

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

REGULAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA EM MICRO-REDES ILHADAS COM
VEÍCULOS ELÉTRICOS E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO
POR ENXAME DE PARTÍCULAS

RODRIGO VEIGA DA SILVA

DM 20/2019

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO VEIGA DA SILVA

REGULAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA EM MICRO-REDES ILHADAS COM
VEÍCULOS ELÉTRICOS E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO
POR ENXAME DE PARTÍCULAS

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO VEIGA DA SILVA

REGULAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA EM MICRO-REDES ILHADAS COM
VEÍCULOS ELÉTRICOS E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO
POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do grau Mestre em Engenharia Elétrica na área de Computação Aplicada.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

V426r Veiga da Silva, Rodrigo
Regulação de tensão e frequência em micro-redes ilhadas com
veículos elétricos e geração distribuída utilizando otimização por
enxame de partículas / Rodrigo Veiga da Silva. — 2019.
87 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Carolina de Mattos Affonso
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal
do Pará, Belém, 2019.

1. Micro-redes. 2. Controle de Droop. 3. Veículos Elétricos.
4. Controle Secundário. 5. Regulação de frequência. I. Título.

CDD 621.310285

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

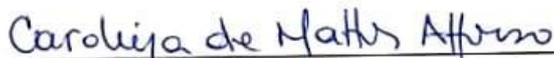
**"REGULAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA EM MICROREDES
ILHADAS COM VEÍCULOS ELÉTRICOS E GERAÇÃO DISTRIBUIDA
UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS"**

AUTOR: RODRIGO VEIGA DA SILVA

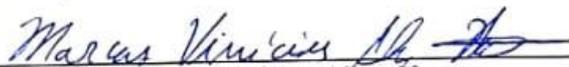
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 16/08/2019

BANCA EXAMINADORA:



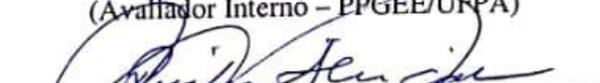
Prof.ª Dr.ª Carolina de Mattos Affonso
(Orientadora – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)


Prof. Dr. Raidson Jenner Negroiros de Alencar
(Avaliador Externo – IFPA)

VISTO:


Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

*“A ciência nunca resolve um problema sem antes
criar pelo menos outros dez.”*

- George Bernard Shaw

AGRADECIMENTOS

Como inevitavelmente esqueceria de mencionar alguém que tenha contribuído de alguma forma na execução dessa dissertação, todos aqueles que se reconhecerem aqui, sintam-se agradecidos, com todo o meu carinho. No entanto, a algumas pessoas eu dedico um agradecimento especial:

A Deus pela inspiração e força nos momentos motivadores e desmotivadores no decorrer dessa dissertação, sempre precedidos de um “Deus me ajude” e “obrigado meu Deus”. Sempre fui atendido. Obrigado!

À minha orientadora e professora, Profa. Carolina de Mattos Affonso, que mesmo devido à grande distância (EUA-BRASIL), conduziu com carinho e dedicação a orientação e sugestões que resultaram no sucesso desta jornada.

À minha família, especialmente meu filho (Rodrigo) e esposa (Amanda) pela compreensão e amor que foram cruciais, principalmente nos momentos difíceis da execução desta dissertação. À minha mãe (Cintia), pela sua companhia no qual, curiosamente, as rotinas do algoritmo principal foram obtidas enquanto conversávamos e tomávamos café em casa. Obrigado mãe! Ao meu pai (Afonso), sempre incentivador e motivador da minha carreira acadêmica e profissional. Obrigado pelos conselhos e ensinamentos! Aos meus irmãos de sangue Vanessa e Rafael, obrigado por sempre estarem presentes na minha vida.

*Este trabalho é dedicado ao maior amor que a vida me deu, meu filho: Rodrigo Veiga da
Silva Filho.*

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativa	1
1.2. Revisão Bibliográfica	3
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Organização do Trabalho	5
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
2.1. Considerações Iniciais	6
2.2. Geração Distribuída	6
2.2.1. Questões técnicas associadas à utilização da GD.....	8
2.2.2. Tecnologias de Fontes de GD.....	9
2.3. Micro-redes.....	10
2.3.1. Conceito.....	11
2.3.2. Arquitetura básica.....	12
2.3.3. Modos de operação.....	13
2.4. Controle de Micro-redes	14
2.4.1. Controle de micro-fontes e <i>Droop</i>	17
2.5. Fluxo de Potência para Micro-redes Ilhadas e Reguladas por <i>Droop</i>	22
2.5.1. Método DBFS.....	23
2.6. Considerações finais	29
3. MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	30
3.1. Considerações Iniciais	30
3.2. PSO	32
3.2.1. Analogia Comportamental.....	32
3.2.2. Algoritmo Básico.....	34
3.2.3. Parâmetros	35
3.3. Considerações finais	36

4. METODOLOGIA.....	37
4.1. Considerações iniciais.....	37
4.2. Sistema Teste	37
4.3. Definição dos componentes do sistema	38
4.3.2. Geração Solar e Eólica	39
4.3.3. Veículos Elétricos.....	40
4.3.4. Sistema de Armazenamento de Energia	42
4.4. Modelagem do problema de otimização	42
4.4.1. Controle Primário	42
4.4.2. Controle Secundário	43
4.5. Considerações finais	48
5. RESULTADOS	49
5.1. Experimentos Iniciais	49
5.2. Experimento principal.....	56
5.3. Considerações finais	61
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERÊNCIAS	64
ANEXO I.....	69

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Estrutura simplificada de uma micro-rede	13
Figura 2 Estrutura de controle hierárquico de uma micro-rede.....	14
Figura 3 Controle Descentralizado e Centralizado	16
Figura 4 Circuito para análise do fluxo de potências.	18
Figura 5 Sistema teste 33 barras modificado.....	37
Figura 6 Carga total do sistema	38
Figura 7 Geração de Renováveis	39
Figura 8 Característica de <i>droop</i> $f - P$ e $U - Q$ – Efeito do controle primário e secundário. 43	
Figura 9 Fluxograma do Problema de Otimização	47
Figura 10 Convergência do Método DBFS – Micro-rede Ilhada	51
Figura 11 Convergência do Método DBFS – Micro-rede conectada	53
Figura 12 Convergência da frequência.....	56
Figura 13 Frequência da micro-rede ilhada utilizando controle por <i>droop</i>	57
Figura 14 Tensão nas barras utilizando controle por <i>droop</i>	58
Figura 15 Frequência da micro-rede ilhada utilizando o método proposto (<i>droop</i> /PSO).	59
Figura 16 Tensão nas barras utilizando o método proposto (<i>droop</i> /PSO).	59
Figura 17 Operação ótima da micro-rede ilhada.	60
Figura 18 Perdas de potência ativa total.	61
Figura 19 Enxame inicial.....	69
Figura 20 Enxame 10 iterações	69
Figura 21 Enxame 100 iterações (final)	70
Figura 22- Curva de F(t) em função das variáveis de decisão.....	70
Figura 23 Evolução da função objetivo	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Potência Nominal das Microfontes.....	49
Tabela 2 Resultado do fluxo de carga utilizando método DBFS para micro-rede ilhada.	50
Tabela 3 Resultado Fluxo de carga – Método DBFS – Micro-rede conectada	52
Tabela 4 Resultado DBFS - Sistema de Distribuição Convencional	54
Tabela 5- Parâmetros do PSO.....	69

LISTA DE SÍMBOLOS

S_i	Potência aparente da Barra i (p.u.)
P_i	Potência ativa da Barra i (p.u.)
Q_i	Potência reativa da Barra i (p.u.)
P_{Gi}	Potência ativa gerada na barra i (p.u.)
Q_{Gi}	Potência reativa gerada na barra i (p.u.)
P_{Ci}	Potência ativa consumida pelas cargas na barra i (p.u.)
Q_{Ci}	Potência reativa consumida pelas cargas na barra i (p.u.)
θ_i	Diferença de fase da Barra i (p.u.)
V_i	Diferença de tensão da Barra i (p.u.)
m_{pi}	Coefficiente de <i>Droop</i> de frequência (p.u.)
m_{qi}	Coefficiente de <i>Droop</i> de tensão (p.u.)
f	Frequência (Hz)
Δf	Desvio de frequência (p.u.)
ΔP_{carga}	Varição de potência ativa (p.u.)
ΔQ_{carga}	Varição de potência reativa (p.u.)
ΔP_i	Compartilhamento de carga de potência ativa do gerador i (p.u.)
ΔQ_i	Compartilhamento de carga de potência reativa do gerador i (p.u.)
Γ	Matriz de incidência nodal
$V^{0'}$	Tensão de referência atualizada (p.u.)
ΔV	Varição de tensão (p.u.)
v_i	Velocidade da partícula
x_i	Posição da partícula
c_1	Fator aceleração
c_2	Fator aceleração
x_{pbest}	Melhor posição das partículas até o momento
x_{gbest}	Melhor posição da partícula no enxame
ω_i	Fator de inércia
K	Fator constrição
$\gamma_C(t)$	Nível de carga
$\gamma_{Solar}(t)$	Nível de geração solar

$\gamma_{Eólico}(t)$	Nível de geração eólica
$SOC_{ve}(t)$	Nível de energia – Veículos elétricos
$SOC_{bat}(t)$	Nível de energia – Baterias
β_P	Coefficiente de ajuste de desvio frequência (Hz)
β_Q	Coefficiente de ajuste de desvio de frequência (p.u.)
P_G^β	Potência ativa gerada devido ação de β_P (p.u.)
Q_G^β	Potência reativa gerada devido ação de β_Q (p.u.)
$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$	Fator de escalabilidade da função objetivo
$F(t)$	Função objetivo
$\Delta f(t)$	Desvio de frequência no tempo
$V_i(t)$	Tensão de barras no tempo
$P_B^{perda}(t)$	Perda de potência ativa total
$Q_B^{perda}(t)$	Perda de potência reativa total

Resumo

Este trabalho apresenta uma implementação de controle de frequência e tensão para uma micro-rede ilhada e regulada por *droop* através do algoritmo de fluxo de carga adaptado para micro-redes e intitulado DBFS (em inglês, *Direct Backward/Forward Sweep Load Flow*) modelado como um problema de otimização resolvido pela técnica de otimização por enxame de partículas PSO (em inglês, *Particle Swarm Optimization*). O PSO, aliado à capacidade V2G (em inglês, *Vehicle-to-Grid*) de veículos elétricos, reajusta as características de *droop* para melhorar os desvios de frequência e tensão de regime permanente da micro-rede, funcionando, assim, como uma ação de controle secundário. As simulações foram realizadas em um sistema de distribuição de 33 barras ilhado, com geração distribuída e veículos elétricos operando em um período de 24 horas. Os resultados demonstraram que a proposta de controle secundário, fundamentada em PSO, se mostrou versátil e eficiente frente as variações de carga e geração do sistema.

Palavras-chave: Micro-redes, Controle de *Droop*, Veículos Elétricos, Algoritmo DBFS, PSO.

Abstract

This work presents a frequency and voltage control implementation for a droop-regulated islanded microgrid through Direct Backward Forward Sweep Load-Flow Method (DBFS) modeled as a particle swarm optimization (PSO) problem. The PSO – allied with the Vehicle-to-Grid (V2G) technology of electric vehicles – controls the microgrid droop features to improve its steady-state frequency and voltage. Thus, working as a secondary control action. Simulations are performed in a 33-bus distribution system with distributed generators and electric vehicles operating over a 24-hour period. The proposal of secondary control, based on PSO, proved to be versatile and efficient in face of load and generation variations.

Keywords: Microgrids, Droop Control, Electric Vehicles, DBFS Algorithm, PSO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

Os combustíveis fósseis são amplamente utilizados para geração de energia e transporte. Estes combustíveis vêm trazendo uma série de problemas de cunho ambiental em virtude dos gases poluentes lançados na atmosfera, que levaram a uma nova tendência de gerar localmente energia no nível de tensão de distribuição usando fontes de energia renováveis como biogás, energia eólica, energia solar e veículos elétricos. Esse tipo de geração, próximo à carga, é conhecida como Geração Distribuída (GD) e apresenta diversas vantagens em comparação com a forma de geração do tipo centralizada, onde grandes geradores são posicionados longe dos centros de carga, o que aumenta as perdas nas extensas linhas de transmissão (KUMAR, SAMUEL e JAISWAL, 2015).

Com a integração da GD no sistema de distribuição, a rede deixa de ser passiva, com transporte de energia unidirecional, para ser uma rede de distribuição ativa, com transporte bidirecional de eletricidade, sendo denominada de Rede Ativa de Distribuição (RAD) (HIDALGO, ABBEY e JOÓS, 2010). O aumento da complexidade da rede, principalmente relacionado à quantidade e intermitência das fontes renováveis, impõem novos desafios operacionais que exigem ferramentas de controle flexíveis e inteligentes para gerenciar esse transporte de energia adequadamente. Assim, surge o conceito de Micro-rede (MR) (ZHOU, GUO e MA, 2015).

Uma MR é essencialmente uma RAD devido ao conglomerado de sistemas de GD e diferentes cargas conectadas entre si no nível de tensão da distribuição, com a diferença de ser uma entidade localmente controlada que pode funcionar de maneira autônoma da rede de energia principal. Com isso, a MR pode operar conectada à rede principal ou ilhada durante desligamentos ou blecautes. Isso implica que a MR tem um papel fundamental no que diz respeito a operação resiliente dos sistemas de energia, mantendo o suprimento confiável e seguro, principalmente quando o sistema está sujeito a desastres naturais ou condições climáticas extremas em que ocorrem ilhamento (SILVA e AFFONSO, 2018). No entanto, a condição de ilhamento impõe desafios para a operação segura dos sistemas de energia, pois o desequilíbrio entre geração e carga, após a desconexão do sistema, pode ocasionar flutuações de tensão e frequência, exigindo a aplicação de corte de carga como último recurso para manter o sistema operando dentro de limites aceitáveis.

Importantes pesquisas estão em andamento para desenvolver modelos matemáticos e técnicas para avaliar e melhorar o desempenho das MRs, tanto sob o ponto de vista de comportamento transiente quanto de regime permanente (TINAGERO, RAMÍREZ, *et al.*, 2019). Em relação ao cálculo da solução de regime permanente, esta não é uma tarefa simples para MRs sujeitas à ilhamento e intermitência de fontes de energia renováveis. Na indústria de sistemas de energia, a forma comum de calcular o estado de regime permanente é através da solução da equação de balanço de potência usando o método de Newton. No entanto, no modo de operação ilhado, a frequência do sistema pode estar diferente da frequência nominal e a barra de referência torna-se inexistente, tornando inviável a utilização de métodos convencionais de fluxo de carga dependentes da barra de referência para os cálculos. Assim, os requisitos de controle de micro-redes e estratégias para realizar o balanceamento local e maximizar seus benefícios, levaram as MRs a atenderem uma ampla gama de funcionalidades, como o controle do fluxo de potência para evitar exceder a capacidade da linha, regulação de tensão e frequência e balanço de energia, que implicaram na formulação de novos métodos de fluxo de carga que levem em consideração o ilhamento e, conseqüentemente, a falta de barra de referência (REN e ZHANG, 2018) (TINAGERO, RAMÍREZ, *et al.*, 2019).

Entre os métodos de controle existentes para micro-redes ilhadas, a técnica de *droop* de frequência e tensão tem ganhado popularidade e é considerada como um método bem estabelecido (TAYAB, ROSLAN, *et al.*, 2017) (KAVIRI, PAHLEVANI, *et al.*, 2017). Na sua essência, esse método de controle imita nos inversores, que são dispositivos conversores de energia estáticos obrigatoriamente presentes em micro-redes, características de estatismo das máquinas síncronas, normalmente presente nos sistemas de energia de grande porte. Assim, observando atender esses novos requisitos nos modelos de micro-redes, os métodos de fluxos de carga para micro-redes (ilhadas ou não) têm incorporado as características de *droop* e ausência da barra de referência em sua formulação.

Recentemente, com a aceleração da eletrificação do transporte devido ao crescimento na venda de Veículos Elétricos (VEs) e diminuição no preço das baterias, o sistema elétrico de distribuição passa por novos desafios operacionais. A conexão em massa de veículos elétricos na rede representa um aumento na demanda de energia, de difícil previsão, pois depende de diversos fatores como o hábito dos motoristas. Contudo, com a possibilidade dos VEs injetarem energia na rede através da tecnologia *Vehicle-to-Grid* (V2G), pode-se pensar nos VEs como uma fonte de energia não convencional e capaz de oferecer capacidade de controle. Assim, os VEs podem ser peça chave nas RADs uma vez que oferecem essa capacidade bidirecional de

fluxo de energia e, dessa forma, podem contribuir para alcançar o objetivo de regulação de sistemas ilhados (SILVA e AFFONSO, 2018) (SHAREEF, ISLAM e MOHAMED, 2016).

Neste trabalho é apresentada uma nova proposta de controle de tensão e frequência de regime permanente baseada no escalonamento ótimo de veículos elétricos em uma micro-rede ilhada e regulada por *Droop*. O ajuste é feito modelando o sistema por meio do método de fluxo de carga DBFS como um problema de otimização resolvido pela técnica heurística baseada no enxame de partículas PSO. Os veículos elétricos, ao injetarem ou drenarem energia da rede, melhoram os desvios de frequência e tensão da micro-rede sustentável em um período de simulação de 24 horas. Nas próximas seções são apresentadas as referências que antecedem a contribuição deste trabalho e os objetivos definidos para essa dissertação.

1.2. Revisão Bibliográfica

Como as micro-redes fazem parte do sistema de distribuição e estes se baseiam em topologias radiais, os métodos de fluxo de carga baseados em varredura direta e inversa tem ganhado popularidade. Mais conhecidos como métodos BFS (em inglês *Backward/Foward Sweep*), estes métodos de fluxo de carga são conhecidamente mais rápidos e eficientes que os convencionais para sistemas de distribuição devido à ausência de cálculos computacionais extensivos como a matriz jacobiana no Método de Newton-Raphson (HAMMED, HOSANI e ZEINELDIN, 2017). Entre os novos métodos de fluxo de carga desenvolvidos para micro-redes, os autores Diás, Aleixandre e Coto (2015) propõe um algoritmo baseado nos métodos BFS, chamado de *Direct Backward Foward Sweep* (DBFS), capaz de resolver o problema do fluxo de carga em micro-redes ilhadas e reguladas por *droop*. Ao invés de utilizar uma barra folga para fornecer a referência de tensão e potência necessária para fechar o balanço de potência na rede, a regulação de tensão e potência é realizada através do compartilhamento entre os recursos distribuídos em função de suas curvas de *droop* de frequência e tensão. Assim, esse método é capaz de fornecer, além da tensão das barras e perdas na linha, o desvio de frequência total da micro-rede. Além do DBFS, um outro algoritmo para micro-redes ilhadas e reguladas por *droop* é proposto por Nassar e Salama (2017), chamado *Foward Return Foward Backward Sweep* (FR-FBS). O método FR-FBS, também baseado nos métodos de BFS, elimina a necessidade dos cálculos matriciais para atingir o objetivo de acelerar o algoritmo e, assim, ser capaz de calcular o regime permanente de micro-redes com maior número de barras, mesmo que para isso, tenha uma pequena perda de precisão. Seguindo o mesmo propósito, os autores Hammed, Hosani e Zeineldin (2017), propõem uma metodologia direta similar ao método DBFS com o objetivo de aproximar os seus resultados com os obtidos no programa de

simulação de sistemas de energia no domínio do tempo PSCAD/EMTDC e, assim, validar sua proposta. Os resultados encontrados tanto no PSCAD como do DBFS são bastante próximos, validando em cadeia o método DBFS.

Trabalhos posteriores propuseram inserir, além das características de *droop* e ilhamento, o efeito do controle hierárquico no problema do fluxo de carga de micro-redes ilhadas. Ren e Zhang (2018) propõem uma estrutura adaptativa de controle secundário de tensão onde a saída de potência das GDs são incrementalmente ajustadas até que satisfaçam seus objetivos de controle. Já os autores Zambroni, Rodrigues e Zambroni (2017) propõe uma ferramenta de controle secundário para reduzir os desvios de frequência da micro-rede, modificando de forma incremental o estatismo dos geradores. Esta ferramenta foi incluída no método de fluxo de carga trifásico para micro-redes ilhadas proposto por (ABDELAZIZ, FARAG, *et al.*, 2012). Contudo, na formulação do problema, ao inserir uma Central Geradora Hidrelétrica com alta capacidade de geração, os autores colocam em dúvida o funcionamento ilhado da micro-rede e a eficácia da proposta de controle secundário. O trabalho de Tinagero, Ramírez, *et al.*(2019) apresenta uma proposta de controle hierárquico para uma micro-rede ilhada regulada por droop. Os modelos desenvolvidos são representados como um novo tipo de barra inserida no método de fluxo de carga de Newton-Raphson convencional.

Observa-se que até o momento, nenhum dos trabalhos anteriores considerou incluir um método de otimização heurístico ao modelo de fluxo de carga para micro-redes ilhadas como proposta de controle secundário. Assim, a principal contribuição desse trabalho foi expandir a capacidade do método DBFS, incorporando o controle secundário de tensão e frequência ao seu algoritmo de fluxo de carga através do compartilhamento inteligente dos recursos na rede, como veículos elétricos, fontes de energia solar, sistema de armazenamento por baterias e gerador de energia eólica. Utilizando os resultados dos cálculos obtidos pelo método DBFS, propõe-se uma função multi-objetivo para minimizar perdas e desvios de frequência e tensão, a ser otimizada utilizando o método de enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*), de rápida convergência dentre as outras heurísticas disponíveis, além de fácil implementação. Tendo em vista contornar a intermitência das fontes renováveis, propõe-se a utilização de um estacionamento de veículos elétricos munido de capacidade V2G, como ação de controle. A simulação é feita em um ciclo de 24h, onde as cargas e fontes de energia renováveis variam de acordo com a hora do dia.

1.3. Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo aplicar o controle secundário ao método de fluxo de carga DBFS, modelando-o como um problema de otimização a ser resolvido pelo método PSO, a fim de melhorar os perfis de tensão e frequência da micro-rede. O problema considera como entrada de dados as cargas e os recursos energéticos disponíveis na micro-rede ilhada variando no tempo, para um período de simulação de 24h. Como objetivos específicos destacam-se:

- Adaptar o algoritmo DBFS para forma dependente do tempo, para que possa obter o estado da micro-rede para cada horário do dia;
- Modelar o DBFS como um problema de otimização a ser resolvido pelo método PSO;
- Inserir as características V2G dos VEs aos cálculos das funções de *droop* para aplicar o controle secundário, isto é, inserir os despachos de VEs como variáveis de decisão do PSO.
- Validar a proposta comparando-a com incorporação apenas do controle primário de tensão e frequência.

1.4. Organização do Trabalho

Esta dissertação de mestrado está organizada em seis Capítulos, incluindo esta introdução. No capítulo 2 é apresentado o embasamento teórico sobre micro-redes, identificando os principais tipos de geração distribuídas utilizadas, conceituação de micro-redes, redes ativas de distribuição e seus modos de operação. Subsequentemente são apresentados o controle de droop de tensão e frequência e a técnica de fluxo de carga para micro-redes ilhadas e reguladas por droop, DBFS.

No capítulo 3 é apresentada a conceituação das técnicas heurísticas utilizadas em otimização de sistemas. A técnica de otimização heurística por enxame de partículas, PSO, é detalhada em sequência, onde são apresentados os passos do algoritmo original junto com as propostas de fator de inércia e fator constrição para melhorar sua performance.

No capítulo 4 é definido o problema de otimização, descrevendo as características da micro-rede, dos recursos energéticos distribuídos e cargas utilizadas na simulação. O controle primário baseado em droop e a proposta de controle secundário, fundamentada em PSO proposta nesta dissertação, são explicadas detalhadamente em seguida.

No capítulo 5 é apresentado os resultados da proposta de controle secundário desta dissertação de mestrado. Primeiramente, o DBFS é testado na sua configuração padrão estática

a fim de confirmar sua ação de controle primário no compartilhamento de carga e indicação da frequência da micro-rede. Em seguida, a simulação principal compara dois cenários, um utilizando apenas o controle primário e outro com a proposta desenvolvida.

No capítulo 6 são feitas as considerações finais sobre os resultados apresentados e discutidos no capítulo 5. Também são propostas melhorias ao sistema desenvolvido, como forma de motivar a continuação deste trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta a descrição de todas as ferramentas que fundamentam a metodologia proposta nesta dissertação de mestrado. Inicialmente é feita uma introdução sobre o funcionamento, contextualização e questões técnicas relacionadas à utilização da geração distribuída, micro-redes e redes ativas de distribuição, seguido da conceituação das principais técnicas de controle de *droop* existentes para micro-redes ilhadas em corrente alternada. Além disso, apresenta-se o método de fluxo de carga DBFS para micro-redes ilhadas e reguladas por *droop*.

2.2. Geração Distribuída

Questões técnicas, ambientais, sociais e econômicas levaram a utilização em larga escala de unidades de geração de energia elétrica de baixa capacidade, conectada ao nível da distribuição, sendo conhecida por Geração Distribuída (GD). Vários conceitos foram utilizados para definir a GD, considerando (ACKERMANN, ANDERSSON e SODER, 2001) (CHOWDHURY, CROSSLEY e CHOWDHURY, 2009):

- *Localização*: geralmente considera-se que as unidades de GD são conectadas às redes de distribuição. Contudo, alguns autores propõem a utilização dessas no nível da transmissão;
- *Nível de tensão*: o nível de tensão de uma rede de distribuição pode ser maior que o nível de transmissão e isso pode variar de país para país. Desta forma, a definição da GD através do nível de tensão é pouco efetiva;
- *Potência nominal*: apesar de parecer ser um critério adequado para definir a GD, este é o menos consensual uma vez que a capacidade de geração depende das características do ponto de conexão da GD à rede elétrica;

- *Serviços auxiliares*: capacidade de realizar controle de tensão ou compensação de potência reativa, reserva girante, etc.;
- *Tecnologias de geração*: pode ser um critério interessante para definição de uma unidade de GD. Contudo, tipos de geração mais versáteis como turbinas à gás, que permitem a geração desde algumas dezenas de kW até centenas de MW, podem comprometer esse critério.
- *Modo de operação*: este critério pode ser de grande utilidade na definição de uma unidade de GD devido ao fato de a maioria das unidades de GD não ser sujeita ao despacho pelo operador do sistema elétrico e nem responder a sinais de preços de mercados de energia elétrica;

Alguns conselhos e institutos internacionais apresentam as seguintes definições de uma unidade de GD:

- *Congrès International des Réseaux Électriques de Distribution (CIRED)*: definem GD com base no nível tensão, no ponto de conexão com a rede (próximo às cargas), na tecnologia de geração ou no fato de a unidade ser sujeita ou não a despacho pelo operador.
- *Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE)*: classifica uma unidade GD de acordo com a sua potência nominal (50-100 MW), o ponto de conexão (geralmente do lado da demanda) e o modo de operação (não sujeita a despacho e nem a planejamentos centralizados).
- *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*: classifica uma unidade de GD cuja conexão seja feita em uma rede local por meio de um ponto de acoplamento comum. Essa conexão não é realizada diretamente nas redes de transmissão.

Os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), no Brasil, definem o conceito de unidades de GD em (ANEEL, 2018) como “centrais geradoras de energia elétrica de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente ao sistema elétrico de distribuição ou por meio de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo com a rede principal ou de forma isolada e despachadas (ou não) pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)” .

Alguns benefícios à utilização da GD são definidos em (INEE, 2019) pelo Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE): (1) benefícios decorrentes da proximidade das unidades de GD com os locais de consumo (benefícios “locais”); (2) benefícios ambientais e econômicos (benefícios globais). Dessa forma, define-se como **benefícios locais**:

- Atendimento mais rápido ao crescimento da demanda devido ao tempo de implementação de uma GD ser altamente inferior ao de implementação de novos sistemas em geração centralizada e expansão de redes de transmissão;
- Aumento da confiabilidade no suprimento de energia elétrica aos consumidores conectados próximos ao ponto de conexão das unidades de GD;
- Se o planejamento e operação das unidades de GD for realizado de forma adequada, podem contribuir no aumento da estabilidade do sistema elétrico devido à existência de reserva de geração distribuída;
- Redução das perdas de transmissão e respectivos custos relacionados a implementação de novos empreendimentos;
- Redução dos riscos de planejamento;
- Possível venda de excedentes de geração em mercados competitivos de energia elétrica.

Em relação aos **benefícios globais**, destacam-se:

- Redução de impactos ambientais causados pela geração de energia elétrica utilizando combustíveis menos poluentes, pela melhor utilização de combustíveis tradicionais e, em plantas de cogeração, aumento da eficiência energética do processo de geração de energia elétrica e térmica;
- Benefícios relacionados a utilização otimizada da geração distribuída e centralizada;
- Maiores oportunidades de comercialização e de ação da concorrência em mercados de energia elétrica, uma vez que há mais agentes envolvidos no processo.

2.2.1. Questões técnicas associadas à utilização da GD

Algumas questões técnicas que estão associadas à utilização de GD devem ser levadas em consideração, dentre elas, destacam-se:

- Regulação de tensão: a integração em larga escala da GD às redes de distribuição pode acarretar problemas no perfil de tensão. Uma situação crítica surge quando a rede está num período de baixo carregamento e as unidades de GD operam perto de sua capacidade nominal. Nessa situação, os limites permitidos para a injeção de potência pelas unidades de GD seriam bastante restritos, uma vez que se assume um comportamento passivo para a rede. Entretanto, se esse limite não for respeitado haverá uma elevação das tensões na rede (LIEW e STRBAC, 2002);
- Qualidade de energia elétrica: um impacto positivo da utilização de unidades de GD para a qualidade de energia suprida aos consumidores é a possibilidade de, desde que

autorizada pela concessionária, a unidade de GD continuar fornecendo energia para um determinado grupo de consumidores, mediante formação de pequenas ilhas elétricas, mesmo após algum defeito na rede. Por outro lado, devido as características peculiares de grande parte das fontes de GD (por exemplo, a falta de controle sobre as fontes primárias nos casos de unidades eólicas ou fotovoltaicas), podem surgir alterações nas formas de onda de tensão. Nesse contexto os problemas mais detectados são: flutuações e afundamento de tensão e frequência e harmônicos de tensão e corrente (BARKER e MELLO, 2000);

- Operação em modo isolado (ilhamento): A atual filosofia de operação de redes de distribuição não permite a operação de parte da rede em modo isolado. Essa é a razão pela qual a grande maioria das unidades de GD são equipadas com dispositivos de proteção anti-ilhamento (GIL, 2009). A operação em modo isolado justifica-se principalmente em redes de distribuição radiais, devido a facilidade com que a atuação dos dispositivos de proteção leva a formação de ilhas elétricas. Em redes malhadas, o ilhamento de parte do sistema demandaria a atuação de mais de um dispositivo de proteção em pontos específicos do sistema, o que torna o ilhamento de partes dessas redes uma tarefa muito mais complicada de ser executada. Alguns motivos destacam-se para proibição da operação de partes das redes de distribuição em modo isolado, como em (GIL, 2009): (i) partes da rede podem continuar energizadas, o que dificulta a garantia de segurança de consumidores e equipes de manutenção; (ii) dificuldades de manutenção de níveis de tensão e frequência aceitáveis, comprometendo a qualidade do suprimento de energia elétrica aos consumidores ;
- Análise de redes de distribuição: Um impacto que deve ser levado em consideração diz respeito às mudanças necessárias nas metodologias de análise dessas redes. Os pacotes computacionais existentes utilizados para o cálculo de fluxo de potência, análise de curto circuito, análise de estabilidade transitória, etc., também devem ser revistos (ZHU e TOMSOVICK, 2002). Alguns fatores que contribuem para a necessidade de revisão dessas ferramentas para análise de sistemas de distribuição envolvem o fato do fluxo energia ser bidirecional, a baixa relação X/R e o ilhamento (tornado inválidas algumas hipóteses simplificadas utilizadas em análise de sistemas de transmissão).

2.2.2. Tecnologias de Fontes de GD

Algumas das principais tecnologias de fontes utilizadas em GD são apresentadas em (KHATTAM e SALAMA, 2004):

- Turbinas Eólicas: a utilização do vento para geração de energia elétrica tornou-se muito popular devido à redução dos custos e à melhora na confiabilidade e no desempenho dos equipamentos. O vento é um recurso abundante em várias regiões e a capacidade nominal de geração vem aumentando com o passar dos anos. Outra vantagem diz respeito a renovação desse recurso na natureza, capaz de substituir a utilização de combustíveis fósseis para geração de energia elétrica. Sua conexão com a rede elétrica depende obrigatoriamente do uso de conversores baseados em eletrônica de potência;
- Células fotovoltaicas: uma alternativa energética (tanto para geração de energia elétrica quanto energia térmica) bastante promissora devido à abundância relacionada ao recurso primário utilizado (sol). Apesar de atualmente serem de capacidade inferior aos sistemas eólicos, as células fotovoltaicas são passivas e mais flexíveis. Sua conexão com a rede elétrica depende obrigatoriamente do uso de conversores baseados em eletrônica de potência;
- Microturbinas: de construção simples e com capacidade de geração que vai até algumas unidades de MW, utilizam diversos tipos de combustíveis para a geração de energia elétrica, como: gás natural, GLP/Propano, diesel, biogás, etc. Outra característica importante é que a energia elétrica é gerada em corrente alternada em frequências mais altas do que das unidades de geração convencionais, sendo, também, dependente de conversores baseados em eletrônica de potência;
- Células a combustíveis: tem a vantagem de ser altamente eficientes e pouco poluentes, porém o custo ainda é muito alto. São geralmente usadas em sistemas *Combined Heat and Power* (CHP);
- Turbinas à gás: as novas tecnologias de turbinas a gás estão tornando esses equipamentos economicamente viáveis quando comparados aos custos de ampliação ou recondição de redes de distribuição e transmissão.

2.3. Micro-redes

Conforme mencionado anteriormente, as redes de distribuição passam por um período de transição de filosofia de projeto e operação, evoluindo da visão de rede passiva adotada tradicionalmente, para uma rede de distribuição ativa. Nesses casos, as redes de distribuição deixam de apresentar fluxos de potência unidirecionais (devido ao suprimento de energia se dar exclusivamente pelas subestações principais) para apresentar fluxos bidirecionais, advindos da intensa participação de unidades de GD nessas redes.

Para proporcionar uma melhor integração das unidades de GD às redes de distribuição é necessária a utilização de tecnologias de comunicação e otimização dos recursos disponíveis, de forma a proporcionar uma maior controlabilidade de grande parte dos dispositivos que integram essas redes. Essa flexibilidade de controle da rede é possibilitada com aplicação do conceito de Redes Inteligentes (*Smart Grids*) (SHABANZADEH e MOGHADDAM, 2013).

Smart Grid é um termo utilizado para designar uma rede na qual os consumidores têm participação ativa tanto na geração de energia quanto no gerenciamento das cargas. Além disso, proporciona aos operadores dos sistemas diversas funções de monitoramento e controle. Uma *smart grid* deve ser auto-recuperável (retomar o fornecimento de energia de forma rápida e sem a necessidade de atuação de controles ou agentes externos) bem como resistir a possíveis defeitos no sistema (SHABANZADEH e MOGHADDAM, 2013). Esses objetivos são alcançados com uma infraestrutura de sistemas de informação e comunicação, provendo “inteligência” necessária às redes de energia.

A aplicação do conceito de *Smart Grids* às redes de distribuição com alta penetração de GD resulta no conceito de Micro-redes. Tal conceito vem sendo discutido como uma alternativa para solucionar o problema da GD ser cada vez mais presente no sistema de distribuição.

2.3.1. Conceito

O conceito de Micro-redes surgiu como uma alternativa para a solução de problemas gerados pela inclusão de unidades de GD em redes de distribuição operadas de forma passiva. Em 2002, o *Consortium for Electric Reliability Technology Solutions* (CERTS) propôs o conceito de Micro-redes, com objetivo de proporcionar a integração de grandes quantidades de Recursos Energéticos Distribuídos (RED) (que são dispositivos de geração ou armazenamento de energia) junto às unidades de GD em redes de distribuição. Assim, procurava-se gerenciar a energia através dos REDs e vencer a política de integração de unidades de GD na forma *fit and forget* (instalações de unidades de GD sem o devido cuidado com os problemas que poderiam causar) (LASSETER, AKHIL, *et al.*, 2002).

O conceito de micro-redes assume a interconexão de cargas e REDs operando como uma entidade única, fornecendo tanto energia elétrica quanto energia térmica. A maioria das REDs deve ser conectada à rede por meio de conversores baseados em eletrônica de potência de forma a permitir a flexibilidade necessária para garantir sua operação como uma única entidade. Essa

flexibilidade de controle permite a micro-rede se apresentar para a rede principal como uma única entidade controlada que atende às necessidades locais de confiabilidade e segurança.

A principal característica da micro-rede é a possibilidade de operação em modo ilhado. Nesse caso, a micro-rede opera desconectada da rede principal, o que possibilita um aumento nos níveis de confiabilidade e continuidade no suprimento de energia para consumidores que fazem parte de micro-rede (CHOWDHURY, CROSSLEY e CHOWDHURY, 2009).

2.3.2. Arquitetura básica

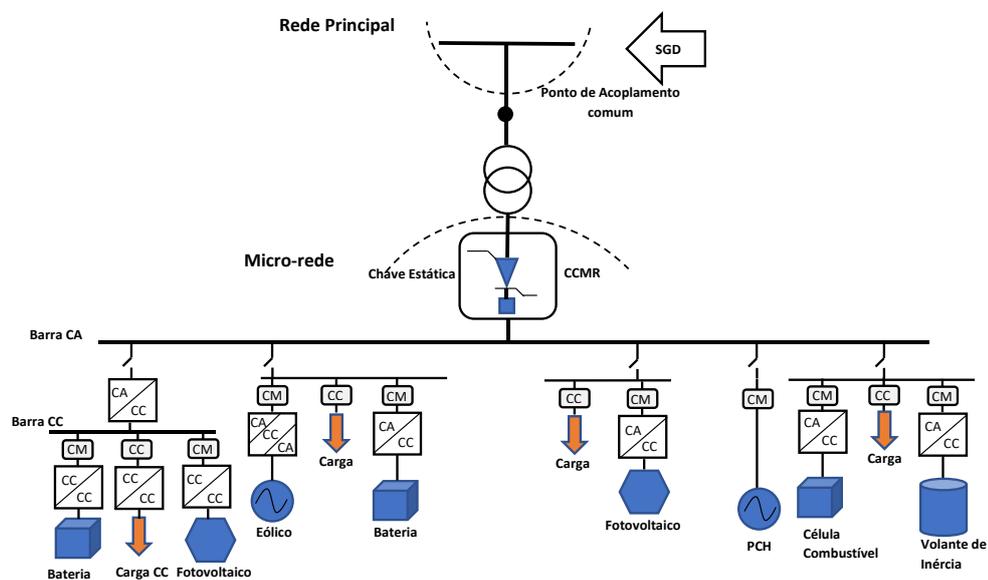
Uma arquitetura simplificada de uma micro-rede é mostrada na Fig. 1. Essa MR consiste em um grupo de alimentadores radiais como uma parte de um sistema de distribuição. Nesse sistema, a micro-rede se conecta à rede principal por meio de um transformador de distribuição. Esse ponto de conexão com a rede principal pode ser chamado de Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Este é o mesmo ponto onde deve ser acoplado o dispositivo responsável pelas manobras de ilhamento e reconexão com a rede principal. Tal dispositivo, conhecido como chave estática, é baseado em tecnologia de estado sólido que possui um tempo de resposta bastante reduzido (BEVRANI e WATANABE, 2014). As cargas domésticas podem ser divididas entre cargas críticas e não-críticas através de alimentadores separados. As cargas críticas devem sempre ser supridas por uma ou mais GDs, enquanto as cargas não-críticas podem ser desligadas no caso de uma contingência ou uma perturbação grave.

Cada alimentador tem um disjuntor e um controlador de fluxo de carga comandado por um controlador central ou um gerenciador de energia. Os disjuntores são utilizados para desconectar um alimentador correspondente, para evitar os impactos de perturbações graves através da MR. A chave estática é capaz de ilhar a MR para fins de manutenção ou quando uma falta ou contingência ocorre. Todos esses eventos estão bem descritos nos padrões da IEEE 1547-2018. Ainda na Fig. 1, estão presentes diversos tipos de micro-fontes representando a diversidade de opções de fontes que existem para a formação da micro-rede. Também é importante observar a presença dos dispositivos de armazenamento de energia e dos dispositivos de controle em nível local (Controlador de Microfonte - CM e Controlador de Carga - CC) e central (Controlador Central de Micro-rede - CCMR) e do Sistema de Gerenciamento de Distribuição - SGD). Assim, os elementos básicos de uma micro-rede são (BEVRANI e WATANABE, 2014):

- Alimentadores que partem do barramento de baixa tensão e que alimentam cargas (muitas vezes controláveis);

- Várias REDs (célula fotovoltaica, geração eólica, unidade CHP, células combustíveis e microturbina);
- Dispositivos de armazenamento de energia (baterias e volantes de inércia);
- Elementos de controle e supervisão (CM, CC, CCMR e SGD).

Figura 1 Estrutura simplificada de uma micro-rede



Fonte: Adaptado de (BEVRANI e WATANABE, 2014).

2.3.3. Modos de operação

O diferencial das micro-redes em relação à integração não coordenada de unidades GD às redes de distribuição reside no fato das micro-redes poderem funcionar tanto no modo conectado com a rede principal quanto em modo isolado (BANERJI, SEN, *et al.*, 2013). Tem-se, então, que:

- Modo Interligado: Nesse modo de operação a micro-rede encontra-se conectada à rede principal através do PAC e pode operar exportando ou importando energia da rede principal de acordo com seu balanço interno de carga ou geração. Nesse modo de operação o CCMR é responsável pela otimização da operação da micro-rede, enviando sinais de controle para os CM e CC.
- Modo Isolado (ilhado): Nesse modo a micro-rede encontra-se desconectada de rede principal. Essa desconexão pode ser previamente programada ou decorrente de alguma

falha na rede principal. Os controladores CM e CC devem ser responsáveis por repartir toda a demanda (inclusive as perdas na rede) entre as microfuentes que compõe a micro-rede. Somente depois de os controladores locais atingirem o equilíbrio é que o CCMR se encarregará de otimizar a operação da micro-rede em modo isolado. Caso a capacidade instalada de geração seja insuficiente para suprir a demanda, deve-se proceder ao corte de cargas juntamente com o CC e o CCMR.

2.4. Controle de Micro-redes

Ao considerar uma micro-rede com penetração de geração distribuída, o controle desse tipo de sistema deve levar em consideração uma estrutura de controle hierárquico (KAUHANIEMI e PALIZBAN, 2015). A estrutura de controle hierárquico de uma micro-rede pode ser descrita como tendo quatro níveis responsáveis pelo processamento, detecção e ajuste, monitoramento e supervisão, manutenção e otimização. Como mostrado na Fig. 2, a estrutura de controle hierárquico de uma micro-rede pode ser classificada em quatro níveis de controle: nível zero (controle de malha interno), primeiro nível (controle primário), segundo nível (controle secundário) e terceiro nível (controle terciário). Cada nível de controle é usado para regular a micro-rede tanto no modo de operação conectado à rede como no modo de operação ilhado. No entanto, no modo de operação ilhado é impossível a realização do controle terciário. Segundo (KAUHANIEMI e PALIZBAN, 2015), cada nível de controle é ilustrado pela Fig. 2 e detalhado através dos itens a seguir:

Figura 2 Estrutura de controle hierárquico de uma micro-rede



Fonte: Adaptado de (KAUHANIEMI e PALIZBAN, 2015)

- Nível zero (Malha de controle interno de corrente e tensão)

Devido a variação das fontes de energia renováveis como eólica e solar, relacionadas a questões climáticas e sazonais, a saída de potência dessas fontes precisam ser controladas. O gerenciamento da potência de saída das REDs é o principal objetivo deste nível de controle e geralmente é realizado através do controle de tensão e corrente dessas fontes. Esse tipo de controle depende, particularmente, do tipo de tecnologia de GD aplicada. Para o caso de geradores fotovoltaicos, por exemplo, o controle de corrente e tensão geralmente é realizado através do método de rastreamento do ponto de máxima potência, denominado em inglês como *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). A utilização desta técnica em sistemas fotovoltaicos pode produzir um aumento de até 30% na eficiência, diminuindo as perdas de energia. Outro método bastante utilizado para transmitir a máxima potência do painel fotovoltaico é o de Perturbação e Observação (P&O). Essa é uma maneira de otimizar a utilização das fontes renováveis e justificar o seus custos de implantação, geralmente elevados. De fato, o primeiro passo no controle de uma micro-rede é o controle do ponto de operação da fonte, pois deve-se garantir, nesse nível mais baixo de controle, que a microfonte converta energia primária (sol, vento) em energia elétrica da forma mais eficiente possível.

- Primeiro nível (controle primário)

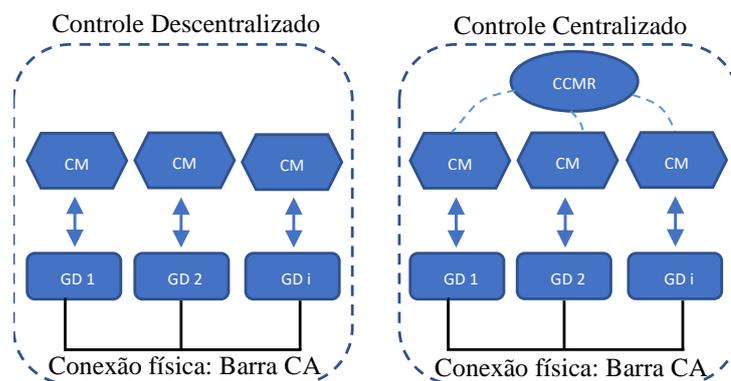
Este nível de controle lida com o compartilhamento da carga da micro-rede a fim de manter os níveis de frequência e tensão da micro-rede em pontos de operação estáveis. O controle primário deve ter a resposta mais rápida para qualquer variação nas fontes ou demanda (na ordem de milissegundos). Assim, esse nível de controle opera em uma escala de tempo rápida e mantém a estabilidade de tensão e frequência da micro-rede durante mudanças de carga ou

após um processo de ilhamento. No modo conectado à rede, o controle primário é responsável pelo controle de potência ativa e reativa de acordo como estabelecido pelo CCMR, enquanto que no modo isolado possui autonomia para promover a otimização das injeções de potência ativa e reativa da microfonte a fim de estabelecer pontos de operações seguros de frequência e tensão. Nesse nível de controle, os controladores de carga também podem ser levados em consideração para fins de esquemas de corte de carga (obedecendo uma política de gerenciamento da demanda).

- Segundo nível (controle secundário)

A responsabilidade do controle secundário é supervisionar e monitorar o sistema, para ajustar e minimizar os desvios de tensão e frequência da micro-rede. Dessa forma, o controle secundário assegura que os desvios de frequência e tensão sejam regulados próximos a zero após cada mudança de carga ou geração na micro-rede. Na prática, o controle secundário tem uma resposta mais lenta às variações, comparado ao nível de controle primário. Este nível de controle pode ser dividido em controle centralizado e descentralizado, representado através da Fig. 3. Nas técnicas centralizadas, a tensão e frequência são medidas usando sensoriamento remoto e enviadas para o CCMR, enquanto que no controle descentralizado, a medição e ação de controle é realizada no terminal de cada GD. Além disso, no nível de controle secundário existem alguns requisitos diferentes entre o modo de operação conectado à rede e o modo de operação ilhado.

Figura 3 Controle Descentralizado e Centralizado



Autor: Adaptado de (KAUHANIEMI e PALIZBAN, 2015)

No modo interligado, o CCMR pode ser responsável por maximizar os lucros ou a otimização da operação da micro-rede. Ao otimizar a geração das microfuentes, pode utilizar os preços praticados pelo mercado para determinar o montante de energia exportada/importada da

rede principal. A otimização da operação é implementada por meio de envios de sinal de referência para os CM e CC. No modo ilhado, o controle secundário é responsável pelo monitoramento da micro-rede a fim de manter os desvios de frequência e tensão dentro dos valores nominais. Os desvios de tensão e frequência são provocados principalmente pelo ilhamento e pela ação do controle primário.

Além disso, os erros de frequência e tensão deste trabalho foram qualificados tendo em vista os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (ANEEL, 2018) que sugerem que os desvios de frequência devem:

- Operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz, em condições normais de operação;
- Voltar para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, quando da ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição. Essa recuperação deve ocorrer em um tempo máximo de 30 segundos.
- Não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas de equilíbrio de carga e geração. Esses desvios não podem ser mantidos por valores de tempo superiores a 30 segundos. Valores abaixo de 56,5 somente são tolerados por até 5 segundos.

Além disso, os desvios de tensão de regime permanente para redes de distribuição com tensão de fornecimento acima 1kV devem ser mantidos entre 95% e 105% da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão.

- Terceiro nível (controle terciário)

Este é o nível mais elevado da hierarquia de controle, podendo estar interligado com mais de um CCMR. Neste nível de controle é criada uma interface entre a micro-rede e a rede principal a fim de estabelecer um elo de comunicação para o controle de geração de energia e do fluxo de potência entre a micro-rede e sistema de energia principal. Assim, esse nível de controle não está disponível em micro-redes ilhadas.

2.4.1. Controle de micro-fontes e *Droop*

De acordo com o modo de operação da micro-rede, as estratégias de controle de micro-fontes é diferente. Essas diferenças são citadas em (SAGGIN, 2016) e relacionadas abaixo:

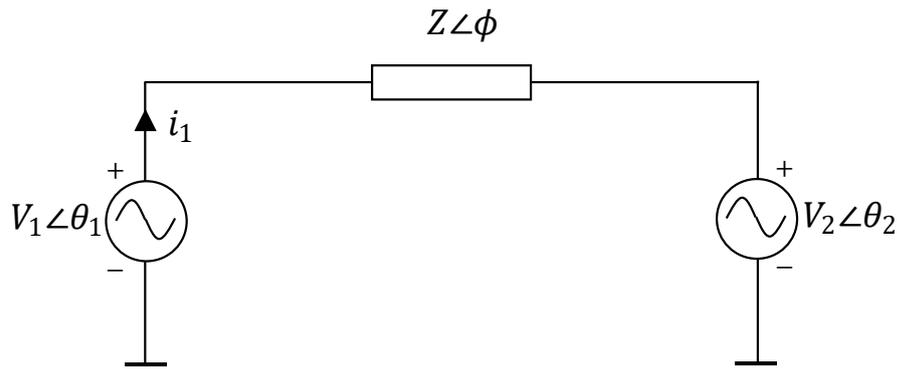
- Modo de operação interligado: A magnitude e a frequência das tensões das microfontes são controladas pela rede principal. Nesse caso as microfontes operam injetando

potência ativa e reativa de acordo com os valores enviados pelo CCMR, conhecido como modo PQ.

- **Modo Ilhado:** não há uma referência de tensão e frequência da rede principal. Nesse caso o controle poderá ser realizado de três maneiras distintas: *Single-Master Operation* (SMO), *Multi-Master Operation* (MMO) e *Inverter Mode Control* (IMC). Na operação SMO uma única microfonte opera regulando tensão e também é responsável por assumir toda a diferença entre carga e geração resultante da desconexão da rede principal, enquanto as outras microfones operam em modo PQ. Na forma de controle MMO que mais de uma microfonte é responsável pela regulação de tensão da rede, bem como do desbalanço entre a carga e geração resultante do ilhamento. Nesse modo de operação algumas microfones podem operar em modo PQ. No modo IMC, menos comum, todas as microfones operam em modo PQ enquanto a regulação de tensão e frequência e o suprimento da diferença de carga é realizada por sistemas armazenadores de energia. Vale destacar que as microfones em modo SMO e MMO devem ser despacháveis, enquanto que as microfones não despacháveis (células fotovoltaicas e turbinas eólicas por exemplo) devem assumir o comportamento PQ. Para microfones operando regulando amplitude de tensão e frequência e compartilhando a carga, a metodologia de controle mais adequada envolve imitar a característica de estatismo de máquinas síncronas nos inversores estáticos. Tal característica é denominada na literatura como *droop control*, controle de queda ou controle de *droop*.

No *droop control* convencional (ou indutivo), o nível de injeção de potência ativa da microfonte é inversamente proporcional ao desvio de frequência da micro-rede, ou seja, se a frequência da micro-rede cai, a microfonte deve aumentar sua geração de potência ativa. O nível de injeção de potência reativa é inversamente proporcional ao desvio de tensão no ponto de conexão da microfonte com a rede, ou seja, se a tensão no ponto de conexão cai, a microfonte deve aumentar sua injeção de potência reativa. O ponto de partida para o entendimento dos métodos de *droop* para sistemas em corrente alternada passa pela análise do fluxo de potência e pode ser analisado através do circuito da Fig. 4, constituído de uma fonte de tensão com, V_1 com ângulo θ_1 , e por uma impedância de linha Z com ângulo ϕ . A segunda extremidade de Z é submetida a uma tensão V_2 , que pode representar uma outra fonte ou carga.

Figura 4 Circuito para análise do fluxo de potências.



Fonte: Adaptado de (MARYAMA, 2016).

Da teoria de circuitos, a potência aparente S entregue pela fonte de tensão V_1 é calculada por

$$S = V_1 \angle \theta_1 \left(\frac{V_1 \angle \theta_1 - V_2 \angle \theta_2}{Z \angle \phi} \right)^* = \frac{(V_1^2 - EV \angle \theta_{12})}{Z \angle \phi}, \quad (2.1)$$

onde o $(\cdot)^*$ representa o conjugado de (\cdot) e

$$\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2. \quad (2.2)$$

Separando as partes real e imaginária de S , tem-se as potências ativa P e reativa Q , que podem ser calculadas pelas equações abaixo:

$$P = \cos \phi \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos \theta_{12}}{Z} + \text{sen} \phi \frac{V_1 V_2 \text{sen} \theta_{12}}{Z} \quad (2.3)$$

$$Q = \text{sen} \phi \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos \theta_{12}}{Z} - \cos \phi \frac{V_1 V_2 \text{sen} \theta_{12}}{Z} \quad (2.4)$$

Percebe-se, assim, que o fluxo de potência depende do ângulo ϕ da impedância de linha. Assim, para qualquer tipo de linha, pode-se determinar a equação de droop adequada ao sistema, desde que o ângulo da impedância de linha ϕ seja conhecido. Por exemplo, uma vez que impedância da linha de um sistema de energia tem característica predominantemente indutiva, considera-se $\phi = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$ (MARYAMA, 2016).

Nesse caso, as equações (2.3) e (2.4) ficam da seguinte forma:

$$P = \frac{V_1 V_2 \text{sen} \theta_{12}}{Z} \quad (2.5)$$

$$Q = \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \theta_{12})}{Z} \quad (2.6)$$

Considerando um sistema com carregamento normal, com abertura angular pequena ($\text{sen}\theta_{12} \approx \theta_{12}$ e $\text{cos}\theta_{12} \approx 1$) temos o comportamento demonstrado em (2.7) para potência ativa e (2.8) para potência reativa.

$$P = \frac{V_1 V_2 \theta_{12}}{Z} \quad (2.7)$$

$$Q = \frac{V_1(V_1 - V_2)}{Z} \quad (2.8)$$

Pode-se observar pelas equações acima que existe algum desacoplamento entre as variáveis do sistema, com a potência ativa dependendo da abertura angular e com a potência reativa dependendo da diferença de magnitude de tensão entre as fontes. Assim, é intuitivo propor que, à medida que um aumento na potência ativa é requerido, deve-se tentar reduzir θ_{12} para contrabalancear o fluxo de potência, mantendo a estabilidade do sistema. Do mesmo modo, à medida que um aumento de potência reativa é requerido pelo sistema, sua tensão deve ser reduzida. Dessa forma, são estabelecidas as equações que determinam θ_{12} e V a partir das potências dos i geradores regulados por droop, apresentadas abaixo:

$$\theta_i = \theta_i^0 - m_{pi}(P_i - P_i^0) \quad (2.9)$$

$$V_i = V_i^0 - m_{qi}(Q_i - Q_i^0), \quad (2.10)$$

onde m_{pi} e m_{qi} são constantes positivas chamadas coeficiente de droop, θ_i e V_i são a diferença de fase e o valor eficaz da tensão de referência, respectivamente, enquanto P_i e Q_i são a diferença de potência ativa e reativa dos valores de referência P_i^0 e Q_i^0 , respectivamente.

Uma desvantagem clara deste método reside na utilização da fase da tensão na relação de *droop*, uma vez que as mesmas devem ser consistentes para todas as fontes do sistema, ou seja, elas devem ser medidas em relação a uma referência comum de fase, o que implicaria na necessidade de algum tipo de sinal de sincronização entre as fontes (GPS, por exemplo), tornando o sistema dependente de um comando externo adicional, isto é, menos robusto (MARYAMA, 2016).

Uma alternativa consiste em substituir a fase da tensão pela frequência na relação de *droop* de potência ativa para linhas indutivas, nesse caso:

$$f_i = f_i^0 - m_{pi}(P_i - P_i^0), \quad (2.11)$$

onde f_i e f_i^0 são a diferença de frequência e a frequência nominal, respectivamente, P_i é a diferença de potência do valor nominal P_i^0 e m_{pi} é o coeficiente de droop de frequência.

Levando em consideração que as variações de carga da micro-rede implicam em variações globais de frequência e tensão (2.8)¹ e (2.9)² segundo (MARYAMA, 2016), pode-se supor que:

$$f_1 \approx f_2 \approx f_i \approx f \quad (2.12)$$

$$V_1 \approx V_2 \approx V_i \approx V \quad (2.13)$$

Os desvios de frequência e tensão da micro-rede são dados em função da variação de carga (ativa e reativa) e inversamente proporcional ao somatório do inverso dos desvios de *droop*. Assim, quanto menor o coeficiente de *droop* (m_i) de um gerador, mais ele irá participar no compartilhamento da geração em relação aos demais geradores regulados por *droop*. Reescrevendo a equação (2.11) para apenas um gerador distribuído, obtém-se:

$$f = f^0 - m_p(P - P^0). \quad (2.14)$$

Como está disponível apenas um gerador regulador por *droop*, este deve compartilhar toda a variação de potência do sistema, assim:

$$(P - P^0) = \Delta P_{carga}. \quad (2.15)$$

Dessa forma, a equação (2.14) é finalmente resumida isolando a parcela da frequência da parcela da potência, assim:

$$\begin{aligned} \Delta f &= f^0 - f = m_p \Delta P_{carga} \\ \Delta f &= m_p \Delta P_{carga}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Usando um artifício matemático de divisão de frações podemos reescrever a equação (2.16) da seguinte forma:

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{carga}}{\frac{1}{m_p}}. \quad (2.17)$$

Pode-se, finalmente, expandir esse raciocínio para uma quantidade n de geradores regulados por *droop* tanto de tensão como para frequência, implicando que:

$$\Delta f = f^0 - f = \frac{\Delta P_{carga}}{\left[\frac{1}{m_{p1}} + \dots + \frac{1}{m_{pn}} \right]}, \quad (2.18)$$

$$\Delta V = V^0 - V = \frac{\Delta Q_{carga}}{\left[\frac{1}{m_{q1}} + \dots + \frac{1}{m_{qn}} \right]}. \quad (2.19)$$

¹ Verdadeira para sistemas estáveis independentemente das impedâncias das linhas.

² Verdadeira para impedâncias de linha suficientemente baixas.

O compartilhamento da carga por cada gerador fica, então:

$$\frac{\Delta P_i}{\Delta P_{carga}} = \frac{\left[\frac{1}{m_{pi}} \right]}{\left[\frac{1}{m_{p1}} + \dots + \frac{1}{m_{pn}} \right]} \quad (2.20)$$

$$\frac{\Delta Q_i}{\Delta Q_{carga}} = \frac{\left[\frac{1}{m_{qi}} \right]}{\left[\frac{1}{m_{q1}} + \dots + \frac{1}{m_{qn}} \right]} \quad (2.21)$$

Percebe-se que o denominador do lado direito da igualdade é sempre constante para uma dada configuração de micro-rede e suas respectivas microfones reguladas por *droop*. Dessa forma, podemos nomeá-lo como $\rho = \left[\frac{1}{m_1} + \dots + \frac{1}{m_n} \right]$. Esse fator ρ é conhecido na área de sistemas de energia como característica de área, que agrega a resposta de controle primário de todas as fontes pertencentes a uma dada área (GLOVER, SARMA e OVERBYE, 2012). Assim, simplificando as equações (2.20) e (2.21) em termos de ρ , obtém-se:

$$\Delta P_i = \Delta P_{carga} \frac{\left[\frac{1}{m_{pi}} \right]}{\rho_p} \quad (2.22)$$

$$\Delta Q_i = \Delta Q_{carga} \frac{\left[\frac{1}{m_{qi}} \right]}{\rho_q} \quad (2.23)$$

Finalmente, as equações (2.22) e (2.23) representam o compartilhamento de carga de cada gerador i regulado por *droop*. Cada gerador participa com um valor de potência proporcional a variação de carga e com o inverso dos seus coeficientes de *droop*. Contudo, ao analisar o compartilhamento de carga em relação aos coeficientes de *droop* observa-se que para ganhos elevados de *droop* ($m_{pi} \rightarrow \infty$) o compartilhamento de potência ativa torna-se nulo ($\Delta P_i = 0$), o mesmo ocorre, portanto, para a potência reativa para $m_{qi} \rightarrow \infty$. Nesse caso, tem-se apenas a característica de fonte de potência ativa e reativa com as fontes injetando apenas suas potências nominais na rede. Entretanto, para ganhos de coeficiente de *droop* nulos ($m_{pi} \rightarrow 0$), tanto para amplitude de tensão quanto para frequência, tem-se uma fonte com característica de tensão constante, absorvendo todo o excedente de potências e reativa ($\Delta P_i = \infty, \Delta Q_i = \infty$), a qual é comumente chamada de barra de folga ou barra *swing*.

2.5. Fluxo de Potência para Micro-redes Ilhadas e Reguladas por *Droop*

O cálculo do fluxo de potência para micro-redes tem um papel importante na determinação da solução de regime permanente. A forma comum de calcular o regime permanente para

sistemas de energia tradicionais é através da solução da equação de balanço usando o método de Newton (TINAGERO, RAMÍREZ, *et al.*, 2019). Contudo, no modo de operação ilhado, a frequência da micro-rede pode ser diferente do valor nominal, e a barra de referência é inexistente, dificultando a adoção de simplificações cruciais no método de Newton. Uma alternativa é realinhar a barra de referência para outras unidades de geração ou distribuí-la entre os geradores na ocorrência de ilhamento, e a unidade de GD selecionada como barra *slack* deve ser capaz de proporcionar todo o excedente de potência ativa e reativa. No entanto, isso nem sempre é possível devido a GD ter capacidade limitada e ser não despachável. Assim, a utilização correta do método de fluxo de carga para análise de micro-redes ilhadas e reguladas por *droop* deve ser considerada.

Nesse sentido, diversos trabalhos consideram calcular o regime permanente de micro-redes utilizando como premissa as características das micro-redes ilhadas inclusas no problema do fluxo de carga. Na literatura encontram-se diversos trabalhos em que os autores abordaram o problema do fluxo de carga para micro-redes ilhadas e controladas por *droop* (ABDELAZIZ, FARAG, *et al.*, 2012) (DIÁS, ALEIXANDRE e COTO, 2015) (HAMMED, HOSANI e ZEINELDIN, 2017) (NASSAR e SALAMA, 2017).

Na próxima seção será demonstrado todos os passos utilizados para a execução do algoritmo adotado para calcular a condição de regime permanente do sistema proposto nesta dissertação. Tal algoritmo, denominado *Direct Backward Foward Sweep* (DBFS), leva em consideração a regulação por *droop* das microfuentes e a falta de uma barra de referência em uma micro-rede ilhada e puramente radial. Esse método é capaz de disponibilizar diretamente o valor da frequência de regime permanente do sistema. Contudo, ao contrário de algoritmos de fluxo de carga como Newton-Raphson, fluxo de carga desacoplado rápido e similares, o DBFS tem a vantagem de ser *derivative-free*, ou seja, livre de derivadas e equações recursivas e, em virtude disso, é executado de forma direta através de leis de circuito. Assim, os cálculos de corrente e tensão são efetuados por computação matricial direta, reduzindo consideravelmente o tempo computacional.

2.5.1. Método DBFS

Quando uma micro-rede está conectada à rede principal, a solução do problema de fluxo de carga pode ser facilmente encontrada através dos métodos bem documentados na literatura. Estes métodos podem ser divididos em duas categorias principais: (i) os que exigem derivadas (Newton-Raphson e fluxo de carga desacoplado rápido) e (ii) os que não são construídos através

da matriz jacobiana, mas usam somente leis básicas de circuitos (métodos baseados em *Backward-Forward Sweep* (BFS) e outros baseados em equivalente de nó).

Métodos baseados em derivadas são desenvolvidos originalmente para extensos sistemas de energia em malha. Contudo, alguns trabalhos aplicaram versões modificadas desse métodos em micro-redes reguladas por *droop* em (IRAVANI, 2007) e (IRAVANI, 2010). No entanto, sua abordagem foi definir as barras de folga, PQ e PV, como em sistemas de energia convencionais, ao invés de considerar o impacto das funções de *droop*. Posteriormente outros autores (ABDELAZIZ, FARAG, *et al.*, 2012) propuseram métodos de Newton baseados em uma região de confiança, no qual demonstraram ser eficientes em relação a regulação por *droop*. Contudo, estudos mais conclusivos demonstraram que os métodos baseados em Jacobianas não eram apropriados para resolver problemas envolvendo redes de distribuição e micro-redes (LISBOA, GUEDES, *et al.*, 2014). Segundo os autores, a razão por trás dessa falha reside no fato dos sistemas de distribuição (do qual se originam as micro-redes) terem altas relações $\frac{X}{R}$, que eventualmente tornam a matriz Jacobiana propensa a singularidade. Tendo em vista esses problemas, iniciou-se a busca por soluções baseadas nos algoritmos BFS (varredura direta e inversa).

Nos métodos baseados em BFS, a rede (puramente radial ou fracamente malhada) é representada por uma árvore orientada, onde a raiz corresponde à subestação, o tronco ao ramal principal e os ramos estão associados aos ramais secundários que partem do tronco. A varredura inversa consiste em, partindo-se dos nós extremos e usando uma estimativa inicial das tensões nodais, calcular as correntes ou fluxos nas linhas até o nó raiz. A partir do resultado da injeção de corrente ou potência do nó raiz, e do valor conhecido da tensão nessa barra, procede-se a varredura direta a qual consiste em recalculando os valores de tensão das barras da rede até os nós extremos. Esse processo é repetido iterativamente até que os valores de tensão nas barras da rede não varie mais que um valor de tolerância pré-estabelecido.

No DBFS, contudo, o desafio de aplicar a abordagem mencionada para micro-redes ilhadas é que não tem-se uma barra de referência, cuja função é: (i) fornecer a potência necessária para alimentar as cargas e satisfazer as perdas da micro-rede e (ii) fixar uma tensão de referência para o algoritmo BFS. Em uma micro-rede regulada por *droop*, a potência é compartilhada por um número de geradores – em uma proporção que depende de sua função de *droop* – e não há uma barra de referência, mas sim um compromisso entre os geradores de fornecer um equilíbrio de potência reativa enquanto aceita variação de tensão em todas as barras.

Para evitar múltiplos laços de iteração, o algoritmo proposto por (DIÁS, ALEIXANDRE e COTO, 2015) é implementado na forma matricial através da aplicação da matriz de incidência nodal como processo pilar. Todo o processo será demonstrado na subseção abaixo.

2.5.1.1. Algoritmo

O DBFS é concebido através de dois laços. Um laço interno, denominado laço de droop de frequência e um externo denominado laço de droop de tensão. No laço interno, o algoritmo inicia na varredura reversa, onde tanto a tensão dos nós como o desvio de frequência da micro-rede são fixados em um valor pré-determinado. O primeiro passo desse estágio consiste em calcular a geração requerida por cada microfonte regulada por droop reconhecendo este valor pré-determinado. Assim:

$$\Delta P_{Gi} = \frac{\Delta f}{m_{pi}}, i = 2, \dots, N. \quad (2.24)$$

Na implementação do DBFS cada barra do sistema tem um gerador regulado por droop. Essa estratégia é aplicada para aumentar a velocidade através da aplicação de uma notação vetorial. Assim, caso uma barra i não tenha um gerador regulado por droop ou o gerador nela conectado seja não despachável, basta fazer $m_{pi} \rightarrow \infty$. Essa denotação está de acordo com as análises feitas para ganhos elevados de *droop* discutidos na subseção (2.4.1).

Na equação (2.14) define-se o *droop* através dos desvios da grandeza em relação aos valores nominais que são denotados pelo sobrescrito 0. Nesse caso, as variações de potência ativa e frequência são dadas respectivamente por $\Delta P_{Gi} = P_{Gi} - P_{Gi}^0$ e $\Delta f = f - f^0$.

Uma vez determinada a potência requerida por cada barra i da micro-rede, o próximo passo do algoritmo é calcular a potência aparente de cada nó através da equação (2.21):

$$S_i = (P_{Ci} + P_{Gi}) + j(Q_{Ci} + Q_{Gi}) \quad (2.25)$$

$$S_i = (P_{Ci} + P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}) + j(Q_{Ci} + Q_{Gi}^0 + \Delta Q_{Gi}) \quad (2.26)$$

Onde P_{Ci} e Q_{Ci} são os valores de potência ativa e reativa das cargas conectadas à barra i , enquanto P_{Gi} e Q_{Gi} são os valores de potência ativa e reativa injetados por um gerador distribuído conectado na barra i , respectivamente. A equação (2.26) é uma expansão da equação (2.25) no qual considera-se os geradores regulados por *droop*.

Para o caso da inexistência de um gerador regulado por *droop* conectado à barra $i = k$, por exemplo, como dito anteriormente, o coeficiente de droop definido para essa barra é de $m_{pk} \rightarrow \infty$, sendo assim:

$$\Delta P_{Gk} = \frac{\Delta f}{m_{pk}} = 0, \quad (2.27)$$

e o valor da potência nominal desse gerador é dado por $P_{Gi}^0 = 0$, dessa forma, zerando os termos com sobrescrito G da equação (2.26). Em virtude disso, repetindo a dedução para a potência reativa, o cálculo da potência aparente na barra k fica em função apenas da carga, como no método BFS convencional para redes não reguladas por droop:

$$S_k = P_{Ck} + jQ_{Ck} \quad (2.28)$$

Agora que o cálculo da potência aparente está definido tanto para barras de geração, quanto para barras de carga, a corrente em cada nó é calculada segundo a equação:

$$I_i = \frac{S_i}{V_i} \quad (2.29)$$

Onde I_i é corrente que deixa ou incide no nó i e V_i é o valor de tensão pré-fixado na fase inicial do algoritmo.

O último passo da varredura reversa é determinar as correntes de ramo. No método DBFS, essas correntes são obtidas de uma maneira diferente da forma convencional, que é feita por meio de várias equações algébricas oriundas das lei de nós de Kirchhoff. Essa estratégia gera um número elevado de equações que é proporcional ao número de barras do sistema, tornando a programação do algoritmo bastante ineficiente. Para contornar essa questão, o método DBFS utiliza uma abordagem direta, no qual os valores das correntes de ramo são determinadas em um único passo através do cálculo da matriz de incidência nodal.

A matriz de incidência nodal Γ é uma matriz $N_r \times N$, onde N_r é o número de ramos, tal que cada elemento interno γ_{ij} da matriz Γ é definido como:

- $\gamma_{ij} = +1$ quando uma corrente do ramo k deixa o nó l ;
- $\gamma_{ij} = -1$ quando uma corrente do ramo k flui em direção ao nó l ;
- $\gamma_{ij} = 0$ quando nenhuma conexão existe.

Assim, de acordo com a teoria de redes (THULASIRAMAN e SWAMY, 2005), os vetores de corrente de ramos e nós estão relacionados através da matriz de incidência nodal segundo

$$I_{nó} = \Gamma^t I_{ramo} \quad (2.30)$$

onde o sobrescrito t representa a transposta de uma matriz.

Isso significa que as correntes de ramo podem ser obtidas facilmente através de

$$\mathbf{I}_{ramo} = \mathbf{\Gamma}^{-t} \mathbf{I}_{nó}, \quad (2.31)$$

onde o sobrescrito $-t$ representa a transposta inversa de uma matriz.

Agora que todas as correntes de ramo foram obtidas, a varredura reversa é finalizada e o algoritmo segue para o passo da varredura direta. Na varredura direta, o algoritmo deve corrigir os valores das tensões de nó consideradas fixas no passo anterior. Esse passo é feito considerando as quedas de tensão nos ramos.

No entanto, a tensão V_1 fixada no passo da varredura reversa é utilizada também para definir a frequência da micro-rede no início da varredura direta. Nesse caso, após finalizar a varredura reversa, espera-se que corrente (potência) saindo do ramo do nó número 1 seja diferente de zero. Particularmente, em uma configuração onde a micro-rede está sendo alimentada por uma subestação conectada ao nó 1, assume-se que uma corrente pode estar sendo drenada ou injetada nesse nó, dependendo se a micro-rede possui um excesso ou uma escassez de geração. O nó de referência é, portanto, a porta de entrada de energia da micro-rede, através do qual uma potência $S_1 = \sum_{m \in A_1} V_1 I_{1m}^*$ é trocada, onde A_1 é o conjunto de ramos em torno do nó 1 e I_{1m}^* são as correntes dos ramos conectados à barra 1. Para indicar a frequência da micro-rede, o algoritmo DBFS utiliza essa troca de energia na barra 1 levando em consideração o equilíbrio de potência:

$$P_{Gi} + P_{Ci} + Re \left(\sum_{m \in A_1} V_1 I_{1m}^* \right) = 0. \quad (2.32)$$

Como $P_{G1} = \Delta P_{G1} + P_{G1}^0$, podemos empregar as correntes de ramo da varredura inversa para determinar a nova frequência em toda a micro-rede, assim

$$\Delta f = -m_{P1} \times \left[P_{C1} + P_{G1}^0 + Re \left(\sum_{m \in A_1} V_1 I_{1m}^* \right) \right]. \quad (2.33)$$

Esse novo valor de Δf é guardado e depois será aplicado em (2.24) para prosseguir com a nova varredura reversa (próxima iteração). Os desvios de frequência serão o sinal na varredura inversa para cortar ou aumentar a geração de energia. A computação direta prossegue eficientemente na forma matricial calculando os erros das tensões anteriormente assumida como conhecidas e fixas. Da teoria de grafos, as novas tensões de cada nó são dados como:

$$\mathbf{V}_{nó} = \mathbf{\Gamma}^{-t} \mathbf{V}_{ramo}. \quad (2.34)$$

Onde \mathbf{V}_{ramo} é a queda de tensão nas linhas da rede, o qual pode obtida também de forma direta através da equação

$$\mathbf{V}_{ramo} = \text{diag}(\mathbf{Z}_{ramo})\mathbf{I}_{ramo}, \quad (2.35)$$

onde $\text{diag}(\mathbf{Z}_{ramo})$ é a matriz diagonal das impedâncias de linha. A variação das tensões das barras na varredura direta é obtida através de

$$\Delta\mathbf{V} = \mathbf{\Gamma}^{-t}\text{diag}(\mathbf{Z}_{ramo})\mathbf{I}_{ramo} \quad (2.36)$$

e as tensões atualizadas através de

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}^0 - \Delta\mathbf{V} \quad (2.37)$$

onde \mathbf{V}^0 é um vetor em que todas as entradas são iguais a 1.0 p.u.

Todos os passos executados pelo algoritmo, até o momento, tiveram como objetivo obter o fluxo de carga da micro-rede tendo em vista uma configuração de droop de frequência apenas, considerando que a tensão do nó de referência é constante e igual a um valor pré-definido, \mathbf{V}^0 . No entanto, a necessidade de compartilhamento de potência reativa através do *droop* de tensão torna a estratégia baseada em um nó de referência com valor pré-fixado uma suposição inválida e incompleta.

Para contornar esta situação, os autores propuseram a adição do *droop* de tensão em um laço externo ao laço de frequência. Com um procedimento similar ao executado no droop de frequência, o laço externo calcula a ΔQ_{Gi} na varredura reversa, e emprega o *droop* do gerador de referência para definir os desvios de tensão, $\Delta V'_i$, na varredura direta. O resultado desses desvios de potência reativa e tensão são introduzidos no laço interno, o qual é responsável por calcular o fluxo de carga. Em outras palavras, o algoritmo interno encontra o equilíbrio da micro-rede – funções de droop de frequência inclusas – toda vez que o algoritmo externo força mudanças de potencias reativas e tensões. Assim, deve-se substituir a equação (2.37) por outra que inclua as alterações causadas pelo droop de tensão.

Para isso, depois que loop interno termina, calcula-se o novo erro de tensão no barramento 1, definido de forma similar ao desvio de frequência equacionado em (2.27), como,

$$\Delta V'_1 = -m_{Q1} \times \left[Q_{C1} + Q_{G1}^0 + \text{Im} \left(\sum_{m \in A_1} V_1 I_{1m}^* \right) \right]. \quad (2.38)$$

Assim, a equação (2.37), que leva em consideração a utilização de uma referência de tensão estática é substituída pela equação (2.39), que assume a estratégia de *droop* tensão,

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}^{0'} - \Delta\mathbf{V}. \quad (2.39)$$

Onde $\mathbf{V}^{0'}$ é a tensão de referência atualizada obtida da equação (2.40), dada por:

$$V^{0'} = V^0 - \Delta V_1' \quad (2.40)$$

2.5.1.2. Resumo

O algoritmo é apresentado a seguir, com ambos os laços externos e internos apresentados no seguinte pseudocódigo.

Pseudocódigo do algoritmo DBFS

```

V0' ← V0
enquanto ΔV1' ≠ constante faça # laço externo
    ΔQGi ←  $\frac{\Delta V_1'}{m_{Q_i}}$ , i ≠ 1
    Δf ← 0
    ΔV ← 0
    enquanto Δf & ΔV ≠ constante faça # laço interno
        ΔPGi ←  $\frac{\Delta f}{m_{P_i}}$ , i ≠ 1
        Calcular Si, i ≠ 1
        Calcular Inó e logo Iramo
        Δf ← -mP1 × P1
        Calcular ΔV
        V ← V0' - ΔV
    fim do enquanto
    ΔV1' ← -mQ1 × Q1
    V0' ← V0 - ΔV1'
fim do enquanto

```

2.6. Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos que fundamentam o funcionamento e controle de micro-redes para o caso destas serem reguladas por *Droop* de tensão e frequência. Estes assuntos baseiam a construção do método de fluxo de potência utilizado nesta dissertação de mestrado. No capítulo seguinte é dada uma atenção aos métodos heurísticos e ao método de otimização por enxame de partículas, usado para resolver o problema de otimização apresentado neste trabalho.

3. MÉTODOS HEURÍSTICOS

3.1. Considerações Iniciais

Uma meta-heurística³ é uma arquitetura geral de regras que pode servir para um conjunto amplo de heurísticas computacionais. Basicamente, todos os algoritmos baseados em meta-heurísticas utilizam alguma forma de busca local e randomização. A randomização é um artifício utilizado para evitar que algoritmo se aproxime de soluções ótimas locais e procure soluções próximas do ótimo global. O objetivo principal de uma meta-heurística é encontrar soluções boas e factíveis em um tempo aceitável. No entanto, não há garantia de que uma solução ótima será encontrada. Mesmo assim, uma solução de boa qualidade, para soluções de engenharia, já é de grande utilidade (CHICCO e MAZZA, 2019).

Dois componentes principais de qualquer meta-heurística são: diversificação e intensificação. Diversificação significa que o algoritmo precisa ser capaz de percorrer o espaço de busca em uma escala global e, para isso, precisa diversificar as características de busca de seu algoritmo. Intensificação significa focar na busca de uma solução em uma determinada região do espaço de busca. No processo de intensificação garante-se que a solução irá convergir para um ponto ótimo, enquanto que na diversificação evita-se que as soluções fiquem presas em ótimos locais. A combinação adequada desses dois parâmetros pode garantir que o algoritmo alcance uma solução ótima global (SUCHETHA e RAMPRABHAKAR, 2018).

As heurísticas podem ser classificadas baseadas no tipo de agente que realiza a busca. Uma destas classificações dada por Beheshti e Shamsuddin (2013) considera-se que a busca pode ser baseadas em população ou em trajetória. As meta-heurísticas baseadas em população utilizam múltiplos agentes ou partículas para percorrer o espaço de busca aleatoriamente em busca da solução ótima. Já as que se baseiam em trajetória, utilizam apenas um agente ou solução que move através do espaço de busca em uma trajetória definida pelo valor da função objetivo e pelas propriedades do algoritmo. Outra classificação sugere que as heurísticas sejam classificadas de acordo com a analogia utilizada com: fenômenos físicos, biológicos, químicos, etc. (ZALDÍVAR, MORALES, *et al.*, 2018).

Várias aplicações de métodos heurísticos para sistemas de energia elétrica foram revisados em Suchetha e Ramprabhakar (2018). Neste artigo são selecionados um conjunto de aplicações que ilustram a difusão desses métodos. Dentre estas aplicações, é possível destacar:

³ Termo utilizado para distinguir das técnicas heurísticas convencionais.

- Reconfiguração do Sistema de Distribuição (RSD): Nessa aplicação é feita a seleção da melhor condição de abertura/fechamento dos ramos de um sistema de distribuição para otimizar uma função objetivo (ou multi-objetivo) pré-determinada. A reconfiguração desses ramos pode ser utilizada para melhorar as perdas, perfis de tensão e sobrecarga das redes. Geralmente, esses problemas são modelados como problemas de otimização combinatórios onde é indispensável a utilização de métodos heurísticos;
- Despacho Econômico (DE): Corresponde ao cálculo das potências de saída das unidades de geração de um sistema de energia para obter um custo total operacional mínimo, sujeito a um conjunto de restrições;
- Previsão de Carga (PC): Corresponde à previsão de demanda em diferentes escalas de tempo (curto, médio e longo prazo) e níveis de agregação (cargas individuais ou agregadas). A demanda depende de fatores externos ao sistema de energia (temperatura, umidade, aspectos econômicos e sociais) de forma complexa e não linear, e outros fatores aleatórios definidos como “ruídos”;
- Programação da Manutenção (PM): Corresponde à definição da sequência no tempo para realizar manutenções de unidades de geração para otimizar uma determinada função objetivo. O problema é não linear e estocástico, e pode ter vários objetivos conflitantes;
- Fluxo de Potência Ótimo (FPO): Corresponde na determinação do ponto de operação no regime permanente para minimizar uma função objetivo (ou multi-objetivo) que pode representar, por exemplo, redução de custos, emissões e perdas.

Além destas aplicações destacadas acima para o sistema de energia como um todo, as técnicas heurísticas também são aplicadas aos sistemas de distribuição e, particularmente, às micro-redes. As micro-redes são caracterizadas por uma grande integração de fontes de energia renováveis. A característica da energia gerada por essas fontes é aleatória, desregulada e não-confiável (situação provocada pela dependência dos geradores distribuídos e de fontes de energia estocásticas como o sol e vento). Além disso, sem o uso ideal das fontes de energia, o custo de empreendimento de uma micro-rede não pode ser suportado. Assim, as técnicas de otimização heurísticas parecem ser promissoras, uma vez que os custos elevados de investimento de uma micro-rede podem ser justificados através do uso mais resiliente e econômico dos recursos. As principais preocupações relacionadas ao controle e

operacionalidade da micro-rede são mencionadas em Chicco e Mazza (2019) e descritas a seguir:

- Manutenção da qualidade de energia e o balanço de potência ativa e reativa.
- Operação ilhada e conectada à rede.
- Planejamento adequado de sistemas armazenadores de energia para promover backup.
- Operação econômica deve ser garantida pelo planejamento da energia, pelo despacho econômico e operações de fluxo de carga ótimas.

No trabalho de Khan e Singh (2017), é apresentada uma análise das técnicas para otimização de micro-redes. Neste artigo, os autores focam no problema de escolher uma meta-heurística apropriada para minimizar os custos de operação da micro-rede. Para identificar o melhor algoritmo, diferentes meta-heurísticas como Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO), Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm* - GA), Algoritmo do Vagalume (*Firefly Algorithm* - FF) e Evolução Diferencial (*Diferencial Evolution* - DE) são avaliadas com diferentes funções objetivo em um cenário fixo. A partir disso, os autores concluíram que os algoritmos com categoria de inteligência de enxame como (PSO e FF) obtém os resultados de forma mais rápida sem perder a capacidade de encontrar ótimos globais, enquanto os demais algoritmos encontraram soluções mais exatas em um tempo de processamento consideravelmente maior.

Assim, com o objetivo de obter o menor tempo de processamento possível, aliado à característica direta e robusta do algoritmo DBFS, o algoritmo PSO foi escolhido como técnica heurística para resolver o problema de otimização definido nesta dissertação de mestrado. A versão do PSO utilizado será detalhada na próxima seção.

3.2. PSO

3.2.1. Analogia Comportamental

O método de otimização por enxame de partículas pode ser explicado de uma forma simples através de uma analogia de comportamento social apresentada em Secchi (2013). O autor sugere uma situação fictícia para explicar o padrão comportamental do método.

Na analogia, supõe-se que um indivíduo e alguns amigos estão em busca de um tesouro enterrado em uma ilha. Cada membro da expedição tem um rádio comunicador receptor, podendo se comunicar com todos os membros informando-os sobre a situação em que se

encontra, bem como ouvir todos os comunicados trocados entre os membros. Assim, cada explorador sabe a localização de toda a equipe e está informado sobre a situação (quão próximo está do encontro do tesouro) de cada membro. O próximo deslocamento será feito fundamentado em sua própria experiência e nos relatos ouvidos em seu rádio. Dessa forma, havendo real cooperação e troca de informações entre os membros da equipe, o tesouro será achado em tempo bem menor do que se o indivíduo fosse procurar sozinho.

Este mesmo comportamento cooperativo e de troca de informações é encontrado entre várias espécies de animais: em revoadas de pássaros, cardumes de peixes, enxame de abelhas, etc. Assim, cientistas de diversas áreas tentaram modelar estes comportamentos e simulá-los. Em particular, Reynolds (1987) discute a riqueza do movimento da revoada de pássaros, da manada de animais terrestres ou de cardume de peixes procurando estabelecer regras básicas do comportamento individual que justifiquem o comportamento do grupo. Nesse trabalho, os autores concluíram que o movimento da revoada de pássaros é resultado de comportamentos relativamente simples de cada um dos indivíduos.

A primeira proposta de algoritmo de otimização baseada na inteligência mencionada acima, foi publicado por Kennedy e Eberhart (1995), denominado “*Particle Swarm Optimization*”. Motivados pelo comportamento conjunto do movimento de animais (pássaros, peixes, abelhas etc.), propuseram o algoritmo de otimização não determinístico bastante eficiente, robusto e de simples implementação computacional.

A apresentação do algoritmo básico pode ser feita de duas maneiras distintas no que diz respeito à complexidade matemática. A primeira, chamada tradução matemática, envolve todos os formalismos matemáticos que deram origem ao algoritmo propriamente dito. Nesta fase, vários aspectos relacionados à equações diferenciais e suas soluções numéricas são apresentados. Na segunda, chamada de programação do algoritmo, os formalismos matemáticos são deixados de lado e o algoritmo é apresentado na sua forma recursiva e adequada para a implementação computacional, ou seja, como apresentado por Eberhart e Kennedy (1995). Assim, tendo em vista que a proposta desta dissertação de mestrado está apenas relacionada à utilização da técnica e nenhuma proposta autoral de melhoria foi desenvolvida nesse sentido, será apresentado apenas a segunda perspectiva.

O termo partícula foi adotado para simbolizar os pássaros e representar as possíveis soluções do problema a ser resolvido. A região sobrevoada pelos pássaros equivale ao espaço de busca e encontrar o local com comida ou o ninho, corresponde a encontrar a solução ótima.

Para que o bando de pássaros (partículas) sempre se aproxime do objetivo, ao invés de se perderem ou nunca alcançarem um alvo, utiliza-se uma função avaliação ou custo. Esta função será utilizada para avaliar o desempenho das partículas. Para alcançarem o objetivo, as partículas fazem uso de suas experiências e da experiência do próprio bando.

Em Wang, Tan e Liu (2018) são apresentadas a análise teórica, estrutura do algoritmo e seleção dos parâmetros do PSO, entre outros aspectos. O algoritmo básico e seleção dos parâmetros utilizados nessa dissertação de mestrado são baseados nessa referência e são descritos na próxima seção.

3.2.2. Algoritmo Básico

O algoritmo PSO possui uma população formada por partículas iniciadas aleatoriamente, onde cada uma representa uma possível solução para o problema de otimização. Essas partículas são representadas por uma posição x_i e uma velocidade v_i . As partículas também possuem valores de aptidão e voam em um espaço de dimensão D . A dimensão D é igual a quantidade de variáveis do problema. Utilizando a informação coletada no processo de busca, as partículas tem a tendência de voar em direção a melhor área ao longo deste processo. A velocidade v_i e a posição x_i da partícula i são apresentados nas Equações 3.1 e 3.2, respectivamente por:

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + c_1 \cdot r_1(x_{pbest} - x_i) + c_2 \cdot r_2(x_{gbest} - x_i), \quad (3.1)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1), \quad (3.2)$$

onde $v_i(t)$ é a velocidade de cada partícula, t é a iteração atual, c_1 e c_2 são constantes de aceleração para controlar a influência da informação cognitiva e social, respectivamente, e r_1 e r_2 são números aleatórios reais entre 0 e 1 distribuídos uniformemente. O índice $pbest$ é a melhor posição de cada partícula até o momento e $gbest$ a melhor posição entre todas as partículas do enxame. A posição $x_i(t)$ é a posição atual da partícula, $x(t + 1)$ é a próxima posição e $v_i(t + 1)$ é a nova velocidade da partícula.

O conjunto inicial de partículas x_i é gerado de forma aleatória e espalhado pelo espaço de busca conforme a equação 3.3.

$$x_i^{Min} \leq x_i \leq x_i^{Max}, i = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

onde x_i^{Min} e x_i^{Max} contém os limites inferior e superior das posições das partículas, respectivamente e n é o número de partículas. As dimensões das partículas são determinadas pelo problema a ser otimizado, de acordo com o número de variáveis do projeto.

O algoritmo básico de otimização por enxame de partículas é descrito observando os passos observados no pseudocódigo abaixo.

```

Pseudocódigo do algoritmo PSO
para  $i \leftarrow 0$  tamanhoEnxame faça
    inicializa  $x_i$  e  $v_i$  aleatórios;
    inicializa  $pBest_i$ ;
fim
inicializa  $gBest$ ;
enquanto condição de parada  $\neq$  constante faça
    para  $i \leftarrow 0$  até tamanhoEnxame faça
        calcula aptidão da partícula  $i$ ;
        atualiza  $v_i$  de acordo com a Equação (3.1);
        atualiza  $x_i$  de acordo com a Equação (3.2);
         $pBest_i \leftarrow$  melhor entre  $x_i$  e  $pBest_i$ ;
    fim
     $gBest \leftarrow$  melhor entre  $pBest$  e  $gBest$ ;
fim
retorna  $gBest$ ;

```

3.2.3. Parâmetros

O algoritmo PSO básico possui um número pequeno de parâmetros para serem determinados pelo usuário. Os parâmetros c_1 e c_2 da Equação 3.1 podem modificar radicalmente o comportamento do algoritmo, provocando uma possível instabilidade. Em Poli, Kennedy e Blackwell (2017) eles são normalmente definidos como $c_1 = c_2 \cong 2$, pois garantem convergência e maior exploração do algoritmo.

Inicialmente, a velocidade das partículas do PSO era limitada através de uma velocidade máxima denominada $vmax$. Nesse caso, se $vmax$ for grande, facilita a exploração global, no entanto diminui o tempo de convergência do algoritmo. Por outro lado, se $vmax$ for muito pequeno facilitará a exploração local, tornando o algoritmo propenso à ficar preso em ótimos locais. Dessa forma, Shi e Eberhart (2001) realizaram experimentos utilizando o conceito de $vmax$ e sugeriram a eliminação deste parâmetro, por apresentar uma série de problemas. Dessa forma, dois novos parâmetros denominados fator de inércia e fator de aceleração foram introduzidos com a finalidade de tentar amenizar tais problemas.

Assim, motivados pelo desejo de controlar melhor a exploração global e local, reduzir a importância de $vmax$ ou eliminá-la completamente, Shi e Eberhart (2001) propuseram um parâmetro denominado inércia ω . A determinação adequada do valor ω proporciona um

equilíbrio entre a exploração global e local, e resulta em uma quantidade de iteração menores para encontrar uma boa solução.

O novo parâmetro ω é introduzido na Equação (3.1), segundo a Equação (3.4)

$$v_i(t + 1) = \omega \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1(x_{pbest} - x_i) + c_2 \cdot r_2(x_{gbest} - x_i). \quad (3.4)$$

Como o vetor de velocidades é iniciado aleatoriamente, começar o algoritmo com valores maiores de ω resulta em uma busca mais abrangente. E ao longo das iterações, o valor de ω vai sendo reduzido gradativamente possibilitando que as partículas encontrem a solução de forma mais rápida. A sugestão proposta por Kennedy, Eberhart e Shi (2018) foi utilizar uma variação linear da inércia, conforme a equação (3.5):

$$\omega_i = \frac{(\omega_{ini} - \omega_{fim})(N - i)}{N} + \omega_{fim} \quad (3.5)$$

onde ω_{ini} e ω_{fim} são os valores inicial e final do fator de inercia, respectivamente. N é o número total de iterações e i é a iteração atual.

Além do fator de inercia, outra estratégia desenvolvida em Clerc e Kennedy (2002), denominada fator aceleração (ou fator contração), foi introduzida com a finalidade de controlar a convergência das partículas e eliminar de vez o parâmetro $vmax$. Esse fator, denominado K , pode ser determinado pela Equação (3.6).

$$K = \frac{2}{\phi - 2\sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \quad (3.6)$$

onde $\phi > 4$.

O valor de K é utilizado para modificar a equação (3.4), conforme demonstrado pela Equação (3.7)

$$v_i(t + 1) = K \left(\omega \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1(x_{pbest} - x_i) + c_2 \cdot r_2(x_{gbest} - x_i) \right). \quad (3.7)$$

3.3. Considerações finais

A inclusão dos fatores contração e inércia à formulação do PSO garante a maior exploração e convergência dos resultados sem depender tanto dos fatores c_1 , c_2 e $vmax$. Essas considerações tornam o algoritmo mais robusto e versátil, facilitando a implementação de diversas aplicações. No capítulo seguinte será apresentada a metodologia usada para modelar o problema de otimização a ser resolvido pelo PSO.

4. METODOLOGIA

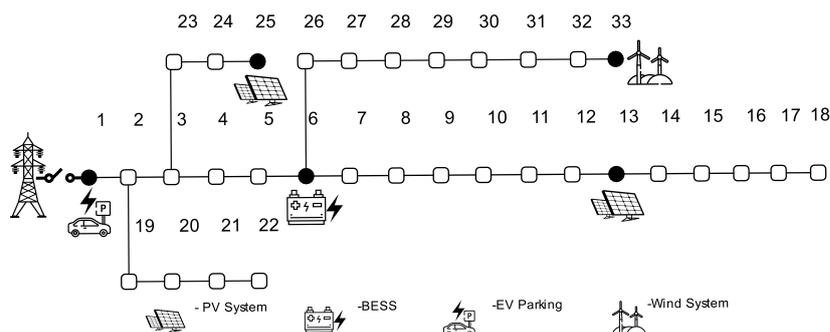
4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são definidos os componentes da micro-rede e a modelagem do problema de otimização utilizados neste trabalho. Serão apresentadas as características elétricas do sistema radial de distribuição de energia de 33 barras proposto por Baran e Wu (1989) e uma descrição da sua transformação na micro-rede sustentável utilizada nas simulações. Na sequência, são apresentadas as microfones e suas particularidades quanto a capacidade de injeção de potência na rede e sua modelagem como fontes reguladas por *droop*. Finalmente, este capítulo descreve a modelagem do método DBFS como um problema de otimização a ser resolvido algoritmo enxame de partículas.

4.2. Sistema Teste

O sistema de distribuição descrito por Baran e Wu (1989) foi utilizado como sistema base das simulações da metodologia apresentada neste trabalho. O sistema original é conectado ao sistema de energia principal através da barra 1 e possui 33 barras incluídas em uma topologia radial com 3 ramificações originárias do ramo raiz. O sistema 33 barras possui tensão e potência base de $12.66kV$ e $500kW$, respectivamente. As 5 micro-fontes de energia consideradas no sistema foram alocadas conforme Diás, Alexandre e Coto (2015), sendo estas: um estacionamento de veículos elétricos conectado na barra 1, um sistema de armazenamento de baterias conectado na barra 6, dois sistemas de geração fotovoltaica conectados nas barras 13 e 25, e um sistema de geração eólica conectado na barra 33. Todas as microfones operam com *droop* e compartilham potência ativa e reativa com a rede. Seus coeficientes de *droop* foram definidos como $m_{Pi} = \{m_{Pve}, m_{Pbateria}, m_{Pfv1}, m_{Pfv2}, m_{Peólica}\}$, e por questões de simplificação considerou-se que $m_{Pi} = m_{Qi}$. O sistema de distribuição de energia foi transformado na micro-rede sustentável conforme ilustra a Fig. 5, e o ilhamento da micro-rede foi realizado entre a barra 1 e o sistema de energia principal.

Figura 5 Sistema teste 33 barras modificado



4.3. Definição dos componentes do sistema

4.3.1. Carga

Para simular o comportamento de carga residencial na micro-rede, foi utilizado um perfil de carga urbano doméstico do ano de 2018 da base de dados do *Retail Market Design Service* (RMDS) (RMDS, 2018). Os dados disponibilizados pelo RMDS são discretizados em intervalos de 15 minutos durante um tempo total de 24 horas e definidos, nesta dissertação, como uma função no tempo $\gamma_C(t)$.

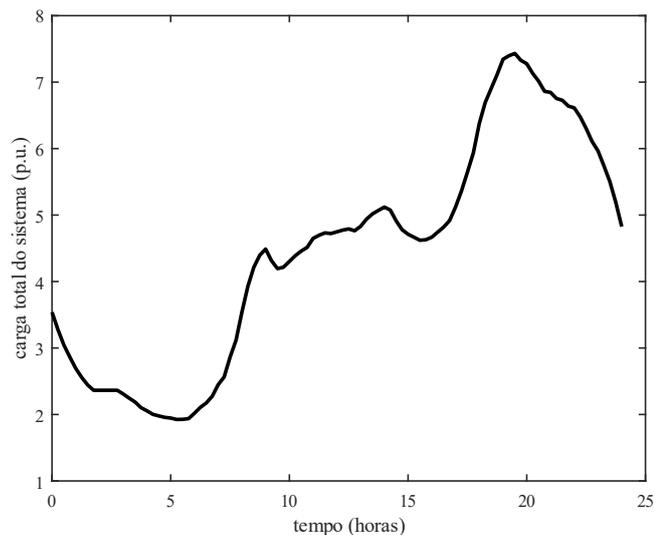
Todas as cargas presentes no sistema foram modeladas como potência constante, o que significa que as cargas não variam com a variação de frequência e tensão na rede. Levando em consideração que o perfil de carga é uma função $\gamma_C(t)$, a carga de potência ativa e reativa de cada barra do sistema varia no tempo, respectivamente, segundo as equações:

$$P_{Ci}(t) = P_{Ci} \times \gamma_C(t) \quad (4.1)$$

$$Q_{Ci}(t) = Q_{Ci} \times \gamma_C(t) \quad (4.2)$$

onde $P_{Ci}(t)$ e $Q_{Ci}(t)$ são a potência ativa e reativa na barra i no instante de tempo t , respectivamente, P_{Ci} e Q_{Ci} são os valores de potência ativa e reativa na barra i originais do sistema teste 33 barras, respectivamente e $\gamma_C(t)$ é o nível de carga. A inserção do perfil de carga RMDS no comportamento da variação de cada barra do sistema de teste resultou na seguinte curva de carga total dada pela Fig. 6.

Figura 6 Carga total do sistema

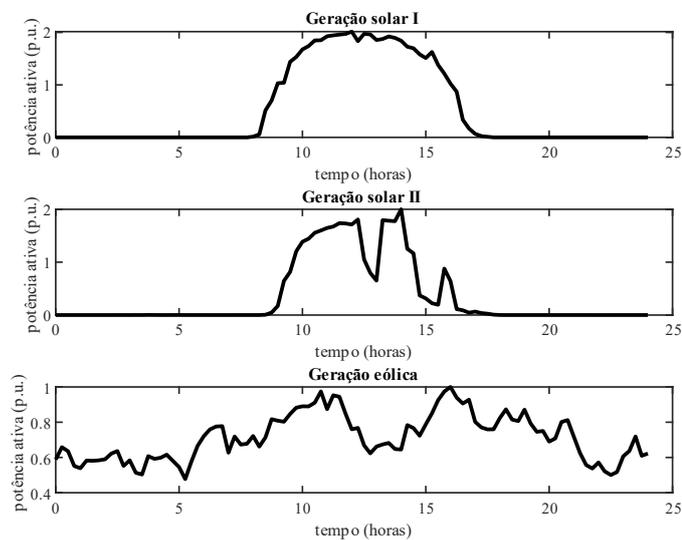


Fonte: (RMDS, 2018)

4.3.2. Geração Solar e Eólica

Para simular o comportamento intermitente das fontes de energia solar e eólica, utilizou-se a base de dados de geração de fontes renováveis disponível em (IEEE PES, 2013) do IEEE & Energy Society (PES), destinada para testes e pesquisas na área de sistemas de energia. Os dados são complexos e divididos em intervalos de 5 minutos. Nesse caso, para compatibilizar as bases de dados de geração e carga, utilizou-se a amostragem no intervalo de 15 minutos. Assim, os perfis de geração solar e eólica utilizados na simulação levaram em consideração as curvas dadas pela Fig. 7.

Figura 7 Geração de Renováveis



Fonte: Adaptado de (IEEE PES, 2013)

Todas as unidades de geração operam com *droop* e compartilham potência ativa e reativa com a rede. Para garantir que as fontes de energia não-despacháveis como a geração eólica e fotovoltaica injetem apenas suas potências nominais, seus ganhos de *droop* foram considerados grandes o suficiente ($m_{P_{fv1}} = m_{P_{fv2}} = m_{P_{eólica}} = \infty$) para que o compartilhamento de potência seja sempre nulo ($\Delta P_{Gi}, \Delta Q_{Gi} = 0$), conforme definido no capítulo 2. Essa formulação permite que as fontes renováveis não despacháveis operem como barras PQ.

A critério de exemplo, o cálculo da potência aparente no método DBFS para a barra onde encontra-se conectado a geração solar I, é obtido pela equação (2.25), onde

$$S_{solarI} = (P_{C13} + P_{GsolarI}^0 + \Delta P_{GsolarI}) + j(Q_{C13} + Q_{GsolarI}^0 + \Delta Q_{GsolarI}) \quad (4.3)$$

Como o compartilhamento da carga é nulo para fontes não despacháveis, assim

$$S_{solarI} = (P_{C13} + P_{GsolarI}^0) + j(Q_{C13} + Q_{GsolarI}^0). \quad (4.4)$$

Esta formulação determina que o cálculo da potência aparente das barras das fontes de energia não-despacháveis depende apenas das injeções de potência ativa/reactiva nominais e das respectivas cargas conectadas.

De modo similar ao modelo das cargas, a geração solar e eólica variam com o tempo. Assim, levando em consideração que o perfil de geração de energia solar é uma função $\gamma_{solarI}(t)$ e que a potência nominal do gerador é $P_{GsolarI}^0$, a geração de energia solar no tempo fica:

$$P_{GsolarI}(t) = P_{GsolarI}^0 \times \gamma_{solarI}(t) \quad (4.5)$$

Lembrando que $m_{Pi} = m_{Qi}$, a potência aparente calculada no tempo t na barra 13 onde encontra-se conectado o gerador solar 1 é:

$$S_{solarI}(t) = (P_{C13}(t) + P_{GsolarI}(t)) + j(Q_{C13}(t) + Q_{GsolarI}(t)). \quad (4.6)$$

Executando a mesma formulação para as demais microfuentes não-despacháveis da micro-rede tem-se que:

$$S_{solarII}(t) = (P_{C25}(t) + P_{GsolarII}(t)) + j(Q_{C25}(t) + Q_{GsolarII}(t)) \quad (4.7)$$

$$S_{eólica}(t) = (P_{C33}(t) + P_{Geólica}(t)) + j(Q_{C33}(t) + Q_{Geólica}(t)). \quad (4.8)$$

4.3.3. Veículos Elétricos

Os veículos elétricos (VE) são modelados como sendo capazes de suprir e drenar energia da rede através da tecnologia V2G, considerando dinâmicas de carregamento e descarregamento da bateria, eficiência, capacidade e estado da carga ou *State of Charge* (SOC).

Assumindo que $P_{ve}(t)$ denota o fluxo de potência do veículo elétrico para o sistema de energia, a seguinte convenção foi adotada:

- Quando $P_{ve}(t) < 0$ (estacionamento de veículos elétricos injeta energia na rede – modoV2G);

- Quando $P_{ve}(t) > 0$ (estacionamento de veículos elétricos drena energia da rede – modo G2V);

A atualização do estado da carga da bateria do veículo elétrico é dado pela equação (3.13) (AFFONSO e KEZUNOVIC, 2019).

$$SOC_{ve}(t + 1) = SOC_{ve}(t) + \eta_{ve} \Delta t \frac{P_{ve}(t)}{C_{ve}^{max}}, \forall t \in T \quad (4.9)$$

Onde η_{ev} é a eficiência da bateira, C_{ve}^{max} a capacidade máxima em kWh , $P_{ve}(t)$ a potência instantânea drenada ou injetada em kW e $SOC_{ve}(t)$ a porcentagem de energia restante na bateria.

Além disso, as seguintes restrições são consideradas:

$$P_{ve}^{Min} \leq P_{ve}(t) \leq P_{ve}^{Max}, \forall t \in T \quad (4.10)$$

$$Q_{ve}^{Min} \leq Q_{ve}(t) \leq Q_{ve}^{Max}, \forall t \in T \quad (4.11)$$

Onde P_{ve}^{Min} é o limite inferior de potência ativa total injetado/absorvido pelo estacionamento de veículos elétricos, P_{ve}^{Max} é o máximo valor de potência ativa total injetada/absorvida pelos veículos elétricos, Q_{ve}^{Min} é o limite inferior de potência reativa total que o inversor dos veículos elétricos injeta/absorve, e Q_{ve}^{Max} é o valor máximo que os veículos elétricos injeta/absorvem.

As características de *droop* dos veículos elétricos também devem respeitar uma restrição relacionada à capacidade máxima da bateria do conjunto de veículos, sendo assim:

$$SOC_{ve}^{Min} \leq SOC_{ve}(t) \leq SOC_{ve}^{Max}, \forall t \in T \quad (4.12)$$

Além disso, cada veículo elétrico é capaz de injetar ou drenar uma potência de $3,3kW$, equivalente ao nível de carga 1 utilizado em áreas residenciais (SHAREEF, ISLAM e MOHAMED, 2016). O veículo elétrico considerado foi o BMW i3, o qual faz parte de um programa da BMW chamado *Charge Forward* que incentiva a utilização do veículo para aplicações V2G (BMW, 2018), com capacidade da bateria de $30kWh$. A quantidade total de veículos elétricos no estacionamento é de 750 unidades. O tempo t varia durante um tempo total de $T = 24h$.

Os VEs participam de forma ativa na micro-rede realizando controle secundário de tensão e frequência através do despacho ótimo de potência ativa. Assim, sua formulação será melhor detalhada na seção 3.3 que trata da modelagem do sistema como um problema de otimização. Vale ressaltar que este trabalho foca o estudo de regime permanente da micro-rede. Dessa forma, aspectos relacionados à dinâmica de baterias foram omitidos.

4.3.4. Sistema de Armazenamento de Energia

A título de simplificação e padronização do comportamento bidirecional das microfones despacháveis no problema de otimização, a modelagem do Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (SAE) foi determinada de forma similar à modelagem feita para os veículos elétricos. Assim, o SAE deve respeitar algumas restrições para que seja incluído como uma microfonte regulada por *droop*. Assumindo que $P_{bat}(t)$ denota o fluxo de potência entre o SAE e a rede elétrica, consideramos que:

- Quando $P_{bat}(t) < 0$ (o sistema de armazenamento de energia está descarregando energia na rede – injetando);
- Quando $P_{bat}(t) > 0$ (o sistema de armazenamento de energia está carregando energia da rede – drenando).

A bateria deve respeitar seus níveis de energia, dessa forma:

$$SOC_{bat}(t + 1) = SOC_{bat}(t) + \eta_{bat} \Delta t \frac{P_{bat}(t)}{C_{bat}^{max}}, \forall t \in T \quad (4.13)$$

Dentre essas características, a potência de carregamento ou descarregamento deve ter seus limites definidos, assim:

$$P_{bat}^{Min} \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat}^{Max}, \forall t \in T. \quad (4.14)$$

Onde $P_{bat}(t)$ é o valor da potência instantânea injetada ou drenada da rede, P_{bat}^{Min} é o limite inferior de potência ativa e P_{bat}^{Max} é o limite superior de potência ativa do sistema de baterias.

As características de *droop* do sistema de armazenamento também devem respeitar uma restrição relacionada à capacidade máxima da bateria do conjunto de veículos, sendo assim:

$$SOC_{bat}^{Min} \leq SOC_{bat}(t) \leq SOC_{bat}^{Max}, \forall t \in T \quad (4.15)$$

Uma vez que a sistema de armazenamento de energia participa de forma ativa realizando controle primário na micro-rede, suas relações de *droop* serão melhor apresentadas na seção 4.4.

4.4. Modelagem do problema de otimização

4.4.1. Controle Primário

Quando a micro-rede opera conectado à rede principal, o objetivo do controlador de cada microfonte é regular a saída de potência ativa e reativa para seguir valores pré-definidos. Por outro lado, quando a micro-rede opera no modo ilhado, os controladores deverão ser capazes de executar o compartilhamento da carga entre as diferentes microfones conectadas na micro-

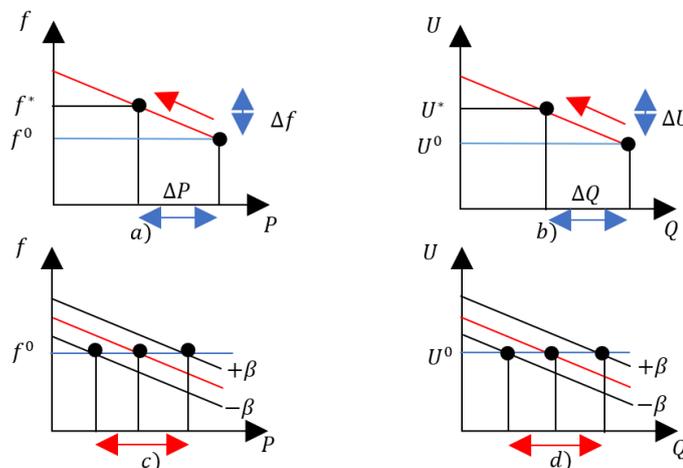
rede. Como uma micro-rede não possui uma microfonte com capacidade suficiente para suprir o desbalanço de carga devido a desconexão com a rede principal, as micro-fontes com características despacháveis – como veículos e banco de baterias – devem compartilhar entre si o excedente de potência de acordo com seus coeficientes de *droop* de frequência e tensão. Assim, o DBFS será utilizado para executar o compartilhamento, indicar o valor da frequência de regime permanente e as tensões de todas as barras.

As micro-fontes do tipo solar e eólica não podem realizar o controle primário uma vez que são consideradas fontes não-despacháveis. Nesse sentido, as mesmas funcionam no método DBFS como cargas negativas e incorporam as características de *droop* elevado. Já o SAE e os VEs executam o controle primário da micro-rede ilhada com ganhos de *droop* (m_{ev}, m_{bat}) $\neq 0$, uma vez que são considerados fontes despacháveis ou com capacidade de geração consideravelmente maiores do que as fontes renováveis. O processo de compartilhamento da carga e a obtenção dos novos pontos de equilíbrio da micro-rede são efetuados pelo DBFS, que indicará a potência requerida pelo SAE e VEs.

4.4.2. Controle Secundário

As microfontes são equipadas com controladores locais capazes de ajustar a saída de potência ativa e reativa de acordo com as características de *droop* como mostrado pela Fig. 8. A regulação primária move os pontos de operação da micro-rede ao longo da característica de *droop* das microfontes, de acordo com a variação de carga da micro-rede, causando erros de regime permanente de frequência e tensão (Fig. 8 (a) e (b)).

Figura 8 Característica de *droop* $f - P$ e $U - Q$ – Efeito do controle primário e secundário.



Fonte: Autor

Assim, em uma micro-rede ilhada, para uma situação de diminuição da carga, o controle primário age aumentando a frequência com o intuito de compensar o desbalanço de potência ativa. O mesmo vale para o caso inverso, onde a ocorrência de um aumento da demanda de potência ativa no sistema reduz a frequência da micro-rede para executar o balanço. A mesma situação ocorre de maneira análoga com a tensão em relação aos desvios de potência reativa (Fig 8.b). Para manter os níveis de qualidade de energia adequados, em termos de manutenção da tensão e frequência em valores nominais, é necessário um controle secundário na saída dos geradores. Em outras palavras, a condição de ilhamento e a ação do controle primário impõe que a micro-rede opere com os valores de frequência e amplitude de tensão fora do valor nominal, que deve ser corrigido por uma ação de controle secundário.

No controle secundário, como explicado no capítulo 2, a micro-rede é otimizada e seus despachos podem ser reajustados para atingir requisitos de controle. No caso deste trabalho, incluímos essa ação através da ajuste das equações de *droop*. Essa ação está ilustrada na (Fig. 8 (c) e (d)).

Para diferentes valores de P e Q , a frequência e a tensão da micro-rede podem ser recondicionadas à operação nominal variando a frequência e tensão enquanto mantém-se os coeficientes de *droop* constantes. Isso corresponde no nível das equações de *droop*, a uma translação linear das suas curvas. Matematicamente, deve-se adicionar um termo constante, β_P , à equação de *droop* de frequência, dessa forma:

$$f = f^0 - m_{Pi}P_{Gi} + \beta_P. \quad (4.16)$$

Onde β_P corresponde à uma adição ou subtração de uma potência ativa P na equação 4.16.

Como ambos os lados da equação devem ser dados em termos de frequência (Hz), podemos afirmar que $\beta_P = m_{Pi}P_G^\beta$, sendo P_G^β a potência gerada devido a inclusão do fator β_P , assim:

$$\begin{aligned} f &= f^0 - m_{Pi}P_{Gi} + m_{Pi}P_G^\beta. \\ f &= f^0 - m_{Pi}(P_{Gi} - P_G^\beta). \end{aligned} \quad (4.17)$$

Já que m_{Pi} é constante para uma dada microfonte, a equação (4.17) indica que, ao modificarmos os valores de P_G^β teremos uma nova curva no qual o controle primário deverá se basear para executar a balanço da rede após uma variação de carga. Em outras palavras, o PSO adiciona (consome potência) ou subtrai (injeta potência) na rede através da manipulação do valor de (P_G^β, Q_G^β) para melhorar a ação do controle primário.

Uma vez que o algoritmo DBFS fornece o desvio de frequência e tensão da micro-rede através do cálculo do fluxo de carga, cria-se uma função que relaciona o par (P_G^β, Q_G^β) para cada valor de desvio de frequência e tensão. Na forma de um problema de otimização, como será mostrado a seguir, é possível obter uma solução otimizada para os valores de (P_G^β, Q_G^β) que melhore o perfil de tensão e frequência da micro-rede.

Os requisitos de restauração secundária da micro-rede poderão ser obtidos ao considerarmos uma função objetivo que relaciona os desvios de tensão e frequência em relação as injeções de potência ativa e reativa de fontes despacháveis do sistema. Assim, com os resultados do método de fluxo de carga DBFS e a respectiva convergência dos valores das equações (2.33) e (2.38), pode-se construir uma função objetivo que pode incluir além das perdas do sistema, a tensão e os desvios de frequência. O problema de otimização será resolvido usando PSO e será formulado como um problema de minimização na forma de

$$\begin{aligned} \text{Min } F(t) = & \alpha_1 \times (\Delta f(t))^2 + \alpha_2 \times \sum_{N=1}^{N_b} (V^0 - V_N(t))^2 \\ & + \alpha_3 \times \sum_{B=1}^{N_b-1} (P_B^{\text{perda}}(t) + Q_B^{\text{perda}}(t)). \end{aligned} \quad (4.18)$$

Onde $F(t)$ é o valor da função objetivo no instante t e $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ são fatores constantes de escalabilidade da função objetivo. Os termos internos da função são definidos separadamente como:

- $(\Delta f(t))^2$ é o quadrado do desvio de frequência da micro-rede no instante de tempo t ;
- $\sum_{i=1}^{N_b} (V^0 - V_i(t))^2$ é o somatório dos quadrados dos desvios de tensão de cada barra i do sistema em relação ao valor nominal U^0 em cada instante de tempo t ;
- $\sum_{B=1}^{N_b-1} (P_B^{\text{perda}}(t) + Q_B^{\text{perda}}(t))$ é o somatório das perdas de potência ativa e reativa das linhas ou ramos (B) do sistema no instante de tempo t .
- $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (0.499, 0.499, 0.002)$ são os fatores de escalabilidade. Neste caso, a minimização dos desvios de frequência e tensão foram priorizados em detrimento das perdas do sistema. No entanto, estes fatores podem ser manipulados, dependendo do interesse de controle.

Onde N_b é igual ao número total de barras do sistema. A variável t é usada para representar a dependência no tempo de cada uma das variáveis.

O problema de otimização está sujeito as seguintes restrições de igualdade e desigualdade:

$$P_{Gi} - P_{Ci} = V_i \sum_{i \in \lambda} V_j (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \text{sen}(\theta_{ij})), \quad \forall i = 1, 2 \dots N_b \quad (4.19)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Ci} = V_i \sum_{i \in \lambda} V_j (G_{ij} \text{sen}(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})), \quad \forall i = 1, 2 \dots N_b \quad (4.20)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}. \quad (4.21)$$

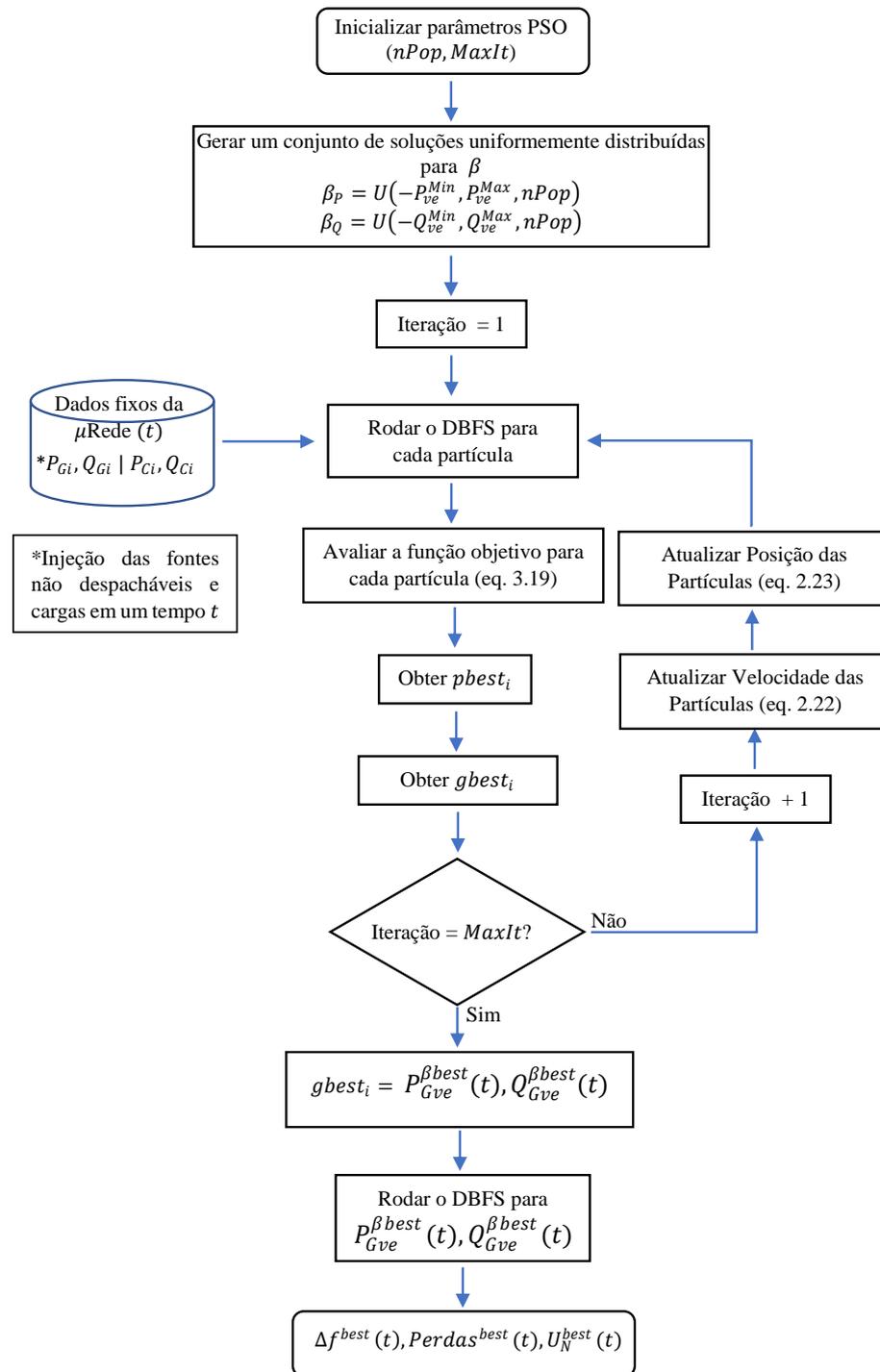
Com as seguintes variáveis de decisão: $P_{Gve}^\beta, Q_{Gve}^\beta$.

Onde:

- $P_{Gve}^\beta, Q_{Gve}^\beta$ são os despachos reajustados de potência ativa e reativa do estacionamento de veículos elétricos, respectivamente;
- P_{Gi}, Q_{Gi} são a geração de potência ativa e reativa na barra i , respectivamente;
- P_{Ci}, Q_{Ci} são a demanda por potência ativa e reativa na barra i , respectivamente;
- G_{ij}, B_{ij} são a parte real e imaginária da matriz de admitância nodal do sistema, respectivamente;

Uma vez que a função objetivo foi determinada, devemos incorporá-la ao PSO e assim finalizamos a modelagem do problema de otimização e, conseqüentemente, da ação de controle secundária. A Fig. 9 a seguir mostra o fluxograma do problema de otimização obtido

Figura 9 Fluxograma do Problema de Otimização



Fonte: Autor

4.5. Considerações finais

A formulação do método DBFS para forma dependente do tempo aumenta a capacidade do problema de fluxo de potência em questão. Levando em consideração a variação da geração e carga do sistema, obtém-se o modo de operação da micro-rede em cada instante de tempo. Assim, enquanto o DBFS encontra o ponto de equilíbrio da micro-rede, indicando os desvios de frequência e tensão das barras (ação de controle primária), o PSO aperfeiçoa essa ação através do ajuste ótimo dos parâmetros do controle de *Droop*. Os resultados da metodologia apresentada são relacionados no capítulo a seguir.

5. RESULTADOS

As simulações computacionais foram realizadas utilizando o programa Matlab ® em um notebook com processador Intel ® i7 de 2.8Ghz de frequência de processamento e memória RAM de 16GB. A tolerância de erro de convergência utilizada para o DBFS foi de 1×10^{-5} . No PSO foram utilizadas um total de 50 partículas para cada variável de decisão e convergência após um número total de 100 iterações. Esses parâmetros de execução do PSO e DBFS foram obtidos através de diversos experimentos objetivando menor tempo computacional e precisão dos resultados.

Os valores bases de tensão e potência utilizados nas simulações foram os mesmos citados na seção (4.2). As potências nominais das microfones foram baseadas nos valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Potência Nominal das Microfontes

GDs	Potência Nominal	Fator de potência
VEs	2475 kW	0,92
FV 1 e FV2	900kW	0,92
Eólica	450kW	0,92
SAE	675kW	0,92

Fonte: Autor.

5.1. Experimentos Iniciais

Primeiramente, o método DBFS foi testado para fins de validação, de modo a confirmar a operação ilhada e regulada por *droop* da micro-rede. Quando a micro-rede está ilhada, o método DBFS deve distribuir a carga entre todas microfones de acordo com os seus coeficientes de *droop*, simulando o comportamento dos controladores primários conectados em cada gerador distribuído. Para o referido teste, 5 geradores regulados por *droop* foram utilizados, com potência nominal igual a $0.9 + j0.9$ (p.u.), com a carga configurada no nível nominal em todas as barras e os coeficientes de *droop* iguais a $(m_{p1}, m_{p6}, m_{p13}, m_{p25}, m_{p33}) = (-0.05, -1, -0.1, -1, -0.2)$. Já que os geradores tem características de estatismo únicas, considera-se $m_{pi} = m_{qi}$. Os resultados do fluxo de carga obtidos pelo método DBFS na micro-rede ilhada são apresentados na Tabela 2.

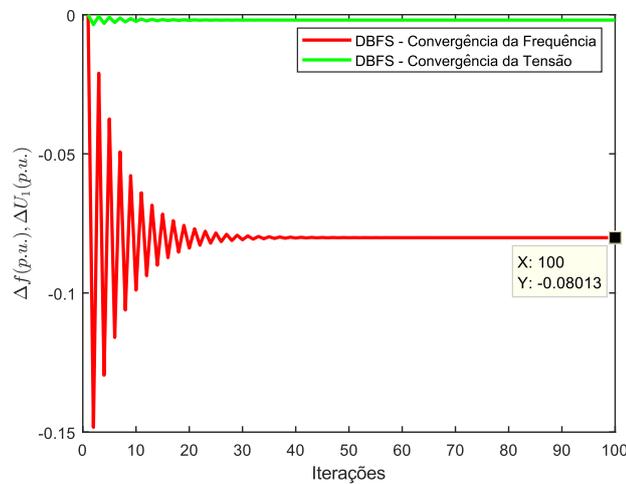
Tabela 2 Resultado do fluxo de carga utilizando método DBFS para micro-rede ilhada.

Barra	Tipo	$ U [p.u.]$	$P_G[p.u.]$	$Q_G[p.u.]$	$P_C[p.u.]$	$Q_C[p.u.]$
1	Droop	0.9981	-2.5025	-0.9388	0	0
2	PQ	0.9975	0	0	0.2000	0.1200
3	PQ	0.9954	0	0	0.1800	0.0800
4	PQ	0.9951	0	0	0.2400	0.1600
5	PQ	0.9949	0	0	0.1200	0.0600
6	Droop	0.9950	-0.9801	-0.9019	0.1200	0.0400
7	PQ	0.9949	0	0	0.4000	0.2000
8	PQ	0.9942	0	0	0.4000	0.2000
9	PQ	0.9946	0	0	0.1200	0.0400
10	PQ	0.9953	0	0	0.1200	0.0400
11	PQ	0.9956	0	0	0.0900	0.0600
12	PQ	0.9962	0	0	0.1200	0.0700
13	Droop	0.9980	-1.7013	-0.9194	0.1200	0.0700
14	PQ	0.9974	0	0	0.2400	0.1600
15	PQ	0.9967	0	0	0.1200	0.0200
16	PQ	0.9960	0	0	0.1200	0.0400
17	PQ	0.9954	0	0	0.1200	0.0400
18	PQ	0.9952	0	0	0.1800	0.0800
19	PQ	0.9973	0	0	0.1800	0.0800
20	PQ	0.9957	0	0	0.1800	0.0800
21	PQ	0.9955	0	0	0.1800	0.0800
22	PQ	0.9953	0	0	0.1800	0.0800
23	PQ	0.9942	0	0	0.1800	0.1000
24	PQ	0.9920	0	0	0.8400	0.4000
25	Droop	0.9913	-0.9801	-0.9019	0.8400	0.4000
26	PQ	0.9950	0	0	0.1200	0.0500
27	PQ	0.9950	0	0	0.1200	0.0500
28	PQ	0.9966	0	0	0.1200	0.0400
29	PQ	0.9980	0	0	0.2400	0.1400
30	PQ	0.9986	0	0	0.4000	1.2000
31	PQ	0.9985	0	0	0.3000	0.1400
32	PQ	0.9985	0	0	0.4200	0.2000
33	Droop	0.9984	-1.3006	-0.9097	0.1200	0.0800

Fonte: Autor

Como foi dito no capítulo 2, o método DBFS é apropriado para micro-redes ilhadas e reguladas por *droop* de frequência e tensão. O que implica que a frequência também é uma variável a ser determinada como saída do cálculo do fluxo de carga. Esse valor de frequência é calculado a partir do valor de Δf obtido pela convergência do DBFS. Utilizando a equação $\Delta f = f - f^0$ determina-se o valor da frequência f . Foi considerado que o algoritmo DBFS deve rodar 100 iterações, e após isto o valor de Δf foi coletado. O gráfico que representa o processo convergência do algoritmo é apresentado na Fig. 10.

Figura 10 Convergência do Método DBFS – Micro-rede Ilhada



Fonte: Autor

Do gráfico da Fig.10, observa-se que o valor de desvio de frequência para o qual a micro-rede convergiu neste problema na centésima iteração foi de $\Delta f = -0.08013 p.u.$ Sabendo que o $f_{pu}^0 = 1 p.u.$ O valor de f é obtido segundo

$$\begin{aligned} \Delta f_{pu} &= f_{pu} - f_{pu}^0 \\ f_{pu} &= 0.91987 p.u. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Como o valor de $f_{base} = 60Hz$, podemos traduzir essa frequência em $p.u.$ em termos de hertz. Dessa forma,

$$\begin{aligned} f &= f_{pu} \times f_{base} \\ f &= 55,1922Hz. \end{aligned} \quad (5.2)$$

O valor negativo de Δf para o qual o algoritmo convergiu representa um decréscimo no valor da frequência, esperado para o caso do ilhamento da micro-rede. Além disso, os valores das tensões de barra são sempre diferentes e menores que 1 (p.u.), evidenciando a característica

ilhada da micro-rede uma vez que não existe barra com uma tensão fixa e para compensar a carga do sistema.

Retomando o resultado do fluxo de carga da rede ilhada da Tabela 2, observa-se o compartilhamento da carga obedecendo os coeficientes de droop dos geradores. Quanto menor o coeficiente de *droop* m de um gerador, mais ele participa no compartilhamento de potência na rede. Assim, geradores com coeficiente de *droop* aproximadamente nulos compartilham toda a potência da rede, enquanto geradores com coeficientes muito elevados/infinitos não participam do compartilhamento e injetam apenas suas potências nominais na rede.

Assim, se fizermos $m_{p1} = m_{q1} \cong 0$ e retirarmos a capacidade de compartilhamento de carga dos demais geradores distribuídos da rede fazendo $(m_{p6}, m_{p13}, m_{p25}, m_{p33}) = (m_{q6}, m_{q13}, m_{q25}, m_{q33}) \cong \infty$, teremos uma medida do funcionamento da micro-rede conectada à rede, com a barra 1 compartilhando toda a variação de carga e os demais geradores distribuídos injetando apenas suas potência nominais. Este comportamento pode ser observado rodando o fluxo de carga com os coeficientes de *droop* na seguinte configuração $(m_{p1}, m_{p6}, m_{p13}, m_{p25}, m_{p33}) = (0, \infty, \infty, \infty, \infty)$. O resultado obtido no método DBFS nesta configuração é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 Resultado Fluxo de carga – Método DBFS – Micro-rede conectada

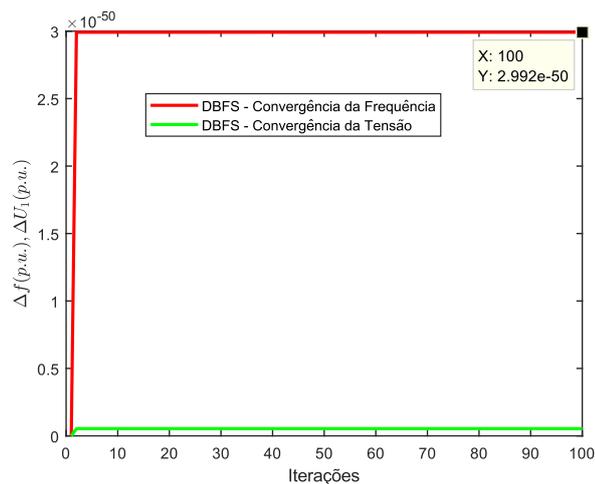
Barra	Tipo	$ U [p.u.]$	$P_G[p.u.]$	$Q_G[p.u.]$	$P_C[p.u.]$	$Q_C[p.u.]$
1	Droop	1.0000	-3.8919	-0.9538	0	0
2	PQ	0.9990	0	0	0.2000	0.1200
3	PQ	0.9949	0	0	0.1800	0.0800
4	PQ	0.9931	0	0	0.2400	0.1600
5	PQ	0.9914	0	0	0.1200	0.0600
6	Droop	0.9882	-0.9000	-0.9000	0.1200	0.0400
7	PQ	0.9876	0	0	0.4000	0.2000
8	PQ	0.9827	0	0	0.4000	0.2000
9	PQ	0.9805	0	0	0.1200	0.0400
10	PQ	0.9786	0	0	0.1200	0.0400
11	PQ	0.9784	0	0	0.0900	0.0600
12	PQ	0.9781	0	0	0.1200	0.0700
13	Droop	0.9763	-0.9000	-0.9000	0.1200	0.0700
14	PQ	0.9757	0	0	0.2400	0.1600
15	PQ	0.9749	0	0	0.1200	0.0200
16	PQ	0.9742	0	0	0.1200	0.0400

17	PQ	0.9736	0	0	0.1200	0.0400
18	PQ	0.9734	0	0	0.1800	0.0800
19	PQ	0.9988	0	0	0.1800	0.0800
20	PQ	0.9973	0	0	0.1800	0.0800
21	PQ	0.9971	0	0	0.1800	0.0800
22	PQ	0.9969	0	0	0.1800	0.0800
23	PQ	0.9935	0	0	0.1800	0.1000
24	PQ	0.9911	0	0	0.8400	0.4000
25	Droop	0.9901	-0.9000	-0.9000	0.8400	0.4000
26	PQ	0.9879	0	0	0.1200	0.0500
27	PQ	0.9876	0	0	0.1200	0.0500
28	PQ	0.9878	0	0	0.1200	0.0400
29	PQ	0.9882	0	0	0.2400	0.1400
30	PQ	0.9883	0	0	0.4000	1.2000
31	PQ	0.9870	0	0	0.3000	0.1400
32	PQ	0.9866	0	0	0.4200	0.2000
33	Droop	0.9861	-0.9000	-0.9000	0.1200	0.0800

Fonte: Autor

A frequência da micro-rede conectada é obtida, também, pela convergência de Δf no algoritmo DBFS como mostra a figura 11.

Figura 11 Convergência do Método DBFS – Micro-rede conectada



Fonte: Autor.

Do gráfico da figura 11, observa-se que o desvio de frequência para o qual o algoritmo DBFS convergiu na configuração de rede conectada foi de $\Delta f = 2.992 \times 10^{-50} p.u.$ O valor da frequência é dado então por

$$\begin{aligned}
\Delta f_{pu} &= f_{pu} - f_{pu}^0 \\
f_{pu} &= \Delta f_{pu} + f_{pu}^0 \\
f_{pu} &= 2.992 \times 10^{-50} + 1 \\
f_{pu} &\cong 1 \text{ p.u.} \\
f &= f_{pu} \times f_{base} = 60\text{hz.}
\end{aligned}
\tag{5.3}$$

O resultado acima implica que a frequência da micro-rede conectada converge para o valor extremamente próximo à frequência nominal, isto é $f = f^0$. Tal situação é esperada uma vez que o sistema conectado deve ser capaz de manter a frequência sempre no nível nominal. Pela Tabela 3 verifica-se que a barra 1 teve sua tensão calculada em 1 p.u. e o compartilhamento da carga foi feito apenas por essa barra, enquanto as demais barras de geração operam apenas injetando suas potências nominais de $0.9 + j0.9 \text{ p.u.}$. Essa situação é análoga a forma tradicional de cálculo do fluxo de carga em que considera-se uma barra de folga com tensão fixa de 1 p.u. executando todo o compartilhamento de carga do sistema.

Para finalizar esta fase de experimentos iniciais, a micro-rede será considerada agora como um sistema de distribuição convencional conectado à rede sem geradores distribuídos. Apenas a barra 1 do sistema possui coeficiente de *droop* nulo, sendo responsável pelo compartilhamento da carga. Como dito, desta vez não há geradores distribuídos injetando suas potências nominais. A potência nominal dos geradores das barras 6, 13, 25 e 33 são consideradas nulas e $m_{p1} \cong 0$. Os resultados para essa configuração são apresentados na Tabela 4.

Ao observar a Tabela 4, o resultado do DBFS com a configuração dita acima é similar ao resultado do método BFS convencional para sistemas de distribuição em que considera-se uma barra de referência com tensão fixa e responsável por todo o compartilhamento de carga. Ou seja, o DBFS pode ser considerado como um caso geral de cálculo de fluxo de carga de uma micro-rede, podendo ser modificado de acordo com o seu modo de operação.

Tabela 4 Resultado DBFS - Sistema de Distribuição Convencional

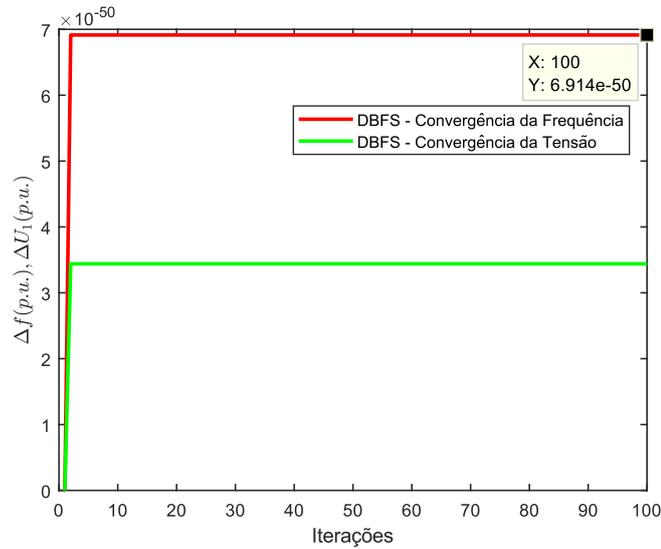
Barra	Tipo	$ U [p.u.]$	$P_G[p.u.]$	$Q_G[p.u.]$	$P_C[p.u.]$	$Q_C[p.u.]$
1	Droop	1.0000	-7.8141	-4.3399	0	0
2	PQ	0.9984	0	0	0.2000	0.1200
3	PQ	0.9910	0	0	0.1800	0.0800
4	PQ	0.9873	0	0	0.2400	0.1600
5	PQ	0.9837	0	0	0.1200	0.0600
6	PQ	0.9791	0	0	0.1200	0.0400

7	PQ	0.9797	0	0	0.4000	0.2000
8	PQ	0.9731	0	0	0.4000	0.2000
9	PQ	0.9700	0	0	0.1200	0.0400
10	PQ	0.9671	0	0	0.1200	0.0400
11	PQ	0.9665	0	0	0.0900	0.0600
12	PQ	0.9655	0	0	0.1200	0.0700
13	PQ	0.9627	0	0	0.1200	0.0700
14	PQ	0.9621	0	0	0.2400	0.1600
15	PQ	0.9614	0	0	0.1200	0.0200
16	PQ	0.9606	0	0	0.1200	0.0400
17	PQ	0.9601	0	0	0.1200	0.0400
18	PQ	0.9598	0	0	0.1800	0.0800
19	PQ	0.9982	0	0	0.1800	0.0800
20	PQ	0.9967	0	0	0.1800	0.0800
21	PQ	0.9964	0	0	0.1800	0.0800
22	PQ	0.9963	0	0	0.1800	0.0800
23	PQ	0.9892	0	0	0.1800	0.1000
24	PQ	0.9861	0	0	0.8400	0.4000
25	PQ	0.9846	0	0	0.8400	0.4000
26	PQ	0.9784	0	0	0.1200	0.0500
27	PQ	0.9777	0	0	0.1200	0.0500
28	PQ	0.9774	0	0	0.1200	0.0400
29	PQ	0.9775	0	0	0.2400	0.1400
30	PQ	0.9768	0	0	0.4000	1.2000
31	PQ	0.9755	0	0	0.3000	0.1400
32	PQ	0.9753	0	0	0.4200	0.2000
33	PQ	0.9753	0	0	0.1200	0.0800

Fonte: Autor

Como nos demais modos de operação, a frequência será determinada pela convergência de Δf . A Fig. 12 apresenta o processo de convergência do algoritmo DBFS para a configuração dada.

Figura 12 Convergência da frequência



Fonte: Autor.

Como o desvio de frequência obtido $\Delta f = 6.914 \times 10^{-50}$ na última iteração do DBFS é praticamente nulo, ao executar a mesma rotina de cálculo da frequência dos outros modos de operação, obtém-se que $f \cong 60\text{Hz}$. Este resultado já era esperado, uma vez que o sistema de distribuição encontra-se conectado e a barra 1 comporta-se de maneira similar a uma barra de referência. Assim, mostra-se com clareza a robustez e fácil configuração do método DBFS, demonstrando sua capacidade de executar a regulação primária, desde que seja corretamente configurado.

5.2. Experimento principal

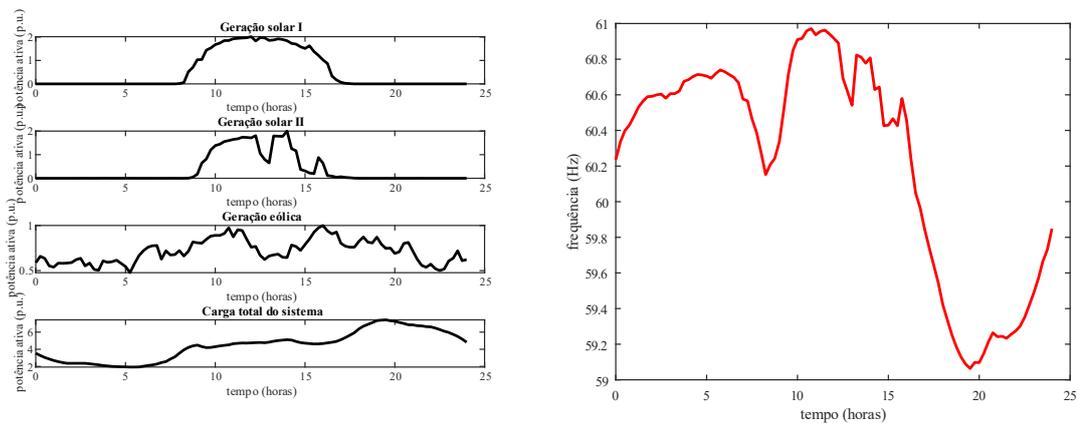
Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos aplicando o método de controle secundário proposto via PSO, considerando a micro-rede ilhada com as diversas microfones. Nesta fase são utilizados os modelos definidos no capítulo 4, onde tanto as cargas como as gerações não-despacháveis variam no tempo em um ciclo diário.

As simulações realizadas contemplam dois cenários. Primeiramente é observado o comportamento da atuação do controle primário por *droop* tradicional, denominado de cenário 1. Em seguida considera-se a metodologia proposta neste trabalho, compreendida no ajuste das curvas de *droop* fundamentada em PSO, denominado de cenário 2.

O ilhamento interrompe o suprimento de energia da micro-rede feito pela rede principal, restando às microfones o controle tanto do suprimento de carga, quanto da regulação de frequência e tensão. Assim, no cenário 1, a micro-rede passa por déficits e excessos de geração

que diminuem ou aumentam o valor da frequência substancialmente. O agravamento das quedas de frequência se dá, principalmente, quando a micro-rede passa por momentos de crescimento da demanda e o montante de geração não é suficiente para supri-la. Já os incrementos de frequência se dão, principalmente, pela injeção de potência das microfones não despacháveis (solar e eólica) nas horas do dia de pouca demanda na micro-rede. As figuras a seguir apresentam o perfil de frequência da micro-rede no período de 24 horas para o cenário 1.

Figura 13 Frequência da micro-rede ilhada utilizando controle por *droop*.



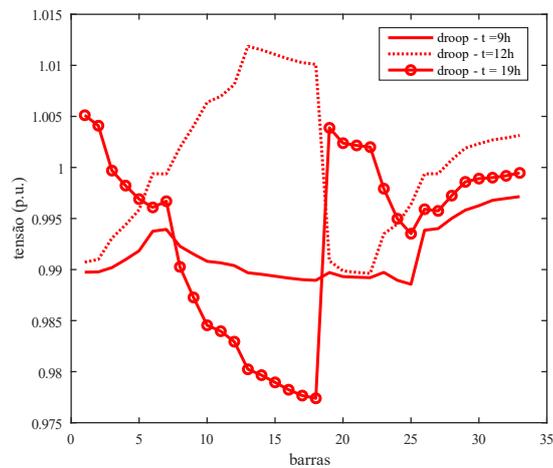
Fonte: Autor.

Como pode-se observar na Fig. 13, nas primeiras horas do dia, momento de baixa demanda de carga, a micro-rede apresenta os níveis de frequência acima do nominal. Tal incremento está relacionado ao desbalanceamento de geração eólica e a carga baixa no sistema. Este aumento continua predominante enquanto a carga do sistema está baixa e as fontes não-despacháveis injetam suas potências nominais. No entanto, à medida que a demanda de energia do sistema aumenta e geração de energia fotovoltaica não está mais presente, a frequência cai abruptamente.

Assim, tendo em vista as recomendações do PRODIST indicadas no capítulo 2, verifica-se que o comportamento do desvio de frequência é mantido em valores de frequência distantes dos recomendados por um longo intervalo de tempo, o que comprometeria a operação segura do sistema de energia em questão. Além da frequência, no que se refere a variação da tensão de regime permanente, não se observou desvios que prejudicassem a operação da micro-rede. Nesse caso, ao observar a Fig. 14, as tensões das barras foram mantidas em níveis adequados entre 0.95 p.u. e 1.05 p.u. em 3 momentos distintos de operação da micro-rede ($t = 5h$, $12h$ e $19h$). No entanto, observa-se uma elevação dos níveis de tensão em $t = 12h$, devido à maior

injeção de potência por parte das fontes renováveis do tipo solar. Como o sistema encontra-se ilhado, quanto maior o nível desse tipo de geração, maior será a elevação do nível de tensão da barra onde o gerador está conectado, já que o excedente de geração não pode ser exportado para a rede principal. A situação inversa ocorre em $t = 19\text{h}$, onde a carga está elevada e já não há mais geração solar. Nesse caso, devido o maior carregamento da rede, ocorre um aumento nas quedas de tensão de ramo da micro-rede.

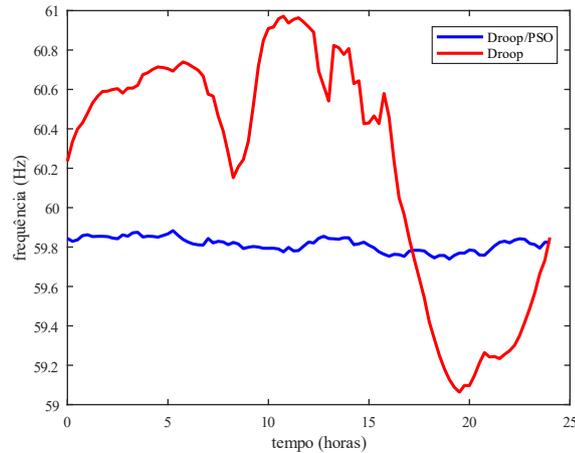
Figura 14 Tensão nas barras utilizando controle por *droop*.



Fonte: Autor.

Para o cenário 2, os veículos elétricos mitigam o desequilíbrio entre carga e geração na micro-rede, reajustando o consumo de potência nos momentos de excesso de geração e carga. No gráfico da Fig. 15 pode-se observar a melhoria da frequência da micro-rede obtida com o PSO/DBFS. Verifica-se, dessa forma, que a característica V2G dos veículos elétricos pode ser crucial e econômica na manutenção de uma micro-rede ilhada, na medida em que os próprios veículos do sistema podem fornecer essa característica de controle e, em contra partida, terem suas baterias carregadas. Vale ressaltar que esse trabalho não considera uma lógica de recarga dos veículos elétricos em que os requisitos do consumidor são priorizados.

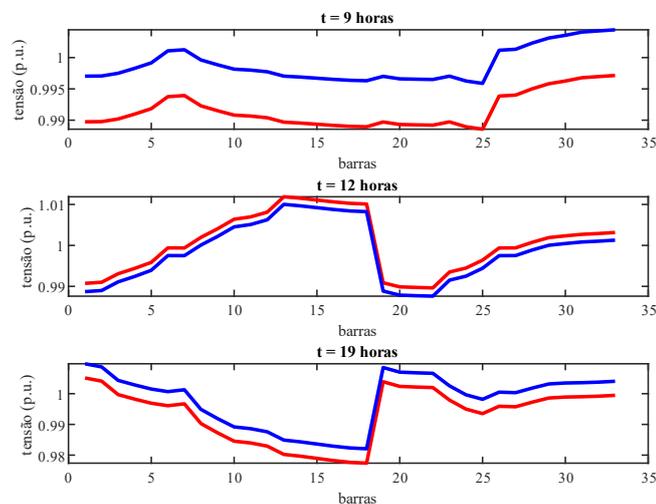
Figura 15 Frequência da micro-rede ilhada utilizando o método proposto (*droop/PSO*).



Fonte: Autor.

Apesar dos resultados para tensões de barras do controle primário serem suficientemente bons, o PSO melhora o perfil de tensão no sistema mantendo-o mais próximo de 1 p.u. independente da hora do dia, como pode-se observar na figura 16.

Figura 16 Tensão nas barras utilizando o método proposto (*droop/PSO*).

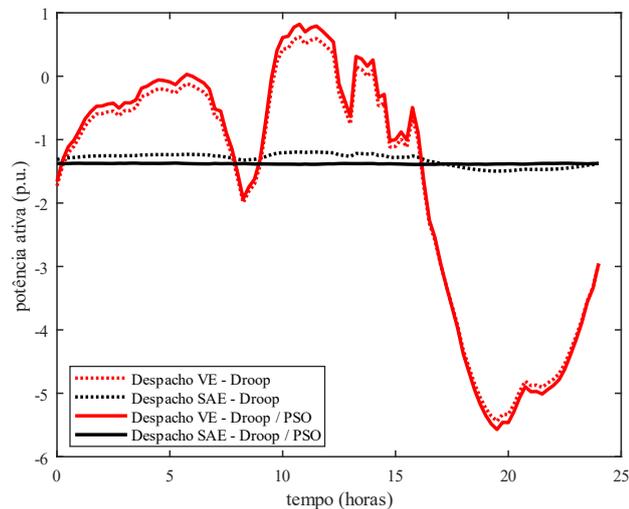


Fonte: Autor.

Finalmente, o despacho ótimo dos veículos elétricos e a operação da micro-rede, tendo em vista a minimização dos desvios de tensão e frequência, podem ser observados através da Fig. 17, onde verifica-se o comportamento ótimo das injeções/consumo de potência na rede para atender estes requisitos de controle. Para garantir a operação secundária do sistema ilhado, a frota de veículos elétricos, através do PSO, ajusta a injeção e consumo de potência da rede. O

modo de operação de carregamento dos veículos elétricos ocorre no período de maior geração do sistema, próximo às $t = 12\text{h}$, justamente o mesmo período de aumento da frequência e maior participação da geração solar fotovoltaica. Assim, comparando as Figs. 15 e 17, ao reduzir os erros de frequência do controle primário, os veículos elétricos consomem potência ativa da rede e compensam os momentos de queda da frequência do período de pico injetando energia. No entanto, como o período de pico do sistema coincide com o período de falta de energia solar (início do período noturno), os veículos elétricos precisam injetar uma quantidade maior de energia na rede. Esse reajuste para melhorar a frequência, no entanto, aumenta as perdas totais do sistema, como pode ser observado na Fig. 18.

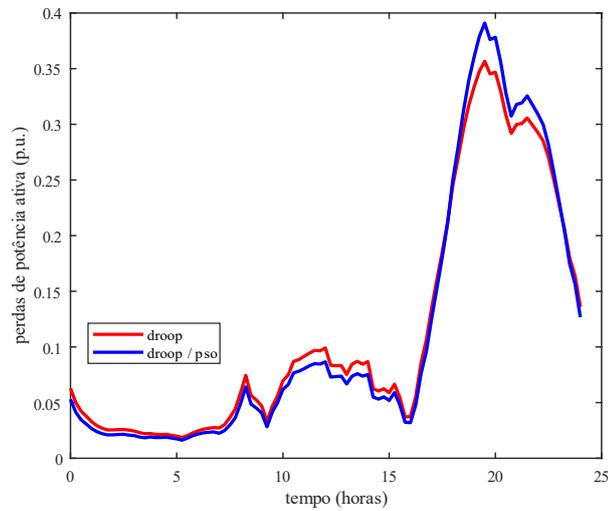
Figura 17 Operação ótima da micro-rede ilhada.



Fonte: Autor.

As perdas do sistema em cada instante de tempo são apresentadas na figura 18. Neste caso, percebe-se o seu aumento no instante de maior demanda na micro-rede. Esse aumento nas perdas deve-se à elevação das correntes de ramo em virtude da ação do controle secundário, isto é, devido ao descarregamento de veículos para reduzir os desvios de frequência. No entanto, a perda máxima obtida foi em torno de 0.4 p.u. para o sistema inteiro em $t = 19\text{h}$, consideravelmente próximo ao valor obtido para o controle primário de 0.35 p.u.

Figura 18 Perdas de potência ativa total.



Fonte: Autor.

5.3. Considerações finais

Os resultados dos experimentos iniciais demonstram a capacidade dos métodos DBFS em modelar o comportamento de regime permanente da micro-rede ilhada e regulada por *droop*, além de ser adaptado para a forma convencional e conectada à rede principal.

No experimento principal o método DBFS apresenta os pontos de equilíbrio e os desvios de frequência da micro-rede em cada instante de tempo. Ao final, a proposta de controle principal é aplicada e os desvios de frequência e tensão são regulados próximos a frequência e tensão de operação nominal.

No anexo I encontram-se os gráficos e tabelas que correspondem ao comportamento do PSO obtido nesta dissertação de mestrado. No capítulo seguinte apresentam-se as considerações finais do trabalho e propostas de trabalho futuro.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mudança de paradigma dos sistemas de distribuição tem incorporado uma série de fatores que desafiam os pesquisadores e engenheiros da área de sistemas de energia, principalmente no que se refere à característica bidirecional de fluxo de energia, inserção de geração distribuída, micro-redes e ilhamento desses sistemas. Junto com essas mudanças, o crescimento na utilização de veículos elétricos tornaram estas questões ainda mais complexas.

Nesta dissertação de mestrado foi proposta uma alternativa de controle secundário de uma micro-rede ilhada e regulada por droop fundamentada em PSO, onde um estacionamento de veículos elétricos é responsável pelo compartilhamento da carga e regulação de tensão e frequência da micro-rede. Para modelar o comportamento ilhado do sistema foi utilizado um método de fluxo de carga DBFS, baseado nos algoritmos BFS, notadamente mais rápidos e robustos e apropriados para micro-redes.

Assim, o método DBFS analisa e modela a questão do ilhamento da micro-rede, enquanto o PSO melhora o desempenho através do despacho ótimo dos veículos elétricos. O PSO, ao controlar os veículos elétricos, permite uma melhor utilização da sua característica V2G para deslocar o consumo e diminuir os desvios de frequência e tensão da micro-rede. Assim, pode-se qualificar esta metodologia tanto como um método de controle, como uma metodologia de gerenciamento da demanda.

Como proposta de trabalhos futuros, é necessário aumentar o nível de complexidade na modelagem dos componentes da rede, principalmente no que diz respeito às características aleatórias das fontes renováveis e cargas (tendo em vista soluções mais realistas). Propõe-se, nessa perspectiva, métodos sofisticados de previsão de geração e carga ou baseados em processos estocásticos. Além disso, através da utilização de programas de simulação no domínio do tempo profissionais como PSCAD, por exemplo, pode-se simular a micro-rede até que o transiente desapareça e comparar com o resultado obtido nesta dissertação. Os resultados provavelmente não estarão tão próximos, pois estes programas profissionais levam em consideração outras variáveis como harmônicos, por exemplo. No entanto, a metodologia apresentada nesta dissertação pode ser uma maneira rápida alternativa de encontrar o modo de operação de uma micro-rede ilhada, regulada por droop e que incorpora uma estrutura de controle hierárquico (controle secundário).

Com os resultados dessa pesquisa foram submetidos e aceitos os seguintes artigos científicos:

- Silva, Rodrigo V., Affonso, Carolina M.; Optimal use of Electric Vehicles, Battery Storage and Renewables to Improve Microgrid Resilience During Emergencies. **CIGRE XIV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning**, 2018. (artigo aceito e apresentado)
- Silva, Rodrigo V., Affonso, Carolina M.; Particle Swarm Optimization and Backward/Forward Sweep Load Flow Analysis for Droop-Regulated Islanded Microgrids. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America**, 2019. (artigo aceito)

REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, M. M. A. et al. A Novel and Generalized Three-Phase Power Flow Algorithm for Islanded Microgrids Using a Newton Trust Region Method. **IEEE Transactions on Power System**, v. 28, n. 1, p. 190-201, Maio 2012. ISSN 0885-8950.
- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L. Distributed Generation: A Definition. **Electric Power System Research**, v. 57, n. 3, p. 195, 2001.
- AFFONSO, C. M.; KEZUNOVIC, M. Technical and Economic Impact of PV-BESS Charging Station on Transformer Life: A Case. **IEEE Transactions on Smart Grids**, v. 10, n. 4, p. 4683-4692, Julho 2019. ISSN 1949-3061.
- ANEEL. **PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.], p. 55. 2018.
- BANERJI, A. et al. Microgrid: A review. **IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)**, Trivandrum, India, 24 Agosto 2013. 1-9.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, Abril 1989.
- BARKER, P.; MELLO, R. D. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems. Part I: Radial Distribution Systems. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, 2000. 1645-1656.
- BEHESHTI, Z.; SHAMSUDDIN, S. M. A review of population-based meta-heuristic algorithm. **International Journal of Advances in Soft Computing and its Applications**, v. 5, n. 1, p. 1-35, Março 2013. ISSN 2074-8523.
- BEVRANI, H.; WATANABE, M. **Power System Monitoring and Control**. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., v. I, 2014.
- BMW. Novo BMW i3. **BMW**, 2018. Disponível em: <<https://www.bmw.com.br/pt/all-models/bmw-i/i3/2017/visao-geral.html>>. Acesso em: 25 Julho 2019.
- CHICCO, G.; MAZZA, A. Heuristic optimization of electrical energy systems: Refined metrics to compare the solutions. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 17, n. 1, p. 1-40, Março 2019.

CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P.; CHOWDHURY, S. **Microgrids and Active Distribution Networks**. [S.l.]: Renewable Energy Series, v. 1, 2009.

CLERC, M.; KENNEDY, J. The particle swarm—explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. **IEEE Transaction on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 1, p. 58-73, Fevereiro 2002. ISSN 1941-0026.

DIÁS, G.; ALEIXANDRE, J. G.; COTO, J. Direct Backward/Foward Sweep Algorithm for Solving Load Power Flow in AC Droop-Regulated Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grids**, v. 7, n. 5, p. 2208-2217, Agosto 2015. ISSN 1949-3053.

GIL, N. J. **Identificação de Condições de Operação em Modo Isolado e Procedimentos de Controlo de Emergência para Multi-Micro-Redes**. 1. ed. Porto: FEUP, v. 1, 2009.

GLOVER, D.; SARMA, M.; OVERBYE, T. **Power System Analysis & Design**. 5. ed. [S.l.]: CL Engineering, 2012.

HAMMED, F.; HOSANI, M. A.; ZEINELDIN, H. A Modified Backward/Foward Sweep Load Flow Method for Islanded Radial Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grids**, v. 10, n. 1, p. 910-918, Setembro 2017. ISSN 1949-3053.

HIDALGO, R.; ABBEY, C.; JOÓS, G. A review of Active Distribution Networks Enabling Technologies. **IEEE PES General Meeting** , Providence, v. 1, n. 1, Julho 2010. ISSN 1.

IEEE PES. ISS. **IEEE PES - Power & Energy Society**, 2013. Disponível em: <<http://sites.ieee.org/pes-iss/data-sets/>>. Acesso em: 7 Abril 2019.

INEE. **Instituto Nacional de Eficiência Energética**, 2019. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp?Cat=gd>. Acesso em: 19 abr. 2019.

IRAVANI, H. N. A. R. Steady-state model and power flow analysis of electronically-coupled distributed resource units. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 721-728, Janeiro 2007.

IRAVANI, M. Z. K. A. R. Unbalanced model and power-flow analysis of microgrids and active distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 4, p. 2851-2858, Outubro 2010.

KAUHANIEMI, K.; PALIZBAN, O. Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 797-813, Janeiro 2015.

KAVIRI, S. M. et al. **A review of AC Microgrid Control Methods**. International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Florianópolis, Brasil: IEEE. 2017. p. 8.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle Swarm Optimization. **Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks**, Perth, p. 1942-1948, Novembro 1995. ISSN 0-7803-2768-3.

KENNEDY, J.; EBERHART, R.; SHI, Y. **Swarm Intelligence**. 1^a. ed. [S.l.]: Elsevier, v. Único, 2001.

KHAN, B.; SINGH, P. Selecting a Meta-heuristic Technique for Smart Micro-grid Optimization Problem: A Comprehensive Analysis. **IEEE Access**, v. 5, p. 13951-13977, Julho 2017.

KHATTAM, W. E.; SALAMA, M. M. A. Distributed generation technologies, definitions and benefits. **Electric Power System Research**, v. 71, n. 2, p. 119-128, Outubro 2004.

KUMAR, M.; SAMUEL, C.; JAISWAL, A. An overview of Distributed Generation in Power Sector. **International Journal of Science, Technology & Management** , v. 4, n. 1, p. 2394-1537, Março 2015.

LASSETER, R. H. et al. The CERTS Microgrid Concept. **Consortium for Electric Reliability Technology Solutions**, v. 1, n. 1, p. 1-27, Abril 2002.

LIEW, S.; STRBAC, G. Maximising Penetration of Wind Generation in Existing Distribution Networks. **IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, 2002. 256-262.

LISBOA, A. et al. A fast power flow method for radial networks with linear storage and no matrix inversions. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 63, n. 1, p. 901-907, Dezembro 2014.

MARYAMA, V. **Análise de Estratégias de Divisão de Carga baseadas em Droop para Microrredes**. 1^a. ed. Florianópolis: [s.n.], v. I, 2016.

NASSAR, M. E.; SALAMA, M. A novel branch-based power flow algorithm for islanded AC microgrids. **Electric Power System Research**, v. 146, n. 1, p. 51-62, Maio 2017.

POLI, R.; KENNEDY, J.; BLACKWELL, T. Particle Swarm Optimization: An overview. **Springer**, v. 1, n. 1, p. 33-57, Junho 2007.

REN, L.; ZHANG, P. Generalized Microgrid Power Flow. **IEEE Transactions on Smart Grids**, v. 9, n. 4, p. 3911-3913, Março 2018. ISSN 1949-3053.

REYNOLDS, W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. **Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques**, v. 21, n. 4, p. 25-34, Julho 1987.

RMDS. Standard Load Profiles. **RMDS**, 2018. Disponível em: <<https://rmdservice.com/standard-load-profiles/>>. Acesso em: 30 Março 2019.

SAGGIN, F. **Modelagem e Controle para Operação de Inversores Monofásicos em Paralelo**: uma abordagem via fasores dinâmicos e LMIS. Florianópolis: [s.n.], 2016.

SECCHI, A. R. Notas de aula Prof Secchi. **COPEE**, 2013. Disponível em: <http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ897/Naturais/GA_PSO/Non%20deterministico_Aula5%20PSO/aula5__non%20deterministico.pdf>. Acesso em: 15 Março 2019.

SHABANZADEH, M.; MOGHADDAM, M. **What is Smart Grids**. International Power System Conference. Tehran - Iran: SMG. 2013. p. 1-5.

SHAREEF, H.; ISLAM, M. M.; MOHAMED, A. A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 403-420, Outubro 2016.

SILVA, R. V.; AFFONSO, C. M. Optimal use of Electric Vehicles, Battery Storage and Renewables to improve Microgrid Resiliense during Emergencies. **XIV Sepope – Symposium of Specialists in Operation Planning and Electrical Expansion**, Recife, p. 9, Setembro 2018.

SUCHETHA, C.; RAMPRABHAKAR, J. Optimization Techniques for Operation and Control of Microgrids. **Journal of Green Engineering**, v. 8, n. 4, p. 621-644, Outubro 2018.

TAYAB, U. B. et al. A review of droop control techniques for microgrid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, n. 1, p. 717 - 727, Setembro 2017. ISSN 1364-0321.

THULASIRAMAN, K.; SWAMY, M. **The Electrical Engineering Handbook**. 1^a. ed. [S.l.]: Elsevier, 2005.

TINAGERO, G. A. et al. Power flow modeling of islanded AC microgrids with hierarchical control. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 105, n. 1, p. 28-36, Fevereiro 2019.

WANG, D.; TAN, D.; LIU, L. Particle swarm optimization algorithm: an overview. **Soft Computing**, v. 22, n. 2, p. 387-408, Janeiro 2018.

ZALDÍVAR, D. et al. A novel bio-inspired optimization model based on Yellow Saddle Goatfish behavior. **Biosystems**, v. 174, n. 2, p. 1-21, Dezembro 2018.

ZAMBRONI, A. C.; RODRIGUES, Y. R.; ZAMBRONI, M. F. **Considerations on islanded microgrid frequency control capability within different generations configurations**. Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission. Curitiba: IEEE-CLAGTEE. 2017. p. 1-9.

ZHOU, X.; GUO, T.; MA, Y. An Overview on Microgrid Technology. **2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation**, Beijing, China, v. 1, n. 1, Setembro 2015. ISSN 978-1-4799-7098-8.

ZHU, Y.; TOMSOVICK, K. Adaptive Power Flow Method for Distribution System with Dispersed Generation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 17, n. 3, p. 822-827, 2002.

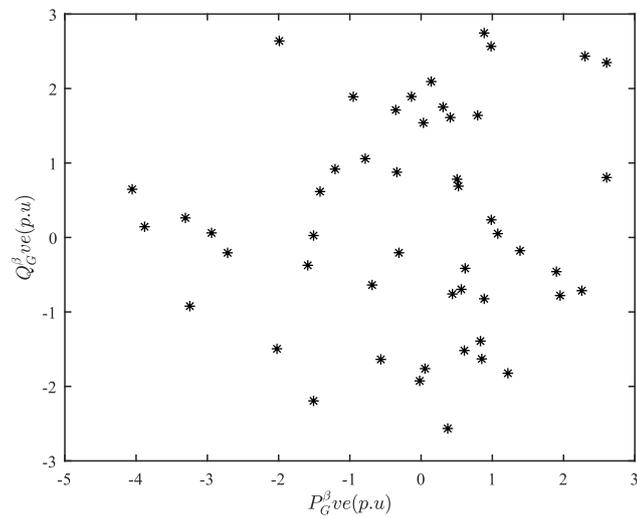
ANEXO I

Tabela 5- Parâmetros do PSO

Parâmetro	Valor
Iterações	100
Nº de partículas	50
Fator de inércia	0.9
Fator constrição	0,7298

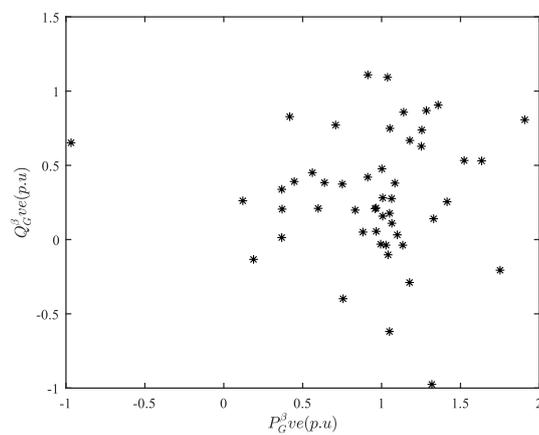
Fonte: Autor.

Figura 19 Enxame inicial



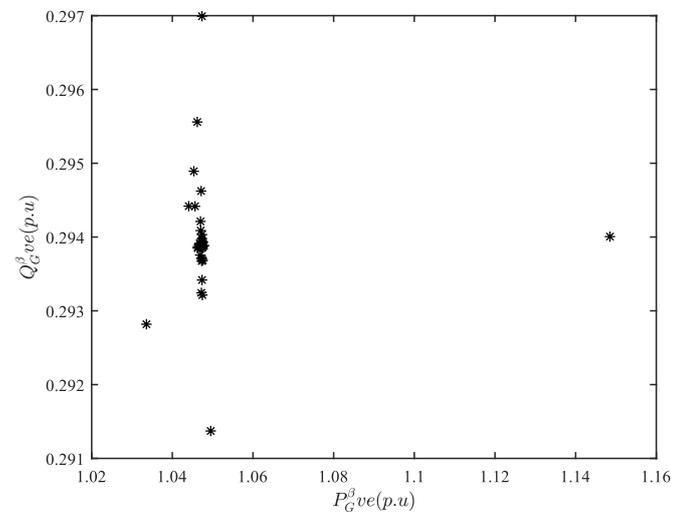
Fonte: Autor

Figura 20 Enxame 10 iterações



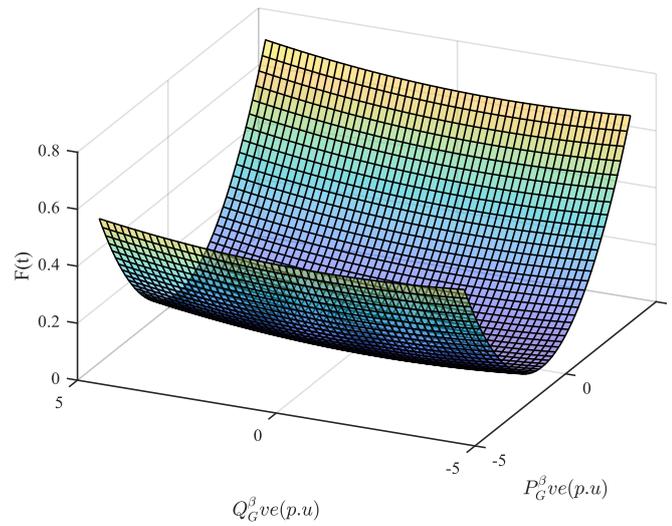
Fonte: Autor.

Figura 21 Enxame 100 iterações (final)



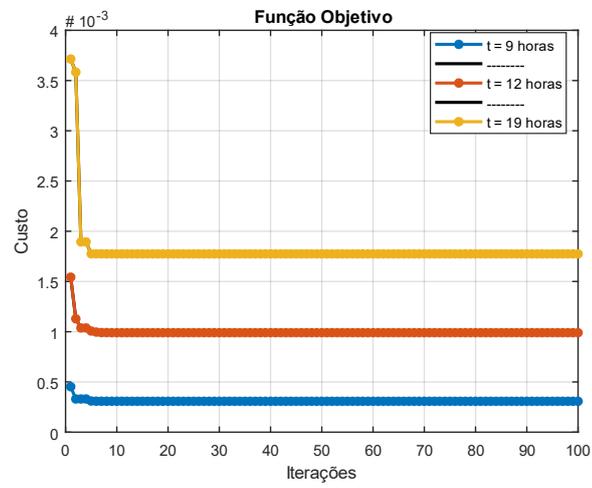
Fonte: Autor.

Figura 22- Curva de F(t) em função das variáveis de decisão



Fonte: Autor.

Figura 23 Evolução da função objetivo



Fonte: Autor.