1.2747.

1.4 Organização do texto

O presente trabalho, além desse capítulo introdutório, é composto de mais 4 capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão dos conceitos de microrredes bem como do problema de alocação de geradores distribuídos em sistemas de distribuição. O Capítulo 3 apresenta o problema de otimização proposto bem como a estratégia utilizada para a sua solução. Os resultados para duas microrredes da literatura, com 33 e 69 barras, são apresentados no Capítulo 4. Por fim, as conclusões e as propostas de continuidade são apresentadas no Capítulo 5.

Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são discutidos conceitos relativos ao problema de alocação de fontes de geração em microrredes. São apresentados fundamentos teóricos e trabalhos que serviram de base para o desenvolvimento desta dissertação. Inicialmente, são explorados os conceitos gerais de microrrede, como os tipos de estruturas, os principais componentes e seus benefícios para o sistema e para os consumidores. Posteriormente, os modos de operação das microrredes são discutidos. Por fim, são apresentados os principais objetivos e restrições comumente considerados no problema de alocação e dimensionamento de Geração Distribuída (GD), bem como os métodos de otimização existentes para solução deste problema.

2.2 Microrredes

Nos últimos anos, o setor elétrico tem passado por contínuas transformações causadas, principalmente, pelas evoluções tecnológicas e pelas mudanças da sociedade, com novas preocupações em relação à sustentabilidade. Essas transformações envolvem, por exemplo, alterações regulatórias e a abertura do mercado para a implementação de mecanismos de concorrência, com novos formatos para modelos de negócio, o que cria condições mais favoráveis para participação de pequenos produtores de energia. Dentre as novas tecnologias que vêm fazendo parte do setor, destaca-se a GD. A GD constitui, basicamente, um meio de produção de energia elétrica em menor escala e localizada mais próxima ao consumidor, que favorece o direcionamento da demanda e a exploração de fontes renováveis. E com a presença cada vez mais acentuada de elementos de GD nos sistemas de distribuição, cria-se um ambiente propício para a formação de microrredes (MUMTAZ e BAYRAM, 2017).

Uma microrrede pode ser definida como uma rede de baixa tensão, de pequena escala (no lado da distribuição), formada por um conjunto de Recursos Energéticos Distribuídos (REDs), como os elementos de GD, Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) e as cargas. No contexto de microrredes de classe residencial, as cargas

podem ser classificadas como não controláveis ou controláveis. O primeiro tipo de carga refere-se aos equipamentos elétricos que não permitem o deslocamento de sua utilização durante o dia. Isto ocorre com equipamentos que apresentam comportamento cíclico ou contínuo, bem como com aqueles cuja alteração dos horários de utilização é inviável para o consumidor. As cargas controláveis, por sua vez, correspondem aos equipamentos elétricos cujos horários de utilização podem ser modificados sem alteração ou prejuízo da sua utilidade para os consumidores (MARNAY, RUBIO e SIDDIQUI, 2001). As microrredes podem operar independentemente no modo de operação ilhado (autônomo) ou em conjunto com o sistema principal no modo de operação conectado à rede (LOPES, MOREIRA e MADUREIRA, 2006).

2.3 Estruturas das Microrredes

As configurações das microrredes podem diferir muito umas das outras. Todavia, alguns elementos estão presentes em qualquer uma delas, independentemente de suas arquiteturas (SOUZA JÚNIOR e DE FREITAS, 2020). Os elementos podem ser agrupados da seguinte forma: (i) geração, sistema de armazenamento e cargas; (ii) rede física para distribuição; e (iii) controles avançados (SOSHINSKAYA, CRIJNS-GRAUS, *et al.*, 2014). Esses elementos são apresentados resumidamente nesta seção.

A configuração típica de uma microrrede é mostrada na Figura 1, na qual se destacam o Ponto de Acoplamento Comum (PAC), ou Ponto de Conexão Comum (PCC), que conecta a microrrede com a rede de distribuição cumprindo funções de ilhamento ou reconexão, e o Centro de Gerenciamento da Microrrede (CGMR), onde se executa o controle da microrrede (MUMTAZ e BAYRAM, 2017), (FALCÃO, 2009).

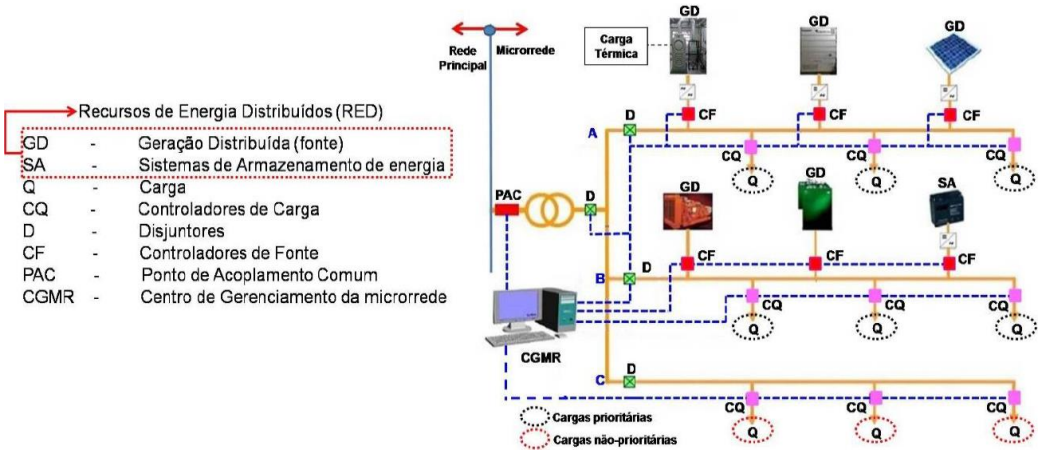

Figura 1: Estrutura geral de uma microrrede.
Fonte: (Falcão, 2009, adaptado).

A seguir são descritos os grupos que constituem a configuração típica de uma microrrede.

2.3.1 Geração Distribuída, Sistema de Armazenamento e Cargas

As unidades de GD são a base das microrredes, responsáveis por fornecer a energia para atender a necessidade do consumidor. Além disso, representam uma geração de energia mais eficiente em comparação com a rede principal. As opções de geração de energia renovável (não controlável) incluem energia solar fotovoltaica, turbinas microeólica, células de combustível e micro-hidrelétricas. As GDs convencionais controláveis e de alta eficiência incluem motores de combustão interna, geradores a diesel e modernas combinações de calor e energia, que podem até ser abastecidas localmente produzindo biomassa ou metano em vez de gás natural como uma opção mais limpa (SOSHINSKAYA, CRIJNS-GRAUS, *et al.*, 2014).

Já os dispositivos do SAE representam recursos que podem auxiliar de forma expressiva a operação de uma microrrede, porque a geração de energia das unidades de GD pode não ser perfeitamente compatível com demandas de carga. Portanto, o SAE melhora o desempenho geral da microrrede atuando como uma ponte ou reserva para atender a demanda do consumidor. Essas opções de armazenamento incluem opções de alta tecnologia, como baterias, volantes, capacitores de energia, ar comprimido e armazenamento hidrelétrico bombeado, ou soluções de tecnologia relativamente baixa, como água gelada ou armazenamento de gelo. Os Veículos Elétricos (VE) também são vistos como uma opção de SAE alternativo para, por exemplo, armazenar energia à noite, quando a demanda e o custo da eletricidade são baixos. Essas opções de armazenamento permitem o aproveitamento contínuo das unidades de GD, apesar das flutuações de carga. Isso mitiga a intermitência de fontes de energia primárias renováveis, operando como unidades despacháveis para fornecer potência requerida (SOSHINSKAYA, CRIJNS-GRAUS, *et al.*, 2014).

Por sua vez, as cargas em microrredes são componentes que consumem energia (elétrica ou térmica) e são classificadas como: (i) prioritárias, críticas ou sensíveis, cujo fornecimento de energia deve ser quase contínuo e com determinada qualidade, principalmente, no modo ilhado, e (ii) não prioritárias ou não críticas que, eventualmente e, por qualquer motivo, podem deixar de receber energia (LASSETER, AKHIL, *et al.*, Apr. 2002), (HATZIARGYRIOU, ASANO, *et al.*, 2007). Esta

classificação da carga permite planejar a estratégia de operação da microrrede, pois oferece uma maior flexibilidade entre oferta e demanda, reduz a máxima demanda, otimiza a operação dos REDs, melhora a qualidade e confiabilidade da energia às cargas prioritárias, permite conhecer a energia importada/exportada à rede principal e estabiliza tensão e frequência facilitando a limitação da carga/geração quando da operação no modo ilhado (LIDULA e RAJAPAKSE, 2011).

2.3.2 Rede Física para Distribuição da Energia

As redes físicas conectam e distribuem a energia entre os diversos componentes da microrrede. Elas podem ser aéreas ou subterrâneas, sendo conectadas ao PAC, local onde acontece a sincronização da microrrede com a rede elétrica e que corresponde à interface composta por elementos de medição local, proteção e conjunto de componentes capazes de realizar a desconexão da microrrede e das GDs (diferentes tipos de relés, disjuntores e religadores) (PINZÓN, 2015).

A operação das redes físicas da microrrede é similar às redes de distribuição, porém, em menor escala, devendo também possuir diversos dispositivos de proteção e segurança, tanto para equipamentos como para as pessoas e animais. A princípio, as microrredes poderiam ser utilizadas em qualquer dos três tipos de configuração comumente utilizadas na distribuição: radial, malha ou reticulada (BELLIDO, 2018).

Segundo (USTUN, OZANSOY e ZAYEGH, 2011), basicamente a energia pode ser distribuída das seguintes formas:

- Distribuição em CC: ainda não populares, pesquisas ao seu respeito estão adquirindo maior importância (MANANDHAR, UKIL e JONATHAN, 2015);
- Distribuição em CA: sistema convencional, dependendo da energia gerada, microrredes podem ser conectadas a um barramento comum;
- Distribuição em CA de alta frequência (HFAC): nesta configuração é utilizada um barramento de corrente alternada, porém com frequência superior à da rede convencional de distribuição. Os REDs são acoplados a um barramento comum, dispositivos eletrônicos de potência convertem a frequência da energia gerada a 400/600 Hz em CA e a transmitem para a

carga, onde um conversor CA/CA converte a energia em 60 Hz CA novamente (CHAKRABORTY, WEISS e SIMÕES, 2007).

2.3.3 Controles Avançados

Os recursos avançados de conversão eletrônica de energia e controle são necessários para integrar a comunicação entre todos os componentes em um sistema coordenado de gerenciamento de microrredes. Permitindo operar e controlar ativamente as unidades de GD em conjunto com unidades de SAE e cargas controláveis (SOSHINSKAYA, CRIJNS-GRAUS, *et al.*, 2014).

O controle da microrrede deve assegurar a operação confiável e econômica do sistema, sempre mantendo o balanço de potência. Neste sentido:

- as potências ativa e reativa devem ser transferidas de maneira adequada, mantendo o sistema estável;
- os processos de conexão e desconexão devem funcionar sem falhas;
- a produção de energia das diferentes fontes deve ser otimizada para melhorar a sua participação no despacho;
- as cargas devem ser classificadas segundo a sua prioridade;
- o controle deve ter a capacidade de iniciar o sistema partindo do zero (conceito conhecido como *black start*) no caso de falha geral.

Além disso, o sistema de controle também deve garantir a transição suave entre os modos de operação quando for necessário (PALIZBAN, KAUHANIEMI e GUERRERO, 2014), (OLIVARES, MEHRIZI-SANI, *et al.*, 2014).

2.4 Vantagens das Microrredes

A utilização de unidades de GD possibilita às microrredes uma série de vantagens e benefícios, tanto aos consumidores quanto às distribuidoras de energia. Esses benefícios são potencializados com a integração de sistemas de armazenamento de energia e centrais de controle, capacitando a microrrede a extrair o máximo de energia e usufruí-la da melhor maneira (DA SILVEIRA, 2021).

Os benefícios obtidos a partir da operação de uma microrrede podem ser sumarizados de acordo com cada parte interessada, abrangendo os consumidores,

operador da rede e distribuidora (BELLIDO, ROSA, *et al.*, 2018), (HUAYLLAS, 2015) e (HATZIARGYRIOU, 2013):

- **Consumidor:** a microrrede realça a confiabilidade local, reduz emissões de gases poluentes, melhora a qualidade de energia reduzindo quedas de tensão e, potencialmente, reduz custos de fornecimento de energia;
- **Operador da rede**: uma microrrede pode ser considerada como uma única entidade controlável dentro do sistema de potência. Ela pode prover desde melhoras técnicas, até ambientais e sociais, e em comparação com semelhantes microfontes, uma microrrede oferece máxima flexibilidade em termos de constituição de propriedade, permite a otimização global da eficiência da rede e mostra-se como a melhor solução para motivar consumidores finais através de uma plataforma comum;
- **Distribuidora:** as microrredes, através de suas fontes locais de geração, podem reduzir a demanda pelas instalações da transmissão e distribuição. Dessa forma, encontram-se dois importantes efeitos: redução de perdas e habilidade para substituir os ativos da rede. Além disso, a presença da geração perto da demanda pode melhorar a qualidade do serviço vista pelos consumidores finais, ao passo que microrredes podem fornecer suporte à rede em tempos de estresse, auxiliando em restaurações pós-faltas. Por outro lado, sua presença representa uma alteração na estrutura tradicional das redes de distribuição, o que aumenta a complexidade das tarefas de gerenciamento, planejamento, operação e manutenção.

As vantagens podem também ser categorizadas em benefícios econômicos, técnicos, ambientais e sociais na visão de alguns autores, conforme discutido nas subseções a seguir.

2.4.1 Econômicos

Entre os benefícios econômicos existentes, podem ser citados (CHIRADEJA e RAMAKUMAR, 2004):

- Adiamento dos investimentos de atualização das instalações;
- Redução dos custos de operação e administração de algumas tecnologias de GD;

- Redução dos custos de combustível devido ao aumento de eficiência global;
- Redução das necessidades de reserva e de seus custos associados;
- Redução dos custos operacionais devido à supressão dos picos de potência;
- Maior segurança para cargas críticas.

2.4.2 Técnicos

Entre os benefícios técnicos existentes, podem ser citados (CHIRADEJA e RAMAKUMAR, 2004):

- Atenuação das perdas associadas às linhas de transmissão;
- Melhoria no perfil de tensão do sistema elétrico;
- Aumento da eficiência energética global;
- Melhoria nos índices de confiabilidade do sistema elétrico;
- Ampliação da qualidade do fornecimento de energia;
- Alívio do congestionamento do sistema de transmissão e distribuição.

2.4.3 Ambientais

Em relação a esse aspecto, pode-se citar um menor impacto em relação à geração convencional, devido a energia ser preferencialmente provida por fontes renováveis. A tecnologia de microrredes traz diversos benefícios em consonância com estas preocupações da sociedade atual. Essas permitem menor emissão de gases poluentes, maior eficiência por meio de cogeração e plantas de aproveitamento de calor residual (MENDONÇA, 2011).

2.4.4 Sociais

Os principais benefícios sociais das microrredes são a conscientização do público e incentivo à economia de energia, a redução de emissões e a energização de áreas remotas ou subdesenvolvidas onde não existem linhas de distribuição (HATZIARGYRIOU, 2013).

Além desses benefícios, as microrredes agregam valor econômico à sociedade de várias maneiras. Primeiramente, elas reduzem as perdas de produção ou produtos durante quedas de energia. Segundo, permitem o desenvolvimento de uma região,

atraindo empregadores. E por último, como usinas locais, apresentam a necessidade de operadores e manutenções, o que gera e mantém empregos. Outro benefício claro proposto pelas microrredes é a melhora no bem-estar social. Devido à alta resiliência e confiabilidade, a região atendida pela microrrede se torna uma "ilha de poder". Assim, em caso de problemas na rede principal, a região se torna um local de refúgio, onde membros da comunidade podem encontrar os serviços comerciais operando normalmente (CHOWDHURY, CHOWDHURY e CROSSLEY, 2009), (MARKETS, 2014).

2.5 Potenciais Desafios na Implantação das Microrredes

Os seguintes potenciais desafios podem ser citados (CHOWDHURY, CHOWDHURY e CROSSLEY, 2009):

- Custos elevados dos REDs – Por possuírem escala reduzida, o custo de instalação é maior do que os sistemas de grande porte;
- Dificuldades técnicas e operacionais – Dificuldade em integrar e controlar um grande número de REDs na rede distribuição;
- Ausência de procedimentos de rede – Pelo fato de o assunto ser relativamente novo, ainda não há procedimentos de rede para tratar da operação e questões de proteção;
- Barreiras administrativas e jurídicas – Na maioria dos países nenhuma legislação ou regulamento padrão está disponível para regular o funcionamento das microrredes;
- Monopólio de mercado – Se as microrredes estão autorizadas a fornecer energia de forma autônoma para as cargas prioritárias durante qualquer contingência da rede principal, uma questão que se coloca é quem irá controlar os preços nesta situação.

2.6 Modos de Operação de Microrredes

2.6.1 Operação Conectada à Rede

Neste formato de operação, a dinâmica do sistema é determinada pela rede principal devido ao tamanho comparativamente pequeno das microrredes (MUMTAZ e BAYRAM, 2017). A microrrede possui a capacidade de realizar o fluxo bidirecional de

potência, ou seja, importar ou injetar energia ativa, além de oferecer suporte de energia reativa à rede principal, podendo controlar a tensão local (HUAYLLAS, 2015).

Do ponto de vista da distribuidora, a microrrede pode ser vista como uma única entidade controlável, ou seja, uma única carga agregada a rede de distribuição. Dessa forma, existe maior facilidade em realizar o controle e na compatibilidade com os regulamentos das redes usuais de distribuição (CHOWDHURY, CHOWDHURY e CROSSLEY, 2009). Ela permite à rede maior flexibilidade, controle e confiabilidade.

De forma geral, quando conectada à rede, a microrrede obedecerá às caraterísticas do sistema principal, ou seja, ao nível de tensão e frequência da rede de distribuição (LIDULA e RAJAPAKSE, 2011).

2.6.2 Operação Ilhada

Uma microrrede pode operar ilhada (ou isolada) em duas situações: (i) quando ocorre um distúrbio e esta é desconectada da rede principal (logo ocorrerá a reconexão após o tempo de reparo); e (ii) quando esta foi projetada para operar de forma isolada permanentemente (desconexão voluntária). Em ambas as situações é importante garantir uma operação viável (respeitando limites de frequência e de tensão) e econômica (com mínimo custo e mínimas perdas de potência) (FOROUTAN, MORADI e ABEDINI, 2016), (HEMMATPOUR, MOHAMMADIAN e GHARAVEISI, 2016).

No modo ilhado, as cargas da microrrede são supridas por gerações locais (geradores síncronos, painéis fotovoltaicos, geradores eólicos etc.) e pelo SAE. Uma característica importante da microrrede é que os recursos de energia (geração e armazenamento) são conectados à rede através dos Inversores Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverters* - VSI), capazes de prover flexibilidade para a operação da microrrede em modo ilhado ou conectado à rede principal (MILANO, 2010).

Na operação ilhada, os conversores VSI emulam o comportamento de *droop* de frequência adotado no controle primário de frequência de geradores síncronos. Ou seja, diante de uma variação de carga, todas as unidades de geração ajustam suas potências terminais de forma a suprir a nova demanda. Considerando a característica de *droop*, a frequência no novo ponto de operação pode diferir do valor nominal de 50 Hz ou 60 Hz (LA GATTA, PASSOS FILHO e PEREIRA, 2019).

2.7 Modelagem do Problema de Alocação de Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição

O posicionamento e o dimensionamento das unidades de GD são fatores que impactam diretamente na operação viável e econômica das microrredes. Quando realizados de forma otimizada, permitem realçar os benefícios dessas redes, conforme discutido na Seção 2.4. Quando se trata de redes de distribuição de energia elétrica, o problema de alocação e dimensionamento dessas unidades (microgeração) já é bem estabelecido na literatura (COELHO, PERES, *et al.*, 2020), (DIAS, OLIVEIRA, *et al.*, 2012), (GEORGILAKIS e HATZIARGYRIOU, 2013) e (ZHANG, MING e LUYAO, 2019). Ressalta-se, neste ponto, que os modelos e as técnicas para alocação de unidades de GD em sistemas de distribuição podem ser aplicáveis às microrredes conectadas ao sistema principal ou ilhadas, conforme esforços apresentados nesta seção.

Na referência (ZHANG, MING e LUYAO, 2019), por exemplo, é apresentado um modelo de dimensionamento e localização de GD e SAEs para o projeto de uma microrrede econômica e confiável considerando veículos elétricos (VEs). O modelo proposto explora o despacho coordenado de energia de GD, SAE e VEs, visando otimizar o planejamento geral e custo operacional, bem como atender aos requisitos de confiabilidade do fornecimento de energia.

Um problema de Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP) aplicável a uma microrrede baseada em *droop* é proposto em (GUPTA, DOOLLA, *et al.*, 2021) para alcançar o compartilhamento de potência reativa proporcional entre GDs, mantendo perdas de linha baixas. São investigados neste trabalho o dimensionamento e o posicionamento ótimos de GDs. A formulação proposta foi testada em uma rede de 33 barras que foi modificada para representar uma microrrede ilhada.

Um problema de otimização MILP é formulado em (GUPTA, NELLIKKATH, *et al.*, 2021) para reduzir as perdas de energia da rede de uma microrrede ilhada controlada por *droop* pela aplicação de um despacho volt-VAr no dia seguinte e reconfiguração da rede.

É possível perceber que diferentes objetivos podem ser considerados nos modelos de alocação e dimensionamento de GD. Resumidamente, os seguintes objetivos podem ser encontrados na literatura relacionada:

a) **Objetivos Técnicos:** minimização de perdas de potência ativa (LEE e PARK, 2013), perdas de potência reativa (HIEN, MITHULANANTHAN e BANSAL, 2013), perda diária de energia (AL-SABOUNCHI, GOW e AL-AKAIDI, 2014), perda anual de energia (HUNG, MITHULANANTHAN e LEE, 2014), perda total de energia (AL-SABOUNCHI, GOW, *et al.*, 2011) e melhoria no perfil de tensão (MUTTAQI, LE, *et al.*, 2014);

b) **Objetivos Econômicos:** minimização de custos de operação (EL-KHATTAM, HEGAZY e SALAMA, 2005) e manutenção de GD (PHONRATTANASAK, MIYATAKE e SAKAMOTO , 2013).

Em relação às restrições do problema de otimização gerado pelo dimensionamento e alocação de GD em sistemas de distribuição, tem-se:

a) Balanço de Potência Ativa (GAUTAM e MITHULANANTHAN, 2007);
b) Balanço de Potência Reativa (HIEN, MITHULANANTHAN e BANSAL, 2013);
c) Qualidade de energia (ABDELSALAM e EL-SAADANY , 2013);
d) Perfil de tensão (HIEN, MITHULANANTHAN e BANSAL, 2013);
e) Limite térmico da linha (POPOVIć, GREATBANKS, *et al.*, 2005);
f) Capacidade do transformador de subestação (KEANE e O'MALLEY, 2005);
g) Número de GD (HUNG, MITHULANANTHAN e LEE, 2014);
h) Tamanho da GD (ABU-MOUTI e EL-HAWARY, 2011);
i) Penetração máxima de unidades híbridas de GD (ABDELSALAM e EL-SAADANY , 2013).

2.8 Métodos de Otimização para Solução de Problemas de Alocação de GD

Diferentes técnicas de otimização podem ser empregadas para solução do problema de alocação e dimensionamento de GDs em sistemas de distribuição e, por consequência, nas microrredes elétricas. A depender da metodologia adotada, e do modelo definido, essas técnicas podem ser classificadas, por exemplo, como de

otimização clássica, baseadas em inteligência e híbridas. De acordo com essa classificação, os seguintes modelos e técnicas podem ser encontrados na literatura para a alocação de GD em sistemas de distribuição (ou em microrredes):

- **Clássicos:** Algoritmos Analíticos (*Analytical Algorithms* - AA) (GÖZEL e HOCAOGLU, 2009), Programação Linear (*Linear Programming* - LP) (KEANE e O'MALLEY, 2005), Programação Não-Linear (*Non-linear Programming* - NLP) (WU, GROSS, *et al.*, 1979), Programação Linear Inteira Mista (MILP) (RIDER, LÓPEZ-LEZAMA, *et al.*, 2013), Programação Não-Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Non-linear Programming* - MINLP) (EL-KHATTAM, HEGAZY e SALAMA, 2005).
- **Inteligência:** Evolução Diferencial (*Differential Evolution* - DE) (KUMAR, MANDAL e CHAKRABORTY, 2019), Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* - SA) (KIRKPATRICK, GELLAT e VECCHI, 1983), Busca Harmônica (*Harmony Search* - *HS*) (GEEM, KIM e LOGANATHAN, 2001), Programação Evolutiva (*Evolutionary Programming* - EP) (KHATOD, PANT e SHARMA, 2013), Algoritmo do Lobo Cinzento (*Grey Wolf Optimizer* - GWO) (AHMADI, CEYLAN e OZDEMIR, 2019), Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm* - GA) (SILVESTRI, BERIZZI e BUONANNO, 1999), Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optmization* - PSO) (KENNEDY e EBERHART, 1995), Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization* - ACO) (DORIGO, BIRATTARI e STÜTZLE, 2006), Colônia Artificial de Abelhas (*Artificial Bee Colony* - ABC) (KARABOGA, 2005), Busca Cuckoo (*Cuckoo Search* - CS) (DORIGO, BIRATTARI e STÜTZLE, 2006) e Método dos Vagalumes (Firefly Method - FFM) (YANG, 2010).
- **Híbridos:** Algoritmo Genético e Recozimento Simulado (GASA) (CROSSLAND, JONES e WADE, 2014), Algoritmo Genético e Enxame de Partículas (GAPSO) (MORADI e ABEDINI, 2012), Algoritmo Genético e Fluxo de Potência Ótimo (GAOPF) (HARRISON, PICCOLO, *et al.*, 2008), Otimização de Enxame de Partícula e Fluxo de Potência Ótimo (PSOOPF) (GOMEZ-GONZALEZ, LÓPEZ e JURADO, 2012).

Ênfase pode ser dada ao uso de metaheurísticas, que são estratégias de otimização de inteligência bastante comuns para a solução do problema de alocação e

dimensionamento de equipamentos em sistemas elétricos de potência. Basicamente, as metaheurísticas são técnicas que coordenam estratégias (heurísticas) de busca local e de busca global para identificar soluções de boa qualidade (podendo ser ótimas) em espaços de soluções complexas. Essas técnicas apresentam relativa facilidade de implementação quando comparadas às técnicas clássicas de otimização, necessitando de um menor nível de ajustes para solução de diferentes problemas.

Os algoritmos de otimização baseados em metaheurísticas são ferramentas úteis para a resolução de problemas complexos na área de planejamento e operação de microrredes. A alocação de geradores de energia tem sido alvo de inúmeros estudos que utilizam diferentes técnicas de otimização. Podem ser destacadas, por exemplo, as técnicas GA, ACO, GWO, ABC e PSO. Algumas aplicações dessas técnicas são descritas a seguir.

A técnica AG é aplicada em (SILVESTRI, BERIZZI e BUONANNO, 1999) para alocação de GD em sistema de distribuição de média tensão. Busca-se neste trabalho encontrar soluções que permitam minimizar, simultaneamente, as perdas no sistema e os custos de produção de energia e de investimento na rede. Em (ZAKARIA, SWIEF, *et al.*, 2020), as técnicas AG e ACO são combinadas para identificar soluções otimizadas para a alocação de GD. A função objetivo do trabalho baseia-se em um modelo linearizado capaz de calcular as perdas de potência ativa em função da potência fornecida pelos geradores. Esta estratégia baseia-se em um forte acoplamento entre potência ativa e fluxo de potência levando em consideração os ângulos de tensão.

Um algoritmo inspirado na técnica GWO é proposto e utilizado em (AHMADI, CEYLAN e OZDEMIR, 2019) como ferramenta de solução para o problema de localização e o dimensionamento ideais do recurso de energia renovável distribuído para manter a magnitude da tensão em sistemas de distribuição dentro dos limites aceitáveis. Diferenças de magnitude de tensão de barramento para cada hora do dia são formuladas como uma função objetivo. Neste trabalho, são consideradas fontes do tipo fotovoltaica e eólica, considerando a minimização das perdas.

Já em (ABU-MOUTI e EL-HAWARY, 2011), é apresentada uma metodologia de otimização que emprega o algoritmo ABC para determinar o tamanho ideal, o fator de potência e a localização da unidade GD a fim de minimizar a perda de potência ativa total do sistema. O problema de alocação é modelado como um MINLP neste trabalho.

Na referência (DIAS, OLIVEIRA, *et al.*, 2012) um algoritmo híbrido que combina o algoritmo PSO e o Fluxo de Potência Ótimo Não-linear (FPO-NL) é aplicado para o posicionamento e o dimensionamento ótimos de GD. O algoritmo PSO é usado para determinar as barras candidatas para alocar as unidades de GD e o FPO-NL para dimensionar o seu tamanho. Basicamente, a abordagem proposta utiliza um índice de sensibilidade baseado em derivadas para identificar as melhores barras candidatas para se instalar os recursos de GD. Este índice é considerado na população inicial do PSO com o objetivo de reduzir o espaço de busca, melhorando a convergência do método.

Já em (GUPTA, NELLIKKATH, *et al.*, 2021) um problema de otimização Programação Linear Inteira Mista (MILP) é formulado para reduzir as perdas de potência de uma microrrede ilhada baseada controle de *Droop* pela aplicação de um despacho volt-VAr e reconfiguração da rede. Um perfil de carga horária real formado por cargas residências e industriais é considerado. Uma redução substancial na perda de potência/energia é observada pelo uso da metodologia proposta.

Na referência (GUPTA, DOOLLA, *et al.*, 2021) um problema de Programação Linear Inteira Mista (MILP) aplicável a uma microrrede baseada em *Droop* foi proposto para alcançar o compartilhamento de potência reativa proporcional entre GDs minimizando perdas. São investigados o dimensionamento e posicionamento ótimos das GDs. A formulação proposta foi testada em uma rede de 33 barras que foi modificada para representar uma microrrede ilhada.

2.9 Considerações Finais

A partir da revisão bibliográfica apresentada neste capítulo, pode-se verificar que a microrrede faz parte da transformação tecnológica que o setor elétrico tem passado, contribuindo para uma operação mais sustentável.

Os dispositivos presentes na estrutura de uma microrrede desempenham funções importantes dentro do sistema. As GDs se apresentam como opções de fontes de energia mais limpas, o AD é capaz de mitigar a intermitência de fontes renováveis, e as cargas que consomem energia (elétrica e térmica), de acordo com sua classificação quanto à prioridade, criticidade e sensibilidade, permitem um melhor planejamento de operação da microrrede. As redes físicas que conectam e transportam energia elétrica dentro da microrrede operam de forma similar em relação às redes de distribuição. Os controles

avançados operam e controlam as unidades de GD, SAE e cargas, assegurando uma operação confiável e econômica do sistema.

Os benefícios econômicos, técnicos, ambientais e sociais proporcionados pela operação de microrredes abrangem todas as partes interessadas tais como: consumidores, operadores da rede e distribuidora.

A microrrede operando conectada à rede principal realiza o fluxo bidirecional de potência podendo controlar a tensão. As variações de carga e geração são compensadas pela rede principal, mantendo-se a frequência da rede constante. Entretanto, quando operando de forma isolada, os geradores operam no modo *droop*, isto é, "com queda de frequência", partilhando a variação de carga. Quanto maior a variação de carga, maior será o desvio de frequência.

Para formação das microrredes, neste capítulo é tratado o problema de alocação e dimensionamento de GDs no sistema. Este problema é bastante atual e bem estabelecido na literatura. Considerando uma microrrede com diversas barras (sistema radial), torna-se importante responder à seguinte questão: Quais os melhores locais para instalação de unidades geradoras? Os trabalhos mais comuns buscam minimizar as perdas de potência ativa.

Inúmeros estudos têm sido realizados aplicando algoritmos de otimização baseado em metaheurísticas por serem úteis na solução de problemas complexos na área de operação e planejamento de microrredes. Neste contexto, o método proposto nesta dissertação para a solução do problema de alocação de geradores distribuídos em microrredes, o qual é baseado na utilização de uma técnica metaheurísticas de otimização, é apresentado no próximo capítulo.

Capítulo 3 – METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 Considerações Iniciais

Dada a importância de se realizar um planejamento prévio bem elaborado de microrredes, conforme discutido no Capítulo 2, é apresentada neste capítulo uma proposta de metodologia de otimização para alocação de recursos de GD nas redes desses sistemas. São apresentados os modelos de otimização considerados para solução do problema em cada modo de operação da microrrede (ilhada e conectada à rede de distribuição), além dos detalhes relacionados à estratégia de otimização adotada.

3.2 Visão Geral da Metodologia Proposta

Propõe-se neste trabalho uma metodologia para alocação de unidades de GD na rede interna de microrredes. Na metodologia, é considerado o planejamento para os dois modos de operação: i) microrredes ilhadas, quando são consideradas as características de *droop* de tensão e frequência; e ii) microrredes conectadas à rede principal. As soluções finais identificadas separadamente para cada modo de operação são então avaliadas a fim de se identificar uma solução única, que atenda às duas situações de operação. De forma geral, visa-se no estudo identificar soluções que minimizem as perdas ativas na rede interna de distribuição da microrrede.

O problema que se propõe solucionar é classificado como de programação não-linear inteira mista, em que as variáveis de decisão são dadas por valores:

i) discretos (binários): posições de alocação das GDs nas barras: 1 (alocada) ou 0 (não alocada);
ii) contínuos: despacho das GDs (potências ativa e reativa), valores de frequência, tensões nodais (módulo e ângulo) e valores associados às curvas $P - f$ e $Q - V$ (referência e inclinação).

É importante destacar que a metodologia proposta neste trabalho considera a operação da microrrede em regime permanente. Logo, aspectos dinâmicos (de conexão e desconexão) não são levados em consideração. Sua aplicação se dá, portanto, em

estágios iniciais do planejamento (fases preliminares de definição de pontos de alocação), sendo que as soluções obtidas devem ser validadas e atualizadas posteriormente com estudos dinâmicos.

3.3 Característica de *Droop* das Unidades de Geração

Nas microrredes operando conectadas à rede principal, as variações internas de carga e geração são compensadas pela própria rede, mantendo-se, portanto, a frequência constante. Entretanto, quando a microrrede se encontra isolada, os geradores operam no modo *droop*, isto é, "com variação de frequência", e partilham eventuais variações de carga. Em outras palavras, na operação isolada a frequência não é mantida no valor nominal (1 pu, ou 60 Hz) e, quanto maior a variação de carga, maior será o desvio de frequência verificado (LA GATTA, PASSOS FILHO e PEREIRA, 2019).

Os gráficos da Figura 2 apresentam o conceito de *droop*. Para entender esse conceito, consideremos que dois geradores possuem seus despachos P_{g1} e P_{g2} definidos para suprir a carga P_D da microrrede operando de forma isolada, ou seja, $P_{\mathrm{g1}} + P_{\mathrm{g2}} = P_D$. Nessa configuração, a frequência da microrrede é f_{MG} e, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 2a, quanto maior a carga, menor será o valor da frequência. Isso ocorre devido à característica linear $P - f$ proporcionada pelos conversores que conectam os geradores à rede. O mesmo acontece para o segundo gerador. E de forma análoga, de acordo com a Figura 2b, existe também a característica $Q - V$ (tensão – potência reativa), com a diferença de que a tensão terminal do geradores é diferente para cada gerador (ao contrário da frequência) (MANNA, GOSWAMI e CHATTOPADHYAY, 2018), (FOROUTAN, MORADI e ABEDINI, 2016).

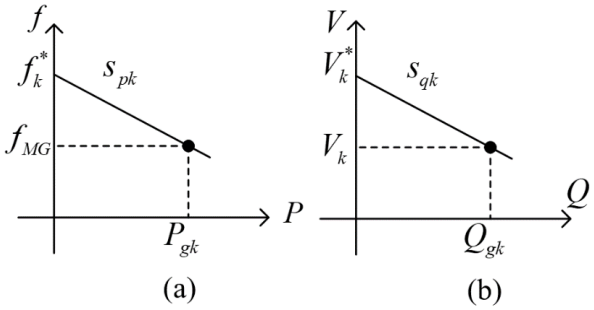

Figura 2: Ilustração da característica de *droop*.
Fonte: (MANNA, GOSWAMI e CHATTOPADHYAY, 2018)

Na operação do sistema isolado, considerando-se uma curva de carga (variação de P_D ao longo do dia, por exemplo), torna-se necessário, portanto, ajustar os valores de frequência e tensão a vazio e a inclinação das retas para cada ponto da curva de carga.

3.4 Modelos de Otimização para Alocação de GD em Microrredes

Considerando as diferentes características operativas da microrrede para os modos de operação ilhado e conectado à rede de distribuição, dois modelos de otimização são considerados na metodologia proposta para solução do problema de alocação de GD na microrrede. Estes modelos são detalhados nas subseções a seguir.

3.4.1 Modelo para Microrrede Ilhada

Para o modo de operação em que a microrrede encontra-se isolada do sistema principal, o modelo de otimização considerado para alocação de GD é dado por:

Minimizar $$F_{MG-Ilhada} = \sum_{(k,m)\in\Omega_L} g_{km}.\left(V_k^2 + V_m^2 - 2.V_k.V_m.cos\theta_{km}\right) \quad (3.1)$$

s.a.:

$$n_k.P_{gk} - P_{dk} - P_k = 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.2)$$

$$n_k.Q_{gk} - Q_{dk} - Q_k = 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.3)$$

$$n_k.\left[P_{gk} - \frac{1}{s_{pk}}.(f_k^* - f_{MG})\right] = 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.4)$$

$$n_k.\left[Q_{gk} - \frac{1}{s_{qk}}.(V_k^* - V_k)\right] = 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.5)$$

$$\theta_k^{ref} = 0 \quad (3.6)$$

$$S_{gk} - \sqrt{\left(n_k.P_{gk}\right)^2 + \left(n_k.Q_{gk}\right)^2} = 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.7)$$

$$S_{gk} \leq S_{gk}^{max} \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.8)$$

$$P_{gk} \geq 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.9)$$

$$Q_{gk}^{min} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk}^{max} \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.10)$$

$$f_{min} \leq f_{MG} \leq f_{max} \quad (3.11)$$

$$V_{min} \leq V_k \leq V_{max} \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.12)$$

$$n_k.f_k^{*\,min} \leq n_k.f_k^* \leq n_k.f_k^{*\,max} \qquad (\forall k \in \Omega_B) \quad (3.13)$$

$$n_k.V_k^{*\,min} \leq n_k.V_k^* \leq n_k.V_k^{*\,max} \qquad (\forall k \in \Omega_B) \qquad (3.14)$$

$$s_{pk}^{min} \leq s_{pk} \leq s_{pk}^{max} \qquad (k \in \Omega_B) \qquad (3.15)$$

$$s_{qk}^{min} \leq s_{qk} \leq s_{qk}^{max} \qquad (k \in \Omega_B) \qquad (3.16)$$

$$0 \leq n_k \leq 1 \qquad (n_k \in \mathbb{Z} \mid \forall k \in \Omega_B) \qquad (3.17)$$

$$\sum_{k \in \Omega_B} n_k = N_{GD} \qquad (3.18)$$

No modelo de otimização, de acordo com a função objetivo dada por (3.1), busca-se minimizar as perdas ôhmicas na rede de distribuição interna da microrrede, cujo montante é representado pela função $F_{MG-Ilhada}$, em que g_{km} representa a condutância do ramo $k-m$ (do conjunto de ramos Ω_L do sistema), V_k e V_m são as magnitudes das tensões nodais das barras terminais deste mesmo ramo e θ_{km} representa a abertura angular das tensões nodais.

As restrições de igualdade dadas por (3.2) e (3.3) representam, respectivamente, as equações de balanço de potência ativa e reativa para cada barra k do conjunto Ω_B de barras que compõem a topologia da microrrede. Nessas equações, n_k representa a variável de decisão do problema relacionada à alocação da GD na barra k, que pode ser igual a 1 ($n_k = 1$) quando se decide alocar uma unidade de geração nessa barra, ou igual a 0 ($n_k = 0$) quando a decisão é a de não alocação de GD na barra. Além disso: P_{gk} e Q_{gk} representam, respectivamente, os despachos de geração ativa e reativa na barra k; P_{dk} e Q_{dk} representam, respectivamente, as potências ativa e reativa de carga da barra k; e P_k e Q_k representam, respectivamente, as potências ativa e reativa líquidas injetadas nessa barra, calculadas conforme (GÓMEZ-EXPÓSITO, CONEJO e CAÑIZARES, 2017).

As características de *droop* de frequência e de tensão para cada gerador alocado na barra k são dadas, respectivamente, pelas restrições de igualdade representadas em (3.4) e (3.5). Nessas equações: f_k^* e V_k^* representam, respectivamente, a frequência e a tensão a vazio definidas para a microrrede; f_{MG} e V_k representam, respectivamente, a frequência e a tensão verificadas para a microrrede em um determinado ponto de operação; e s_{pk} e s_{qk} são, respectivamente, os coeficientes de inclinação a serem definidos para a operação em *droop* relacionada aos controles $P-f$ e $Q-V$. Vale destacar que, nesse trabalho, não é considerada a dependência da carga com a tensão e

frequência (KUNDUR, 1994). Ressalta-se que a investigação do impacto da modelagem de carga no problema de alocação é importante e será objeto de trabalhos futuros. Observa-se nessas restrições que, quando a decisão é a de não alocação de GD na barra k (i.e., $n_k = 0$), os valores de frequência e de tensão ficam iguais aos da rede de distribuição.

A restrição de igualdade representada em (3.6) define a referência angular de uma das barras do sistema (qualquer uma delas). Ressalta-se que nessa formulação não é considerada uma barra de balanço que supre todas as variações de carga do sistema (como é feito no fluxo de potência ótimo convencional).

Na restrição de igualdade representada por (3.7), a potência aparente gerada em cada barra k, S_{gk}, é definida como função das potências ativa e reativa geradas.

As restrições de desigualdade de (3.8) até (3.17) representam os limites impostos às variáveis de decisão do problema. Destaca-se a variável n_k relacionada à decisão de alocação de GD em cada barra k, que pode receber apenas valores discretos no intervalo [0,1], conforme (3.16). Finalmente, a restrição (3.18) indica que cada plano de alocação (solução do problema) deve possuir um número exato de geradores a serem alocados, representado por N_{GD}, parâmetro previamente definido para solução do problema.

As variáveis de decisão a serem otimizadas pelo problema proposto são: a potência ativa gerada P_{gk}, a potência reativa gerada Q_{gk}, os coeficientes de inclinação de *droop* s_{pk} e s_{qk}, a frequência da microrrede f_{MG}, a tensão da microrrede V_k, a potência aparente S_{gk}, a frequência a vazio f_k^*, a tensão a vazio V_k^* e a variável de alocação de GD n_k.

É importante observar que as restrições para os limites de corrente nos circuitos não são consideradas no modelo, embora sejam importantes nos estudos de planejamento da microrrede. O nível de carregamento considerado foi o nominal para os sistemas estudados na presente dissertação, fazendo com que os valores de corrente nos ramos fossem menores que os limites citados na literatura.

3.4.2 Modelo para Microrrede Conectada à Rede Principal

Já para o modo de operação em que a microrrede opera conectada à rede principal, o modelo de otimização considerado na solução pela metodologia proposta para alocação de GD é dado por:

$$\textit{Minimizar} \quad F_{MG-conectada} = \sum_{(k,m)\in\Omega_L} g_{km}.\left(V_k^2 + V_m^2 - 2.V_k.V_m.cos\theta_{km}\right) \tag{3.19}$$

$$s.a.: \quad n_k.P_{gk} - P_{dk} - P_k = 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \tag{3.20}$$

$$n_k.Q_{gk} - Q_{dk} - Q_k = 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \tag{3.21}$$

$$\theta_k^{ref} = 0 \tag{3.22}$$

$$S_{gk} - \sqrt{\left(n_k.P_{gk}\right)^2 + \left(n_k.Q_{gk}\right)^2} = 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \tag{3.23}$$

$$S_{gk} \leq S_{gk}^{max} \qquad (\forall k \in \Omega_B) \tag{3.24}$$

$$P_{gk} \geq 0 \qquad (\forall k \in \Omega_B) \tag{3.25}$$

$$Q_{gk}^{min} \leq Q_{gk} \leq Q_{gk}^{max} \qquad (\forall k \in \Omega_B) \tag{3.26}$$

$$V_{min} \leq V_k \leq V_{max} \qquad (\forall k \in \Omega_B) \tag{3.27}$$

$$0 \leq n_k \leq 1 \qquad (n_k \in \mathbb{Z} \mid \forall k \in \Omega_B) \tag{3.28}$$

$$\sum_{k\in\Omega_B} n_k = N_{GD} \tag{3.29}$$

$$P_{PAC}^{min} \leq P_{gPAC} \leq P_{PAC}^{max} \tag{3.30}$$

$$Q_{PAC}^{min} \leq Q_{gPAC} \leq Q_{PAC}^{max} \tag{3.31}$$

A função objetivo (3.19) do modelo de alocação de GD para a microrrede conectada à rede principal é idêntica àquela considerada para a operação em modo ilhado, definida em (3.1). Ou seja, nesse caso, pretende-se também minimizar as perdas ôhmicas na rede interna da microrrede.

Em relação às restrições, verifica-se que as equações de (3.20)-(3.29) são idênticas, respectivamente, às restrições (3.2), (3.3), (3.6)-(3.10), (3.12), (3.17) e (3.18), definidas para o modelo de microrrede ilhada. No entanto, para o modo de operação conectado à rede, ao modelo de otimização são adicionadas duas novas restrições, representadas por (3.30) e (3.31), que correspondem, respectivamente, à definição de

limites mínimos e máximos para as potências ativa (P_{gPAC}) e reativa (Q_{gPAC}) líquidas injetadas pela rede principal no ponto de conexão com a microrrede (i.e., na barra do Ponto de Acoplamento Comum – PAC). Esta última restrição se faz importante para representar as limitações em termos de capacidade dos transformadores presentes na subestação do alimentador.

3.5 Solução do Problema de Alocação de GD em Microrredes

Nesta seção, é apresentada a estratégia proposta para solução dos problemas definidos nas Subseções 3.4.1 e 3.4.2, com apresentação das técnicas de otimização empregadas.

3.5.1 Tratamento dos Modelos de Otimização

A fim de solucionar o problema de alocação de GD em microrredes a partir dos modelos de otimização apresentados na seção anterior, propõe-se neste trabalho desacoplar o problema principal de cada modo de operação em dois subproblemas de otimização a serem solucionados iterativamente: i) subproblema de planejamento; e ii) subproblema de operação.

O subproblema de planejamento para os dois modos de operação está relacionado à definição do plano de alocação, ou seja, definição das variáveis n_k para cada barra k da microrrede, sendo representado como:

$$\textit{Minimizar} \qquad F_{MG} = \sum_{(k,m)\,\in\,\Omega_L} g_{km}.\left(V_k^2 + V_m^2 - 2.V_k.V_m.cos\theta_{km}\right) \tag{3.32}$$

$$s.a.: \qquad 0 \leq n_k \leq 1 \qquad (n_k \in \mathbb{Z} \mid \forall k \in \Omega_B) \tag{3.33}$$

$$\sum_{k\,\in\,\Omega_B} n_k = N_{GD} \tag{3.34}$$

No subproblema de planejamento, a função objetivo representada em (3.32) corresponde à minimização das perdas ôhmicas e as restrições dadas por (3.33) e (3.34), definem, respectivamente, os limites impostos à variável de decisão de alocação da GD em cada barra k da microrrede e o número de geradores a serem instalados, assim como nos modelos de otimização definidos para cada modo de operação. As variáveis de magnitude, ângulo das tensões nodais e parâmetros da curva de *droop* (para a microrrede ilhada) não são variáveis de decisão desse subproblema, elas são valores

calculados pelo subproblema de operação solucionado após a definição, a partir do subproblema de planejamento, de cada plano $n = \{n_1, n_2, \dots, n_k, \dots, n_{\dim(\Omega_B)}\}$ de alocação.

Portanto, o subproblema de operação para o modo ilhado equivale ao modelo definido na Subseção 3.4.1 em que as variáveis de decisão de alocação são valores fixos decorrentes do subproblema de planejamento. Da mesma forma, o subproblema de operação para o modo de operação da microrrede conectada à rede principal é definido pelo modelo apresentado na Subseção 3.4.2 em que as variáveis de decisão de alocação também são valores fixos decorrentes do subproblema de planejamento.

Para solução do subproblema de planejamento, é proposto neste trabalho o emprego da técnica de otimização metaheurística de Algoritmo Genético (AG), por ser uma técnica bastante difundida e consolidada na literatura (GEORGILAKIS e HATZIARGYRIOU, 2013). E para solução do subproblema de operação em cada modo de operação da microrrede, é utilizada a técnica de otimização Método de Pontos Interiores (do inglês, *interior-point method*), implementada pela biblioteca *fmincon* do MATLAB®. A seguir, são apresentados detalhes relativos à solução do subproblema de planejamento via técnica AG.

3.5.2 Metaheurística Algoritmo Genético

A metaheurística de otimização AG é, basicamente, uma técnica pertencente à classe das metaheurísticas que realizam evolução iterativa de um conjunto de soluções, normalmente chamado de população. A partir de um conjunto inicial dessas soluções, a cada iteração do algoritmo que compõem essas técnicas, um novo conjunto é criado de acordo com a estratégia de geração própria. As melhores soluções em cada iteração possuem maior probabilidade de compor o novo conjunto que segue pelo processo evolutivo. Este processo é repetido até que o critério de parada seja atingido.

Dentro dessa classe de algoritmos de evolução iterativa, a técnica metaheurística AG é baseada nos mecanismos de seleção natural de espécies. Inspirado na Teoria da Evolução de Darwin, seu algoritmo consiste em evoluir uma população de indivíduos, sendo que cada indivíduo representa uma solução para o problema (i.e., um plano de alocação de GD). Basicamente, a cada iteração do AG, os indivíduos da população corrente são avaliados através da função objetivo (ou função de aptidão), sendo que os

indivíduos com melhor função aptidão possuem maior probabilidade de serem selecionados como progenitores da próxima geração. Os filhos são gerados a partir desses indivíduos por meio da recombinação de informações, com a aplicação de um operador de cruzamento, e podem ainda sofrer modificações em suas características fundamentais a partir do emprego do operador de mutação. O operador de cruzamento utilizado por esta técnica pode apresentar diversas formas, basicamente tem a função de combinar segmentos de informações entre os progenitores para gerar os novos filhos. O operador de mutação é executado logo após o processo de cruzamento e tem por objetivo realizar modificações pontuais em determinadas propriedades genéticas de uma população, de forma aleatória oferecendo oportunidade para que mais pontos do espaço de busca sejam avaliados, na tentativa de evitar mínimos locais. Vale comentar que, após seleção dos indivíduos progenitores, os operadores de cruzamento e de mutação são empregados sob certas probabilidades, denominadas, respectivamente, de taxa de cruzamento e taxa de mutação. Após a formação dos novos indivíduos, uma estratégia de seleção é utilizada para definir os indivíduos que vão compor a população para a próxima geração.

Este procedimento de seleção de indivíduos progenitores, aplicação dos operadores de cruzamento e de mutação e seleção dos indivíduos que seguem pelo processo evolutivo, que caracteriza a metaheurística AG, é repetido, geração após geração, até que o critério de parada seja atingido (GOLDBERG, 1989).

Vale comentar que, embora o AG tenha sido amplamente aplicado para a solução do problema de alocação de geradores distribuídos em sistemas de distribuição (GEORGILAKIS e HATZIARGYRIOU, 2013), cita-se que o problema de alocação de geradores em microrredes ilhadas (onde deve-se considerar a variação da frequência) é relativamente novo na literatura.

3.5.3 Algoritmo Genético Aplicado ao Subproblema de Alocação de GD

3.5.3.1 Algoritmo Proposto

Na Figura 3, é apresentado um fluxograma básico de representação da metodologia de otimização proposta neste trabalho para solução do problema de alocação de GD nas redes internas das microrredes. Neste fluxograma, a metaheurística AG é adaptada para evoluir um conjunto de soluções (planos de alocação de GDs), que

caracteriza a solução do subproblema de planejamento definido na Subseção 3.5.1. A cada iteração do AG, as soluções são avaliadas pelo subproblema de operação, o que permite calcular o valor da função objetivo apresentada em (3.30), que corresponde à aptidão de cada indivíduo.

Para o emprego da ferramenta de otimização apresentada na Figura 3, devem ser inicialmente definidos alguns parâmetros:

- **Número de GDs**: número N_{GD} de geradores a serem alocados;
- **Tamanho da população**: número de indivíduos n_{ind} que compõem o conjunto de soluções que segue pelo processo evolutivo do AG;
- **Taxa de mutação**: taxa de probabilidade $a_{mutação}$ que define se cada novo indivíduo gerado sofrerá ou não modificação em suas propriedades genéticas;
- **Critério de convergência**: critério utilizado para interromper o processo evolutivo, considerando que soluções de boa qualidade para o problema já tenham sido identificadas. Neste trabalho, é considerado como critério de convergência o número máximo de gerações ($N_{geração}^{max}$).

Após a definição dos parâmetros de otimização, a população inicial de indivíduos deve ser gerada. A geração dessa população pode ser realizada de forma aleatória ou utilizando alguma informação heurística relacionada ao problema. No presente trabalho, optou-se pela geração aleatória das soluções iniciais a serem evoluídas.

Em seguida, cada indivíduo da população inicial deve ser avaliado segundo o subproblema de operação, ou seja, o desempenho da microrrede é avaliado a partir da implementação de cada plano de alocação de GD criado. A avaliação se dá pela solução do problema de fluxo de potência ótimo considerando a microrrede ilhada ou conectada à rede principal, de acordo com o modelo específico dentre aqueles apresentados na Seção 3.4.

Após avalição dessas soluções, é iniciado o processo iterativo que compõe o algoritmo da técnica AG, o qual é interrompido de acordo com o critério de parada definido. Neste trabalho, o critério de parada utilizado é o número de gerações. O número de gerações (i.e., número de iterações) é contabilizado por meio da variável $N_{geração}$.

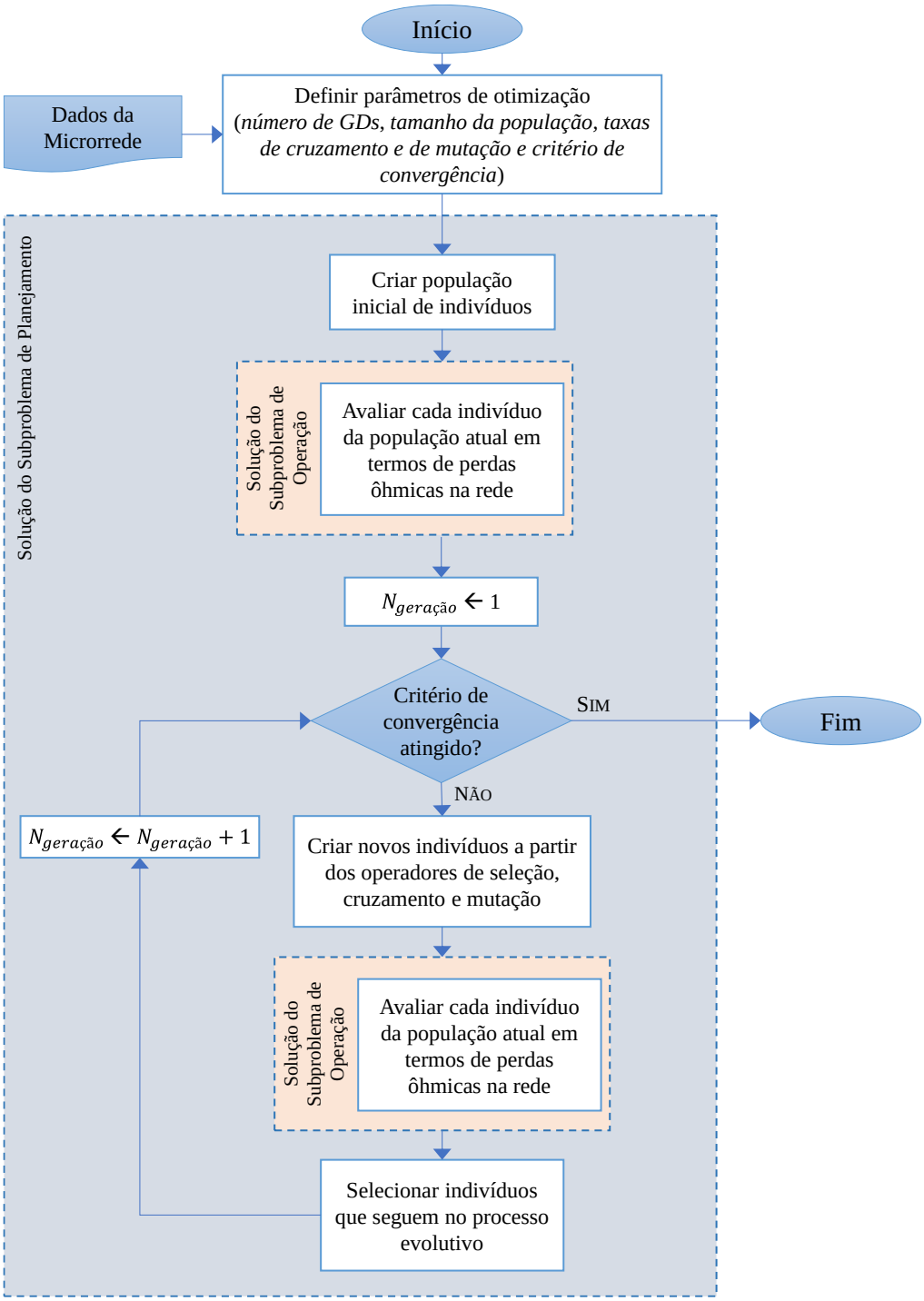

Figura 3: Fluxograma de etapas do AG para alocação de GD em microrredes.

Dentro de cada geração, os indivíduos são evoluídos por meio dos operadores de seleção, cruzamento e mutação, buscando uma solução adequada para o problema. Na seleção natural, os indivíduos mais adaptados têm maiores possibilidades de sobrevivência e transmitem suas características para as gerações seguintes. No algoritmo do AG, por meio do operador de seleção, os indivíduos mais aptos possuem maiores chances de serem escolhidos para reprodução. Os operadores de seleção comumente utilizados são: *Ranking*, Roleta e Torneio. No presente trabalho, é adotada a

seleção por torneio. Essa estratégia de seleção consiste em promover um torneio entre um grupo de n (n ≥ 2) indivíduos aleatoriamente tomados na população. Assim, o indivíduo que vencer este torneio (indivíduo com melhor valor de aptidão entre o grupo) é selecionado para fazer parte da geração da nova população, enquanto os demais indivíduos do grupo são descartados. O processo de seleção termina quando se realiza uma quantidade de torneios igual ao tamanho da população.

Na reprodução, os operadores de cruzamento e de mutação são aplicados aos indivíduos selecionados para criar os indivíduos. Diferentes estratégias de cruzamento e mutação podem ser empregadas. No cruzamento com dois pontos de corte, os descendentes são formados pela recombinação genética dos progenitores, com base em dois pontos de corte selecionados de forma aleatória. Já no chamado cruzamento uniforme, os descendentes são gerados por meio da recombinação genética dos progenitores, de acordo com valores estabelecidos em uma máscara binária gerada aleatoriamente.

3.5.3.2 Representação das Soluções

A Figura 4 apresenta uma microrrede ilustrativa com cinco barras candidatas à alocação de geradores distribuídos. Deve-se decidir pela alocação ($n_k = 1$) ou não ($n_k = 0$) das unidades em cada barra visando-se minimizar as perdas de potência ativa no sistema. Considerando n_{ind} indivíduos para a solução do problema dado na Figura 4, a população do AG é então representada por uma matriz n_{ind}×5, em que cada linha é associada a uma solução do problema, ou seja, um plano de alocação de GD, e cada coluna representa a possibilidade de alocação da GD na k-ésima barra da microrrede.

Vale lembrar que no presente trabalho, de acordo com a restrição definida no subproblema de planejamento em (3.34), considera-se que cada plano de alocação deve possuir um número exato de geradores a serem alocados (N_{GD}), parâmetro previamente definido para solução do problema. Portanto, durante a solução do problema, indivíduos que não respeitem essa restrição devem ser descartados (ou receber uma penalização elevada).

Para o exemplo ilustrativo, considerando-se, por exemplo, a alocação de geradores nas Barras 1 e 3 para o sistema ilustrativo, sendo $N_{GD} = 2$, o indivíduo na solução via metaheurística AG apresenta a seguinte estrutura:

$$n = [1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \tag{3.35}$$

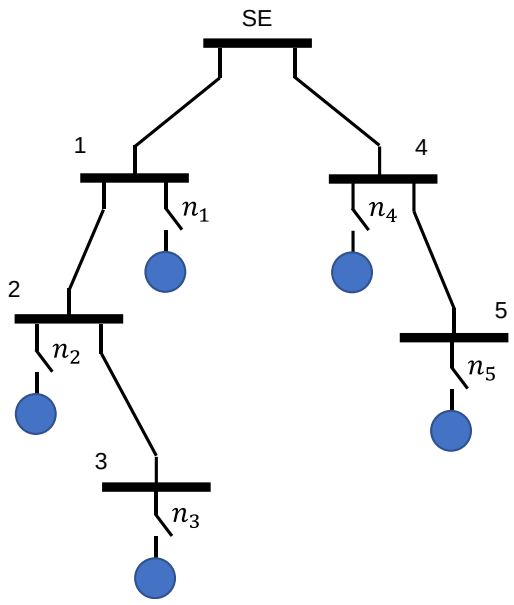

Figura 4: Sistema ilustrativo para representação das soluções do AG.

3.6 Considerações Finais

Esse capítulo apresenta a metodologia proposta para a alocação de unidades de geração distribuída nas microrredes visando a minimização de perdas de potência ativa. Para a solução, o problema é decomposto em dois subproblemas: o de planejamento (para o qual a solução é realizada por meio da metaheurística AG) e o de operação (que é avaliado para cada plano de alocação gerado pelo AG por meio de um FPO). O FPO foi implementado com auxílio da *toolbox* de otimização do MATLAB® e contempla ambos os modos de operação, isto é, conectado à rede principal e ilhado.

Capítulo 4 – RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pela metodologia proposta para dois sistemas (33 e 69 barras), operando ilhados e conectados à rede principal. Os resultados obtidos serão avaliados do ponto de vista da qualidade da solução, da reprodutibilidade e do esforço computacional.

Na solução do problema de otimização, é utilizada a *toolbox* de Algoritmos Genéticos (AG) do MATLAB® para resolver o subproblema de planejamento (que possui variáveis de decisão inteiras) e a *toolbox* de otimização do MATLAB® (função *fmincon*) para solução do problema de operação (fluxo de potência ótimo não linear com variáveis contínuas para a minimização de perdas).

4.2 Parâmetros Gerais

Os estudos de caso serão realizados considerando um número fixo de três geradores distribuídos, ou seja, $N_{GD} = 3$ (problema de planejamento). Para a solução do problema de operação (fluxo de potência ótimo), são considerados os limites apresentados na Tabela 1. Para ambos os modos de operação, os limites máximos de potência aparente e reativa das unidades geradoras (Q_{gk} e S_{gk}) são diferentes para os dois sistemas. As demais grandezas possuem limites idênticos para ambos os sistemas. Ressalta-se que o trabalho resolve somente o problema de alocação de GD, sendo a capacidade pré-especificada (2 MVA).

Tabela 1: Limites das variáveis.

Variável	**Mínimo**	**Máximo**	**Sistema 33 Barras**		
			Variável	**Mínimo**	**Máximo**
f_{MG} (Hz)	59,7	60,3	S_{gk} (MVA)	0	2,0
f_k^* (Hz)	59,7	60,3	Q_{gk} (MVar)	-1,2	1,2
s_{pk} (pu)	1,0 x 10^{-5}	1,0 x 10^{-1}	**Sistema 69 Barras**		
s_{qk} (pu)	1,0 x 10^{-5}	1,0 x 10^{-2}	**Variável**	**Mínimo**	**Máximo**
V_k^* (pu)	0,9	1,1	S_{gk} (MVA)	0	3,0
V_k (pu)	0,9	1,1	Q_{gk} (MVar)	-1,5	1,5

4.3 Microrrede de 33 barras

4.3.1 Descrição do Sistema

Proposto inicialmente em **(BARAN e WU, 1989a)**, o sistema radial de 33 barras operando conectado ao sistema principal possui 32 ramos. O ilhamento ocorre a partir da desconexão entre os nós 33 (subestação) e 1, conforme pode ser visto na Figura 5. As bases de potência, tensão e frequência adotadas são 1 MVA, 12,66 kV e 60 Hz, respectivamente. Na operação ilhada, adota-se como referência angular a barra 1. No ponto de operação nominal considerado, a carga ativa atendida é de 3,715 MW e 2,3 MVar **(BARAN e WU, 1989a)**.

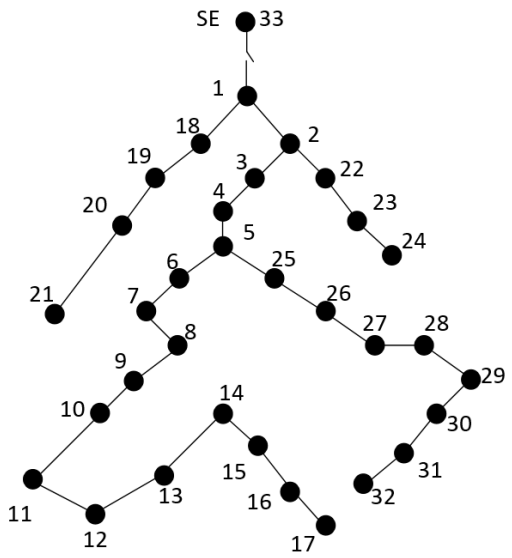

Figura 5: Microrrede ilhada de 33 barras.

4.3.2 Alocação de GD Considerando o Sistema Ilhado

A primeira análise refere-se ao sistema operando de forma ilhada e adota-se, para o AG, um número fixo de 40 indivíduos. As probabilidades de cruzamento e de mutação foram ajustadas em 60% e 5%, respectivamente. São considerados dois casos variando o número de gerações: 50 (Tabela 2) e 60 (Tabela 3). É importante ressaltar que tais valores foram ajustados empiricamente após vários testes. Para cada caso foram executadas 10 repetições do AG, onde são consideradas “sementes” diferentes para geração dos números pseudoaleatórios inerentes ao processo estocástico de otimização.

É sabido da literatura técnica que metaheurísticas (como o AG) não garantem soluções ótimas: estas fornecem soluções de boa qualidade em um tempo

computacional razoável (YANG, 2014). A solução ótima para o problema de alocação de GD é garantida pela análise de todas as possibilidades, em um processo denominado de Busca Exaustiva (BE).

Tabela 2: Caso 1 – número de gerações igual a 50 (sistema de 33 barras ilhado).

Simulação	**Alocação de GD nas Barras**			**Perdas (kW)**
1	7	23	31	21,61
2	9	22	30	19,76
3	**2**	**12**	**29**	**16,55**
4	10	23	29	16,73
5	8	23	30	20,88
6	1	9	29	22,11
7	10	23	29	16,73
8	14	23	29	18,00
9	9	22	31	21,10
10	11	23	29	16,69

Tabela 3: Caso 2 - número de gerações igual a 60 (sistema de 33 barras ilhado).

Simulação	**Alocação de GD nas Barras**			**Perdas (kW)**
1	2	12	28	18,44
2	9	23	28	18,77
3	2	13	29	16,66
4	9	23	28	18,77
5	2	12	31	22,68
6	**2**	**12**	**29**	**16,55**
7	9	23	28	18,77
8	2	12	28	18,44
9	**2**	**12**	**29**	**16,55**
10	10	23	29	16,73

Considerando-se 32 barras candidatas para a alocação de 3 unidades de geração, existem 4960 soluções possíveis. Todas as soluções foram avaliadas através do FPO neste trabalho. Destas, 61,8% (3065 soluções) são factíveis, isto é, o FPO alcança a convergência. O problema associado com a avaliação de todas as possibilidades é o tempo computacional empregado, que pode ser inviável para sistemas de maior porte. Em um computador Intel Core i7 1.80 GHz com 16 GB de RAM e sistema operacional Windows 10 64-bit, a BE (cujos resultados estão na Tabela **4**) foi realizada em aproximadamente 29,3 horas, conforme consta na Tabela 5.

Tabela 4: Solução Ótima Global (Busca Exaustiva).

Barras	**Perdas (kW)**	**f_{MG} (Hz)**
2, 12, 29	16,55	59,79

Tabela 5: Comparativo do tempo computacional.

	Caso 1	**Caso 2**	**BE**
Tempo Médio para Cada Simulação (h)	4,45	4,71	29,30

Através dos resultados apresentados na Tabela 2 a Tabela 5, observa-se que o AG foi capaz de encontrar a solução ótima em menos de 20% do tempo consumido pela BE. Ademais, o simples aumento do número de gerações permitiu a melhoria da qualidade das soluções do AG (no Caso 2 a solução ótima de 16,55 kW foi encontrada duas vezes). Tal melhoria pode ser vista na Figura 6, que apresenta um comparativo entre as soluções (sendo a solução da BE destacada em uma linha pontilhada em vermelho): a variabilidade das soluções no Caso 2 é reduzida, apresentando um desvio padrão de 1,8597 kW enquanto o Caso 1 apresenta um desvio padrão de 2,3009 kW.

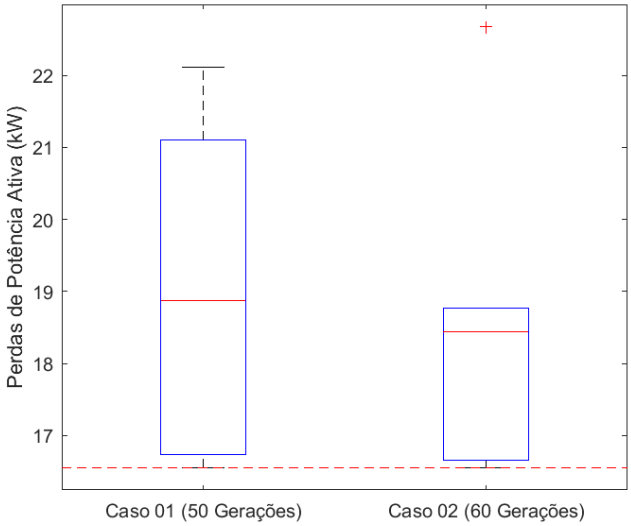

Figura 6: Comparações entre as soluções (sistema de 33 barras ilhado).

A melhor solução para o sistema operando de forma ilhada corresponde à alocação nas barras 2, 12 e 29 conforme apresentado na Tabela 6. Operando em uma frequência de regime permanente de 59,79 Hz, as perdas mínimas são de 16,55kW. Adicionalmente, analisando a Figura 7 nota-se que as tensões nodais estão dentro dos limites de 0,9 a 1,10 pu.

Tabela 6: Perdas de potência ativa e frequência.

Barras	**Perdas (kW)**	f_{MG} **(Hz)**
2, 12, 29	16,55	59,79

O compartilhamento de potência ativa, reativa e aparente (apresentado na Figura 8) está intrinsecamente associado ao ajuste das curvas de *droop* ($P - f$ e $Q - V$) que é realizado pelo fluxo de potência ótimo. Os coeficientes de *droop* ajustados e *setpoints* (frequência e tensão a vazio) são apresentados na Tabela 7.

Inicialmente observa-se que todos os parâmetros estão dentro da faixa permitida (limites). Conforme a Tabela 7, nota-se que os coeficientes da curva $P - f$, s_p e f_k^*, são

distintos para cada unidade geradora, motivo pelo qual a potência ativa gerada (Figura 8) difere-se entre os geradores. Caso os parâmetros fossem iguais entre si, o montante de potência ativa seria o mesmo, uma vez que a frequência da microrrede f_{MG} é única (vide equação 3.4).

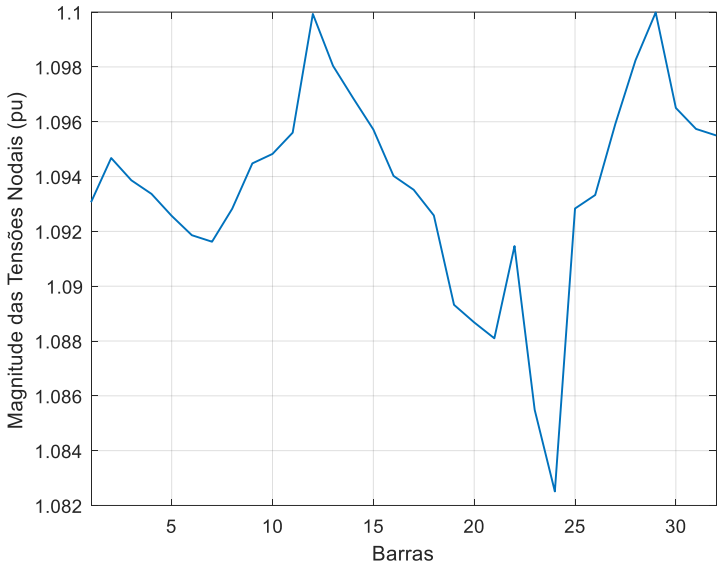

Figura 7: Magnitude das tensões nodais (sistema de 33 barras ilhado).

Observa-se na Tabela 7 que os parâmetros da curva $Q - V$, s_q e V_k^*, também são distintos. Mesmo que fossem iguais, o montante de potência reativa gerada seria diferente, pois as tensões terminais de cada unidade diferem-se entre si (vide equação 3.5).

Tabela 7: Coeficientes de *droop* ajustados e *setpoints* (frequência e tensão a vazio).

Gerador	s_p **(pu)**	s_q **(pu)**	f_k^* **(Hz)**	V_k^* **(pu)**
2	2,9983 x 10^{-3}	2,4682 x 10^{-3}	60,115	1,0968
12	6,4503 x 10^{-3}	9,0216 x 10^{-5}	60,113	1,1000
29	4,8404 x 10^{-3}	1,1995 x 10^{-5}	60,114	1,1000

Na formulação proposta, por simplicidade, os limites de carregamento dos circuitos não foram considerados. Tais limites deveriam ter sido incluídos para tornar o modelo mais próximo da realidade e garantir que as soluções encontradas sejam factíveis do ponto de vista prático. Conforme a literatura técnica **(SAVIER e DAS, 2007)** o limite de corrente dos ramos para o sistema em estudo é de 380 A ou 8,3326 pu (na base adotada).

Entretanto, ressalta-se que no presente trabalho foi considerado o carregamento original e, na Figura 9, observa-se que a magnitude da corrente nos ramos é inferior a 1

pu. Logo, a solução é factível, mas as restrições de corrente deveriam ter sido consideradas e isto será objeto de trabalhos futuros.

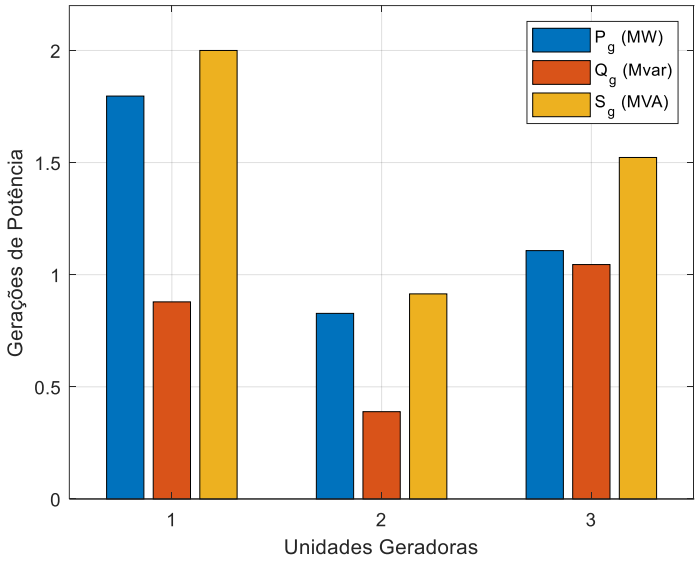

Figura 8: Potência ativa, reativa e aparente gerada (sistema de 33 barras ilhado).

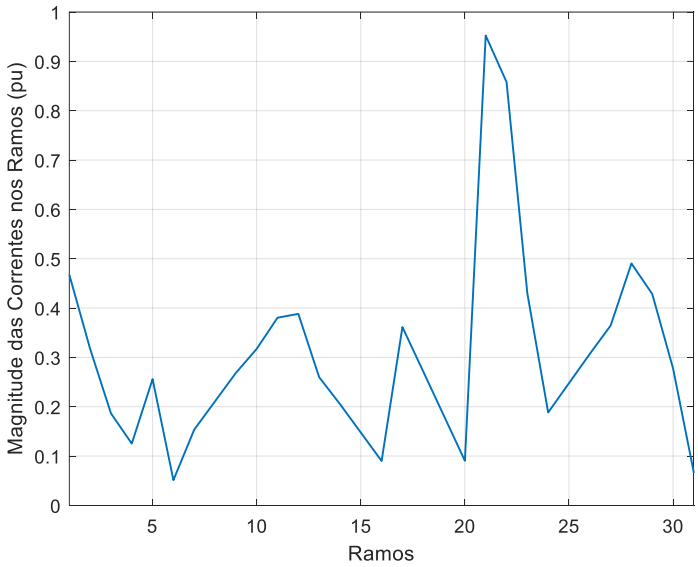

Figura 9: Magnitude das correntes nos ramos (sistema de 33 barras ilhado).

4.3.3 Alocação de GD Considerando o Sistema Conectado à Rede Principal

A solução ótima obtida para o sistema ilhado pode não ser a melhor para a operação conectada à rede principal. Desta forma, o problema de otimização é executado visando identificar as potenciais barras para alocação visando à minimização de perdas de potência ativa na operação conectada.

Uma vez que o AG executado com 40 indivíduos e 60 gerações mostrou-se mais eficaz na identificação de soluções de boa qualidade na subseção anterior (Caso 2 para a microrrede ilhada), essa configuração será adotada nesse estudo de caso (Caso 3, microrrede conectada). A busca exaustiva não foi realizada e os resultados do Caso 3 são apresentados na Tabela 8.

A alocação de GD nas barras 13, 23 e 29 forneceu um menor valor de perdas de potência ativa (9,5995 kW) e se repetiu por 4 vezes nas 10 simulações do AG. Já a alocação 12, 23 e 29 forneceu um valor de perdas bem próximo (9,6330 kW) em relação as alocações descritas anteriormente (melhor solução). O tempo médio computacional de simulação obtido foi 2,31 h.

Tabela 8: Caso 3 - 40 indivíduos e 60 gerações (sistema de 33 barras conectado).

Simulação	**Alocação de GD nas Barras**			**Perdas (kW)**
1	10	24	28	13,2598
2	2	13	29	14,8611
3	**13**	**23**	**29**	**9,5995**
4	**13**	**23**	**29**	**9,5995**
5	12	23	29	9,6330
6	10	23	29	10,5145
7	12	23	29	9,6330
8	14	23	29	10,1721
9	**13**	**23**	**29**	**9,5995**
10	**13**	**23**	**29**	**9,5995**

4.3.4 Avaliação da Solução Considerando o Sistema Conectado à Rede Principal

Na Tabela 9 apresenta-se as duas melhores soluções para a alocação de geradores na operação conectada. Sendo a frequência igual à 60 Hz (mantida constante pela rede principal representada pela barra 33 na Figura 5), observa-se que as soluções apresentam valores aproximados de perdas, diferindo-se somente na seleção de uma das barras (na solução 1 a barra 13 foi selecionada e na solução 2 a barra 12 foi selecionada). Ademais, os valores de perdas são inferiores àquele obtidos na operação ilhada. Isso se deve ao menor valor de fluxo de corrente nos ramos na operação conectada (em que parte da potência da carga é suprida pela rede principal). Ainda em relação ao modo de operação ilhada (onde a melhor solução foi a alocação nas barras 2, 12 e 29), observa-se que a barra 29 permanece sendo selecionada para receber a GD na operação conectada.

Tabela 9: Perdas de potência ativa (sistema de 33 barras conectado).

	Alocação GD nas Barras	**Perdas (kW)**
Solução 1	13, 23 e 29	9,5995
Solução 2	12, 23 e 29	9,6330

Comparando as duas soluções em relação ao perfil de tensões nodais (Figura 10) observa-se a similaridade das magnitudes nas barras geradoras (bem como na subestação – barra 33). A maior diferença ocorre nas barras 12 e 13, que foram escolhidas diferentemente por cada uma das soluções.

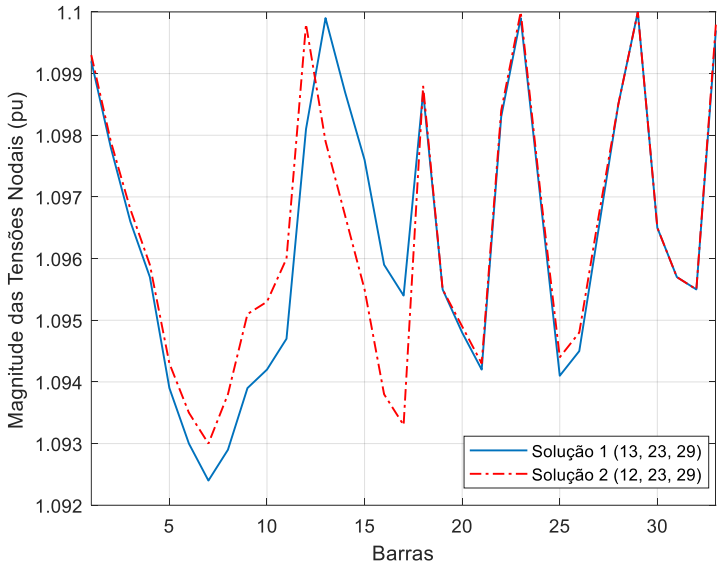

Figura 10: Magnitude das tensões nodais (sistema de 33 barras conectado).

A Figura 11 e Figura 12 ilustram as potências geradas (ativa, reativa e aparente) por unidade em cada solução. A Tabela 10 apresenta, para cada solução, os valores de potência absorvida da subestação (P_{33-1} e Q_{33-1}) bem como o total de potência gerada pelas unidades distribuídas ($P_G = \sum_{i=1}^{3} P_{Gi}$ e $Q_G = \sum_{i=1}^{3} Q_{Gi}$). Observa-se nessas figuras e tabela, a ligeira diferença entre os valores de potência gerada nas duas soluções, justificando a ligeira diferença nos valores de perda de potência.

Tabela 10: Potências absorvidas da rede e geradas (sistema de 33 barras conectado).

	P_{33-1} **(MW)**	Q_{33-1} **(MVar)**	P_G **(MW)**	Q_G **(MVar)**
Solução 1	0,8618	0,4235	2,8628	1,8845
Solução 2	0,8495	0,4174	2,8751	1,8906

Como anteriormente mencionado, os limites de corrente nos ramos não foram considerados. Para avaliar a factibilidade das soluções em relação a esse requisito, a Figura 13 apresenta as magnitudes das correntes para as duas soluções. É possível observar que tais magnitudes são inferiores a 1 pu e, portanto, as soluções são factíveis

(embora não seja garantido que o modelo de otimização aqui apresentado forneça soluções que atendam a essa restrição).

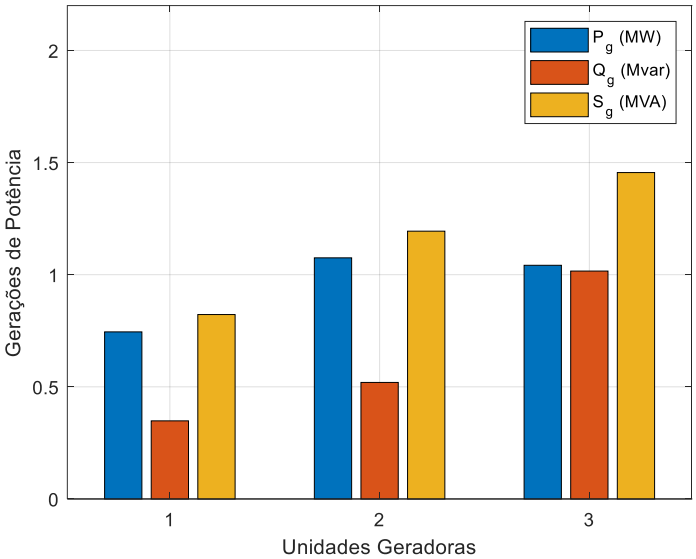

Figura 11: Potência ativa, reativa e aparente gerada com Solução 1 (sistema de 33 barras conectado).

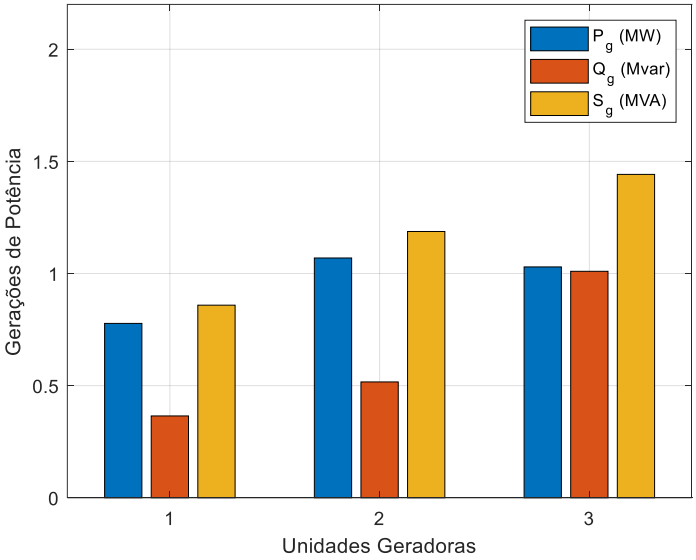

Figura 12: Potência ativa, reativa e aparente gerada com Solução 2 (sistema de 33 barras conectado).

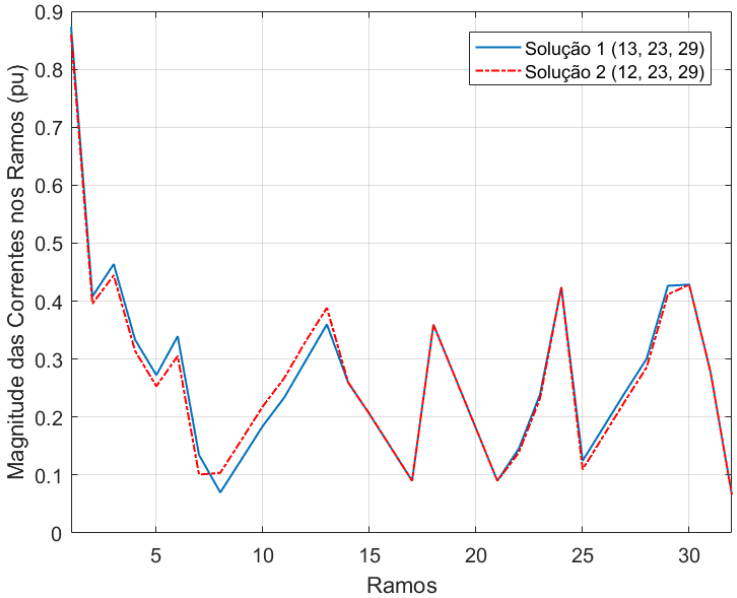

Figura 13: Magnitude das correntes nos ramos (sistema de 33 barras conectado).

4.3.5 Aplicabilidade das Soluções em Ambos os Modos de Operação

Nas seções anteriores foram analisadas três soluções, sendo uma para o sistema operando de forma ilhada e duas para a operação conectada à rede principal. A Tabela 11 avalia tais soluções em ambos os modos de operação do ponto de vista da frequência e dos valores de perdas de potência ativa. Para a elaboração desta tabela, a alocação (barras) foi fornecida para o fluxo de potência ótimo para minimização de perdas na operação ilhada (sem barra infinita) e conectada (com barra infinita).

A primeira observação a ser feita refere-se ao fato de que a solução que minimiza as perdas na operação ilhada (por exemplo nas barras 2, 12 e 29) não é a mesma que minimiza as perdas na operação conectada (tal solução está associada às maiores perdas dentre as soluções: 14,9651 kW).

A segunda observação é que a melhor solução para a operação conectada (a solução “Conectada – Sol 01”: 28,4520 kW) fornece maiores perdas quando o sistema está operando de forma ilhada (a solução “Conectada – Sol 02” possui menores perdas quando o sistema passa da operação conectada para a ilhada). Em uma avaliação global, verifica-se, portanto, que a solução “Conectada – Sol 02”, mesmo não sendo a ótima nos dois modos de operação, é a solução que apresenta montantes de perdas mais próximos das soluções ótimas em cada modo.

Em relação à frequência da microrrede, nota-se que os limites foram respeitados no modo de operação ilhado pelas duas soluções identificadas no modo conectado.

Tabela 11: Avaliação das soluções em ambos os modos de operação.

Solução	**Alocação de GD nas Barras**			**Rede Ilhada**		**Rede Conectada**
				Perdas (kW)	**Freq (Hz)**	**Perdas (kW)**
Ilhada	2	12	29	*16,5500*	59,7920	14,9651
Conectada – Sol 01	13	23	29	28,4520	59,8350	*9,5995*
Conectada – Sol 02	12	23	29	16,8910	59,7920	9,6330

4.3.6 Análise das Barras Candidatas à Alocação

Com base nas análises realizadas na seção anterior, observa-se que pode não existir uma melhor solução que minimize as perdas em ambos os modos de operação, cabendo ao responsável pelo planejamento tomar a melhor decisão com base no conjunto de soluções fornecido pela metodologia proposta. Tal procedimento se torna mais importante quando a operação ilhada ocorre por um tempo pré-determinado, isto é, a microrrede não foi planejada para operar de forma autônoma durante todo o período.

As barras candidatas a alocação em ambos os modos de operação (ilhada e conectado) são 2, 12, 13, 23, 29. Realizando a combinação das 5 possibilidades de 3 em 3 tem-se as 10 combinações descritas na Tabela 12.

Tabela 12: Combinações das soluções (sistema de 33 barras).

Combinação	**Alocação de GD nas Barras**			**Rede Ilhada**		**Rede Conectada**
				Perdas (kW)	**Freq (Hz)**	**Perdas (kW)**
1	2	12	13	125,64	59,7970	60,0809
2	2	12	23	53,0230	59,7920	51,6694
3	**2**	**12**	**29**	**16,5500**	**59,7920**	**14,9651**
4	2	13	23	54,2850	59,7920	52,6311
5	**2**	**13**	**29**	**16,6640**	**59,7920**	**14,8611**
6	2	23	29	31,2840	59,7920	30,7194
7	12	13	23	--	--	58,7091
8	12	13	29	148,1600	59,7920	22,9467
9	**12**	**23**	**29**	**16,8910**	**59,7920**	**9,6330**
10	13	23	29	28,4520	59,8350	9,5995

A primeira consideração a ser realizada refere-se à factibilidade do problema de otimização. A combinação número sete é factível do ponto da operação conectada e não factível na operação ilhada (isto é, o fluxo de potência ótimo não converge para essa alocação).

Dentre as combinações apresentadas, três são escolhidas por apresentarem um montante de perdas aproximado e inferior à 20 kW: são elas as combinações 3, 5 e 9.

Dentre estas, destaca-se as de número 3 (melhor solução para a operação ilhada) e a 9 (segunda melhor solução para a operação conectada).

Ressalta-se que a análise realizada nessa seção não garante a melhor solução simultânea para ambos os modos de operação: para a obtenção da melhor solução, a BE, considerando ambos os modos de operação, deve ser executada.

4.4 Microrrede de 69 barras

4.4.1 Descrição do Sistema

O segundo sistema de estudo utilizado na presente dissertação foi proposto em (BARAN e WU, 1989b) e possui 69 barras. O ilhamento ocorre a partir da desconexão entre os nós 69 (subestação) e 1, conforme pode ser visto na Figura 14. As bases de potência, tensão e frequência adotadas são 1 MVA, 12,66 kV e 60 Hz, respectivamente. Na operação ilhada, adota-se como referência angular a barra 1. No ponto de operação nominal considerado, a carga ativa atendida é de 3,8022 MW e 2,6946 MVar (BARAN e WU, 1989b).

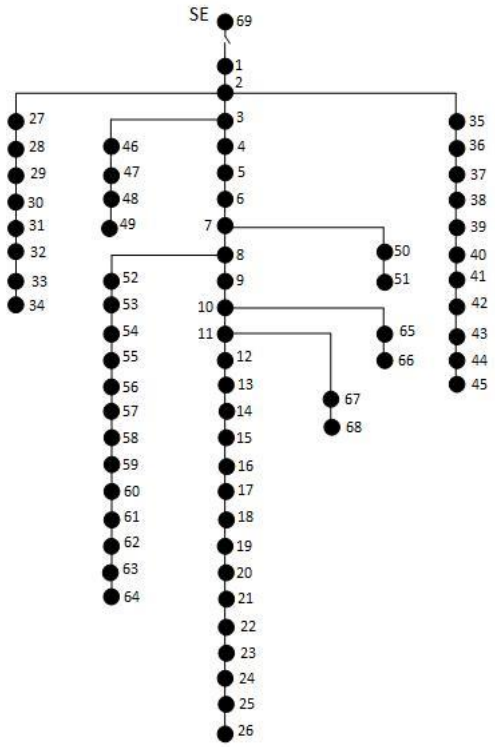

Figura 14: Microrrede ilhada de 69 barras.

Para as simulações realizadas serão considerados 40 indivíduos, 60 gerações e taxas de mutação e cruzamento iguais à 60% e 5%, respectivamente.

4.4.2 Alocação de GD Considerando ambos os Modos de Operação

A metodologia de alocação para ambos os modos de operação foi executada dez vezes e os resultados são apresentados nas Tabela 13 e Tabela 14. A comparação gráfica dos resultados pode ser visualizada na Figura 15. O tempo médio de simulação foi de 3,79 horas para a rede operando ilhada e de 3,42 horas para a rede operando conectada à rede principal.

Tabela 13: Alocação de geradores para o sistema operando ilhado.

Simulação	**Alocação de GD nas Barras**			**Perdas (kW)**
1	19	50	62	18,6144
2	19	50	62	18,6144
3	**12**	**36**	**62**	**11,4684**
4	1	22	59	16,8731
5	17	50	62	18,3816
6	**12**	**36**	**62**	**11,4684**
7	1	22	59	16,8731
8	19	50	62	18,6144
9	19	50	62	18,6144
10	4	19	61	12,3969

Tabela 14: Alocação de geradores para o sistema operando conectado à rede principal.

Simulação	**Alocação de GD nas Barras**			**Perdas (kW)**
1	11	18	60	4,4569
2	**10**	**19**	**60**	**4,2671**
3	18	32	60	7,3859
4	19	60	64	7,0115
5	19	53	61	7,4139
6	11	15	61	6,3441
7	7	19	61	6,8889
8	18	50	61	7,0684
9	9	19	60	4,4873
10	9	22	61	6,1736

Na operação ilhada a solução de melhor qualidade obtida pela metodologia proposta, identificada em duas simulações, indica a alocação das três unidades nas barras 12, 36 e 62 (sendo as perdas de potência ativa iguais à 11,4684 kW). Para o sistema conectado à rede principal, a melhor solução indica um total de perdas igual à 4,2671 kW com as unidades alocadas nas barras 10, 19 e 60. Observa-se, através da Figura 15, que as perdas são menores na operação conectada, haja vista a contribuição do sistema principal no suprimento da carga, o que reduz o fluxo de corrente nos ramais do sistema.

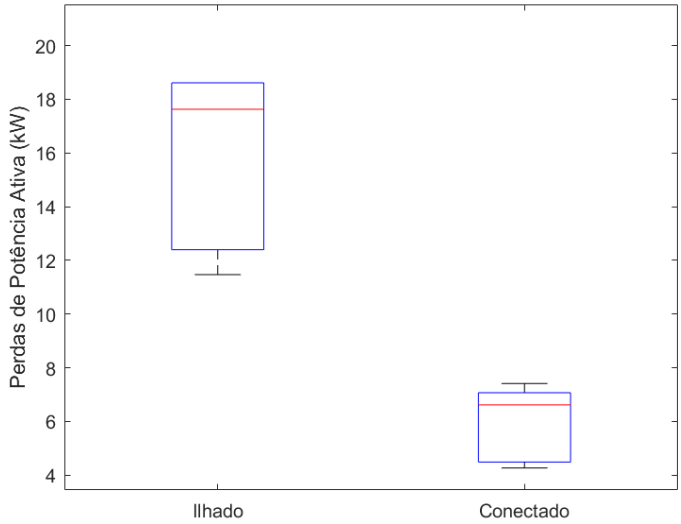

Figura 15: Comparação das soluções para 10 execuções (sistema de 69 barras).

4.4.3 Avaliação da Solução Ótima Considerando o Sistema Ilhado

Para o sistema de 69 barras operando ilhado foram escolhidas as duas melhores soluções da Tabela 13, conforme consta Tabela 15, onde pode-se verificar que a frequência foi ajustada dentro dos limites. Ademais, as tensões nodais também foram ajustadas dentro da faixa permitida, como pode ser visto na Figura 16, na qual pode-se observar que na segunda solução o perfil de tensão é mais próximo do valor nominal (1 pu). O compartilhamento de potência entre as unidades (Tabela 16 e Tabela 18) é função dos parâmetros de curva de droop ajustados pelo fluxo de potência ótimo e apresentados na Tabela 17 e na Tabela 19.

Tabela 15: Melhor solução (sistema 69 ilhado).

	Barras	**Perdas (kW)**	f_{MG} **(Hz)**
Solução 1	12, 36, 62	11,4684	59,766
Solução 2	4, 19, 61	12,3969	59,802

Tabela 16: Geração de potência na solução 1 (sistema de 69 barras ilhado).

Gerador	P_g **(MW)**	Q_g **(Mvar)**	S_g **(MVA)**
12	0,6983	0,4792	0,8469
36	1,4501	1,0379	1,7833
62	1,6652	1,1884	2,0458

Tabela 17: Coeficientes de *droop* ajustados e *setpoints* – solução 1 (frequência e tensão a vazio).

Gerador	s_p **(pu)**	s_q **(pu)**	f_k^* **(Hz)**	V_k^* **(pu)**
12	7,6034 x 10^{-3}	4,4598 x 10^{-3}	60,085	1,0960
36	4,3474 x 10^{-3}	2,4833 x 10^{-3}	60,145	1,0974
62	3,2623 x 10^{-3}	2,7101 x 10^{-3}	60,092	1,0974

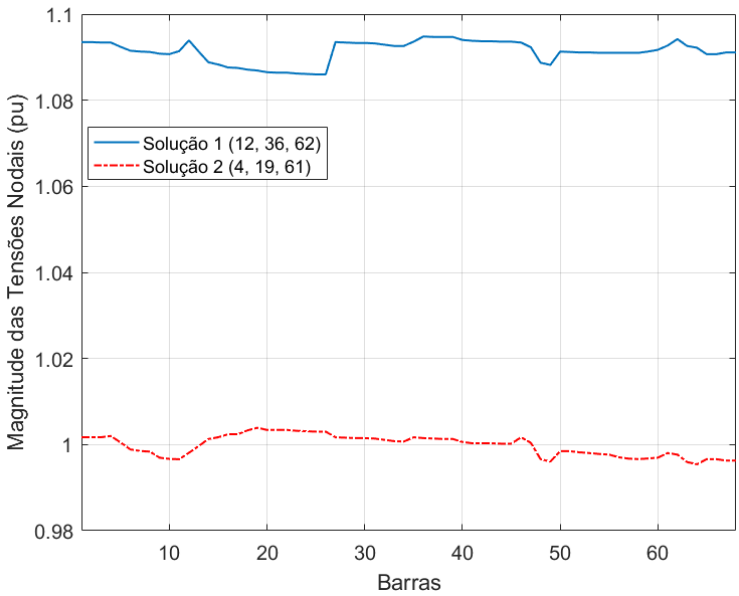

Figura 16: Magnitude das tensões nodais (sistema de 69 barras ilhado).

Conforme apresentado em SAVIER e DAS (2007), diferentes limites de corrente são adotados para os ramos do sistema, sendo o menor valor igual a 200 A (4,3856 pu na base adotada). Conforme pode ser visto na Figura 17, as correntes nos ramos são inferiores ao valor limite e as soluções são factíveis, embora poderia não ser devido ao fato de tais restrições não terem sido modeladas no fluxo de potência ótimo.

Tabela 18: Geração de potência na solução 2 (sistema de 69 barras ilhado).

Gerador	P_g **(MW)**	Q_g **(Mvar)**	S_g **(MVA)**
4	1,7060	1,0181	1,9867
19	0,4810	0,5779	0,7519
61	1,6275	1,1088	1,9693

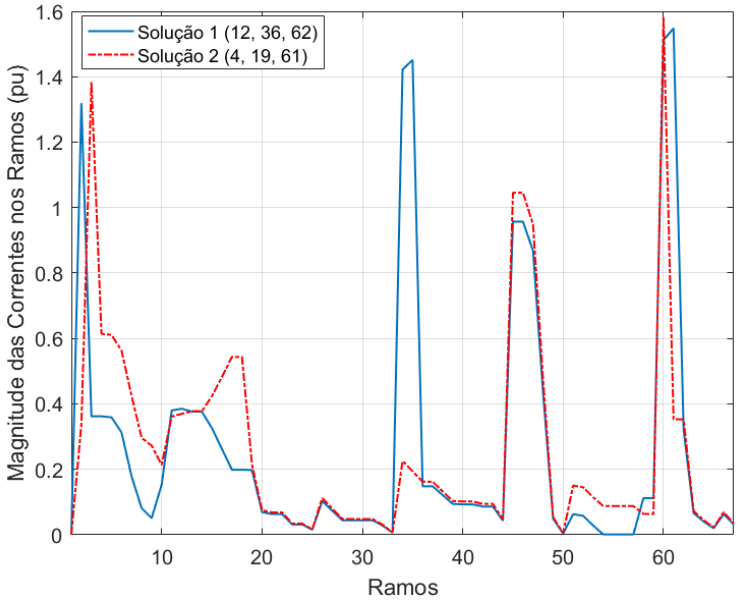

Figura 17: Magnitude das correntes nos ramos (sistema de 69 barras ilhado).

Tabela 19: Coeficientes de *droop* ajustados e *setpoints* – solução 2 (frequência e tensão a vazio).

Gerador	s_p (pu)	s_q (pu)	f_k^* (Hz)	V_k^* (pu)
4	2,6898 x 10^{-3}	4,9870 x 10^{-3}	60,077	1,0071
19	1,0554 x 10^{-2}	4,9347 x 10^{-3}	60,106	1,0068
61	3,2818 x 10^{-3}	4,9944 x 10^{-3}	60,122	1,0036

4.4.4 Avaliação da Solução Considerando o Sistema Conectado à Rede Principal

Para o sistema operando conectado à rede principal foram escolhidas três soluções que fornecem resultados bem próximos por terem selecionado barras vizinhas para a alocação de geradores. Tais soluções são apresentadas na Tabela 20. A Tabela 21 apresenta, para cada solução, os valores de potência absorvida da subestação (P_{69-1} e Q_{69-1}) bem como o total de potência gerada pelas unidades distribuídas ($P_G = \sum_{i=1}^{3} P_{Gi}$ e $Q_G = \sum_{i=1}^{3} Q_{Gi}$). Observa-se que a ligeira diferença nos valores de geração e absorção de potência implica na ligeira diferença no valor de perdas das soluções.

Tabela 20: Perdas de potência ativa (sistema de 69 barras conectado).

	Alocação GD nas Barras	Perdas (kW)
Solução 1	10, 19 e 60	4,2671
Solução 2	11, 18 e 60	4,4569
Solução 3	9, 19 e 60	4,4873

As Figura 18 e Figura 19 apresentam as magnitudes de tensão nodal e correntes nos ramos. Observa-se que os limites foram respeitados e que as diferenças ocorrem nas vizinhanças das barras 9 a 11 e 18 a 19 (escolhidas pelas soluções).

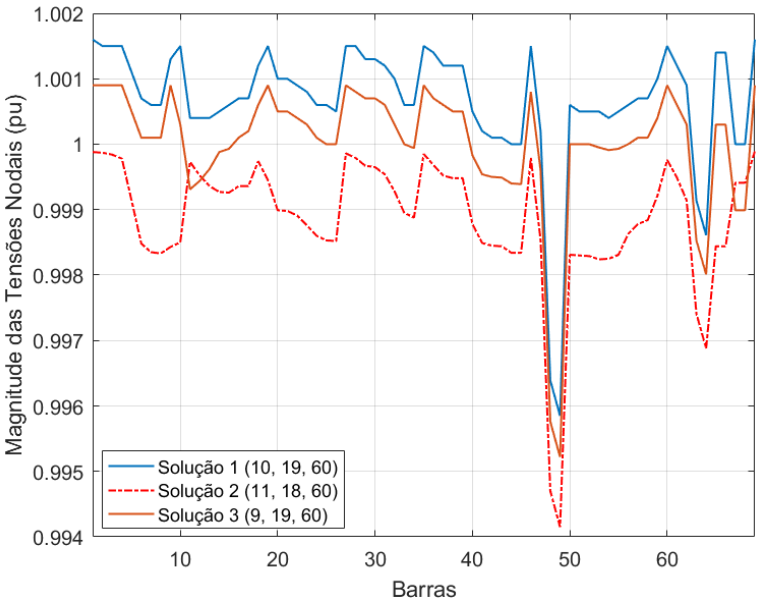

Figura 18: Magnitude das tensões nodais (sistema de 69 barras conectado).

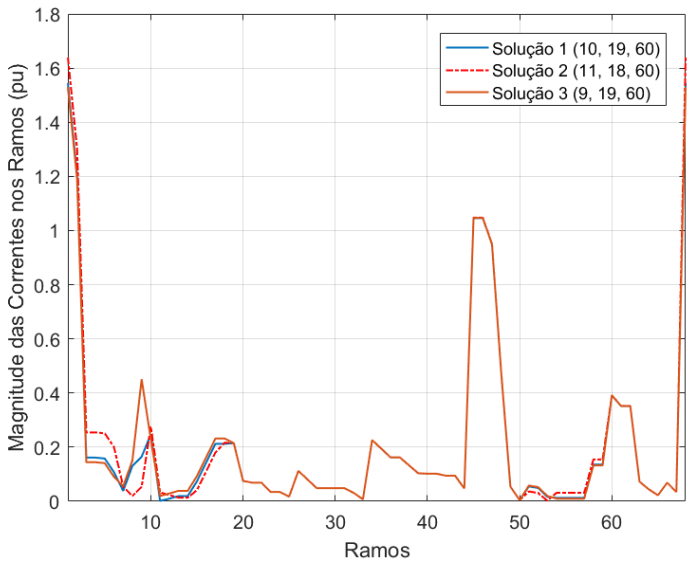

Figura 19: Magnitude das correntes nos ramos (sistema de 69 barras conectado).

Tabela 21: Potências absorvidas da rede e geradas (sistema de 69 barras conectado).

	P_{69-1} (MW)	Q_{69-1} (MVar)	P_G (MW)	Q_G (MVar)
Solução 1	1,2579	0,90186	2,5486	1,7995
Solução 2	1,3327	0,95681	2,4739	1,7447
Solução 3	1,2439	0,89197	2,5628	1,8095

4.4.5 Aplicabilidade das Soluções em ambos os Modos de Operação

Anteriormente foram analisadas cinco soluções para o sistema de 69 barras, sendo duas obtidas no caso ilhado e três no caso conectado à rede principal. Na ocasião da rede operar nos dois modos (isto é, a microrrede está sujeita a um ilhamento), é importante avaliar a qualidade das soluções (valor das perdas) em ambos os modos de operação. Para isso, para cada alocação da Tabela 22 foi executado o fluxo de potência ótimo tanto para o sistema ilhado (sem barra infinita e com a modelagem do controle em *droop*) quanto para o sistema conectado (com barra infinita). Observa-se que a solução "Ilhada – Sol 02" apresenta um bom compromisso na redução de perdas em ambos os modos de operação, sendo uma boa opção para a escolha na etapa de planejamento. Por fim, observa-se que a solução "Conectada – Sol 02" não é factível para a operação ilhada (isto é, o fluxo de potência ótimo não convergiu).

Tabela 22: Avaliação das soluções em ambos os modos de operação (sistema de 69 barras).

Solução	**Alocação de GD nas Barras**			**Rede Ilhada**		**Rede Conectada**
				Perdas (kW)	**Freq (Hz)**	**Perdas (kW)**
Ilhada – Sol 01	12	36	62	11,4684	59,766	10,6760
Ilhada – Sol 02	**4**	**19**	**61**	**12,3969**	**59,802**	**8,0125**
Conectada – Sol 01	10	19	60	35,502	59,794	4,2671
Conectada – Sol 02	11	18	60	--	--	4,4569
Conectada – Sol 03	9	19	60	23,808	59,748	4,4873

Uma análise similar àquela realizada para o sistema de 33 barras, em que foi feita a combinação das barras das melhores soluções poderia ter sido adotada para o sistema de 69 barras. Entretanto, já ficou claro através da Tabela 22 a importância da análise das soluções fornecidas pelo Algoritmo Genético e que a melhor solução para o sistema ilhado pode não ser a melhor para a operação conectada à rede principal.

4.5 Considerações Finais

O presente capítulo apresentou um estudo de caso para dois sistemas da literatura operando ilhados ou conectados à rede principal. Foi verificado que o Algoritmo Genético não garante soluções ótimas nem a reprodutibilidade das soluções, apesar de apresentar soluções de boa qualidade em um tempo computacional razoável. Ademais, observou-se que a melhor solução para o sistema operando ilhado pode não ser a melhor para a operação conectada à rede principal, indicando que uma avaliação detalhada das soluções em cada modo de operação deve ser realizada. Com base nessas análises, ressalta-se que cabe ao engenheiro responsável pelo planejamento a definição das melhores soluções, buscando um compromisso em ambos os modos de operação.

Capítulo 5 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

5.1 Considerações Finais

O presente trabalho apresentou uma metodologia de otimização para a alocação de unidades de geração distribuída em microrredes operando de forma ilhada ou conectada à rede principal. O objetivo foi a minimização de perdas de potência ativa no interior da microrrede. O problema de natureza não linear inteira mista, foi decomposto em dois subproblemas durante a solução. O primeiro, o de planejamento, trata as variáveis binárias (associadas à alocação ou não de geradores nas barras) e é solucionado através do Algoritmo Genético. Para cada indivíduo do Algoritmo Genético resolve-se um subproblema de operação, que consiste em um fluxo de potência ótimo de natureza contínua para a minimização das perdas de potência ativa. A operação ilhada ou conectada à rede principal exige formulações distintas para o fluxo de potência ótimo.

Na operação conectada à rede principal, empregou-se um fluxo de potência ótimo convencional, em que existe uma barra de balanço (ou infinita) capaz de suprir as variações de carga e perdas mantendo a frequência da microrrede constante. Por outro lado, na operação ilhada, existiu a necessidade de se modelar a característica de *droop* (malha $P - f$ e $Q - V$), responsável pelo compartilhamento de potência ativa e reativa entre as unidades. Nesse caso, a frequência da microrrede pode diferir da frequência nominal da rede.

A metodologia proposta foi aplicada a duas microrredes, sendo uma com 33 barras e outra de 69 barras. Os resultados foram comparados com aqueles fornecidos pela busca exaustiva (para a microrrede de 33 barras), mostrando a capacidade do Algoritmo Genético em fornecer soluções de qualidade (eventualmente encontrando o ótimo) em um tempo de computação razoável. Para a microrrede de 69 barras, embora não se tenha realizado uma busca exaustiva, considera-se que os resultados obtidos foram promissores. A alocação foi realizada para os dois modos de operação e as soluções finais identificadas separadamente foram então avaliadas a fim de se

identificar uma solução única, que atenda às duas situações de operação. A principal conclusão é que a metodologia proposta, aplicada separadamente aos diferentes modos de operação, fornece resultados que devem ser avaliados posteriormente pelo responsável pelo planejamento, sendo este um bom ponto de partida na tarefa de avaliação.

5.2 Propostas de Continuidade

Os trabalhos futuros estarão focados na:

- consideração de outras metaheurísticas;
- avaliação de um número maior de GDs;
- avaliação das soluções no domínio do tempo;
- inclusão dos custos de alocação das unidades;
- inclusão dos limites de corrente dos ramos;
- consideração de perfis de carga em um horizonte de planejamento.

Referências Bibliográficas

ABDELSALAM , A. A.; EL-SAADANY , E. F. Probabilistic Approach for Optimal Planning of Distributed Generators with Controlling Harmonic Distortions. **IET Gener. Transm. Distrib.**, 7, Out. 2013. 1105-1115.

ABU-MOUTI, F. S.; EL-HAWARY, M. E. Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 26, Oct. 2011. 2090-2101.

AHMADI, B.; CEYLAN, O.; OZDEMIR, A. **Grey Wolf Optimizer for Allocation and Sizing of Distributed Renewable Generation**. 54th International Universities Power Engineering Conference - UPEC. Bucharest, Romania: [s.n.]. 2019.

AL-SABOUNCHI, A. et al. **Optimal Sizing and Location of a PV System on Three-Phase Unbalanced Radial Distribution Feeder Avoiding Reverse Power Flow**. IEEE Electrical Power and Energy Conference. Winnipeg, Canada: [s.n.]. 2011. p. 74-79.

AL-SABOUNCHI, A.; GOW, J.; AL-AKAIDI, M. Simple Procedure for Optimal Sizing and Location of a Single Photovoltaic Generator on Radial Distribution Feeder. **IET Renewable Power Generation**, 8, Mar. 2014. 160–170.

ATWA, Y. M.; EL-SAADANY, E. F. Probabilistic Approach for Optimal Allocation of Wind-Based Distributed Generation in Distribution Systems. **IET Digital Library**, Jan. 2011. 79-88.

BARAN, M. E.; WU, F. F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Apr 1989a. 1401-1407.

BARAN, M. E.; WU, F. F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 4, Jan. 1989b. 725-734.

BELLIDO, M. H. et al. Barriers, Challenges and Opportunities for Microgrid Implementation: The Case of Federal University of Rio de Janeiro. **Journal of Cleaner Production**, 188, Jul. 2018. 203-216.

BELLIDO, M. M. H. **Microrredes elétricas: Uma Proposta de Implementação no Brasil**. Tese de Doutorado - UFRJ. Rio de Janeiro. 2018.

CHAKRABORTY, S.; WEISS, M. D.; SIMÕES, M. G. Distributed Intelligent Energy Management System for a Single-Phase High-Frequency AC Microgrid. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Piscataway, 54, Feb. 2007. 97–109.

CHIRADEJA, P.; RAMAKUMAR, R. An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 19, Dec. 2004. 764–773.

CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P. Microgrids and Active Distribution Networks. [S.l.]: The Institution of Engineering and Technology, 2009. p. 321.

COELHO, F. C. R. **Alocação Ótima de Geração Distribuída em Sistemas de Distrinuição de Energia Elétrica via Otimização Bio-Inspirada na Ecolocalização de Morcegos**. Dissertação de Mestrado - UFJF. Juiz de Fora. 2013.

COELHO, F. C. R. et al. Empirical Continuous Metaheuristic for Multiple Distributed Generation Scheduling Considering Energy Loss Minimisation, Voltage and Unbalance Regulatory Limits. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 14, May. 2020. 3301–3309.

CROSSLAND, A. F.; JONES, D.; WADE, N. S. Planning the Location and Rating of Distributed Energy Storage in LV Networks Using a Genetic Algorithm with Simulated Annealing. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 59, p. 103-110, Jul. 2014.

DA SILVEIRA, A. S. **Método Heurístico para Otimização do Dimensionamento de Uma Microrrede De Energia**. Tese de Doutorado - UFSM. Santa Maria. 2021.

DIAS, B. H. et al. **Hybrid Heuristic Optimization Approach for Optimal Distributed Generation Placement and Sizing**. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. [S.l.]: [s.n.]. Jul. 2012. p. 1-6.

DORIGO, M.; BIRATTARI, M.; STÜTZLE, T. Ant Colony Optimization. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, Nov. 2006. 28-39.

EL-KHATTAM, W.; HEGAZY, Y. G.; SALAMA, M. M. A. An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, 20, May 2005. 1158-1165.

FALCÃO, D. M. **Smart Grids e Microrredes:** o Futuro já é Presente. Anais do VIII SIMPASE. Rio de Janeiro: [s.n.]. Ago 2009.

FOROUTAN, V. B.; MORADI, M. H.; ABEDINI, M. Optimal Operation of Autonomous Microgrid Including Wind Turbines. **Renewable Energy**, 99, Dec. 2016. 315-324.

GAUTAM, D.; MITHULANANTHAN, N. Optimal DG Placement in Deregulated Electricity Market. **Electric Power Systems Research**, 77, Oct. 2007. 1627-1636.

GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. **SAGE Journals**, 76, Feb. 2001. 60-68.

GEORGILAKIS, P. S.; HATZIARGYRIOU, N. Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research. **IEEE Transactions on Power Systems**, 28, Jan. 2013. 3420–3428.

GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. 13. ed. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 1989.

GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; CONEJO, A. J.; CAÑIZARES, C. Electric Energy Systems: Analysis and Operation. [S.l.]: CRC Press, 2017.

GOMEZ-GONZALEZ, M.; LÓPEZ, A.; JURADO, F. Optimization of Distributed Generation Systems Using a New Discrete PSO and OPF. **Electric Power Systems Research**, 84, Mar. 2012. 174-180.

GÖZEL, T.; HOCAOGLU, M. H. An Analytical Method for the Sizing and Siting of Distributed Generators in Radial Systems. **Electric Power Systems Research**, 79, Jun. 2009. 912-918.

GUPTA, Y. et al. Optimal DG Allocation and Volt−var Dispatch for a Droop Based Microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 12, Jan. 2021. 169–181.

GUPTA, Y. et al. Volt−VAr Optimization and Reconfiguration − Reducing Power Losses in a Droop Based Microgrid. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 57, May 2021. 2769-2781.

HARRISON, G. P. et al. Hybrid GA and OPF Evaluation of Network Capacity for Distributed Generation Connections. **Electric Power Systems Research**, v. 78, p. 392-398, Mar. 2008.

HATZIARGYRIOU, N. Microgrids Architectures and Control. 1. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2013.

HATZIARGYRIOU, N. et al. Microgrids. **IEEE Power and Energy Magazine**, 5, Jul-Ago 2007. 78-94.

HEMMATPOUR, M. H.; MOHAMMADIAN, M.; GHARAVEISI, A. A. Optimum Islanded Microgrid Reconfiguration Based on Maximization of System Loadability and Minimization of Power Losses. **ScienceDirect International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 78, Jun. 2016. 343-355.

HIEN, N. C.; MITHULANANTHAN, N.; BANSAL, R. C. Location and Sizing of Distributed Generation Units for Loadabilty Enhancement in Primary Feeder. **IEEE Systems Journal**, v. 7, p. 797-806, Dec. 2013.

HUAYLLAS, T. E. C. **Micro-Redes Elétricas: Estado da Arte e Contribução para o Dimensionamento, Aplicação e Comercialização da Energia Produzida**. Tese de Doutorado - USP. São Paulo. 2015.

HUNG, D. Q.; MITHULANANTHAN, N.; LEE, K. Y. Optimal Placement of Dispatchable and Nondispatchable Renewable DG Units in Distribution Networks for Minimizing Energy Loss. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 55, Feb. 2014. 179-186.

KARABOGA, D. **An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization.** Universidade Erciyes. Kayseri. 2005.

KEANE, A. ; O'MALLEY, M. Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, 20, Aug. 2005. 1640-1646.

KENNEDY, J; EBERHART, R. **Particle Swarm Optimization**. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: [s.n.]. 1995. p. 1942-1948.

KHATOD, D. K.; PANT, V.; SHARMA, J. Evolutionary Programming Based Optimal Placement of Renewable Distributed Generators. **IEEE Transactions on Power Systems**, 28, May 2013. 683-695.

KIRKPATRICK, S. ; GELLAT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. **Science (American Association for the Advancement of Science)**, 220, May 1983. 671-680.

KUMAR, S.; MANDAL, K. K.; CHAKRABORTY, N. Optimal DG placement by multi-objective opposition based chaotic differential evolution for techno-economic analysis. **Applied Soft Computing**, May 2019. 70-83.

KUNDUR, P. Power System Stability and Control. [S.l.]: McGraw-Hill Professional Publishing, 1994.

LA GATTA, P. O.; PASSOS FILHO, J. A.; PEREIRA, J. L. R. Tools for Handling Steady-State Under-Frequency Regulation in Isolated Microgrids. **IET Renewable Power Generation**, 13, Jan. 2019. 609-617.

LASSETER, R. et al. **Integration of Distributed Energy Resources: The CERTS MicroGrid Concept**. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions. [S.l.], p. 186-202. Apr. 2002.

LEE, S. H.; PARK, J.-H. **Optimal Placement and Sinzing of Multiple DGs in a Practical DIstribution System by Considering Power Loss**. IEEE Electronic Library (IEL) Conference Proceedings 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. [S.l.]: [s.n.]. Oct. 2013. p. 1-8.

LIDULA, N. ; RAJAPAKSE, A. D. Microgrids Research: A Review of Experimental Microgrids and Test Systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, January 2011. 186-202.

LOPES, J. A. P.; MOREIRA, C. L.; MADUREIRA, A. G. Defining Control Strategies for MicroGrids. **IEEE Transactions on power systems**, 21, May. 2006. 916-924.

MANANDHAR, U.; UKIL, A.; JONATHAN, T. K. K. **Efficiency Comparison of DC and AC Microgrid**. IEEE Innovative Smart Grid Technologies - ISGT. Bangkok, Thailand: [s.n.]. 2015.

MANNA, D.; GOSWAMI, S. K.; CHATTOPADHYAY, P. K. Optimisation of Droop Coefficients of Multiple Distributed Generators in a Micro-grid. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 12, Oct. 2018. 4108-4116.

MARKETS, E E. Think microgrid: A discussion guide for policymakers. [S.l.]: [s.n.], 2014.

MARNAY, C.; RUBIO, F. J.; SIDDIQUI, A. S. Shape of the Microgrid. **IEEE Winter Meeting**, Jan. 2001. 151-153.

MENDONÇA, L. P. **Introdução as Microrredes e Seus Desafios**. Monografia - UFRJ. Rio de Janeiro. 2011.

MILANO, F. Power System Modelling and Scripting. 2010. ed. [S.l.]: Springer, 2010.

MORADI, M. H.; ABEDINI, M. A Combination of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Optimal DG Location and Sizing in Distribution Systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 34, Jan. 2012. 66-74.

MUMTAZ, F.; BAYRAM, I. S. Planning, Operation, and Protection of Microgrids: An Overview. **Energy Procedia**, 107, Feb. 2017. 94-100.

MUTTAQI, K. M. et al. An Algebraic Approach for Determination of DG Parameters to Support Voltage Profiles in Radial Distribution Networks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 5, May 2014. 1351-1360.

OLIVARES, D. E. et al. Trends in Microgrid Control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 5, Jul. 2014. 1905-1919.

PALIZBAN, O.; KAUHANIEMI, K.; GUERRERO, J. M. Microgrids in Active Network Management - Part I: Hierarchical Control, Energy Storage, Virtual Power Plants, and Market Participation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 36, Aug. 2014. 428-439.

PHONRATTANASAK, P.; MIYATAKE, M.; SAKAMOTO , O. **Optimal Location and Sizing of Solar Farm on Japan East Power System Using Multiobjective Bees Algorithm**. IEEE Energytech. Cleveland, USA: [s.n.]. 2013. p. 1-6.

PINZÓN, A. M. O. **Otimização da Potência Unitária dos Geradores de Energia numa Microrrede Elétrica com Geração Híbrida Fóssil/Renovável**. Dissertação de Mestrado - UNIFEI. Itajubá. 2015.

POPOVIć, D. H. et al. Placement of Distributed Generators and Reclosers for Distribution Network Security and Reliability. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 27, Jul. 2005. 398-408.

RIDER, M. J. et al. Bilevel Approach for Optimal Location and Contract Pricing of Distributed Generation in Radial Distribution Systems Using Mixed-Integer Linear Programming. **IET Gener. Transm. Distrib**, 7, Jul. 2013. 724-734.

SAVIER, J. S.; DAS, Debapriya. Impact of Network Reconfiguration on Loss Allocation of Radial Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Oct. 2007. 2473–2480.

SILVESTRI, A.; BERIZZI, A.; BUONANNO, S. **Distributed Generation Planning Using Genetic Algorithms**. PowerTech Budapest 99. Budapest, Hungary: [s.n.]. 1999. p. 257.

SOSHINSKAYA, Mariya et al. Microgrids: Experiences, Barriers and Success Factors. **Renewable and Sustainable Energy**, 40, n. 1, Ago. 2014. 659-672.

SOUZA JÚNIOR, M. E. T.; DE FREITAS, L. C. G. Microrredes: Estado da Arte, Desafios e Tendências para Geração, Distribuição e Uso Sustentável de Energia Elétrica. **Brazilian Applied Science Review**, 4, Dez. 2020. 3888-3906.

USTUN, T. S.; OZANSOY, C.; ZAYEGH, A. Recent Developments in Microgrids and Example Cases Around the World: A Review. **Renewable and sustainable Energy Reviews**, Melbourne, 15, Oct. 2011. 4030-4041.

WU, F. F. et al. **A Two-stage Approach To Solving Large-scale Optimal Power Flows**. IEEE Conference Proceedings Power Industry Computer Applications Conference - PICA. Cleveland, USA: [s.n.]. 1979.

YANG, X.-S. Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimisation. **International Journal of Bio-Inspired Computation**, 2, Mar. 2010. 78-84.

YANG, X.-S. Nature-Inspired Optimization Algorithms. [S.l.]: Elsevier, 2014.

ZAKARIA, Y. Y. et al. **Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing Using Genetic and Ant Colony Algorithms**. Fourth International Conference on Advanced Technology and Applied Sciences - (ICaTAS). Cairo, Egypt: [s.n.]. Sep. 2020. p. 10-12.

ZHANG, M.; MING, G.; LUYAO, L. Sizing and Siting of Distributed Generators and Energy Storage in a Microgrid Considering Plug-in Electric Vehicles. **Energies (Basel)**, Jun. 2019. 2293.