

HENRIQUE ITIRO ETO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE MICRORREDES USANDO O
GRIDLAB-D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Coorientador: M.Sc. Felipe José Lachovicz

CURITIBA

2018

Dedico este trabalho aos meus pais e avôs
que sempre me apoiaram nos estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família e principalmente aos meus pais Antonio e Regina, pelo carinho, atenção e por terem dado grande importância à minha educação desde que eu era criança.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki, pela disponibilidade, bom-humor e dedicação em me orientar na realização do trabalho, mesmo estando ocupado.

Agradeço ao coorientador M.Sc. Felipe José Lachovicz, por ter sido altamente atencioso e paciente ao me ajudar em todas as dúvidas técnicas que tive no projeto.

Agradeço aos colegas e professores do curso de Engenharia Elétrica, pelo companheirismo e conhecimento transmitido, contribuindo para a minha formação como engenheiro.

Agradeço aos colegas de estágio do Lactec, por terem me dado apoio moral nos momentos difíceis.

Agradecemos o apoio do projeto de P&D ANEEL 2866-0442/2016 da COPEL Distribuição em execução pelo Lactec, bem como o apoio da rede de pesquisa MEIHAPER do CYTED sob número 717RT0533.

E por fim, agradeço à Hana Eto, minha fiel e brava Lhasa Apso preto e branco, que sempre me deu carinho, companhia e algumas mordidas durante a realização deste trabalho.

“Science is but a perversion of itself unless it has as its ultimate goal the betterment of humanity.”

-Nikola Tesla

RESUMO

Grande parte da energia elétrica produzida atualmente provém de matrizes de combustíveis fósseis, resultando em sua depleção e em impactos ambientais graças à emissão de gases poluentes. Também deve ser mencionado o fato de que uma parcela considerável da população ainda não possui acesso à eletricidade. Diante disso, há uma tendência mundial em democratizar, descarbonizar e descentralizar o fornecimento de energia. A microrrede é um sistema de distribuição que acompanha esse caminho por apresentar geração distribuída vinda de fontes renováveis, sistemas de baterias para amenizar a natureza intermitente da geração e chave para o ilhamento do sistema, que diminui a sua dependência com a rede elétrica principal. Portanto, é importante conhecer ferramentas computacionais para a simulação desse sistema. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de metodologia de modelagem e simulação de microrredes com o programa GridLab-D. A metodologia de trabalho foi dividida em 5 etapas, sendo a primeira responsável pela validação do Módulo *Powerflow* com a simulação do sistema alimentador de teste de 13 barras do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE). As fases restantes foram compostas pelo dimensionamento e aplicação do gerador fotovoltaico, baterias e chave em uma barra de baixa tensão do sistema da IEEE, formando a microrrede. Foram considerados cenários com penetração fotovoltaica de 10%, 35% e 70% em relação à carga instalada na microrrede. Com este estudo foi possível verificar que o GridLab-D é uma ferramenta válida para a simulação de sistemas de distribuição com fases desbalanceadas pelo fato de seu resultado apresentar uma pequena diferença de valor se comparado com os valores oficiais da IEEE. A modelagem no programa dos componentes da microrrede como geradores fotovoltaicos e baterias apresentaram um comportamento condizentes com a realidade. No entanto, foi observado que na atual versão do GridLab-D as funções de ilhamento ainda requerem um maior amadurecimento. A análise da microrrede desconectada à rede só foi possível com a programação manual da bateria e aplicação de comandos ainda não documentados pelos desenvolvedores da ferramenta.

Palavras-chave: Microrrede. GridLab-D. Sistema Fotovoltaico. Bateria.

ABSTRACT

The majority of electrical energy produced nowadays still comes from fossil fuels, resulting in its depletion and environmental impact thanks to the emission of polluting gases. Also, there needs to be mentioned the fact that a considerable portion of the population does not have access to electricity. Because of these facts, there is a global trend in democratize, decarbonize and decentralize the supply of energy. Microgrid is a distribution system which follows this way for presenting distributed generation that comes from renewable sources, battery system to soften the generation's intermittent nature and a switch for the islanding of the system, lowering its dependency to the main grid. Therefore, it is important to know computer software for the simulation of microgrids. In this work, it is presented the development of a methodology of the modeling and simulation of microgrids with the program GridLab-D. The methodology of this work was divided in 5 stages, the first one being the validation of Powerflow Module by simulating the 13-bus test feeder provided by the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). The remaining stages were composed by the sizing and application of a photovoltaic generator, batteries and switch in a low voltage bus presented in IEEE's system. It were considered scenarios with three photovoltaic penetrations values considering the load installed on the microgrid: 10%, 35% and 70%. With this study it was possible to verify that GridLab-D is a valid tool for simulating distribution systems with unbalanced phases by the fact that its result presented a small difference in value compared to IEEE'S official data. In the program, modeling microgrid components such as photovoltaic generator and batteries presented a behavior consistent with reality. However, it was observed that in the current version of the software islanding functions still requires more development. Analysis of the microgrid disconnected to the main grid was only possible with manual programming of the battery and use of commands not yet documented by the developers of the program

Key words: Microgrid. GridLab-D. Photovoltaic System. Battery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – FORNECIMENTO TOTAL DE ENERGIA POR RECURSO.....	14
FIGURA 2 – MUDANÇA MÉDIA ANUAL E GLOBAL NA PRODUÇÃO DE ENERGIA POR RECURSO	15
FIGURA 3 – POPULAÇÃO SEM ACESSO À ELETRICIDADE, 2016 (MILHÕES) ...	15
FIGURA 4 – CONSTRUÇÃO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA	20
FIGURA 5 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA	21
FIGURA 6 – CURVA I-V E P-V DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO DE 156mm x 156mm SOB CONDIÇÕES PADRÕES DE ENSAIO	22
FIGURA 7 – CURVAS V-I DE CONEXÃO DE CELULAS FOTOVOLTAICAS EM (a) SÉRIE E (b) PARALELO.....	22
FIGURA 8 – INFLUENCIA DA IRRADIAÇÃO SOLAR NA CURVA V-I DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA (TEMPERATURA DE 25°C)	23
FIGURA 9 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CURVA V-I DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA (IRRADIÂNCIA DE 1000 W/m ²).....	24
FIGURA 10 – PRINCIPAIS PARTES CONSTITUINTES DE UMA BATERIA ELETROQUIMICA	25
FIGURA 11 – DADOS DE BATERIAS ELETROQUIMICAS DISPONIVEIS COMERCIALMENTE	26
FIGURA 12 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA BATERIA ELETROQUÍMICA...	27
FIGURA 13 – PONTE TRIFÁSICA COMPOSTA POR 6 IGBTs.....	28
FIGURA 14 – SFCR COM INVERSOR CENTRAL	29
FIGURA 15 – SFCR COM INVERSOR STRING.....	29
FIGURA 16 – SFCR COM INVERSOR MULTI-STRING.....	30
FIGURA 17 – SFCR COM MÓDULO INTEGRADO AO INVERSOR	30
FIGURA 18 – CONEXÃO EM UM CONTROLADOR PWM.....	32
FIGURA 19 – CONEXÃO EM UM CONTROLADOR PMP.....	33
FIGURA 20 – ARQUITETURA DE UMA MG.....	34
FIGURA 21 – FUNÇÕES DE UMA EMS.....	36
FIGURA 22 – APLICAÇÃO DO FILTRO DE TÍTULO “GRIDLAB-D” E RELEVÂNCIA DE CITAÇÕES.....	40
FIGURA 23 – ALIMENTADOR TESTE DE 13 BARRAS.....	47

FIGURA 24 – CURVA DE CARGA RESIDENCIAL DE BAIXA RENDA PARA DIAS ÚTEIS	48
FIGURA 25 – CURVA DE CARGA RESIDENCIAL DE MÉDIA RENDA PARA DIAS ÚTEIS	48
FIGURA 26 – CURVA DE CARGA COMERCIAL PARA DIAS ÚTEIS.....	49
FIGURA 27 – FASES PARA A ELABORAÇÃO DO PROJETO	50
FIGURA 28 – ETAPAS PARA A SIMULAÇÃO DO SISTEMA ALIMENTADOR DE 13 BARRAS	51
FIGURA 29 – MICRORREDE APLICADA NO TRABALHO	54
FIGURA 30 – PERFIL DE TENSÃO DO SISTEMA DE 13 BARRAS PARA A FASE A	58
FIGURA 31 – PERFIL DE TENSÃO DO SISTEMA DE 13 BARRAS PARA A FASE B	59
FIGURA 32 – PERFIL DE TENSÃO DO SISTEMA DE 13 BARRAS PARA A FASE C	59
FIGURA 33 – FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA NA BARRA 650	60
FIGURA 34 – FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA NA BARRA 650	60
FIGURA 35 – FATOR DE POTÊNCIA NA BARRA 650	61
FIGURA 36 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 650.....	62
FIGURA 37 – FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA NA BARRA 634	63
FIGURA 38 – FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA NA BARRA 634	63
FIGURA 39 – FATOR DE POTÊNCIA NA BARRA 634	64
FIGURA 40 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634.....	64
FIGURA 41 – TENSÃO NA BARRA 634 POR FASE.....	65
FIGURA 42 – GERAÇÃO FOTOVOLTAICA (TRIFÁSICA) POR PENETRAÇÃO	66
FIGURA 43 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634 COM PV.....	67
FIGURA 44 – TENSÃO NA BARRA 634 COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	68
FIGURA 45 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 650 COM PV.....	69
FIGURA 46 – CURVA TRIFÁSICA DA BATERIA NO CENÁRIO DE 10%.....	71
FIGURA 47 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634 COM PV E BATERIA (10%)	71
FIGURA 48 – CURVA TRIFÁSICA DA BATERIA NO CENÁRIO DE 35%.....	72
FIGURA 49 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634 COM PV E BATERIA (35%)	72

FIGURA 50 – CURVA TRIFÁSICA DA BATERIA NO CENÁRIO DE 70%.....	73
FIGURA 51 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634 COM PV E BATERIA (70%)	73
FIGURA 52 – PERFIL DE TENSÃO NA BARRA 634 COM PV E BATERIA.....	74
FIGURA 53 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 650 COM PV E BATERIA.....	75
FIGURA 54 – POTÊNCIA NA BARRA 634 NO MODO ILHADO (35% DE PV E 0% DE SOC)	77
FIGURA 55 – POTÊNCIA NA BARRA 634 NO MODO ILHADO (35% DE PV E 60% DE SOC)	78
FIGURA 56 – POTÊNCIA NA BARRA 634 NO MODO ILHADO (70% DE PV E 0% DE SOC)	79
FIGURA 57 – POTÊNCIA NA BARRA 634 NO MODO ILHADO (70% DE PV E 20% DE SOC)	79
FIGURA 58 – AUTONOMIA DE ILHAMENTO EM CADA CASO	80
FIGURA 59 – POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 650 COM O ILHAMENTO DA MICRORREDE	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EIXOS E PALAVRAS-CHAVE PARA REVISÃO DA LITERATURA	38
TABELA 2 – APLICAÇÃO DOS FILTROS NO BANCO BRUTO DE ARTIGOS.....	39
TABELA 3 – MÉTRICA DOS ARTIGOS SELECIONADOS.....	42
TABELA 4 – RELAÇÃO DE BARRAS E CURVAS DE CARGAS.....	52
TABELA 5 – PERFIL DE TENSÃO DO SISTEMA 13 BARRAS OBTIDO PELO GRIDLAB-D.....	56
TABELA 6 – PERFIL DE CORRENTE DO SISTEMA 13 BARRAS OBTIDO PELO GRIDLAB-D.....	57
TABELA 7 – DIFERENÇA DE VALORES DE TENSÃO EM PORCENTAGEM	57
TABELA 8 – DIFERENÇA DE VALORES DE CORRENTE EM PORCENTAGEM...	58
TABELA 9 – BASES DE POTÊNCIA PARA CADA FASE NA CARGA DO 634.....	62
TABELA 10 – ÁREA E ENERGIA TOTAL PRODUZIDA PARA CADA CENÁRIO DE PENETRAÇÃO DE PV.....	66
TABELA 11 – PICO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA POR CENÁRIO	67
TABELA 12 – ELEVAÇÃO DE TENSÃO DA BARRA 634 COM PV ÀS 12:00.....	68
TABELA 13 – CAPACIDADE DA BATERIA E CONFIGURAÇÃO DO INVERSOR PARA CADA CENÁRIO	70
TABELA 14 – HORÁRIOS DE OPERAÇÃO DA BATERIA POR CENÁRIO	74
TABELA 15 – ELEVAÇÃO DE TENSÃO DA BARRA 634 COM PV E BATERIA ÀS 12:00	75
TABELA 16 – CARACTERÍSTICAS DE CADA CONFIGURAÇÃO DE ILHAMENTO	80

LISTA DE SIGLAS

BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FBS	Varredura para frente e atrás, do inglês <i>Forward-Back Sweep</i>
GS	Gauss-Seidel
GUI	Interface gráfica do utilizador, do inglês <i>Graphical User Interface</i>
IEA	Agência Internacional de Energia, do inglês <i>International Energy Agency</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, do inglês <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
MG	Microrrede, do inglês <i>Microgrid</i>
NR	Newton-Raphson
NREL	Laboratório Nacional de Energia Renovável, do inglês <i>National Renewable Energy Laboratory</i>
p.u.	Sistema por unidade
PMP	Ponto de máxima potência
PV	Fotovoltaico, do inglês <i>Photovoltaic</i>
PWM	Modulação por largura de pulso, do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>
SFCR	Sistema fotovoltaico conectado à rede
SFI	Sistema fotovoltaico isolado
SOC	Estado de carga, do inglês <i>State of Charge</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
1.4	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	19
2.2	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM BATERIAS	24
2.3	INVERSORES	27
2.4	CONTROLADORES DE CARGA.....	31
2.5	MICRORREDE	33
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	37
3	REVISÃO DA LITERATURA	38
3.1.	METODOLOGIA DE BUSCA DE ARTIGOS.....	38
3.2.	ARTIGOS SELECIONADOS.....	40
3.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1	MATERIAIS.....	44
4.1.1	GridLab-D.....	44
4.1.2	Alimentador de teste de 13 barras da IEEE	46
4.1.3	Curvas de carga	47
4.1.4	Dados climáticos	49
4.2	MÉTODOS.....	49
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	54
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	VALIDAÇÃO DOS DADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE 13 BARRAS	56

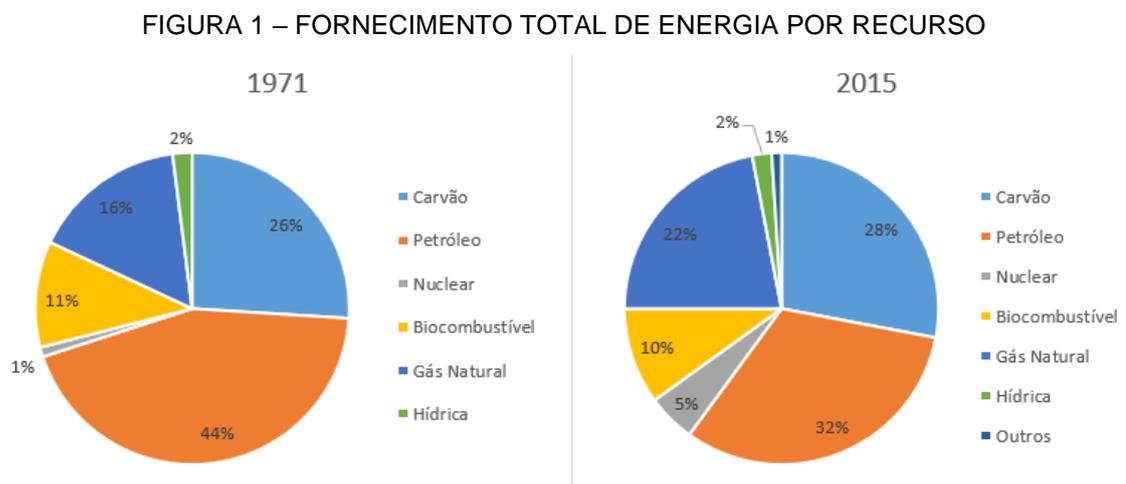
5.2	APLICAÇÃO DE CURVAS DE CARGA À MICRORREDE	59
5.3	CONEXÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO À MICRORREDE.....	65
5.4	CONEXÃO DE BATERIA À MICRORREDE	69
5.5	CONEXÃO DE CHAVE À MICRORREDE	75
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	81
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	84
6.1.	TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e econômico da sociedade e a melhoria na qualidade de vida das pessoas foram possíveis graças ao uso de energia elétrica, a qual possibilitou a iluminação residências e vias públicas, automatização de processos, alimentação de maquinários de grande potência usados em indústrias, realização de troca de dados de forma rápida e simples, entre outras utilidades. Portanto, é difícil de imaginar uma vida sem os benefícios fornecidos pela eletricidade.

Mas a geração de energia elétrica na maioria dos países é ainda realizada através da queima de combustíveis fósseis, resultando em sua depleção e também em impactos ambientais graças à emissão de gases poluentes. Para agravar a situação, o forte crescimento econômico de países emergentes como China e Índia provocou um expressivo aumento na demanda de energia elétrica (SINGH; SINGH, 2012).

Conforme a FIGURA 1, em 2015 aproximadamente 82% das fontes de energia primárias era ainda derivada dos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural). Comparado com 1971, houve uma redução de 44% para 32% no uso de petróleo, mas houve um aumento de 26% para 28% no uso de carvão devido ao crescimento econômico da China, cuja fonte de energia primária é o carvão. Em 2011 foi observado um pico no consumo mundial de carvão (29,1%) e nessa mesma época 71,3% das fontes de energia eram compostas por carvão na China (IEA, 2017a).



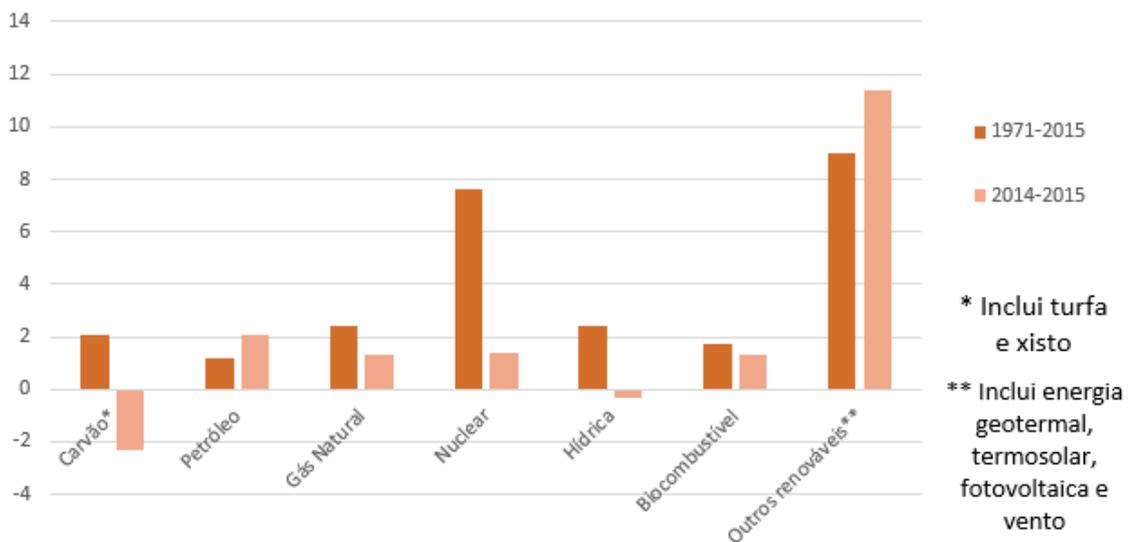
FONTE: Adaptado de IEA (2017a).

Segundo Singh e Singh (2012), as reservas de carvão estarão disponíveis como fonte de energia até 2112 e será o único combustível fóssil a partir de 2042. O

alto consumo dessas fontes poluentes é a maior causadora do Aquecimento Global devido ao Efeito Estufa e como consequências poderão ocorrer: aumento da temperatura e nível dos mares; acidificação dos oceanos; derretimento dos gelos no Hemisfério Norte e extinção de plantas e animais.

Com o intuito de reduzir a dependência nos combustíveis fósseis, tem-se expandido cada vez mais o emprego de energias renováveis e não-poluente nos últimos anos. De acordo com a IEA (2017a), fontes renováveis como a energia eólica, térmico solar, fotovoltaico e geotermal tiveram uma rápida expansão, sendo que no período de 2014 a 2015 eles tiveram um crescimento de 16,8%, 6,8%, 29,7% e 4,1% respectivamente. A FIGURA 2 mostra a inclinação mundial de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e um impressionante aumento no uso de recursos renováveis.

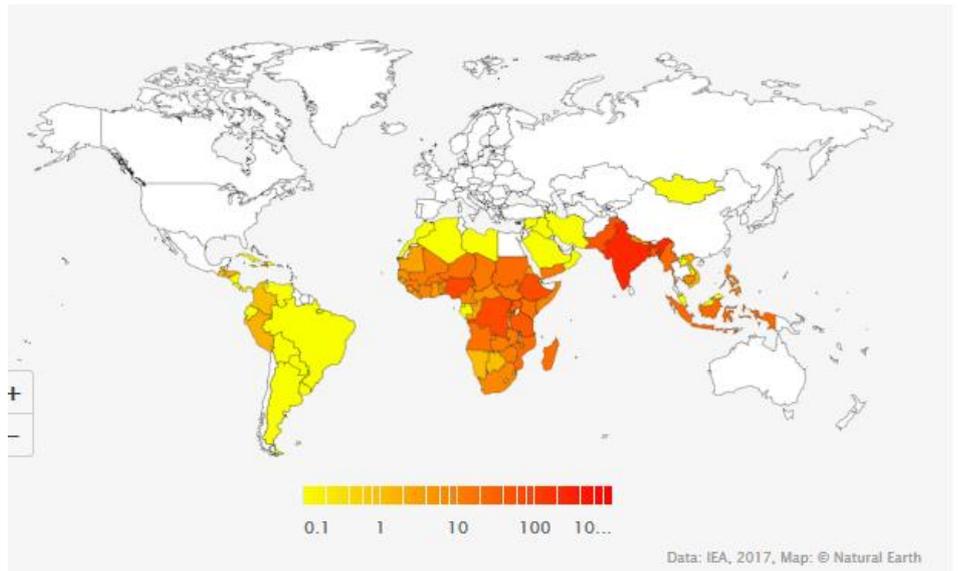
FIGURA 2 – MUDANÇA MÉDIA ANUAL E GLOBAL NA PRODUÇÃO DE ENERGIA POR RECURSO



FONTE: Adaptado de IEA (2017a).

Outra estatística levantada pela IEA (2017b) que deve ser mencionado é em relação ao acesso à energia elétrica. É estimado que em 2016, 1,1 bilhões de pessoas, 14% da população mundial, não possuíam acesso à eletricidade. Desse número, 84% vivem em áreas rurais e conforme FIGURA 3, 95% dessas pessoas estão localizadas na África subsaariana e países em desenvolvimento da Ásia.

FIGURA 3 – POPULAÇÃO SEM ACESSO À ELETRICIDADE, 2016 (MILHÕES)



FONTE: IEA (2017b).

Para Hirsch, Parag e Guerrero (2018), vários sistemas elétricos ao redor do mundo estão começando a adotar os “três D’s” que são compostos por “Descentralização, Descarbonização e Democratização”. Isso significa que esses sistemas têm como características: maior independência com relação à infraestrutura elétrica da região, emissão reduzida de dióxido de carbono (CO₂) e o fornecimento de energia elétrica em áreas remotas carentes de infraestrutura. Um tipo de configuração de sistema que atende a esses requisitos é a microrrede (MG).

Tanto os Estados Unidos da América quanto a Ásia dominam 42% do desenvolvimento mundial de MG. Já a Europa tem uma participação de 11%, a América Latina 4% e a África e Oriente Médio juntos, 1%. Em 2015 a capacidade instalada de todas as MGs era de 1,4 GW e é esperado um crescimento em 2024 de 5,7 GW (estimativa conservadora) ou 8,7 GW (cenário mais agressivo) (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018).

A arquitetura de uma MG é composta basicamente por geração distribuída, sistema de armazenamento de energia distribuída e cargas que podem ser residenciais, comerciais e industriais. A geração de energia centralizada, ainda muito utilizada atualmente, necessita de transmissão em alta tensão a longas distâncias da fonte geradora até os consumidores. Também é sensível ao crescimento da demanda de energia, pelas complicações ambientais, técnicas e econômicas surgidas ao se construir novas instalações geradoras e de transmissão (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

Na MG, as operações no modo ilhado e conectado à rede, e também a instalação de geradores menores baseados em fontes renováveis, como painéis solares e aerogeradores, perto do consumidor fazem com que os consumidores não sejam altamente dependentes da infraestrutura central de energia, permitindo assim o fornecimento de energia elétrica em áreas remotas e rurais. O fato de não depender unicamente das longas linhas de transmissão também oferece uma maior confiabilidade na entrega da energia e menores perdas de potência (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018).

O acoplamento de bancos de bateria é um componente essencial nas MGs para: manter o equilíbrio de potência no sistema frente às flutuações e cargas e transientes; amenizar a natureza intermitente das fontes renováveis e manter o fornecimento de energia de forma contínua quando são realizadas transições entre a operação ilhada e conectada à rede (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

Os benefícios trazidos pelos sistemas de MG têm motivado a instalação dessa arquitetura tanto em metrópoles urbanas (confiabilidade no fornecimento de energia) quanto em regiões pobres e isoladas do globo (não necessidade de uma infraestrutura complexa de eletricidade) (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018). Por estes motivos, além do baixo impacto ambiental, o estudo de MGs é algo importante de ser realizado atualmente.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de metodologia de modelagem e simulação de microrredes com a ferramenta computacional GridLab-D.

Por sua vez, os objetivos específicos do trabalho consistem em:

- a) Avaliar ferramentas computacionais de simulação de sistemas elétricos para MG;
- b) Analisar a modelagem e simulação de uma MG em regime permanente no GridLab-D;
- c) Validar os resultados dos estudos elétricos executados pela ferramenta computacional;
- d) Determinar vantagens e desvantagens da ferramenta computacional;

1.3 JUSTIFICATIVA

O conceito de MG é relativamente novo, e apesar de já existirem vários estudos relacionados a essa arquitetura, esta temática ainda requer um maior amadurecimento. Atualmente muitos programas computacionais de sistemas de potência ainda não oferecem ferramentas de análise específicas de MG. O GridLab-D oferece análise de fluxo de potência, modelagem de equipamentos residenciais, cálculos comerciais, uso de dados meteorológicos para cálculo de geração de energia eólica solar, vários tipos de operações elétricas, entre outros. Ao fim desse trabalho espera-se o melhor entendimento do GridLab-D, bem como sobre a modelagem de MGs. Dessa forma, viabilizar-se-á mais uma ferramenta para complementar os estudos de MG.

1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Este documento está dividido em seis capítulos. O capítulo 1, “Introdução”, apresenta o contexto do tema do trabalho, objetivos gerais e específicos a serem alcançados e justificativa para a realização do trabalho. O capítulo 2, “Fundamentação Teórica”, fornece a fundamentação teórica para o desenvolvimento do trabalho, descrevendo os sistemas fotovoltaicos, sistemas de armazenamento de energia com bateria, inversores, controladores de carga e microrredes. No capítulo 3, “Revisão da Literatura”, são explicados os passos realizados para a busca de artigos científicos relevantes para o tema do projeto e em seguida são apresentados breves resumos dos artigos selecionados para a revisão da literatura.

O capítulo 4, “Materiais e Métodos”, descreve o programa GridLab-D e a metodologia aplicada no trabalho com o intuito de alcançar os objetivos propostos. O capítulo 5, “Análise de Resultados de Discussão”, apresenta as simulações realizadas e os resultados obtidos no trabalho. O capítulo 6, “Conclusões e Trabalhos Futuros”, apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo será apresentada a fundamentação teórica dos módulos fotovoltaicos, sistemas de armazenamento de energia com baterias, inversores, controladores de carga e microrrede.

2.1 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Ao contrário das matrizes energéticas de origem fóssil, a radiação solar provê energia sem grandes impactos ambientais. Uma forma de aproveitar a energia solar pode ser realizada com a implementação de painéis fotovoltaicos, dispositivos que convertem diretamente a luz solar em eletricidade.

As células fotovoltaicas são compostas por materiais semicondutores, cuja condutividade elétrica está entre a de um isolante e a de um condutor. O silício cristalino é atualmente o material semicondutor mais utilizado na fabricação de células, sendo que em 2011, ele dominava 87,9% do mercado. Podem ser encontradas no mercado placas fotovoltaicas construídas com o silício monocristalino (m-Si), policristalino (p-Si) e amorfo (a-Si) (PINHO; GALDINO, 2014).

O silício monocristalino pode ser obtido pelo método Czochralski (Si-Cz) ou por Float Zone (Si-FZ), formando uma estrutura com um único cristal e com poucos defeitos. A sua uniformidade e pureza garantem uma eficiência de 16,5% a 24,2%, dependendo de como é construído. O silício policristalino, apesar de ser mais barato por exigir menor rigor em sua preparação, apresenta uma estrutura formada por pequenos cristais, tendo uma eficiência menor, na ordem de 14,5 a 16,2%. Tanto as lâminas de m-Si quanto as de p-Si possuem uma espessura de aproximadamente de 0,2mm. O silício amorfo não apresenta uma estrutura cristalina e atinge uma eficiência na ordem de 10%, mais baixo se comparado com os m-Si e p-Si. No entanto, o a-Si pode ser construída com lâminas bem finas, de espessura na ordem de micrômetros, sendo aplicado em filmes finos com alta maleabilidade (CRESESB, 2008; PINHO; GALDINO, 2014).

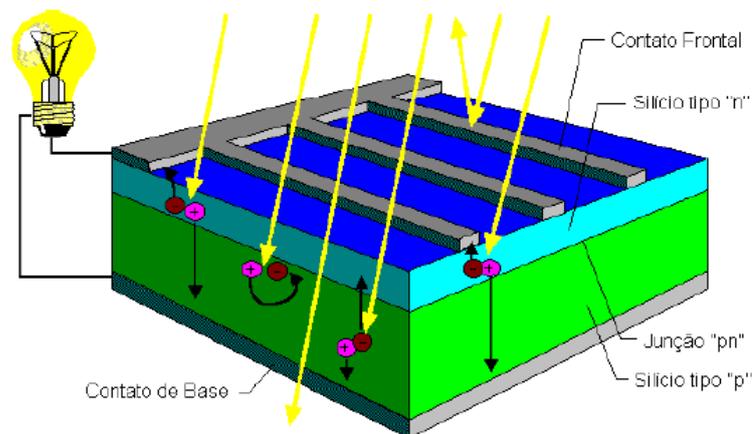
As células fotovoltaicas são construídas com dois tipos de silício: o tipo N e o tipo P. O tipo N é uma camada de silício com a adição de átomos de fósforo, conferindo a ele um elétron em excesso na banda de valência que pode ser facilmente deslocado para a banda de condução. Já o tipo P também é uma camada de silício, mas com a

adição de átomos de boro, provocando a falta de um elétron na valência. Essa falta é chamada de lacuna e faz com que essa banda aceite mais facilmente um elétron de átomos vizinhos (CRESESB, 2008).

Na junção PN das células, os elétrons em excesso da camada N passam para a P, onde as lacunas os capturam. Com isso, há um acúmulo de elétrons na P, tornando eletricamente negativo e uma redução na N, tornando-o positivo. Essa diferença de potencial entre o lado N e P criam um campo elétrico que dificultam a passagem dos elétrons restantes da N. A incidência de luz promove a criação de mais elétrons livres e essa circulação de cargas gera a tensão elétrica sobre a célula, dando origem ao efeito fotovoltaico (CRESESB, 2008).

A FIGURA 4 apresenta a construção de uma célula fotovoltaica e seu funcionamento.

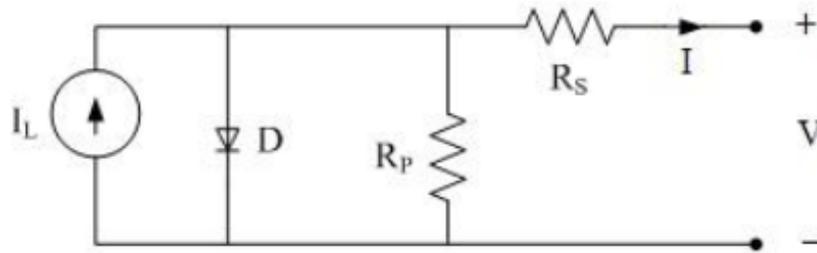
FIGURA 4 – CONSTRUÇÃO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA



FONTE: CRESESB (2008).

O circuito equivalente de uma célula é mostrado na FIGURA 5, onde R_s e R_p representam as perdas por resistências em série na junção e resistência paralelo pelos contatos metálicos, respectivamente. O diodo representa a junção PN no escuro. A corrente I é o resultado da soma da corrente gerada pelo efeito fotovoltaico com a corrente de saturação reversa do diodo e é dada pela eq. 1 (PINHO; GALDINO, 2014).

FIGURA 5 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA



FONTE: PINHO, GALDINO (2014).

$$I = I_L - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

Onde:

I_L – corrente fotogerada (A);

I_o – corrente de saturação reversa do diodo (A);

n – fator de idealidade do diodo (adimensional, geralmente entre 1 e 2);

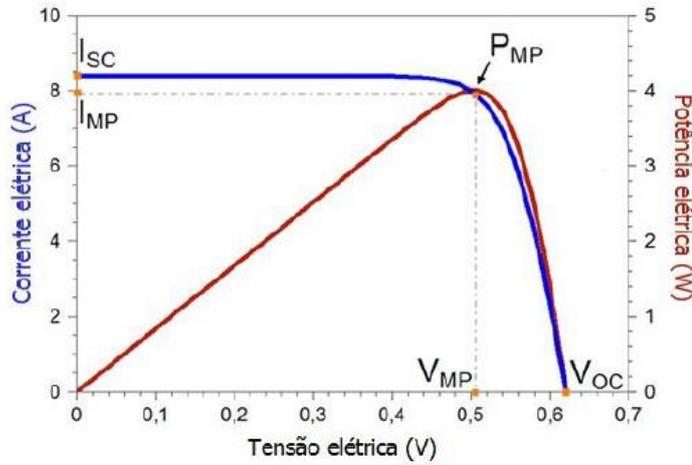
q – carga do elétron ($1,6 \times 10^{-16}$ C);

k – constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

T – temperatura absoluta (K).

A FIGURA 6 apresenta a curva I-V, destacado em azul, de uma célula fotovoltaica, levando em conta a eq. 1. Já a curva em azul representa a curva P-V. I_{sc} é a corrente de curto-circuito, V_{oc} é a tensão de circuito aberto, P_{mp} é a potência máxima e I_{mp} e V_{mp} representam, respectivamente, a corrente e tensão no ponto de potência máxima. É recomendável a operação da placa fotovoltaica no ponto P_{mp} (PINHO; GALDINO, 2014).

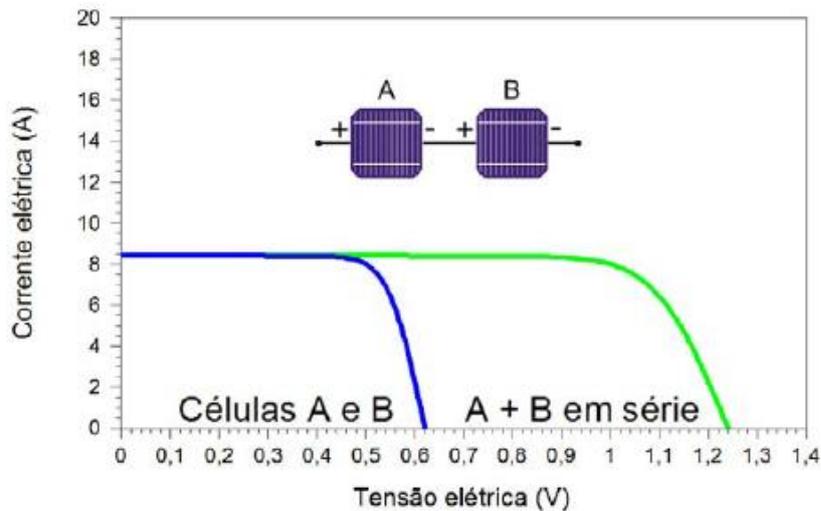
FIGURA 6 – CURVA I-V E P-V DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO DE 156mm x 156mm SOB CONDIÇÕES PADRÕES DE ENSAIO



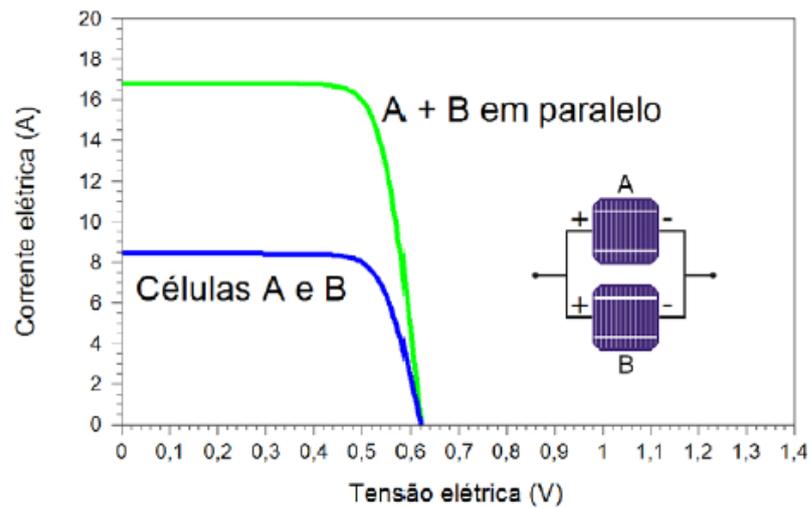
FONTE: PINHO, GALDINO (2014).

De forma a se obter valores de correntes e tensões desejados e aumentar a potência gerada, pode-se fazer associações em série ou paralelo das células ou painéis fotovoltaicos. Conforme visto na FIGURA 7, a conexão em paralelo gera uma soma de correntes e a tensão permanece inalterada. Já na conexão em série, as tensões são somadas mas a corrente permanece a mesma (PINHO; GALDINO, 2014).

FIGURA 7 – CURVAS V-I DE CONEXÃO DE CELULAS FOTOVOLTAICAS EM (a) SÉRIE E (b) PARALELO



(a)

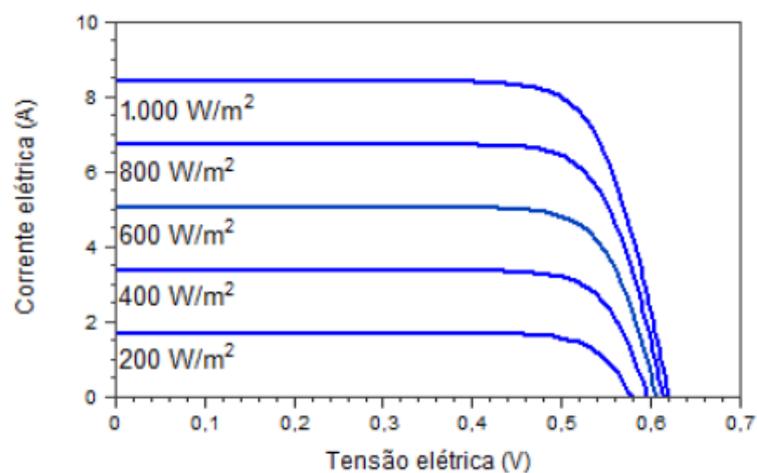


(b)

FORNE: PINHO, GALDINO (2014).

Fatores externos como a incidência solar e temperatura também afetam o desempenho da geração fotovoltaica. A irradiação solar incidente sobre as células aumenta a produção da corrente elétrica de forma linear, e conseqüentemente, a potência fornecida. Isso pode ser visto analisando a FIGURA 8 (PINHO; GALDINO, 2014).

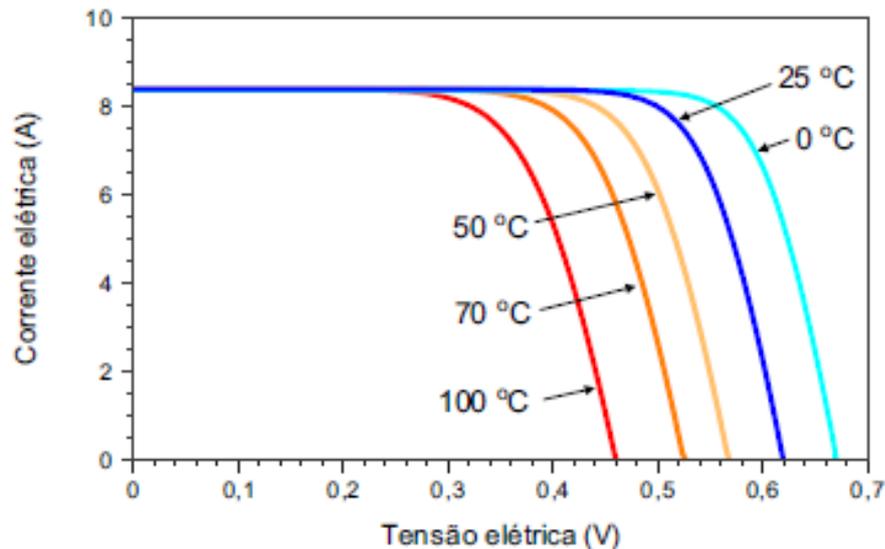
FIGURA 8 – INFLUENCIA DA IRRADIAÇÃO SOLAR NA CURVA V-I DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA (TEMPERATURA DE 25°C)



FORNE: PINHO, GALDINO (2014).

O aumento da temperatura das células semicondutoras diminui a sua eficiência, pois a tensão gerada é diminuída e a corrente sofre uma elevação desprezível, como mostrado na FIGURA 9 (PINHO; GALDINO, 2014).

FIGURA 9 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CURVA V-I DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA (IRRADIÂNCIA DE 1000 W/m²)



FONTE: PINHO, GALDINO (2014).

2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM BATERIAS

A natureza intermitente da irradiação solar exige um sistema de armazenamento de energia para atender à demanda da carga em períodos de baixa geração, como de noite ou dias nublados e chuvosos. Uma parte da energia produzida em momentos de alta geração pode ser armazenada para uso posterior. Dessa forma, é possível fornecer ao consumidor energia elétrica de forma contínua (PINHO; GALDINO, 2014).

Além dessa principal função, o armazenamento de energia permite aliviar o sistema durante picos de demanda, manter os valores de tensão e frequência dentro dos padrões exigidos e possibilitar o auto restabelecimento de uma rede caso ocorra uma falha catastrófica sem depender de outras redes externas (BORTONI; SILVA, 2016).

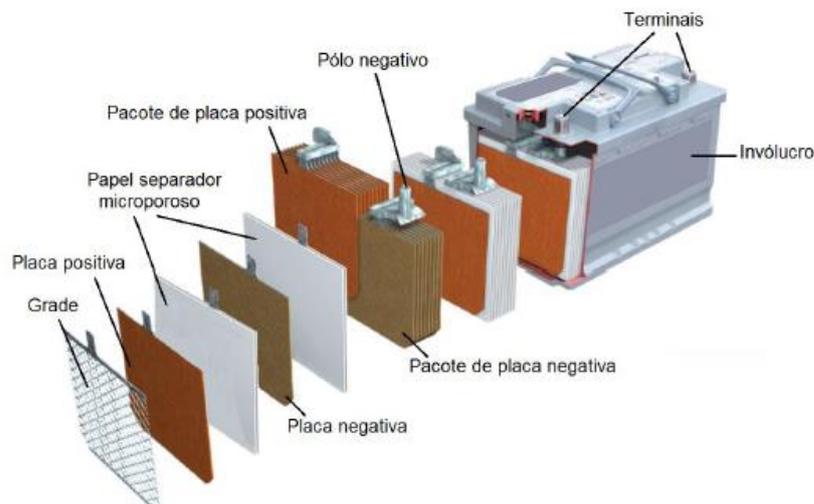
As baterias eletroquímicas são compostas por eletrodos positivos e negativos imersos em uma solução eletrolítica, onde ocorrem a transferência de elétrons. Esse

dispositivo tem a capacidade de transformar a energia química em elétrica ou vice-versa através de processos eletroquímicos de oxirredução ocorrem em seu interior. Nessa categoria de sistemas de armazenamento de energia existem as tecnologias de chumbo-ácido (Pb-ácido), íon de lítio (Li-ion) níquel-cádmio (NiCd), sódio-enxofre (NaS) e Níquel-hidreto metálico (NiMH) (BORTONI; SILVA, 2016; PINHO; GALDINO, 2014).

Ao escolher uma bateria, deve-se levar em conta dados como a sua densidade de energia (Wh/L), capacidade instalada (Ah) e vida útil (em ciclos). A densidade de energia determina a energia nominal por volume, definindo o tamanho do dispositivo. A capacidade instalada é o total de amperes-hora que pode ser retirado da bateria. Por exemplo, uma bateria de 200 Ah é capaz de fornecer 200 A durante 1 hora, ou 50 A por 4 horas. A vida útil determina quantos ciclos de carga-descarga, com uma determinada profundidade de descarga, a bateria pode ser submetida antes de apresentar falhas (PINHO; GALDINO, 2014).

A FIGURA 10 apresenta as partes que constituem uma bateria eletroquímica. A grade é uma peça que oferece suporte para o material ativo e conduz corrente elétrica. De forma a evitar o curto-circuito entre as placas positivas e negativas, são utilizados materiais isolantes e porosos, denominados de separadores, que permitem a passagem de eletrólitos mas separam fisicamente as placas (PINHO; GALDINO, 2014).

FIGURA 10 – PRINCIPAIS PARTES CONSTITUINTES DE UMA BATERIA ELETROQUÍMICA



FONTE: PINHO, GALDINO (2014).

Como mostrado na FIGURA 11, a bateria de Pb-ácido apresenta várias desvantagens como baixa densidade energética, eficiência, vida útil e vida cíclica se comparada com tecnologias como a Li-ion. O descarte dele deve ser realizado de forma correta por conter chumbo e ácido sulfúrico, componentes químicos danosos ao meio ambiente. No entanto, ela é uma tecnologia de armazenamento de baixo custo e pronta disponibilidade no mercado, motivando a sua ampla utilização (BORTONI; SILVA, 2016; PINHO; GALDINO, 2014).

FIGURA 11 – DADOS DE BATERIAS ELETROQUIMICAS DISPONIVEIS COMERCIALMENTE

Tecnologia	Eletrólito	Densidade Energética [Wh/kg]	Densidade Energética [Wh/L]	Eficiência η_{wh} [%]	Vida útil [anos]	Vida cíclica [ciclos]	Temperatura de operação		Aplicações típicas (exemplos)
							Carga padrão [°C]	Descarga [°C]	
Chumbo ácido ⁷ (Pb-ácido)	H ₂ SO ₄	20–40	50–120	80–90	3–20	250–500	-10 a +40	-15 a +50	Uso estacionário, tração, automotiva
Níquel-Cádmio (NiCd)	KOH	30–50	100–150	60–70	3–25	300–700	-20 a +50	-45 a +50	Mesmo tipo de aplicações das baterias chumbo-ácido, ferramentas, veículos elétricos
Níquel-hidreto metálico (NiMH)	KOH	40–90	150–320	80–90	2–5	300–600	0 a +45	-20 a +60	Notebooks, celulares, câmeras fotográficas, veículos elétricos e híbridos, brinquedos
Íon de Lítio (Li-ion, Li-polímero)	Polímeros orgânicos	90–150	230–330	90–95	–	500–1000	0 a +40	-20 a +60	Notebooks, celulares, filmadoras, <i>smart cards</i> , veículos elétricos e híbridos
Bateria alcalina recarregável de Manganês (RAM) ⁸	KOH	70–100	200–300	75–90	–	20–50	-10 a +60	-20 a +50	Produtos de consumo, brinquedos
Cloreto de Níquel e Sódio (NaNiCl)	β'' -Al ₂ O ₃	~100	~150	80–90	–	~1000	+270 a +300	+270 a +300	Veículos elétricos e híbridos (possíveis aplicações estacionárias)

FONTE: PINHO, GALDINO (2014).

A bateria pode ser modelada como um circuito composto por uma fonte de tensão e uma resistência conectada em série, como é mostrado na FIGURA 12. R_i representa a resistência interna, V_e representa a tensão em aberto do elemento ideal e V_{bat} é a tensão externa medida nos terminais da bateria, dada pela eq. 2. Quando a bateria de chumbo-ácido é carregada, há produção de ácido sulfúrico, ocasionando a redução no valor da resistência interna e aumento da tensão em aberto. Já na descarga o efeito inverso ocorre (PINHO; GALDINO, 2014).

$$V_{bat} = I_{bat} \cdot R_i + V_e \quad (2)$$

Onde:

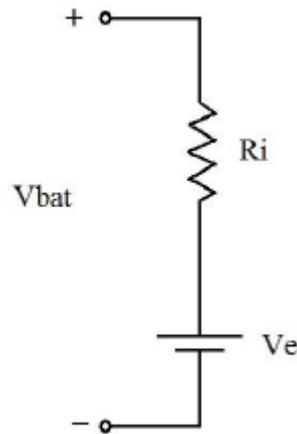
V_{bat} (V) – tensão nos terminais da bateria;

I_{bat} (A) – corrente no elemento, sendo positiva na recarga e negativa na descarga da bateria;

R_i (Ω) – resistência interna da bateria;

V_e (V) – tensão interna desconsiderando a resistência.

FIGURA 12 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA BATERIA ELETROQUÍMICA



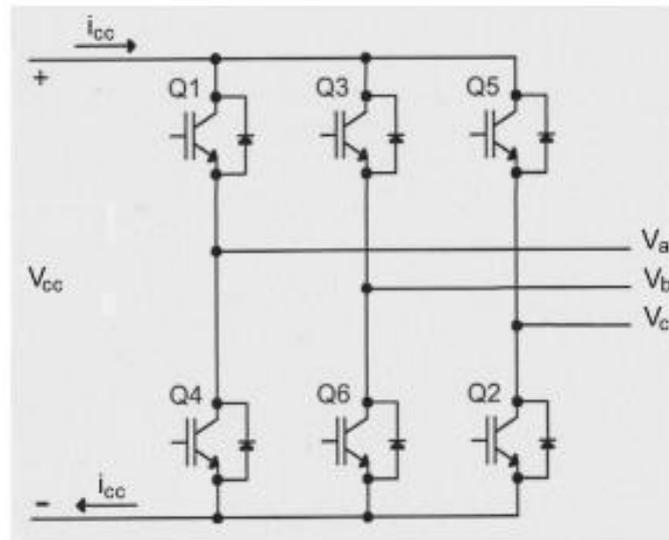
FONTE: PINHO, GALDINO (2014).

2.3 INVERSORES

A corrente de saída dos módulos fotovoltaicos e baterias é em corrente contínua (CC), no entanto os consumidores devem ser alimentados com corrente alternada com forma senoidal (CA). Para isso são utilizados os inversores, circuitos compostos por dispositivos semicondutores de potência que convertem a corrente CC em CA.

Os dispositivos utilizados nos circuitos inversores podem ser compostos por SCR, TRIAC e GTO (conhecidos como tiristores) ou BJT, MOSFET e IGBT (chamados de transistores). Por operarem nos modos de corte (OFF) e saturação (ON), a saída produzida é quadrada. Para a obtenção de um sinal senoidal, o sinal quadrado deve ser tratado com o uso de filtros de potência. A FIGURA 13 apresenta uma ponte trifásica completa de um inversor que apresenta 6 IGBTs (PINHO; GALDINO, 2014; RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

FIGURA 13 – PONTE TRIFÁSICA COMPOSTA POR 6 IGBTs



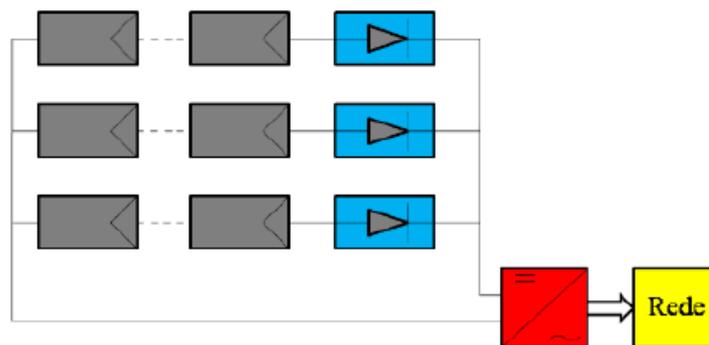
FONTE: PINHO, GALDINO (2014).

Para sistemas conectados à rede com exigência de potência maior que 5kW, é recomendável o uso de inversores trifásicos ou inversores monofásicos ligados de forma trifásico. Isso se dá pelo fato que a injeção de corrente em apenas uma fase pode ocasionar desequilíbrio entre as fases. O limite máximo recomendável para os inversores monofásicos, com o intuito de manter a estabilidade do sistema, é de 4,6kW, com 10% de tolerância (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em duas categorias: autocomutados e comutados pela rede. Compostos por IGBTs ou MOSFETs, os inversores autocomutados podem ser utilizados em sistemas fotovoltaicos isoladas (SFIs) ou conectadas à rede (SFCRs), são capazes de sincronizar sua tensão de saída com a tensão da rede, operam com o controle de modulação por largura de pulso (PWM, do inglês Pulse Width Modulation), possuem alto fator de potência, baixa introdução de harmônicos e podem operar de forma independentemente. Já os inversores comutados pela rede são compostos por tiristores, operam apenas conectados à rede, necessitam da tensão alternada da rede para seu funcionamento e por fornecerem um sinal de saída baixo fator de potência e alto nível de distorção harmônica, requerem o uso de filtros complexos que diminuem a sua eficiência (PINHO; GALDINO, 2014; RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

Os inversores SFCRs podem ser ligados de quatro formas: central, string, multi-string e módulo integrado. Na primeira configuração, mostrada na FIGURA 14, o inversor é acoplado a painéis fotovoltaicos conectados em paralelo, fazendo com que o processo de conversão seja realizado em um único inversor. Apesar de reduzir os custos, possui uma confiabilidade menor e não permite a busca do PMP (ponto de máxima potência) (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

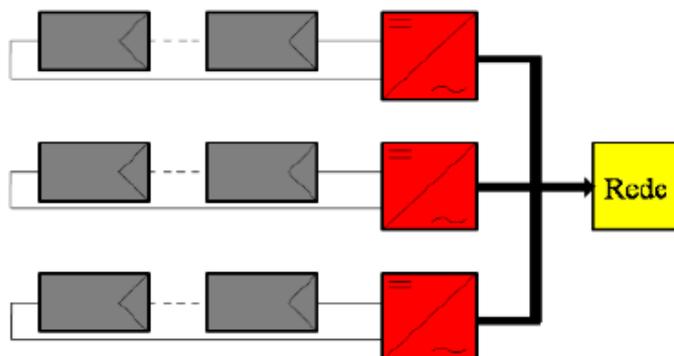
FIGURA 14 – SFCR COM INVERSOR CENTRAL



FONTE: RAMPINELLI, KRENZINGER, ROMERO (2013).

Na configuração string, cada fileira de módulo fotovoltaico é conectada a um inversor, garantindo uma maior eficiência energética e confiabilidade do sistema, mas gerando maiores custos. A FIGURA 15 apresenta essa configuração (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

FIGURA 15 – SFCR COM INVERSOR STRING

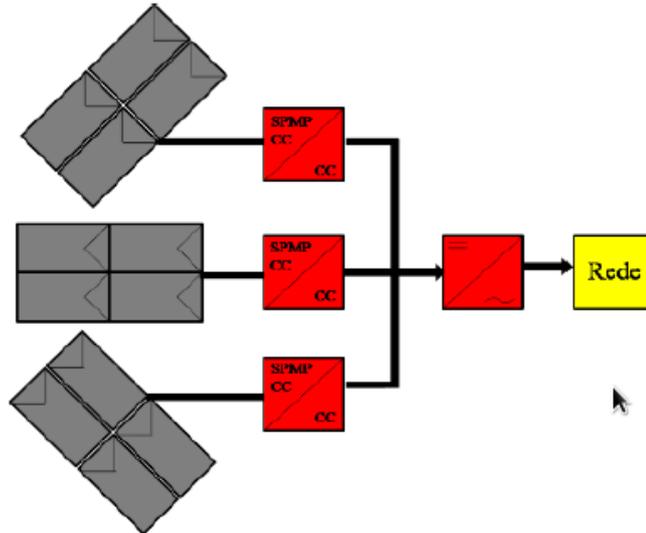


FONTE: RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013

O multi-string, mostrado na FIGURA 16, é caracterizado por ter cada painel ou arranjo conectado a um conversor CC/CC que permite a polarização do conjunto

em seu PMP através de um seguidor do ponto de máxima potência (SPMP). Um inversor central é conectado a cada conversor CC/CC para realizar a conversão CC/CA (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

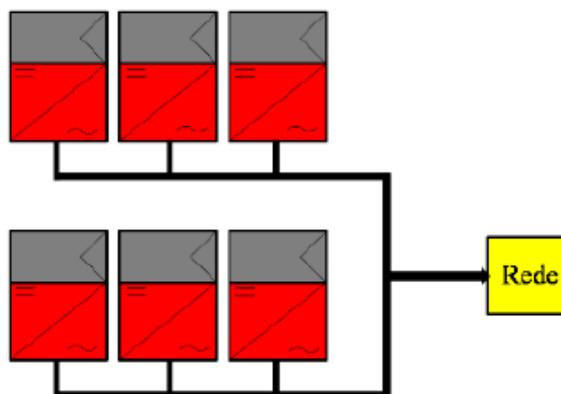
FIGURA 16 – SFCR COM INVERSOR MULTI-STRING



FONTE: RAMPINELLI, KRENZINGER, ROMERO (2013).

A FIGURA 17 mostra a configuração por módulo integrado. Nela, cada inversor é conectado a um único módulo, responsável pela conversão CC/CA e polarização do módulo em seu PMP. Ela não apresenta perdas por associação de módulo, mas a eficiência de conversão é menor (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

FIGURA 17 – SFCR COM MÓDULO INTEGRADO AO INVERSOR



FONTE: RAMPINELLI, KRENZINGER, ROMERO (2013).

2.4 CONTROLADORES DE CARGA

Os controladores de carga são dispositivos que possuem como objetivo o gerenciamento de energia que as placas fotovoltaicas injetam nas baterias e também a proteção do sistema de armazenamento contra cargas e descargas excessivas, prolongando a sua vida útil (PINHO; GALDINO, 2014)

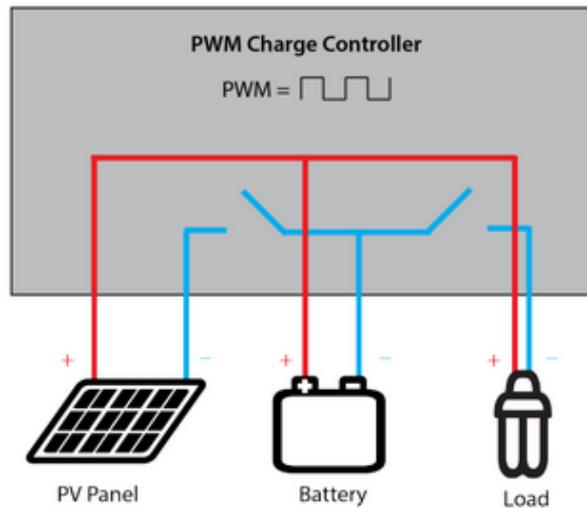
O controlador realiza a proteção da bateria de várias formas. Através dos pontos de regulação (set points), o usuário pode definir os parâmetros de operação do controlador de carga, otimizando a relação entre ele e a bateria. As operações de desconexão e reconexão do painel fotovoltaico, HVD (Desconexão de Alta Tensão, do inglês High Voltage Disconnect) e HVR (Reconexão de Alta Tensão, do inglês High Voltage Reconnect), respectivamente, agem quando a bateria já estiver totalmente carregada, protegendo-a de sobrecargas. A desconexão de carga, LVD (Desconexão de Baixa Tensão, do inglês Low Voltage Disconnect), evita com que a bateria sofra descargas excessivas, desligando as cargas temporariamente quando a bateria atinge uma determinada tensão (PINHO; GALDINO, 2014).

A compensação térmica é utilizada com o intuito de adequar os valores de set point com a temperatura da bateria. Alarmes e indicações visuais podem ser implementados para indicar a atual condição operacional do carregamento dos sistemas de armazenamento. E por fim, o sistema de desvio da energia do gerador é utilizado para desviar a energia do gerador fotovoltaico para uma carga externa quando as baterias estão completamente carregadas (PINHO; GALDINO, 2014).

Existem dois tipos de estratégias de controle aplicadas aos controladores de carga: a PWM e PMP.

No controle PWM, o banco de baterias está diretamente conectado aos painéis fotovoltaicos, conforme a FIGURA 18. Durante o carregamento da bateria, o controlador permite a injeção contínua de corrente gerada pelos painéis para o sistema de armazenamento. Ao atingir um valor de tensão específico, o controlador rapidamente desconecta o gerador da bateria, protegendo-o do sobrecarregamento (ALTE STORE, [s.d.]; PHOCOS, 2015).

FIGURA 18 – CONEXÃO EM UM CONTROLADOR PWM

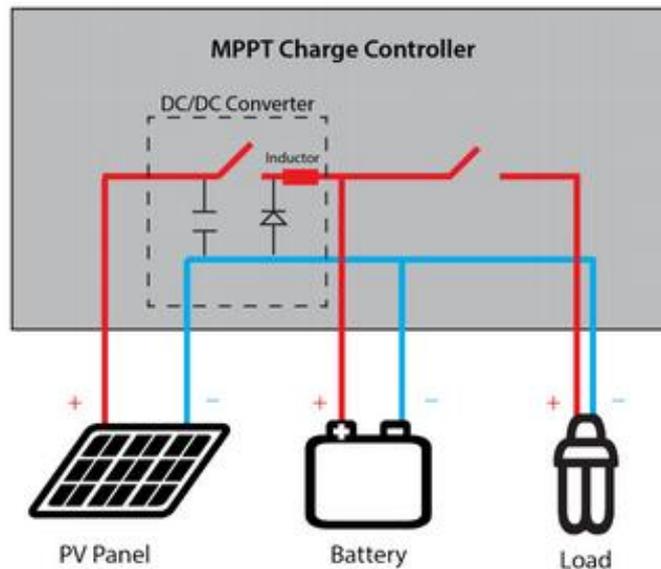


FONTE: PHOCOS (2015).

Porém, para essa estratégia de controle, é necessário com que a placa fotovoltaica tenha um valor de tensão nominal igual à da bateria de forma a evitar perdas de energia. Enquanto é carregada, a tensão da bateria cresce até se tornar igual ao valor de tensão do gerador. Portanto para que isso ocorra, a tensão do gerador deve ser maior que a do armazenamento durante esse período. Pode-se concluir que por exemplo, ao conectar uma bateria de 12V em um painel de 24V, mais da metade da potência gerada será desperdiçada já que ao atingir sua tensão nominal, a bateria será desconectada de um painel que poderia continuar gerando energia (ALTE STORE, [s.d.]

No controle PMP, o fluxo de potência que vai do painel fotovoltaico para o sistema de armazenamento de energia é ajustado para seguir o ponto máximo de potência da curva V-I do painel. Ao atingir o valor máximo de tensão da bateria, o conversor CC/CC conectado entre o gerador e bateria diminui o valor de tensão do painel fotovoltaico, mas aumenta a sua corrente, mantendo o valor de potência. Dessa forma, o painel de 24V pode continuar carregando a bateria de 12V até que esta esteja plenamente carregada. A conexão básica deste controle é apresentada na FIGURA 19 (ALTE STORE, [s.d.]

FIGURA 19 – CONEXÃO EM UM CONTROLADOR PMP



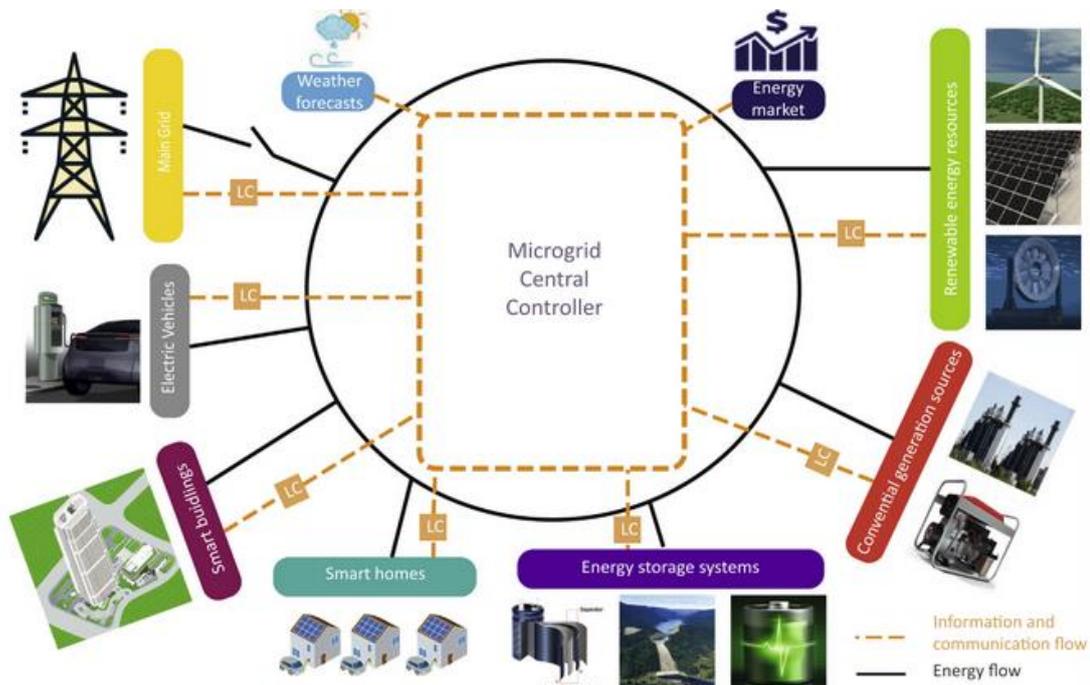
FONTE: PHOCOS (2015).

2.5 MICRORREDE

A microrrede pode ser definida como uma rede de distribuição de baixa tensão composta por geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia, cargas controláveis e cargas sensíveis a faltas. A conexão ou desconexão à rede principal possibilita a esse sistema operar no modo ilhado ou conectado à rede (ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2018). A FIGURA 20 apresenta a arquitetura de uma MG.

A geração distribuída utilizada em MGs pode incluir tecnologias recentes como: painéis fotovoltaicos, micro geradores eólicos, micro turbinas, células de combustível, cogeração, etc. Geradores convencionais de pequena escala também podem ser utilizados na geração distribuída, mas essa prática é desencorajada devido ao impacto ambiental causado pela queima de combustíveis fósseis (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011; ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2018).

FIGURA 20 – ARQUITETURA DE UMA MG



FONTE: ZIA, ELBOUCHIKHI, BENBOUZID (2018).

A natureza intermitente das fontes de energias renováveis (como a incidência solar e o vento) e o baixo momento de inércia dos geradores inseridos em uma MG tornam crucial a instalação de sistemas de armazenamento de energia. Elas garantem o fornecimento de energia de forma contínua para os consumidores durante as transições do modo conectado para rede para ilhado e vice-versa, melhoria da estabilidade do sistema em flutuações de carga e transientes, atendimento à demanda da carga em períodos de baixa geração devido à sua intermitência. As baterias eletroquímicas oferecem vantagens comparados com outros sistemas de armazenamento, como a possibilidade de ser instalado na configuração de bancos de baterias centralizados ou distribuídos e a função de reservar energia para uma futura demanda (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

Na MG, as cargas podem ser do tipo residencial, comercial e industrial. As cargas que exigem uma alta confiabilidade e qualidade de energia, como indústrias e hospitais, são classificadas como sensíveis. As cargas não-sensíveis podem ser usadas como cargas controladas e isso possibilita operações estratégicas que tenham como intuito: diminuição de pico de carga, melhoria na estabilidade de tensão e frequência do sistema e aumento da qualidade e confiabilidade da energia fornecida para as cargas sensíveis (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

A geração realizada por tecnologias como a fotovoltaica produz corrente contínua (CC), necessitando de dispositivos de eletrônica de potência como inversores para fazer a conversão de energia e injetá-la no sistema. Chaves estáticas são usadas para sincronização e operação no modo ilhado. A interface com a rede principal pode ser feita com a conexão CA sincronizada ou CC assíncrona. O processo de conversão de energia pode gerar perdas de 5% a 15% e a maior facilidade em isolar faltas CC motivaram a proposição de modelos de MG que operam totalmente em CC. No entanto, vários equipamentos elétricos ainda operam com corrente alternada, limitando a instalação de MGs CC (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018).

Os geradores estão dispersos em vários pontos da rede, portanto para a troca de informações entre os sensores instalados em cada gerador e melhor otimização de suas operações com controladores locais, é necessário a instalação de uma infraestrutura de comunicação. Para a escolha de uma tecnologia de comunicação, leva-se em conta características como taxa de transferência de dados, área de cobertura, qualidade de serviço, confiabilidade, latência e consumo de energia. Tecnologias a fio como DSL, PLC e fibra óticas oferecem uma maior taxa de transferência e confiabilidade, mas maiores custos de instalação. Já as tecnologias sem fio como Zigbee, Z-wave, GSM e WiFi apresentam menores custos de instalação, um grande atrativo para áreas remotas. No entanto, elas apresentam menores taxas de transferência e problemas com interferências (ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2018).

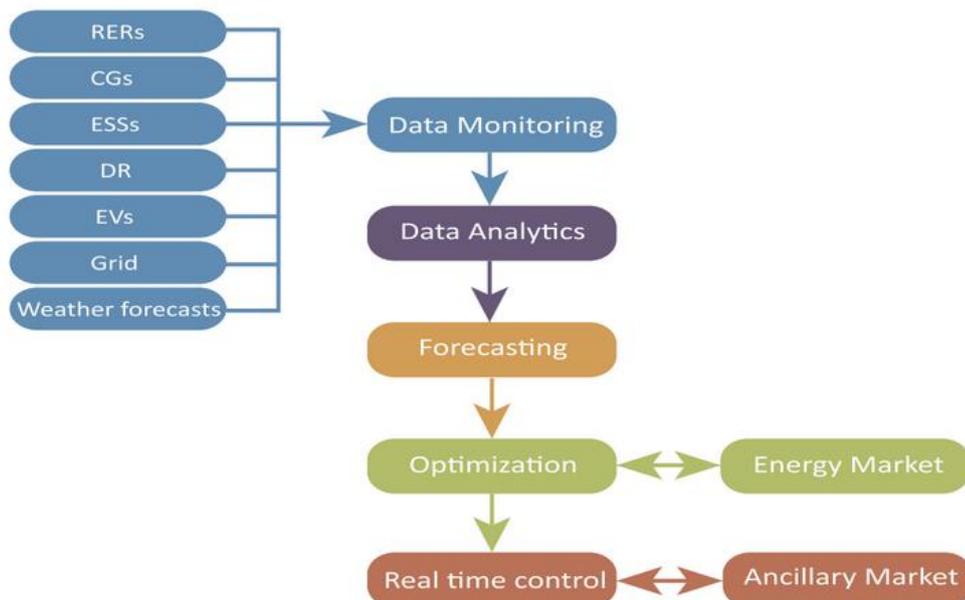
A MG está conectada com a rede principal através de um ponto de acoplamento comum. Durante o modo conectado à rede, a MG consegue realizar trocas de energia com a rede principal. No entanto, ao ser detectado falhas na rede principal, a MG é desconectada da rede principal, passando a operar no modo ilhado e assim garantindo a estabilidade do sistema. As cargas sensíveis são alimentadas com a geração distribuída e estratégias de controle de carga são adotadas durante esse modo de operação. A abertura da chave que interconecta a MG e rede principal deve ser o mais rápido possível e o valor de tensão não pode cair mais que 50% da nominal durante todo o tempo de operação (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011; ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2018).

O EMS (Sistema de Gerenciamento de Energia, do inglês Energy Management System) é um sistema que consiste em um conjunto de módulos para a realização de tomadas de decisão na rede. Existem módulos como previsão de carga,

HMI (Interface Homem Máquina, do inglês Human Machine Interface), SCADA (Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados, do inglês Supervisory Control and Data Acquisition), entre outros. O sistema pode ser classificado em centralizado e descentralizado. No gerenciamento centralizado, todas as informações são enviadas em um controlador central, que toma as decisões, e as envia para os sistemas da MG. Já no descentralizado, as tomadas de decisão são elaboradas de acordo com as negociações entre o controlador central e controladores locais, de forma a alcançar objetivos que agradem tanto o interesse local quanto global (ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2018).

Como visto na FIGURA 21, informações da rede e previsão do tempo são monitoradas, analisadas e então é montada uma previsão de energia gerada pela geração distribuída, consumo das cargas, fatores meteorológicos e preços de energia no mercado. A partir daí decisões são tomadas e enviadas para os sistemas de geração, armazenamento e carga. Dessa forma, as operações na MG são otimizadas, ao mesmo tempo que satisfazem as restrições tecnológicas impostas (ZIA; ELBOUCHIKHI; BENBOUZID, 2018).

FIGURA 21 – FUNÇÕES DE UMA EMS



FONTE: ZIA, ELBOUCHIKHI, BENBOUZID (2018).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foram apresentados os conceitos básicos de geração fotovoltaica, baterias eletroquímicas, inversores e controladores de cargas a partir da leitura de livros dessas áreas.

Por se tratar de uma tecnologia ainda não totalmente consolidada, a fundamentação teórica da MG foi elaborada com base na leitura de artigos científicos. Foram apresentados brevemente os componentes da MG como a geração distribuída, sistemas de armazenamento, carga, dispositivos de eletrônica de potência, comunicação de dados e o EMS.

Os conhecimentos adquiridos nesse capítulo serão essenciais para a elaboração do trabalho.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1. METODOLOGIA DE BUSCA DE ARTIGOS

A montagem do banco de artigos para leitura na revisão de literatura desse trabalho foi conforme Ensslin *et al.* (2014). Esse método tem como objetivo a reunião de inúmeras publicações científicas e a montagem do portfólio bibliográfico através de processos de filtragens.

Primeiramente foram definidos os eixos de pesquisa, que são “integração de energias renováveis e sistemas de armazenamento de energia com bateria” como problema e “ferramenta de simulação computacional e sistema” como método e tecnologia. Para o eixo de problema foram determinadas as palavras-chaves *renewable energy source integration* e *battery energy storage system integration*. Para o eixo de método e tecnologia foram definidos *microgrid* e *Gridlab-D modeling*. A TABELA 1 apresenta os eixos e palavras-chaves escolhidas.

TABELA 1 – EIXOS E PALAVRAS-CHAVE PARA REVISÃO DA LITERATURA

Eixos	Palavra-chave	
Integração de energias renováveis e sistemas de armazenamento de energia com bateria	<i>Renewable energy source integration</i>	<i>Battery energy storage system integration</i>
Ferramenta computacional e sistema elétrico	<i>Microgrid</i>	<i>Gridlab-d modeling</i>

FONTE: O Autor (2018).

Após a determinação das palavras-chaves, foram definidos os seguintes termos para busca: *renewable energy source integration AND microgrid*, *renewable energy source integration AND gridlab-d modeling*, *battery energy storage system integration AND microgrid* e *battery energy storage system integration AND gridlab-d modeling*. A busca foi realizada com o programa *Publish or Perish*, que tem como atrativo a análise de métricas de uma publicação científica como o número de citações e os índice-h e índice-g, valores calculados com base no número de citações e publicações com o intuito de se medir o impacto de um trabalho. Foi delimitado resultados publicados entre os anos de 2008 a 2018.

No total foram encontrados 3270 resultados. Após isso, foram excluídos resultados que fossem de conferências, fontes pouco relevantes, livros e citações, resultando em 832 artigos. Em seguida foram selecionados os artigos cujos títulos estejam correlatos com o tema do trabalho, totalizando 135 artigos. O processo dessas duas primeiras filtragens pode ser visto na TABELA 2.

TABELA 2 – APLICAÇÃO DOS FILTROS NO BANCO BRUTO DE ARTIGOS

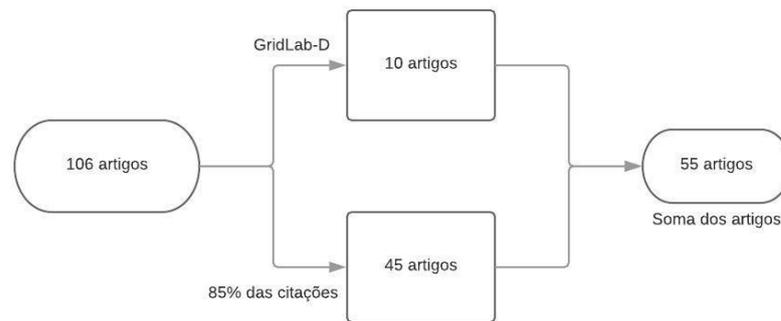
Palavras-chaves	Banco bruto	Filtro de fonte e tipo	Filtro de título
<i>renewable energy source integration AND microgrid</i>	998	403	46
<i>renewable energy source integration AND gridlab- d modeling</i>	855	33	16
<i>battery energy storage system integration AND microgrid</i>	998	365	59
<i>battery energy storage system integration AND gridlab-d modeling</i>	419	31	14
TOTAL			135

FONTE: O Autor (2018).

A retirada de artigos repetidos foi realizada com o programa *Mendeley*, o que resultou em 106 artigos. Depois foram criados dois filtros: uma que seleciona artigos cujos títulos contenham *Gridlab-D* e outra que seleciona publicações que representassem 85% das citações totais do portfólio bibliográfico. O primeiro filtro resultou em 10 artigos e o segundo, 45 artigos, como mostrado na FIGURA 22.

Foram lidos os abstracts das 55 publicações selecionadas nos filtros anteriores de forma a determinar os artigos mais relevantes para a leitura da introdução e conclusão. E finalmente foram selecionados 6 artigos para a elaboração da revisão de literatura.

FIGURA 22 – APLICAÇÃO DO FILTRO DE TÍTULO “GRIDLAB-D” E RELEVÂNCIA DE CITAÇÕES



FONTE: O Autor (2018).

3.2. ARTIGOS SELECIONADOS

O trabalho de Rikos, Tselepis e Hoyer-Klick (2008) apresenta um estudo sobre o uso de dados de irradiação solar e nuvens coletadas por satélites espaciais na integração de energia solar em uma MG. Baseando-se nesses dados, é possível saber com antecedência quando os geradores a diesel devem ser acionados para compensar a queda na geração fotovoltaica. Foi analisado a estabilidade da MG da ilha de Cítnos, Grécia, sob condições de grossas nuvens que produzem sombras nos módulos fotovoltaicos, provocando desvios no nível de energia gerado. As simulações foram realizadas com a ferramenta computacional Matlab/Simulink e dados meteorológicos obtidos em uma estação local e por satélites. Como conclusão do estudo, foi verificado que os dados de satélites facilitam a tomada de decisões no acionamento de baterias ou geradores a diesel em casos de perturbações climáticas, criam uma base de dados meteorológicos da região onde a MG está instalada e indicam os locais geográficos mais apropriados para a instalação de painéis fotovoltaicos.

De acordo com Schneider, Fuller e Chassin (2011), para a realização de simulações de redes inteligentes são necessárias ferramentas computacionais multidisciplinares, sendo o GridLab-D um deles. Para demonstrar o seu potencial em conduzir análises de redes inteligentes, foi realizado com essa ferramenta uma simulação de conservação por redução de tensão (CVR, conservation voltage reduction) em 24 protótipos de alimentadores com o intuito de reduzir os picos de carga e consumo de energia. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo condizentes com os valores comprovados em campo.

O trabalho de Fu *et al.* (2012) aborda um alimentador de 34 barras da IEEE adaptado para se tornar uma MG através da inserção de geração distribuída, baterias para armazenamento de energia e operação no modo ilhado ou conectado à rede. A geração distribuída consiste em geradores eólicos e fotovoltaicos tendo como base dados meteorológicos da cidade de Milwaukee, Wisconsin, Estados Unidos da América, e geradores a diesel. Já o sistema de armazenamento de energia é constituído por baterias de zinco-bromo. O alimentador, os sistemas de geração e armazenamento e o controle do sistema foram modelados usando o programa computacional PSCAD. Simulações foram realizadas, tanto no modo ilhado quanto no modo conectado à rede. O estudo desenvolvido nesse trabalho propõe uma metodologia de como dimensionar a capacidade de geração das energias renováveis de forma a se obter continuidade no fornecimento e bons índices de qualidade de energia.

Eghtedarpour e Farjah (2012) propõe um novo sistema de operação e controle para a integração de painéis fotovoltaicos e sistemas de armazenamento em uma MG CC. Esse sistema de controle tem como intuito maximizar a utilização de energia renováveis durante vários modos de operações da MG, considerando limitações impostas pelos sistemas de geração, armazenamento e carga. Um sistema distribuído de gerenciamento de potência é utilizado de forma a garantir estabilidade na MG. A validação desse estudo foi realizada com simulações no Matlab/Simulink e os resultados obtidos demonstram uma operação razoável da MG durante várias perturbações no sistema elétrico.

O trabalho de Karabiber *et al.* (2013) apresentam um modelo de MG híbrido CC/CA que tem como objetivo facilitar a integração da energia CC produzida pelas energias renováveis com a convencional energia trifásica CA. Nesse modelo, as linhas de distribuição são separadas em “linhas de geração” e “linhas de consumo”. As linhas de geração conectam os geradores CC como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicos. Uma estação conversora de energia mistura tanto a energia CA da rede convencional quanto a energia CC proveniente das linhas de geração e converte para CA, repassando essa energia para as linhas de consumo. Nesse estudo também é proposto um controlador que dá prioridade ao fornecimento de energia vindo de recursos renováveis para os consumidores da MG. As simulações desse trabalho foram realizadas com a ferramenta computacional Matlab/Simulink. Como conclusão, foi verificado nesse modelo de MG híbrido uma melhoria em sua confiabilidade e

controle graças à isolação dos geradores com relação às linhas de consumo. A cooperação entre a geração distribuída e a geração da rede convencional oferece maior proteção à MG diante de condições extremas no sistema e melhor balanço energético. Esse modelo também não traz custos adicionais para os consumidores da rede convencional situados na MG, encorajando os stakeholders a investirem nesse sistema.

Tendo em vista o fato do GridLab-D não ser capaz de realizar modelagens e simulações em conjunto com algoritmos avançados e hierárquicos de controle e não apresentar uma interface gráfica de usuário, Faruque e Ahourai (2014) apresentam em seu trabalho o GridMat, uma toolbox do Matlab que permite a co-simulação entre o GridLab-D e Matlab, ferramentas computacionais que oferecem simulações de sistemas de potência e controle, respectivamente. Para demonstrar as capacidades desse toolbox, foi simulado a implementação de algoritmos de controle em uma MG residencial. O GridMat obteve êxito em desenvolver algoritmos de controle para um controlador de MG, reduzir o consumo de energia e deslocar o pico de carga para redução de custos.

3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Para a realização da revisão bibliográfica foi utilizado o método de Ensslin *et al.* (2014) com o intuito de obter trabalhos acadêmicos correlacionados com o tema do trabalho. As etapas propostas pelo método foram descritas e no final 6 artigos foram selecionados para o portfólio bibliográfico. As métricas dessas publicações científicas podem ser vistas na TABELA 3.

TABELA 3 – MÉTRICA DOS ARTIGOS SELECIONADOS

Trabalho	Citações/ano	Citações
Rikos, Tselepsi e Hoyer-Klick (2008)	7,00	70
Schneider, Fuller e Chassin (2011)	4,00	28
Fu et al. (2012)	22,33	134
Eghtedarpour e Farjah (2012)	13,83	83
Karabiber et al. (2013)	14,80	74
Faruque e Ahourai (2014)	5,25	21
Total		410

FONTE: O Autor (2018).

As publicações selecionadas propõem diversas abordagens para a inserção de fontes renováveis na MG, incluindo o uso de dados atmosféricos, MGs híbridas e estratégias de controle. Um dos artigos estuda o uso do GridLab-D para análises de CVR.

O estudo desenvolvido por Fu *et al.* (2012) apresenta a simulação do sistema de 34 barras da IEEE adaptada para se tornar uma MG, que poderá ser proveitoso para o atual trabalho onde se pretende simular o sistema de 13 barras da IEEE. Já o trabalho de Faruque e Ahourai (2014) apresenta o GridMat, um toolbox do Matlab que poderá ser utilizado no trabalho com o intuito de facilitar a modelagem e simulação da MG.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados no trabalho e os métodos aplicados em sua execução.

4.1 MATERIAIS

A seguir são apresentados o software de simulação GridLab-D, o sistema alimentador de teste de 13 barras disponibilizado pela IEEE, curvas de cargas e dados climáticos da cidade de Seattle, localizado no estado norte-americano de Washington.

4.1.1 GridLab-D

A ferramenta computacional utilizada para o desenvolvimento desse projeto foi o GridLab-D, um software de simulação de sistemas de distribuição desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos com a colaboração de indústrias e meios acadêmicos (CHASSIN; SCHNEIDER; GERKENSMEYER, 2008).

A versão 1.0 deste programa, também conhecido como *Allston*, foi lançado em janeiro de 2008, sendo distribuído apenas para os parceiros dos desenvolvedores. A versão 1.1 (*Buckey*), lançado 3 meses depois do *Allston*, foi disponibilizado para o público. A versão utilizada nesse trabalho é o 4.0 (*Jojoba*), disponibilizado em junho de 2017 (GRIDLAB-D, 2018a)

Este programa apresenta um algoritmo que permite a simulação de inúmeros dispositivos do sistema ao mesmo tempo, cada um descrito por várias equações diferenciais. Isso permite uma maior precisão nos resultados obtidos, facilidade em integrar novos módulos e sistemas de terceiros, e simulações simultâneas com várias escalas de tempo, de intervalos menores que segundos a vários anos (CHASSIN; SCHNEIDER; GERKENSMEYER, 2008).

O GridLab-D é um programa útil para empresas de distribuição, agências reguladoras, *stakeholders* e consumidores por auxiliar em análises do preço da tarifa de energia, viabilidade na implantação de geração distribuída, gerenciamento de energia em horários de pico e planejamento na automação de sistemas de distribuição (CHASSIN; SCHNEIDER; GERKENSMEYER, 2008).

Escrito em linguagem C++, ele possui as seguintes características (GRIDLAB-D, 2018b):

- código aberto;
- linha de comando;
- baseado em objetos;
- simulações com tempo discreto.

Por ser uma ferramenta computacional de código aberto, o GridLab-D permite com que o usuário possa acessar e entender todo o mecanismo por trás do software. Isso também possibilita com que qualquer um possa corrigir ou personalizar o código base para atender sua necessidade (GRIDLAB-D, 2018b).

A inserção de dados no programa é realizada com linhas de comando dentro de arquivos de texto. Não há uma interface gráfica (GUI), gerando uma dificuldade maior no entendimento do que está sendo simulado. No entanto, a entrada de dados com arquivos de texto simplifica as simulações de sistemas de distribuição com alta dimensão topológica. Ao invés de ter que inserir manualmente cada dado do sistema, o usuário pode criar um *script* com códigos de MATLAB ou Python que automatiza a geração de arquivos de texto. Os dados de saída gerados pelo GridLab-D também são em forma de texto, que podem ser tratados e analisados no Excel ou MATLAB (GRIDLAB-D, 2018b).

Ao executar as simulações, o GridLab-D pode usar desde componentes de distribuição com o Módulo *Powerflow* até conjuntos residenciais e seus eletrodomésticos com o Módulo *Residential*. Análise financeira, geração distribuída e armazenamento de energia, eventos de falta e dados climáticos podem ser incluídos respectivamente com os Módulos: *Market*, *Generator*, *Reliability* e *Climate*.

O programa é baseado em objetos, portanto dentro de cada Módulo existem várias “classes”, que contêm equações e parâmetros que ditam como uma entidade vai se comportar no sistema. Uma classe personalizada de acordo com a necessidade do usuário é o “objeto” (GRIDLAB-D, 2018b).

Ao contrário de outros softwares de simulação de circuitos elétricos, que usam passos de tempo bem pequenos e igualmente espaçados para simular tempo contínuo, o GridLab-D opera com tempos discretos. O programa simula o tempo com blocos discretos que podem variar em tamanho, mas com passos constantes. Ao pular de um bloco para o outro, cada objeto é atualizado de acordo com o algoritmo de sua classe e o seu ponto no tempo, definido (GRIDLAB-D, 2018b).

O cálculo de fluxo de potência com o Módulo *Powerflow* fornece dados como: corrente de linha, tensão nas barras, cargas elétricas conectadas a cada barra e tensão na subestação. O GridLab-D, por ter sido projetado especificamente para sistemas de distribuição, consegue realizar a análise de fluxo de potência com as três fases do sistema desbalanceadas. Para isso, ele usa três métodos de cálculo: Newton-Raphson (NR), Gauss-Seidel (GS) e Varredura para Frente e para Trás (FBS, *Forward-Back Sweep*). Os dois primeiros métodos citados são recomendados para a solução de sistemas cuja topologia é não-radial, enquanto que o método de Varredura é melhor realizado em sistemas estritamente radiais do alimentador até a carga (GRIDLAB-D, 2013a).

4.1.2 Alimentador de teste de 13 barras da IEEE

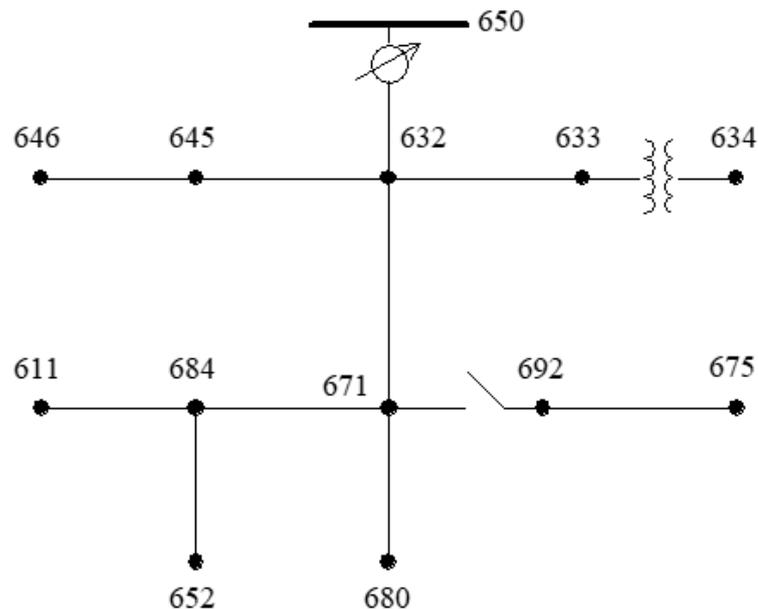
O sistema alimentador de teste de 13 barras disponibilizado pela IEEE, mostrado na FIGURA 23, será o circuito de distribuição utilizado como base para as simulações deste trabalho.

Operando a uma tensão base de 4.16 kV, a partir da barra 650, o sistema possui como características a presença de: cargas desbalanceadas, capacitores shunt, regulador de tensão e linhas aéreas e subterrâneas. Ele apresenta um transformador abaixador, situado na barra 634, cujo lado secundário possui uma tensão nominal de 480 V.

Nesse sistema, as cargas possuem duas formas de conexão: Delta (D) ou Estrela (Y). E são classificadas em potência constante (PQ), impedância constante (Z) ou corrente constante (I). O circuito apresenta cargas concentradas (*spot loads*) espalhadas ao seu redor e uma carga distribuída (*distributed load*) entre a barra 632 e 671.

Os dados do sistema, juntamente com os códigos de bitola, revestimento e espaçamento das linhas de distribuição estão disponibilizados em arquivos na extensão .xls no site oficial da IEEE (IEEE PES, 2017).

FIGURA 23 – ALIMENTADOR TESTE DE 13 BARRAS



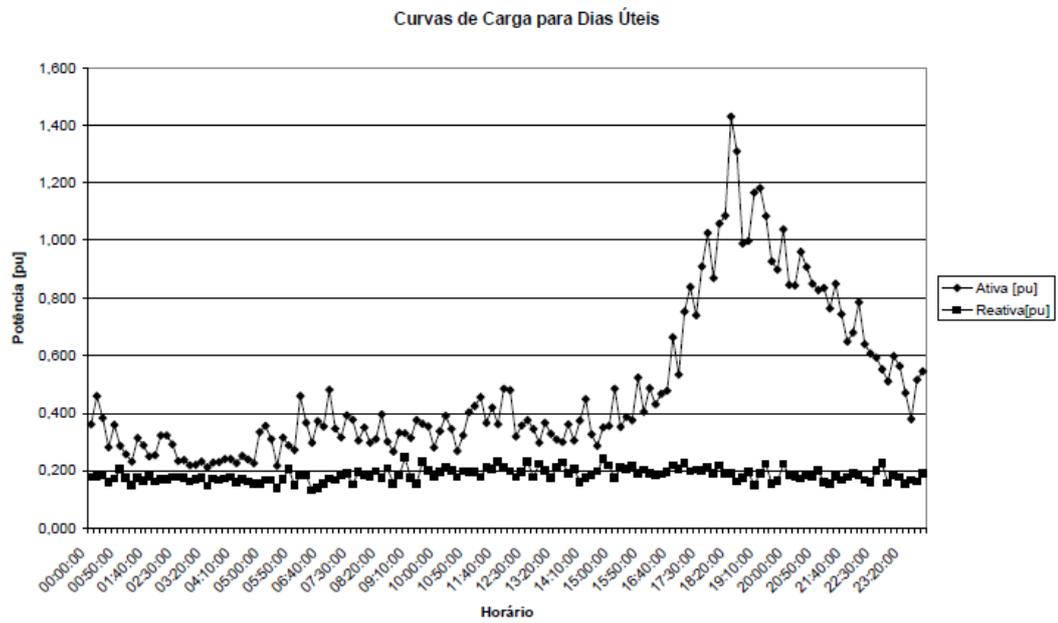
FONTE: IEEE PES, [s.d.]

4.1.3 Curvas de carga

As cargas estáticas PQ do sistema da IEEE foram substituídas por curvas de cargas de consumidores residenciais de baixa renda, média renda e comerciais em dias úteis obtidas por Yamakawa (2007). Elas são mostradas, respectivamente, nas FIGURA 24, FIGURA 25 e FIGURA 26.

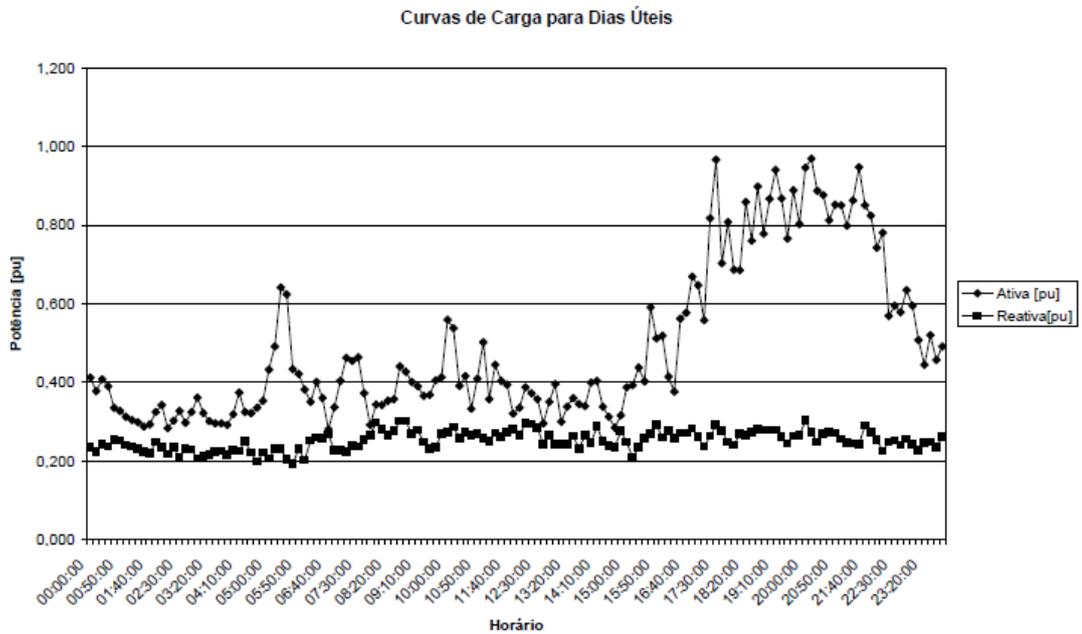
Nota-se na curva de baixa renda que há uma baixa demanda de potência ativa durante todo o dia, exceto durante as 18h e 21h onde é registrado um pico de consumo de energia. A curva dos consumidores de média renda apresenta um comportamento semelhante à de baixa renda, no entanto é observado um maior consumo de potência ativa durante o dia, provavelmente devido ao fato dessa classe social possuir mais acesso à eletrodomésticos. A última curva, dos consumidores comerciais, mostra um comportamento que reflete o horário de funcionamento de estabelecimentos comerciais, tendo o seu aumento de carga ativa no início da manhã até o período da noite.

FIGURA 24 – CURVA DE CARGA RESIDENCIAL DE BAIXA RENDA PARA DIAS ÚTEIS



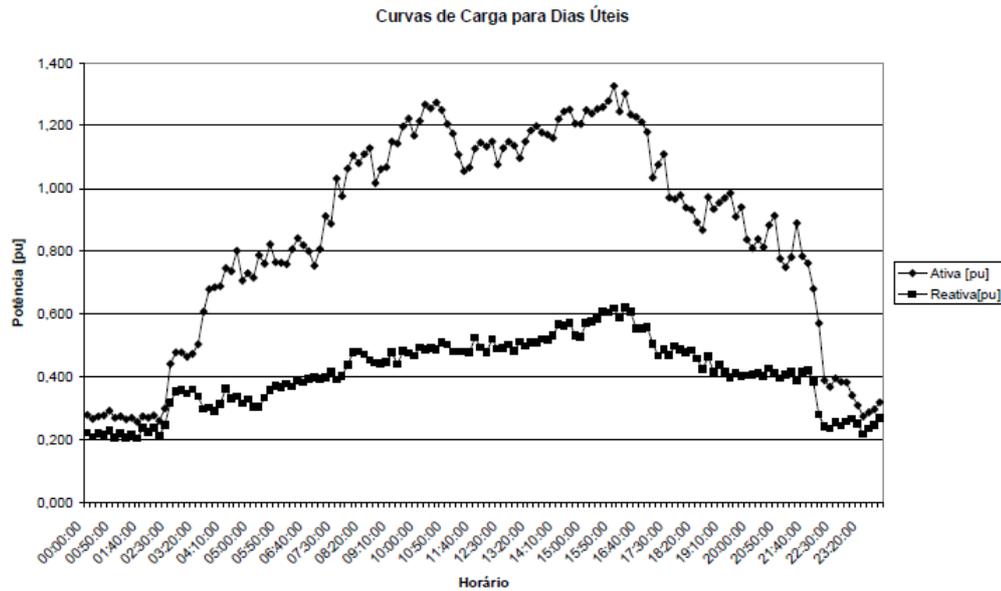
FONTE: YAMAKAWA, 2007

FIGURA 25 – CURVA DE CARGA RESIDENCIAL DE MÉDIA RENDA PARA DIAS ÚTEIS



FONTE: YAMAKAWA, 2007

FIGURA 26 – CURVA DE CARGA COMERCIAL PARA DIAS ÚTEIS



FONTE: YAMAKAWA, 2007

4.1.4 Dados climáticos

Na simulação da geração fotovoltaica, o GridLab-D pode levar em conta dados meteorológicos reais, como temperatura, irradiância solar, vento e umidade através do Módulo *Climate*. Esses dados são inseridos na simulação com um arquivo com a extensão *.TMY2*, criado e fornecido pela NREL (Laboratório Nacional de Energia Renovável, do inglês *National Renewable Energy Laboratory*) (GRIDLAB-D, 2016).

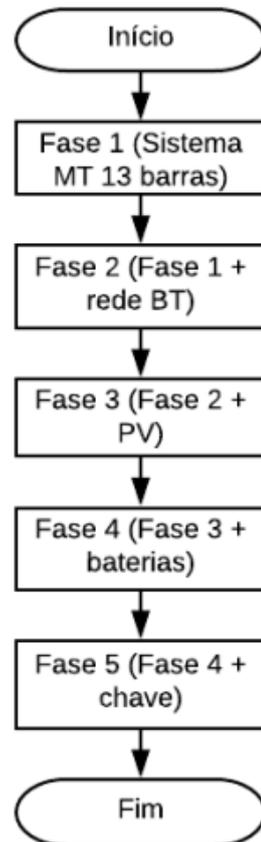
Para a realização deste trabalho, foi utilizado o dado climático da cidade de Seattle, localizado no estado norte-americano de Washington, por ser bastante aplicado em exemplos de simulações do sistema de 13 barras com sistema fotovoltaico pelos desenvolvedores do programa. O arquivo *.TMY2* desta região, “WA-Seattle.tmy2”, pode ser encontrado no diretório de amostras “*samples*” do GridLab-D.

4.2 MÉTODOS

Para a elaboração deste trabalho, foram definidas 5 fases, como apresentado na FIGURA 27. A fase 1 consiste na simulação do sistema de distribuição de 13 barras para a validação dos resultados do programa GridLab-D. As fases restantes possuem

como objetivo o dimensionamento e inserção de componentes da MG no sistema, como rede de baixa tensão, geradores fotovoltaicos, baterias eletroquímicas e chave para operação no modo ilhado ou conectado à rede.

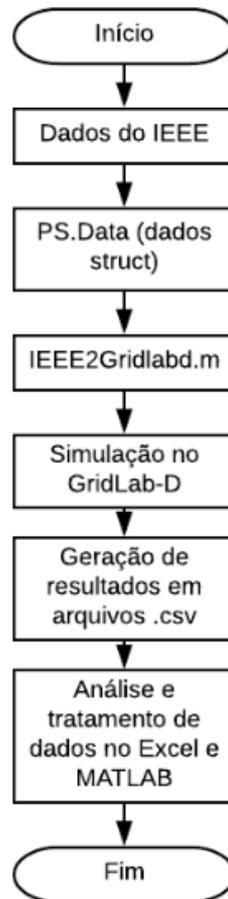
FIGURA 27 – FASES PARA A ELABORAÇÃO DO PROJETO



FONTE: O Autor (2018).

As etapas seguidas para a realização da fase 1 são apresentadas na FIGURA 28. Os dados do circuito de 13 barras, disponibilizados no formato .csv pelo IEEE foram convertidos em uma variável *struct*, denominada PS.Data, no programa Matlab. A dimensão topológica do sistema de distribuição exigiu o desenvolvimento do script IEEE2Gridlabd.m no Matlab para gerar automaticamente o arquivo .glm, que serve como entrada de dados para simulações no GridLab-D.

FIGURA 28 – ETAPAS PARA A SIMULAÇÃO DO SISTEMA ALIMENTADOR DE 13 BARRAS



FONTE: O Autor (2018).

Após as simulações, valores numéricos como perfil de tensão e de corrente foram produzidos pelo programa no formato .csv. Foram utilizadas as ferramentas computacionais Excel e Matlab para o tratamento e análise dos dados. Os dados obtidos com a simulação do sistema de 13 barras foram comparados com os valores reais fornecidos pela IEEE com o objetivo de validar os resultados fornecidos pelo GridLab-D.

A fase 2 consistiu em conectar uma rede de baixa tensão (BT) ao sistema da IEEE. Foi observado que o sistema já possuía uma barra BT, o 634, conectado ao lado secundário do transformador abaixador (4160/480 V). Portanto, nesta barra foi instalada a MG. Esta fase foi também aproveitada para a inserção das curvas de cargas citadas no tópico 4.1.3. A relação de barras e curvas é mostrada na TABELA 4. A escolha dos tipos de curvas de cargas para cada uma das barras PQ tiveram como critério o nível de potência da carga estática que estava previamente instalada nos dados originais. As barras que continham cargas de nível relativamente baixo

foram escolhidas para receberem a curva de baixa renda. As de nível médio receberam a curva de média renda e as de nível alto, curva comercial.

No GridLab-D, as curvas foram implementadas com o objeto *schedule*, que tem como intuito a definição de um valor em um parâmetro que varia com o tempo de maneira pré-definida.

TABELA 4 – RELAÇÃO DE BARRAS E CURVAS DE CARGAS

Barra	Curva de Carga
634	Residencial de baixa renda
645	Residencial de baixa renda
671	Residencial de média renda
675	Comercial
632 e 671	Residencial de baixa renda

FONTE: O Autor (2018).

Na fase 3, foi dimensionado e conectado o sistema fotovoltaico à MG com o Módulo *Generator*. No GridLab-D, ele pode ser dimensionado declarando as seguintes características: tipo (monocristalino, policristalino, amorfo), rendimento e área de superfície do módulo (GRIDLAB-D, 2014). Neste trabalho, foram utilizados painéis monocristalinos com rendimento de 20% na conversão de energia.

Nas simulações foram considerados 3 cenários de penetração de geração fotovoltaica: baixa (10%), média (35%) e alta (70%) em relação à carga instalada na MG. A área do sistema, medido no GridLab-D em sf (pés-quadrados), é medido para definir a potência nominal do módulo. Esta foi dimensionada de forma a atender cada um desses cenários. A penetração fotovoltaica foi calculada com a eq. 3. O inversor conectado ao sistema fotovoltaico foi configurado com uma eficiência de 95% e modo de operação que forneça energia com fator de potência unitário.

$$PNT = \frac{E_{load}}{E_{pv}} * 100 [\%] \quad (3)$$

onde:

PNT – penetração de energia fotovoltaica no sistema (%);

E_{load} – energia total consumida pela carga (Wh);

E_{pv} – energia total produzida pelo sistema fotovoltaico (Wh);

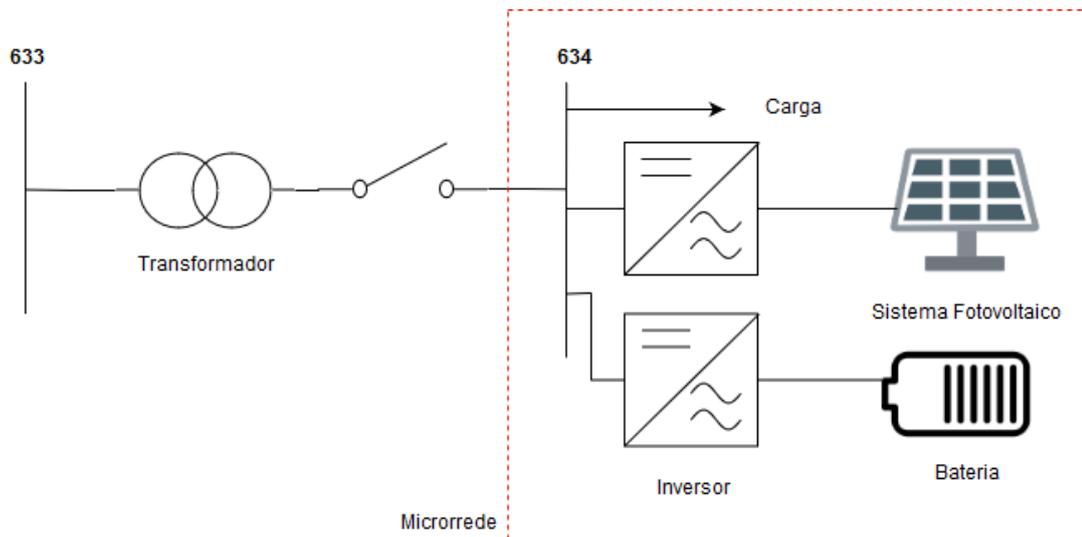
A fase 4 consistiu em dimensionar o sistema de armazenamento com baterias e conectar ele à MG com o Módulo *Generator*. No GridLab-D, ele pode ser dimensionado declarando as seguintes características: tipo (chumbo-ácido ou de íon-lítio), SOC (Estado de Carga, do inglês State of Charge), eficiência de *round trip* (ida e volta) e capacidade de armazenamento (GRIDLAB-D, 2013b). Neste trabalho, foram utilizadas baterias de íon-lítio com round trip de 85% e estado de carga em 0%. A capacidade de armazenamento da bateria foi dimensionada de forma a possibilitar o armazenamento de toda energia produzida pelo sistema fotovoltaico em cada um dos cenários.

O inversor conectado à bateria foi configurado para controlar a potência desta no modo *Load Following*. Ao usar este modo, deve ser declarado em qual barra o fluxo de potência será monitorado para a realização do controle. Nas simulações, a barra escolhida foi a da MG, o 634. Também devem ser informados os valores de potência que quando ultrapassados, devem acionar o funcionamento da bateria, assim como os valores máximos nas taxas de carga e descarga. Esses parâmetros de controle foram definidos realizando a análise da curva de fluxo de potência da barra 634 obtido na fase anterior. Nesta etapa, a bateria deve ter como objetivo armazenar a energia produzida pelo sistema fotovoltaico e realizar o seu despacho nos horários de pico.

Na fase 5, foi conectado uma chave à MG para observar o seu comportamento durante o modo ilhado. A abertura desta será realizada no momento em que a produção de energia fotovoltaica for maior que a demanda da carga. Foi analisado quanto tempo a MG no modo ilhado conseguiu suprir a carga para cada um dos cenários de penetração.

A MG obtida com estas fases é mostrada na FIGURA 29.

FIGURA 29 – MICRORREDE APLICADA NO TRABALHO



FONTE: O Autor (2018).

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi estudado as características da ferramenta computacional GridLab-D. Este programa foi escolhido para a realização do trabalho por oferecer cálculo do fluxo de potência com as três fases desbalanceadas e a modelagem de componentes da MG como painéis fotovoltaicos, baterias e chaves.

O sistema alimentador de 13 barras da IEEE foi utilizado nas simulações deste trabalho para a validação dos dados simulados com o Módulo *Powerflow* por oferecer características de circuito de distribuição como cargas desbalanceadas, cabos subterrâneos e ser dimensionalmente pequeno, mas altamente carregado. Nele também foi conectado a MG para a sua análise. As cargas estáticas originalmente presentes no sistema alimentador foram substituídas por curvas de cargas para oferecer uma análise de perfil de carga mais condizente com a realidade.

Durante a etapa de estudo do Gridlab-D, foi observado que o programa aceita dados climático real para a simulação de geração fotovoltaica. Os dados de Seattle, WA foram utilizados por já estarem presentes no diretório raiz do programa e por serem bastante utilizados em simulações de geração fotovoltaica no sistema de 13 barras pelos desenvolvedores do GridLab-D.

A metodologia para o desenvolvimento deste trabalho foi apresentada neste capítulo. A metodologia deste trabalho em 5 fases, sendo a primeira responsável pela validação do Módulo *Powerflow* e as restantes, compostas pelo dimensionamento e

aplicação do gerador fotovoltaico, baterias e chave em uma barra de baixa tensão no sistema da IEEE, formando a microrrede. Foram considerados cenários com penetração fotovoltaica de 10%, 35% e 70%.

A organização da metodologia nesta forma permitiu a simulação de cada um dos componentes da MG dentro dos prazos estabelecidos pelo cronograma.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VALIDAÇÃO DOS DADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE 13 BARRAS

O sistema alimentador de teste de 13 barras foi simulado no GridLab-D com o módulo *Powerflow* e método numérico NR. A TABELA 5 apresenta os valores de tensão em cada fase obtidos para cada barra, sendo que a magnitude é dada em p.u. (sistema por unidade, tendo como base 277,13 V) e o ângulo, em graus. Os espaços em branco nas tabelas a seguir representam a não existência da respectiva fase na barra.

TABELA 5 – PERFIL DE TENSÃO DO SISTEMA 13 BARRAS OBTIDO PELO GRIDLAB-D

Volt	MAG (p.u.)	ANG (°)	MAG (p.u.)	ANG (°)	MAG (p.u.)	ANG (°)
Barra	A-N		B-N		C-N	
611					0,982187	115,697
632	1,025454	-2,467	1,044280	-121,697	1,024083	117,807
633	1,022165	-2,521	1,042626	-121,745	1,021612	117,793
634	0,998288	-3,191	1,024311	-122,199	1,002904	117,319
645			1,034629	-122,033	1,019371	117,877
646			1,032746	-122,171	1,016544	117,919
650	1	0	1	-119,982	1	120,008
652	0,988209	-5,186				
671	0,994646	-5,250	1,054864	-122,320	0,985980	115,972
675	0,988189	-5,498	1,057239	-122,495	0,984108	115,985
680	0,994646	-5,250	1,054864	-122,320	0,985980	115,972
684	0,992708	-5,269			0,984075	115,857
692	0,994643	-5,250	1,054862	-122,320	0,985976	115,972
RG60	1,066646	0	1,052615	-119,981	1,073803	115,697

FONTE: O Autor (2018).

A TABELA 6 apresenta os valores de corrente em cada fase obtidos para cada linha, sendo a magnitude dada em corrente e o ângulo, em graus.

TABELA 6 – PERFIL DE CORRENTE DO SISTEMA 13 BARRAS OBTIDO PELO GRIDLAB-D

Corrente	Fase A		Fase B		Fase C	
	MAG (A)	ANG (°)	MAG (A)	ANG (°)	MAG (A)	ANG (°)
1			142,928741	-142,739	65,28579	57,750
2	80,980236	-37,702	60,971035	-159,072	62,272442	80,447
3	701,828712	-37,702	528,4156367	-159,072	539,6944973	80,447
4			65,285789	-122,235	65,28579	57,750
5	559,268029	-28,205	413,576759	-140,871	582,558867	94,688
6	63,448688	-39,084				
7	479,583773	-26,608	214,118884	-134,515	473,170724	101,309
8	63,448688	-39,084			74,231451	125,784
9	0	131,429	0	-271,969	0	-71,073
10	231,456709	-17,403	69,754324	-55,093	177,505052	111,148
11					74,231451	125,784
12	204,359572	-4,872	69,754324	-55,093	122,937953	112,372

FONTE: O Autor (2018).

Para a comparação entre os perfis de tensão e corrente obtidos com a ferramenta computacional e os dados fornecidos pelo IEEE, foram elaboradas as TABELA 7 e TABELA 8, que apresentam as diferenças de valores em porcentagem.

TABELA 7 – DIFERENÇA DE VALORES DE TENSÃO EM PORCENTAGEM

Volt	A-N		B-N		C-N	
	MAG (%)	ANG (%)	MAG (%)	ANG (%)	MAG (%)	ANG (%)
Barra						
611					-0,8612	0,070
632	-0,4363	0,887	-0,2189	0,018	-0,6569	0,018
633	-0,4092	1,513	-0,1563	0,020	-0,6713	0,022
634	-0,4314	1,183	-0,2458	0,016	-0,6933	0,017
645			-0,1675	-0,109	-0,3812	-0,014
646			-0,1597	-0,157	-0,3103	-0,016
650			0,0000	0,014	0,0000	-0,007
652	-0,5811	1,218				
671	-0,4694	0,933	-0,1866	0,016	-0,8366	0,041
675	-0,4767	1,100	-0,1838	0,019	-0,8514	0,038
680	-0,4693	0,9337	-0,1865	0,016	-0,8365	0,041
684	-0,4664	0,947			-0,8480	0,054
692	-0,4690	1,126	-0,1864	0,016	-0,8465	0,040
RG60	-0,3902	0	-0,2490	0,015	-0,4775	3,585

FONTE: O Autor (2018).

TABELA 8 – DIFERENÇA DE VALORES DE CORRENTE EM PORCENTAGEM

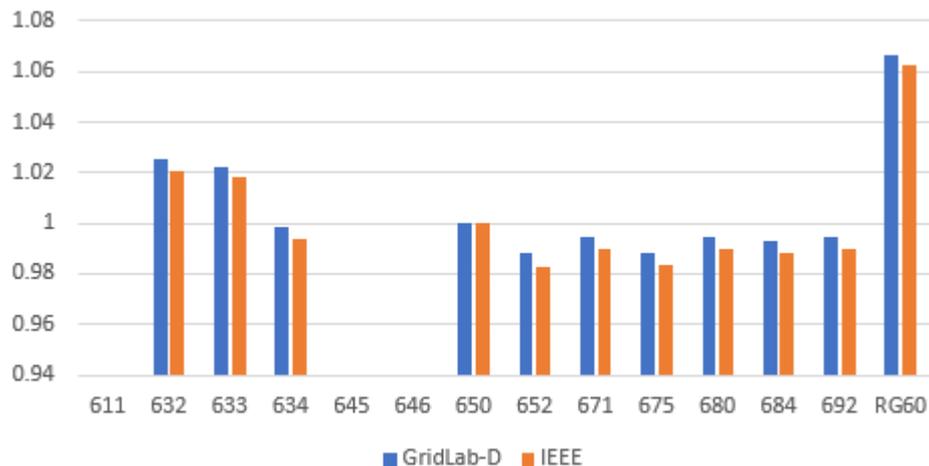
Corrente Linha	Fase A		Fase B		Fase C	
	MAG (%)	ANG (%)	MAG (%)	ANG (%)	MAG (%)	ANG (%)
1			0,0638	-0,056	-0,1162	0,137
2	0,4300	0,098	0,2437	0,011	0,6819	0,040
3	0,4258	0,098	0,2481	0,011	0,6910	0,028
4			-0,1162	-0,054	-0,1162	0,137
5	-0,1554	1,310	0,3117	0,027	0,6889	-1,173
6	-0,6004	0,090				
7	-0,2705	1,558	0,4653	0,107	0,4898	-1,410
8	-0,6004	0,090			-4,3309	-3,424
9						
10	-1,0242	4,271	-0,2073	0,175	0,4904	-1,607
11					-4,3309	-3,432
12	0,4726	5,392	-0,2073	0,175	0,9124	-0,521

FONTE: O Autor (2018).

Tanto para o perfil de corrente quanto de carga, as diferenças de valores foram baixas, demonstrando a confiabilidade do GridLab-D em realizar simulações de fluxo de potência em sistemas com fases desbalanceadas.

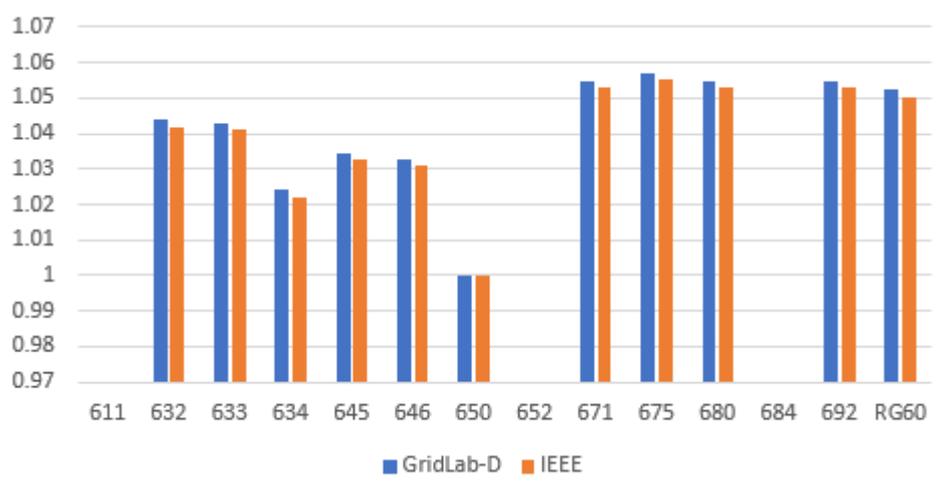
As FIGURA 30, FIGURA 31 e FIGURA 32 apresentam os gráficos do perfil de tensão em p.u. para cada fase, comparando os resultados do GridLab-D e IEEE. A inspeção visual desses gráficos confirma a exatidão do programa ao realizar o cálculo de fluxo de potência em cada barra.

FIGURA 30 – PERFIL DE TENSÃO DO SISTEMA DE 13 BARRAS PARA A FASE A



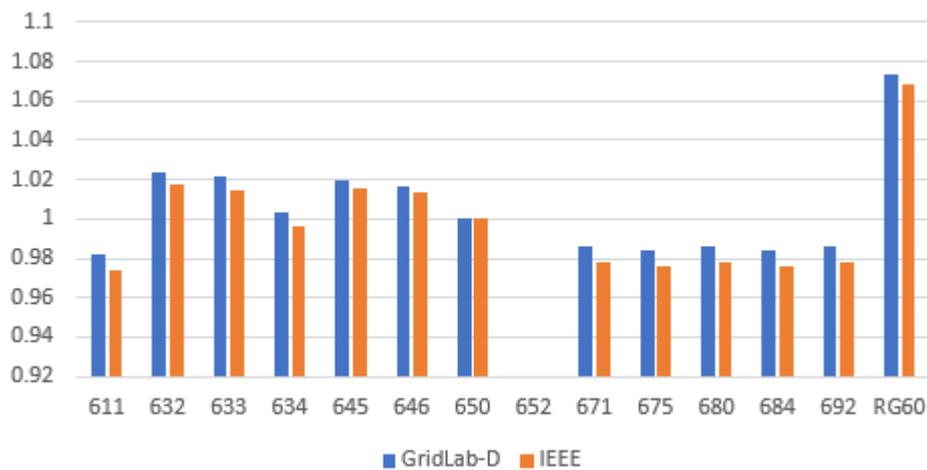
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 31 – PERFIL DE TENSÃO DO SISTEMA DE 13 BARRAS PARA A FASE B



FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 32 – PERFIL DE TENSÃO DO SISTEMA DE 13 BARRAS PARA A FASE C



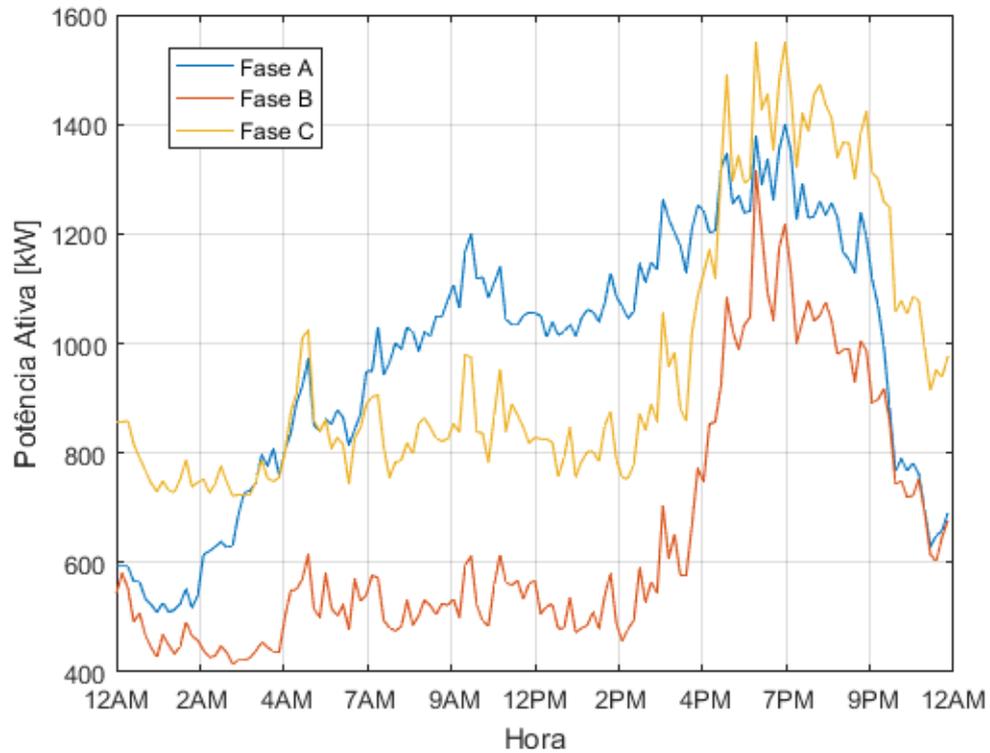
FONTE: O Autor (2018).

5.2 APLICAÇÃO DE CURVAS DE CARGA À MICRORREDE

As curvas de carga de Yamakawa (2007) possuem um intervalo de tempo de 5 minutos, totalizando 288 pontos em cada curva. O objeto *schedule* do GridLab-D é limitado a no máximo 252 pontos, portanto foi aplicado ao objeto um intervalo de tempo de 10 minutos, gerando 144 pontos para cada curva.

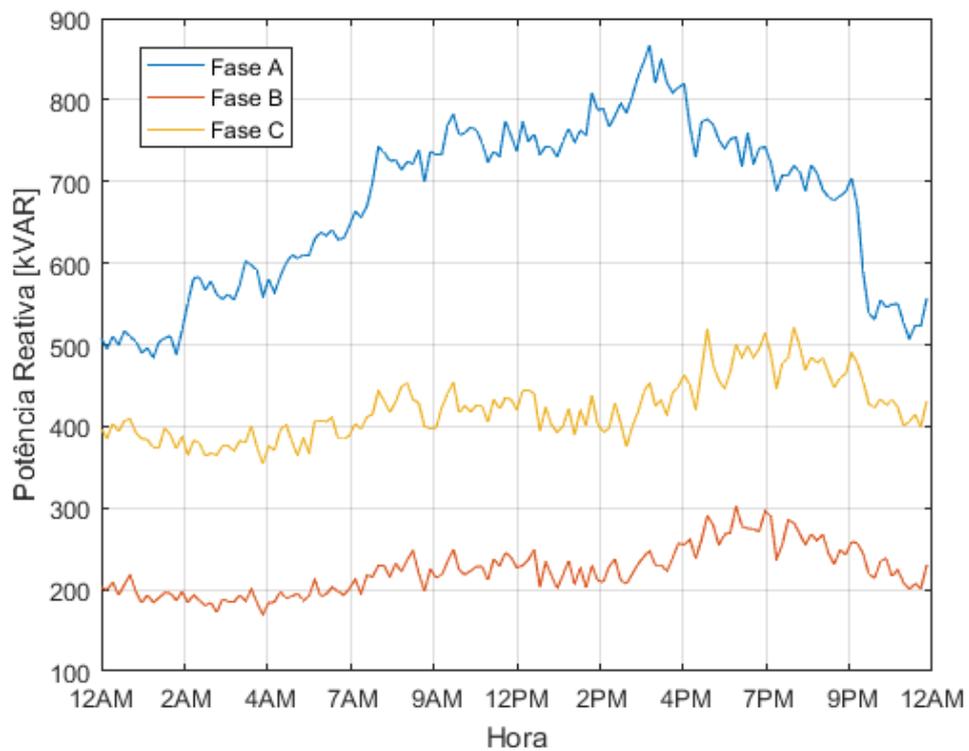
Para analisar o comportamento do sistema após a aplicação das curvas de cargas nas barras, foram montados gráficos, apresentados nas FIGURA 33, FIGURA 34 e FIGURA 35, que mostram respectivamente, a potência ativa, potência reativa e fator de potência em cada fase na barra de alimentação 650.

FIGURA 33 – FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA NA BARRA 650



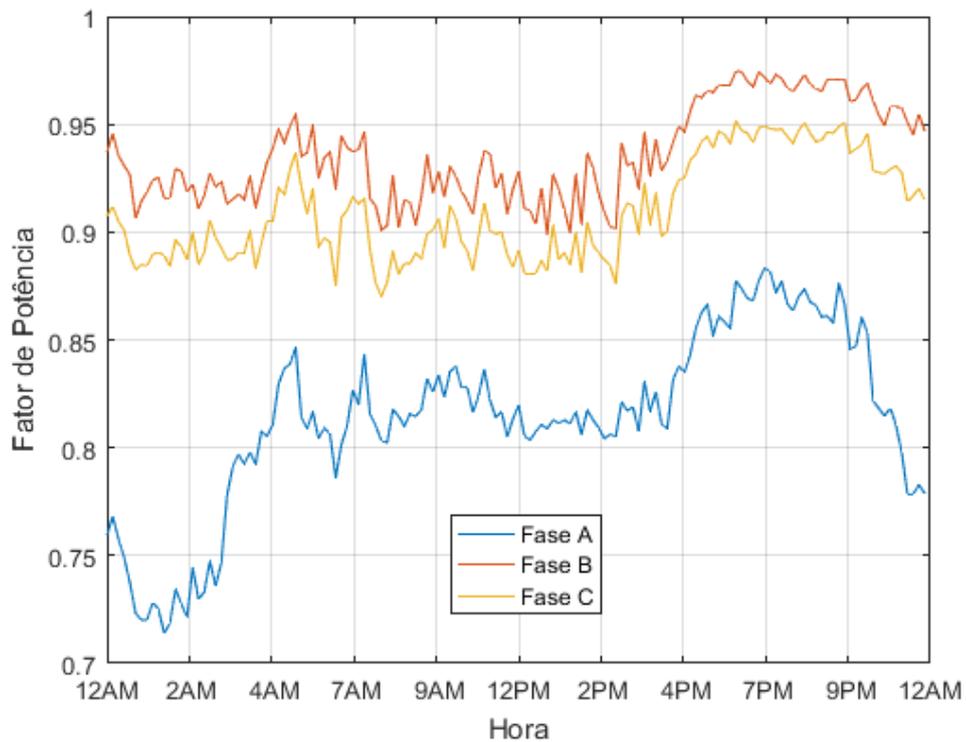
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 34 – FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA NA BARRA 650



FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 35 – FATOR DE POTÊNCIA NA BARRA 650

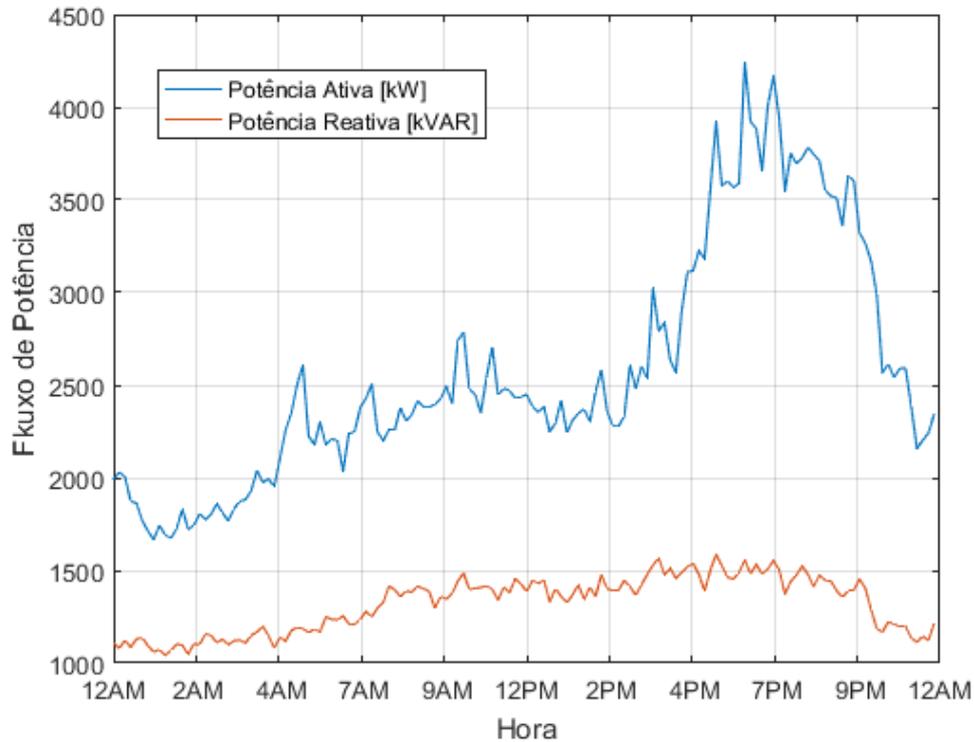


FONTE: O Autor (2018).

Verifica-se nesses gráficos que a fase A apresenta um menor fator de potência se comparado com outras fases, reflexo da alta presença de carga reativa. Nota-se que a Fase A, durante o período da noite e madrugada apresenta menor consumo de potência ativa se comparado com a Fase C, enquanto que no período da manhã e tarde, maior. Durante todo o dia, a sua potência reativa é maior que de outras fases, tendo como reflexo o menor fator de potência. Tanto para a potência ativa e reativa, a Fase B apresentou os menores valores, no entanto nele são registrados valores mais altos de fator de potência.

A FIGURA 36 apresenta o fluxo de potência trifásica na barra 650. Nota-se no que o pico de demanda ativa foi registrado às 18:20 no valor de 4,24 MW, enquanto que o horário de menor demanda ativa, 1,67 MW, foi das 01:10 e 01:40.

FIGURA 36 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 650



FONTE: O Autor (2018).

A potência ativa e reativa em cada fase na barra da microrrede 634 são mostrados, respectivamente, nas FIGURA 37 e FIGURA 38. O fator de potência é apresentado na FIGURA 39

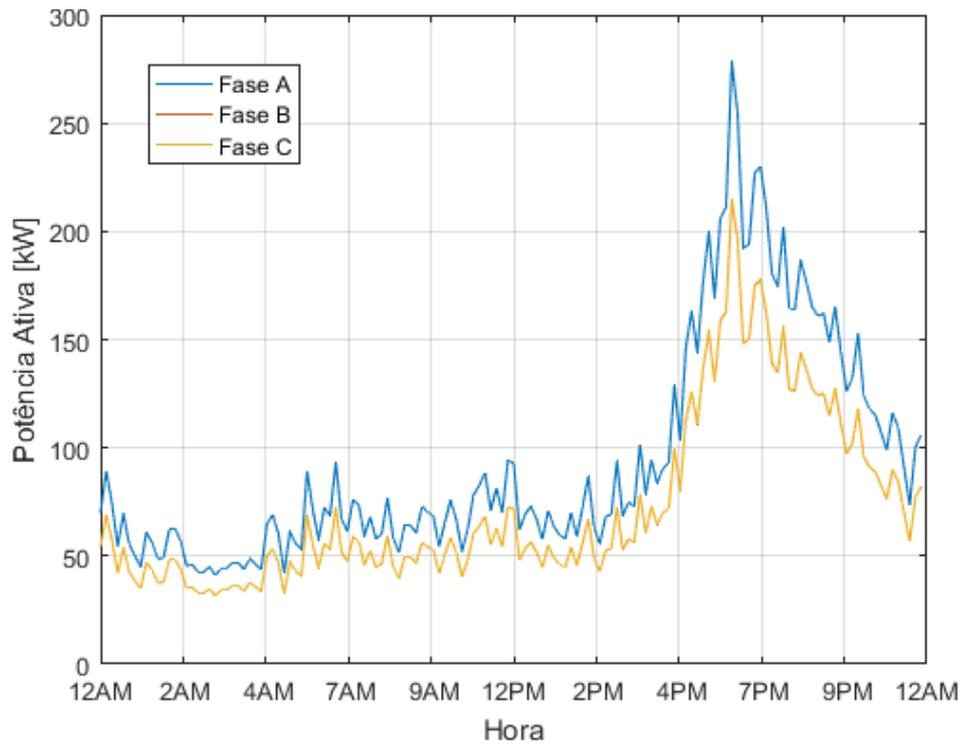
Verifica-se que as potências ativas e reativas da Fase B e C apresentaram o mesmo comportamento. Isso se deve ao fato de que nessas fases a base da carga instalada é a mesma. A Fase A apresenta valores de potências maiores por ter uma base de carga maior. As bases aplicadas nas simulações são informadas na TABELA 9. Como a curva de carga utilizada é a mesma para todas as fases, o valor de fator de potência delas é igual.

TABELA 9 – BASES DE POTÊNCIA PARA CADA FASE NA CARGA DO 634

Fase	A	B	C
Base da carga (kVA)	194,16	150,00	150,00

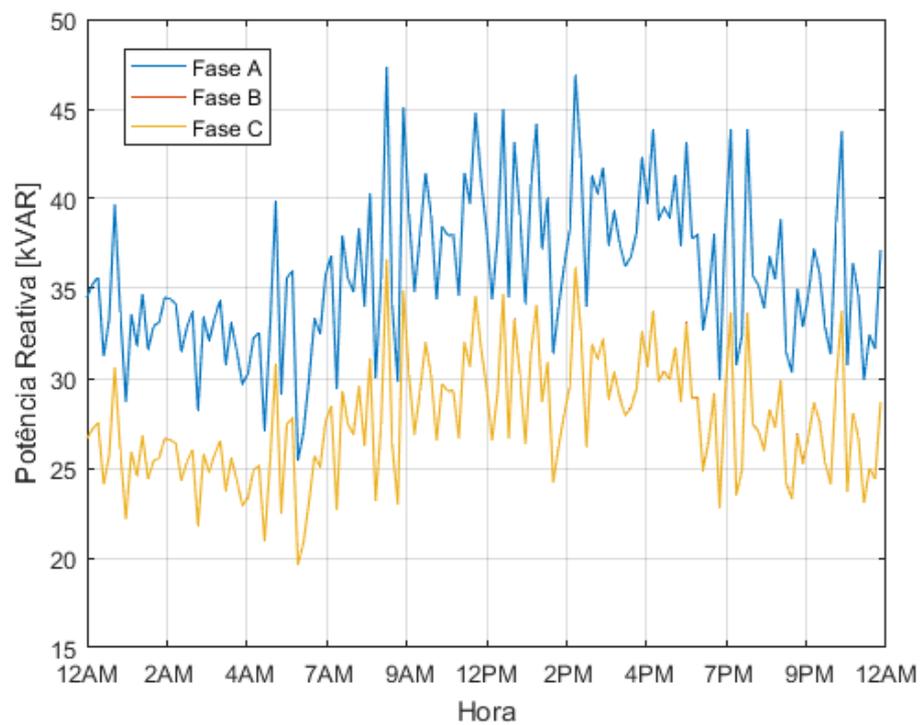
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 37 – FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA NA BARRA 634



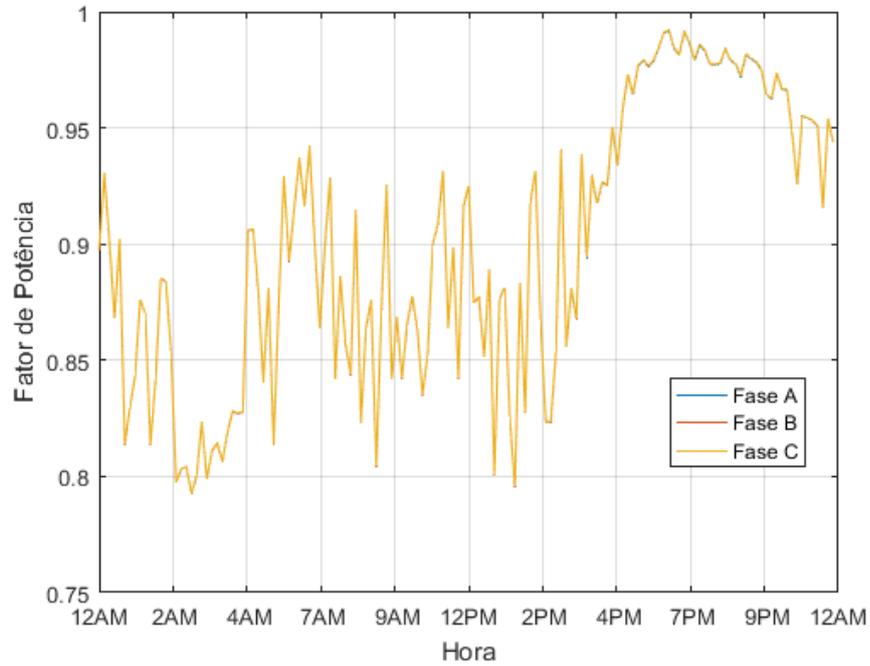
FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 38 – FLUXO DE POTÊNCIA REATIVA NA BARRA 634



FONTE: O Autor (2018).

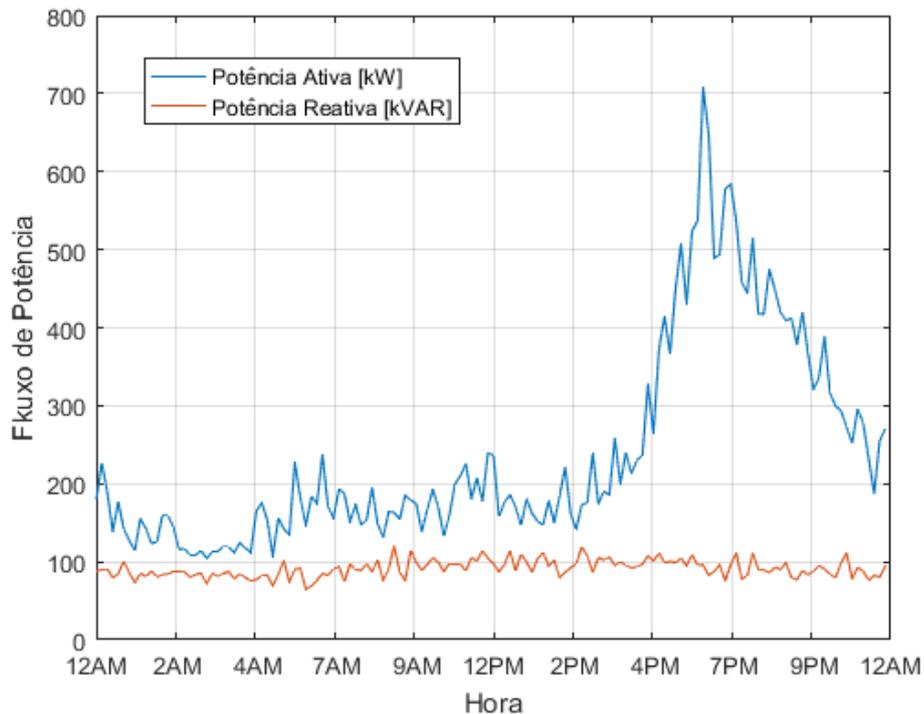
FIGURA 39 – FATOR DE POTÊNCIA NA BARRA 634



FONTE: O Autor (2018).

A FIGURA 40 mostra os perfis trifásicos de carga na MG, instalado na barra 634. O pico de demanda ativa na barra 634 foi registrado às 18:20 no valor de 707,87 kW. Já o horário de menor demanda ativa ocorreu às 03:20 com 104,13 kW.

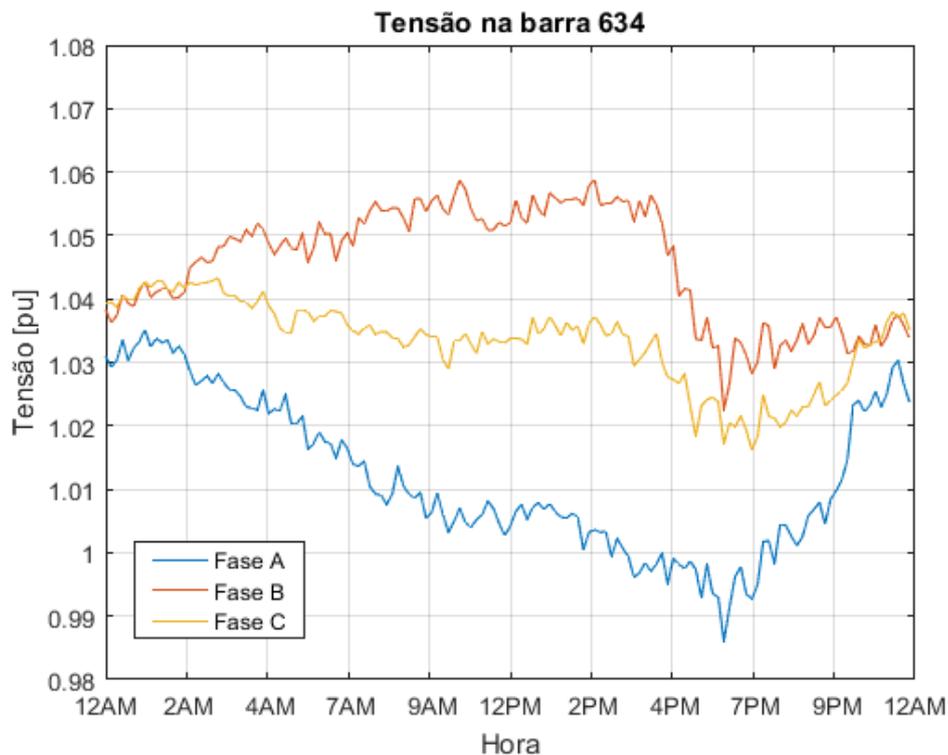
FIGURA 40 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634



FONTE: O Autor (2018).

A curva de tensão, em p.u. com base 277,13 V, registrada na barra 634 para cada fase é mostrada na FIGURA 41. Verifica-se que no horário de pico há uma redução no nível de tensão em todas as fases. Como apresentado anteriormente, há uma diferença de carregamento para cada fase. Nota-se que na A, por ter um maior carregamento, apresenta maiores quedas no nível de tensão. Apesar de terem carregamentos iguais, a B e C apresentaram um diferente comportamento de tensão. Isso pode ser uma influência causada pelo carregamento de todo o sistema. Como visto nos gráficos de potência no 650, a Fase B é a menos carregada do circuito, aumentando o seu nível de tensão na 634.

FIGURA 41 – TENSÃO NA BARRA 634 POR FASE



FONTE: O Autor (2018).

5.3 CONEXÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO À MICRORREDE

Como mencionado no tópico 4.2, no GridLab-D o dimensionamento do gerador fotovoltaico se deu através do ajuste de sua área. Foram executados simulações com vários valores de área e seus resultados analisados com a eq. 3.

A relação de valores obtidas para satisfazer os cenários de penetração de 10%, 35% e 70% são mostrados na TABELA 10, assim como a energia total produzida por cada uma delas.

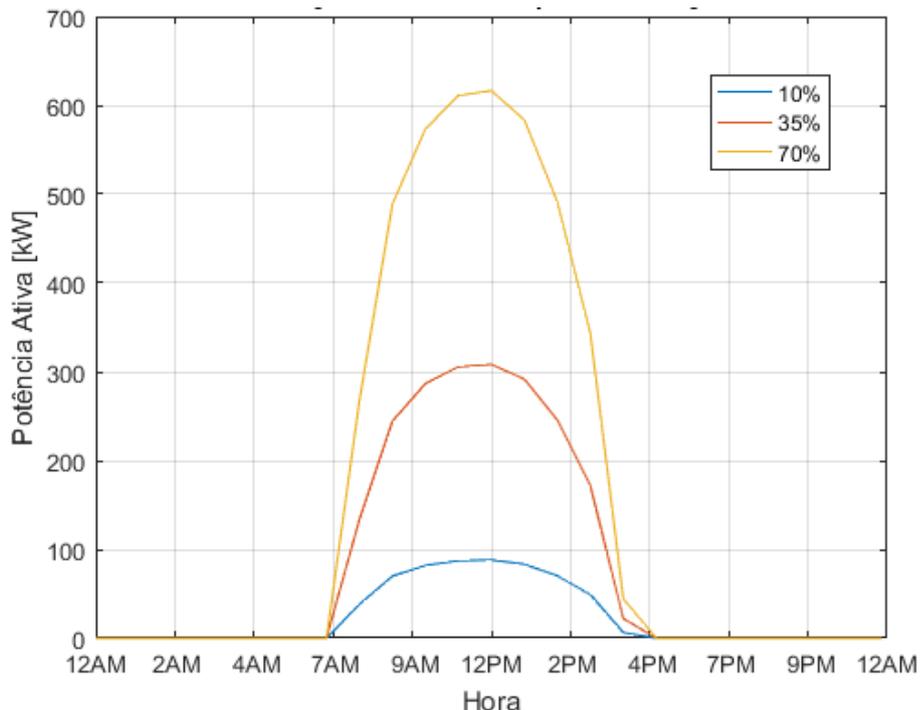
TABELA 10 – ÁREA E ENERGIA TOTAL PRODUZIDA PARA CADA CENÁRIO DE PENETRAÇÃO DE PV

Penetração de PV	Área (sf)	Energia total produzida (kWh)
10%	6650	573
35%	23275	2006
70%	46550	4012

FONTE: O Autor (2018).

O gráfico de geração trifásica para cada um desses cenários é mostrado na FIGURA 42. Observa-se que para todos os cenários o início de produção de energia ocorreu às 7:10 e o seu término, às 16:50. O pico de geração foi registrado ao meio-dia. Como esperado, o aumento de geração fotovoltaica é diretamente proporcional ao valor de penetração e o período de produção apresenta um comportamento fidedigno ao real.

FIGURA 42 – GERAÇÃO FOTOVOLTAICA (TRIFÁSICA) POR PENETRAÇÃO



FONTE: O Autor (2018).

A TABELA 11 apresenta os valores de pico de produção de energia ocorrido às 12:00 para cada cenário.

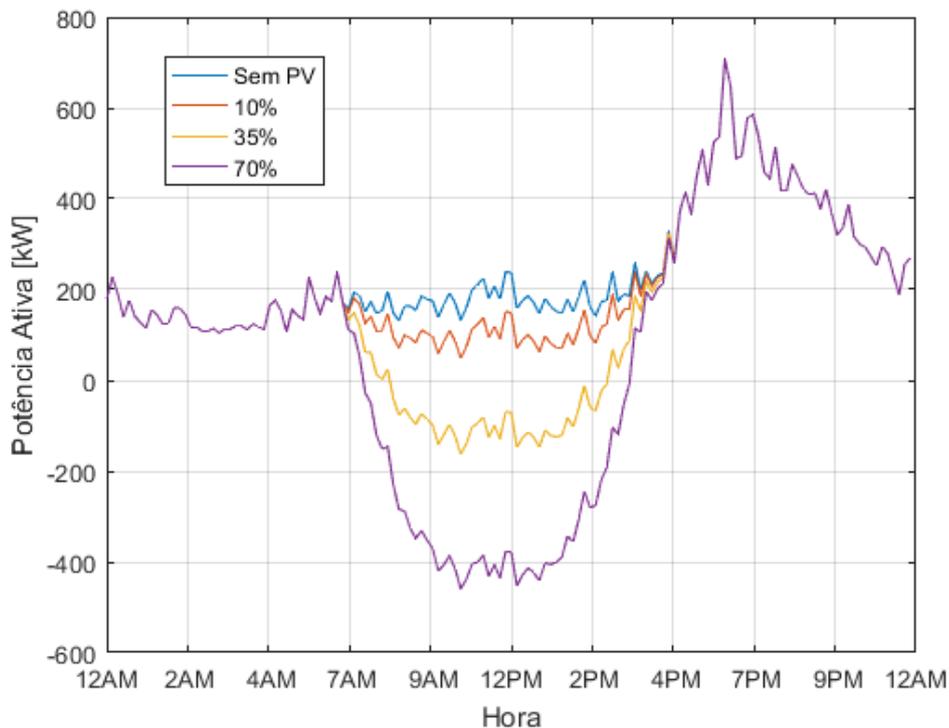
TABELA 11 – PICO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA POR CENÁRIO

Cenário	10%	35%	70%
Pico de geração (kW)	88,06	308,22	616,45

FONTE: O Autor (2018).

O fluxo de potência ativo trifásico na barra 634 para cada cenário é apresentado na FIGURA 43. Para as penetrações de 35% e 70%, nota-se intervalos de tempo em que o fluxo de potência da barra 634 é negativo. Isso se deve ao fato da geração fotovoltaica superar a demanda da carga instalada na barra nos momentos de maior irradiação solar. Esse fluxo negativo acaba sendo enviado à rede, evidenciando a importância de se instalar baterias para o armazenamento deste. Verifica-se que no cenário de 10%, não foi registrado esse comportamento.

FIGURA 43 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634 COM PV



FONTE: O Autor (2018).

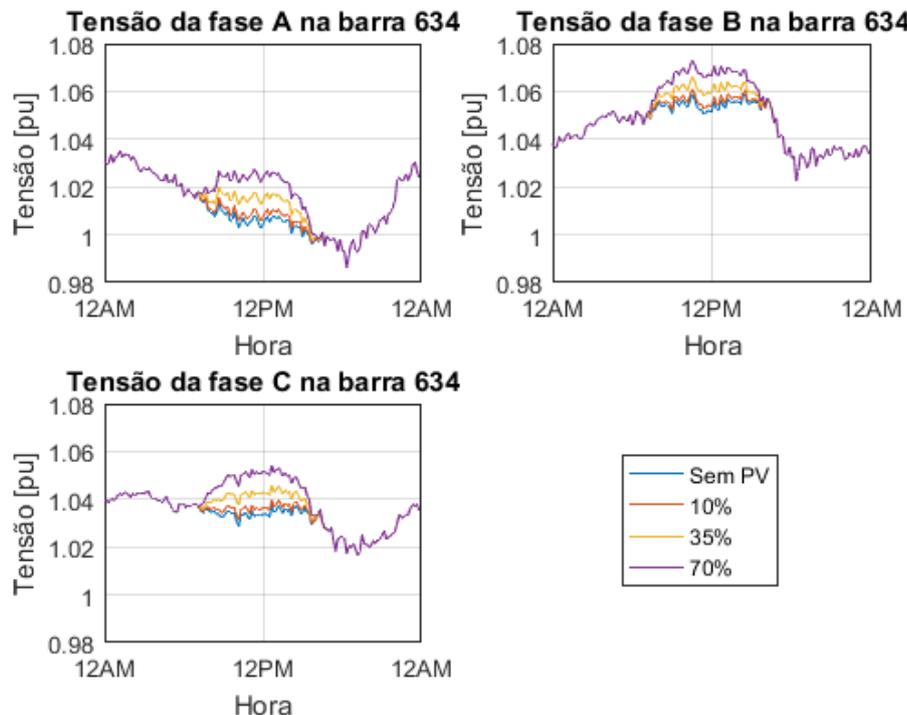
O perfil de tensão de cada fase do 634 é mostrado na FIGURA 44. Pode-se observar que a tensão da barra, para todas as fases, teve uma elevação durante o período de geração solar. Verifica-se também que esse aumento é diretamente proporcionado ao valor de penetração fotovoltaica. A TABELA 12 apresenta o aumento percentual da tensão em cada fase às 12:00 (horário de pico de geração) para os cenários simulados.

TABELA 12 – ELEVAÇÃO DE TENSÃO DA BARRA 634 COM PV ÀS 12:00

Cenário	Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)
10%	0,29	0,21	0,25
35%	0,99	0,73	0,88
70%	1,94	1,43	1,71

FONTE: O Autor (2018).

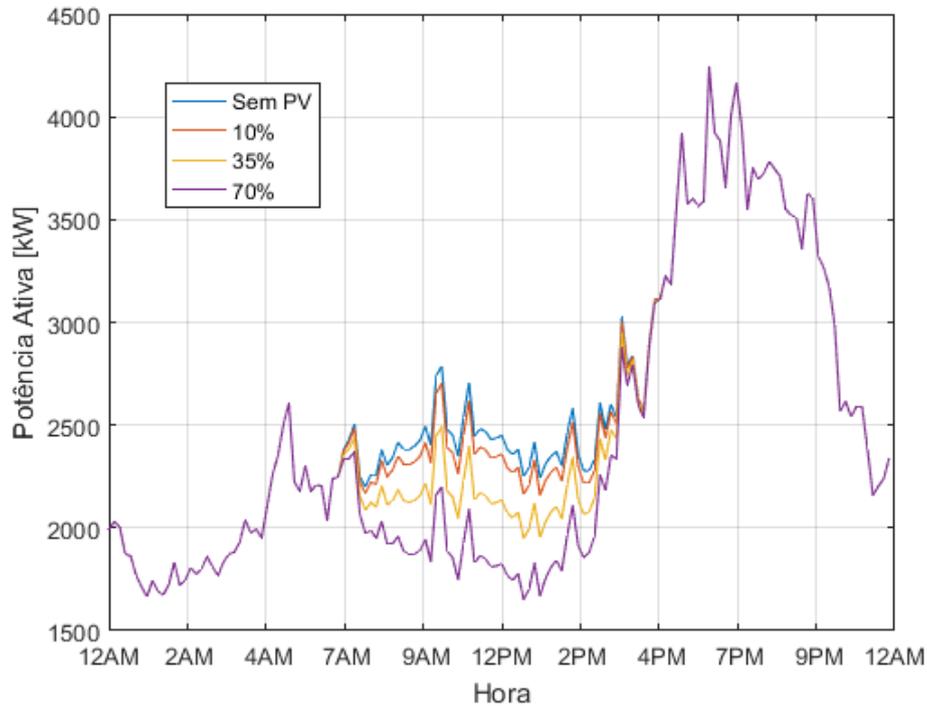
FIGURA 44 – TENSÃO NA BARRA 634 COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA



FONTE: O Autor (2018).

O impacto na barra de alimentação 650 ao inserir sistemas fotovoltaicos pode ser visto na FIGURA 45. Nota-se que o fluxo negativo resultante do sistema fotovoltaico afetou o perfil de carga da rede principal durante o período de sua geração, abaixando o nível de tensão durante o período de irradiação solar.

FIGURA 45 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 650 COM PV



FONTE: O Autor (2018).

5.4 CONEXÃO DE BATERIA À MICRORREDE

Como visto no tópico 4.2, a capacidade da bateria foi dimensionada de forma a conseguir armazenar toda a energia produzida pelo módulo fotovoltaico. Os parâmetros de controle do inversor no *Modo Following* foram definidos com o intuito de carregar durante o período de geração fotovoltaica, com o intuito de evitar o fluxo negativo, e descarregar no horário de alta demanda. As máximas taxas de carga foram declaradas de forma a armazenar apenas a energia do fotovoltaico, evitando o consumo de energia da rede principal. Já as máximas taxas de descarga foram definidas de forma a conseguirem suprir energia durante os horários de pico. O fator de potência do inversor foi configurado para unitário, tendo um fornecimento apenas de potência ativa.

A capacidade de armazenamento e a configuração do inversor para cada um dos cenários é mostrado na TABELA 13. Nas simulações realizadas, as baterias estão inicialmente descarregadas (SOC em 0%).

TABELA 13 – CAPACIDADE DA BATERIA E CONFIGURAÇÃO DO INVERSOR PARA CADA CENÁRIO

Penetração de PV	10%	35%	70%
Capacidade (kWh)	573	2006	4012
Máxima taxa de carga (kW)	88.06	308	616
Máxima taxa de descarga (kW)	800	800	800
Início do carregamento (kW)	125	61	50
Fim do carregamento (kW)	328	152	125
Início do descarregamento (kW)	450	350	150
Fim do descarregamento (kW)	400	300	140

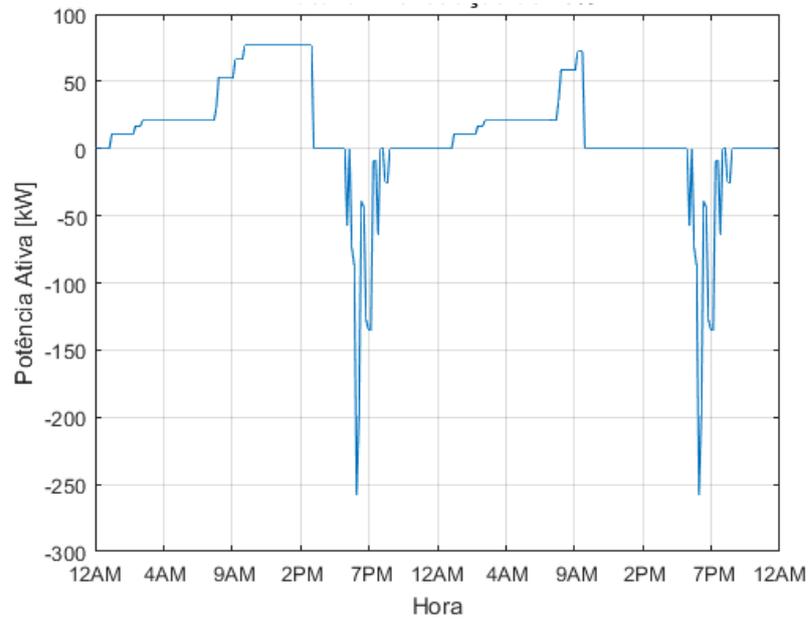
FONTE: O Autor (2018).

A FIGURA 46 apresenta a curva da bateria no cenário de 10% e a FIGURA 47, o fluxo de potência trifásica na barra 634 com o sistema fotovoltaico e bateria. Na curva de bateria, valores positivos representam o carregamento e negativos, o descarregamento.

Nota-se que o controle permitiu a bateria de armazenar a energia produzida pelo fotovoltaico no primeiro dia, mas no segundo dia ela cessou o armazenamento prematuramente às 10:10. Isso se dá pelo fato da sua capacidade ter ficado completamente cheia nesse momento. Verifica-se com este comportamento que o sistema modelado no GridLab-D possui um funcionamento condizente com uma bateria real.

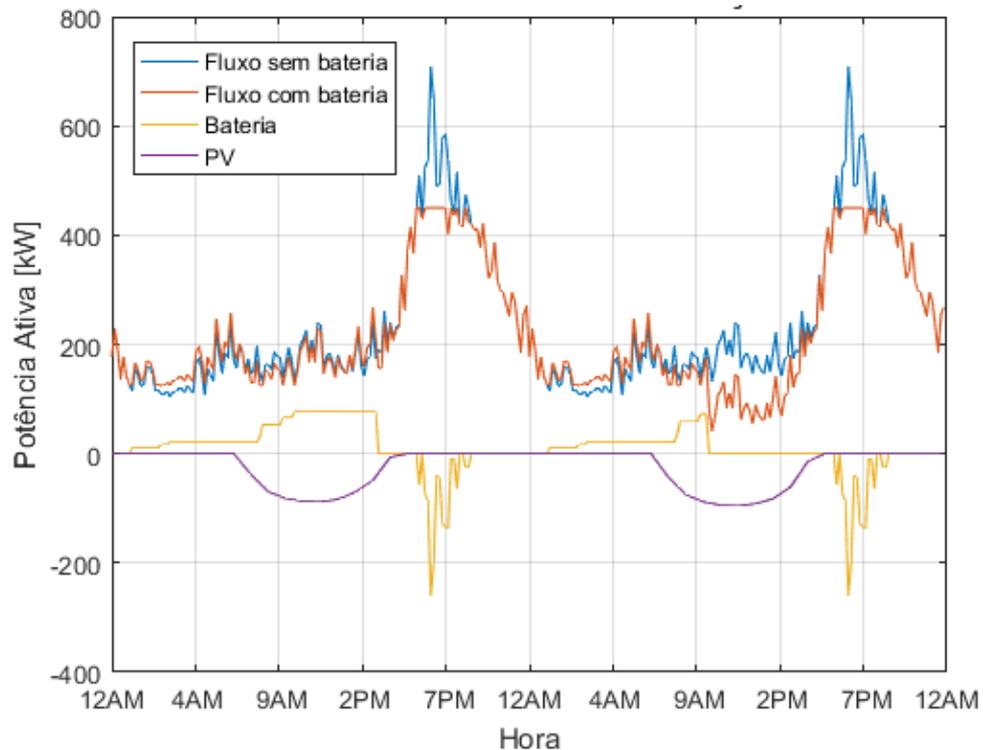
O despacho de energia da bateria permitiu uma redução no pico de carga, fazendo com que a potência fornecida pela concessionária não ultrapassasse 450 kW, como evidenciado na curva de fluxo de potência com bateria na FIGURA 47.

FIGURA 46 – CURVA TRIFÁSICA DA BATERIA NO CENÁRIO DE 10%



FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 47 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634 COM PV E BATERIA (10%)

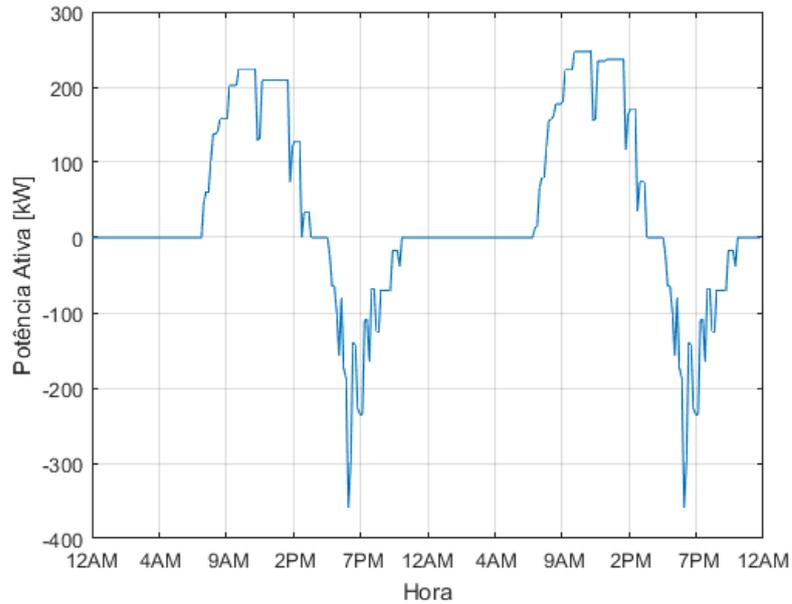


FONTE: O Autor (2018).

Para o cenário de 35% são apresentados as FIGURA 48 e FIGURA 49. Observa-se que a bateria conseguiu armazenar o excedente da produção de energia solar que não foi consumida pela carga, fazendo com que não fosse registrado o fluxo

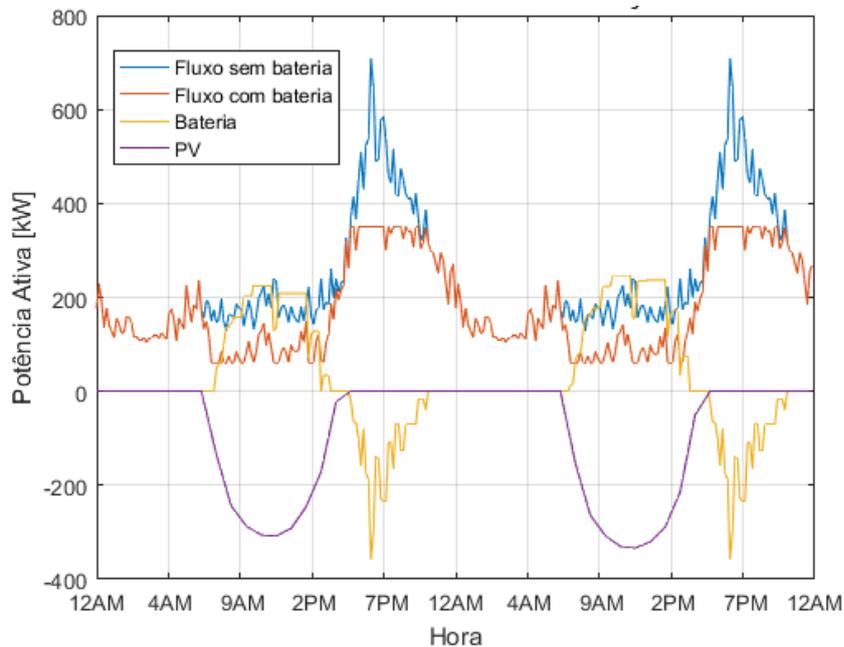
de potência negativo na barra 634 no período de dois dias. A potência fornecida pela concessionária não ultrapassou o valor de 350 kW devido à redução no pico de demanda.

FIGURA 48 – CURVA TRIFÁSICA DA BATERIA NO CENÁRIO DE 35%



FONTE: O Autor (2018).

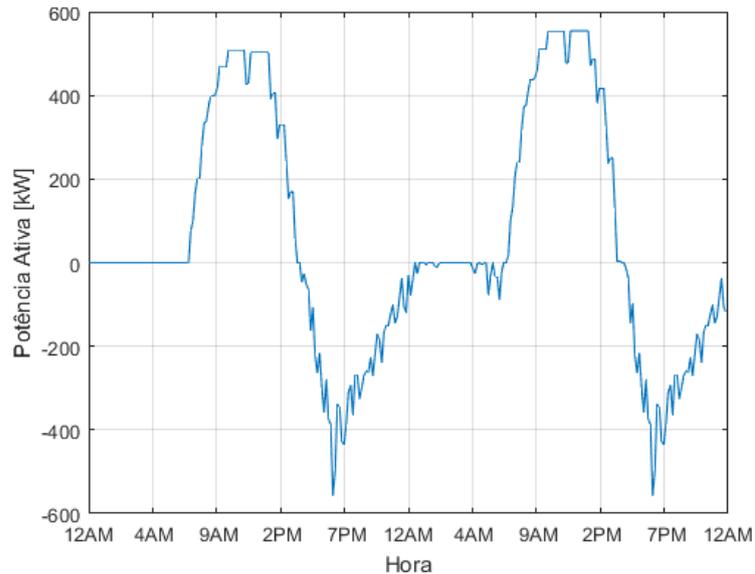
FIGURA 49 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634 COM PV E BATERIA (35%)



FONTE: O Autor (2018).

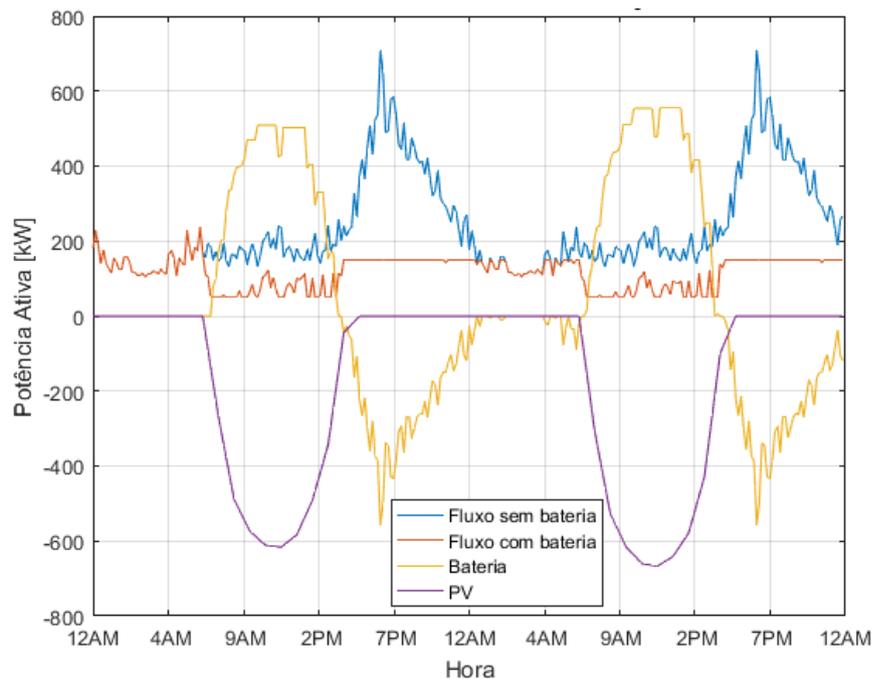
Assim como no cenário anterior, na simulação com penetração de 70% não foi registrado o fluxo de potência negativo na barra 634. A grande capacidade da bateria neste cenário, se comparado com as penetrações anteriores, possibilitou um intervalo de tempo maior no despacho de energia. Como apresentado na FIGURA 51, o fluxo de potência resultante na barra 634 não ultrapassou 150 kW.

FIGURA 50 – CURVA TRIFÁSICA DA BATERIA NO CENÁRIO DE 70%



FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 51 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 634 COM PV E BATERIA (70%)



FONTE: O Autor (2018).

A TABELA 14 apresenta de forma resumida os horários de operações da bateria em cada cenário. Verifica-se que um maior cenário de penetração permitiu períodos de descarga mais longo.

TABELA 14 – HORÁRIOS DE OPERAÇÃO DA BATERIA POR CENÁRIO

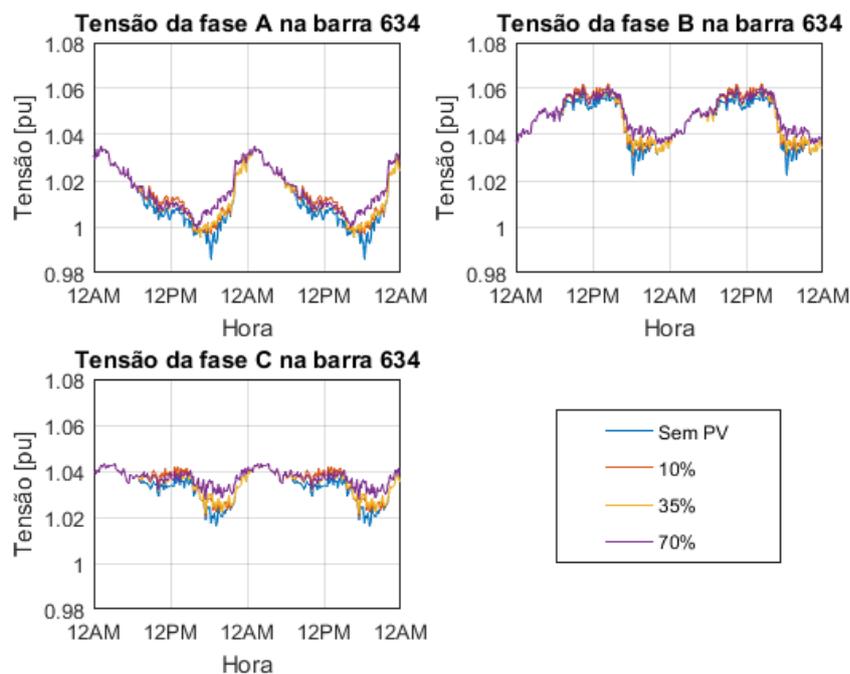
Cenário	Início carga	Fim carga	Início descarga	Fim descarga
10%	01:10	15:10	17:40	20:30
35%	08:00	15:30	17:00	22:00
70%	07:40	15:30	16:00	02:10

FONTE: O Autor (2018).

O perfil de tensão de cada fase do 634 é mostrado na FIGURA 52. Observa-se que a presença do sistema de armazenamento atenuou os efeitos da elevação de tensão decorrentes da geração fotovoltaica, por absorver o fluxo de potência negativo gerado pelo sistema fotovoltaico.

A TABELA 15 apresenta o aumento percentual da tensão em cada fase às 12:00 (horário de pico de geração) para os cenários simulados. Se comparado com a tabela de elevação de tensão com PV e sem bateria, o aumento registrado nesta etapa foi baixo.

FIGURA 52 – PERFIL DE TENSÃO NA BARRA 634 COM PV E BATERIA



FONTE: O Autor (2018).

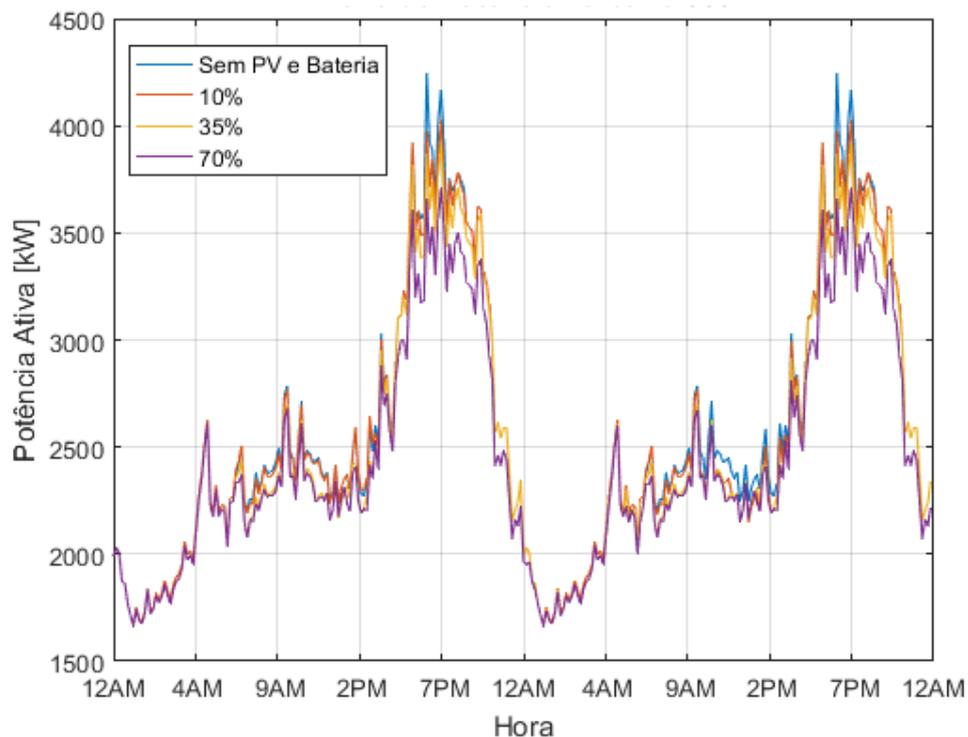
TABELA 15 – ELEVAÇÃO DE TENSÃO DA BARRA 634 COM PV E BATERIA ÀS 12:00

Cenário	Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)
10%	0.04	0.03	0.03
35%	0.57	0.42	0.51
70%	0.60	0.44	0.53

FONTE: O Autor (2018).

O comportamento da barra de alimentação 650 ao inserir a bateria é apresentado na FIGURA 53. Por não apresentar o fluxo negativo de potência na barra 634, o comportamento da barra 650 nesta etapa é similar quando não havia o sistema fotovoltaico e de armazenamento de energia.

FIGURA 53 – FLUXO DE POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 650 COM PV E BATERIA



FONTE: O Autor (2018).

5.5 CONEXÃO DE CHAVE À MICRORREDE

Nesta etapa, o acionamento da chave foi realizado com o objeto *eventgen*, contido no módulo *Reliability*, que tem como intuito a geração de um evento num instante de tempo definido que realiza a abertura desta. Para a análise de microrrede

é necessário incluir na simulação o objeto *fault_check* juntamente com a linha de comando *strictly_radial false*, indicando ao GridLab-D que existe um sistema ilhado após a abertura da chave.

Ao abrir a chave, o sistema de baixa tensão perde a sua barra de referência *SWING* (barra infinita de um sistema), presente na barra de alimentação 650. Assim, não é possível medir o fluxo de potência da bateria e gerador solar. Para contornar esse problema, a barra que continha o inversor e painel fotovoltaico foi configurado como *SWING_PQ*. Neste modo, ainda não documentado pelos criadores do GridLab-D, a barra é inicialmente configurada como *PQ* (barra constante de potência). Mas no momento em que se perde a barra de referência da rede principal, ela automaticamente se torna uma *SWING*, tornando possível a simulação no modo ilhado. Para fazer com que o modo *SWING_PQ* funcione, é necessário adicionar a seguinte linha no objeto *fault-check*: *grid_association true*.

Por mudar a barra de referência para o cálculo de fluxo de potência, não foi possível obter medições corretas de tensão. Após o chaveamento, o medidor instalado na barra 634 não mediu a potência injetada pelo gerador fotovoltaico e bateria. Portanto, foi feito o cálculo do balanço de energia com a adição dos valores de potência ativa registrados pelos medidores conectados a esses componentes.

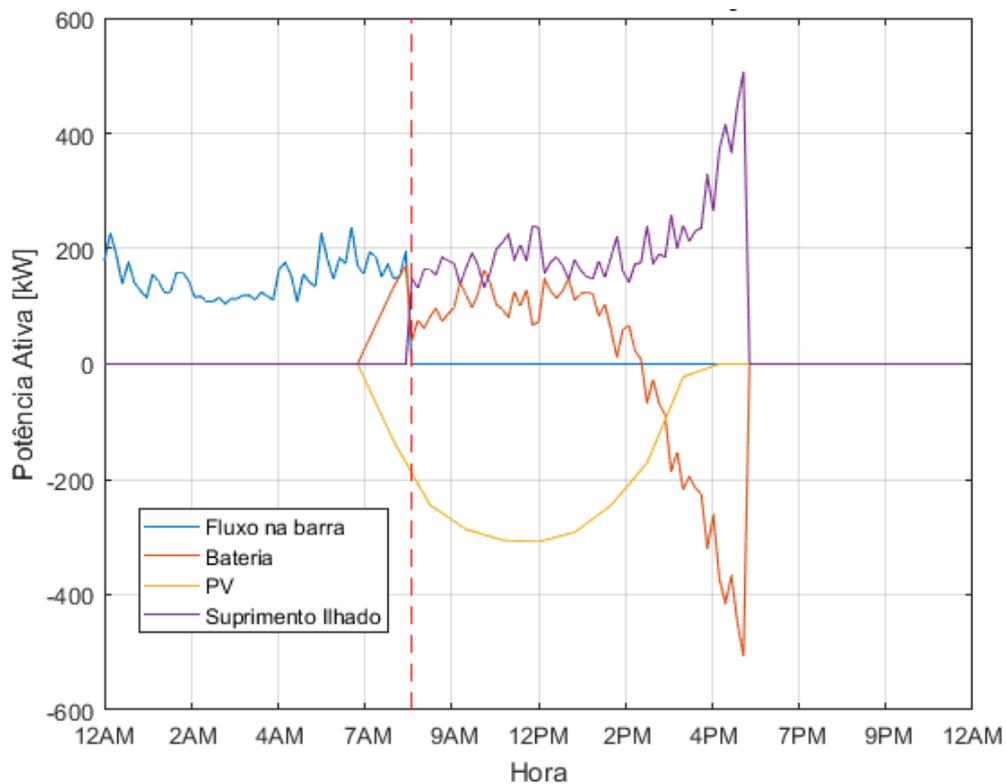
O modo de controle da bateria *Load Following*, aplicado na fase anterior, não é recomendável para a utilização em MGs no modo ilhado. Portanto, para a realização da simulação da MG no modo ilhado, foi utilizado o modo *Constant PQ*. Nele, o usuário deve criar um objeto *schedule*, onde são especificados manualmente os valores de carga e descarga, assim como os instantes em que eles ocorrem. Nas simulações realizadas, o *schedule* foi programado de forma a armazenar o excedente de energia do sistema fotovoltaico e realizar o seu descarregamento acompanhando a carga conectada à microrrede.

Como mencionado no tópico 4.2, a abertura da chave será realizada no momento em que a produção de energia fotovoltaica for maior que a demanda da carga. No cenário de 10%, notou-se que em nenhum momento a geração fotovoltaica superou a demanda de carga. Portanto, o modo ilhado não foi aplicado neste valor de penetração.

No cenário de 35% e SOC inicialmente em 0% a produção de energia fotovoltaica foi maior que a demanda de carga às 8:20, logo esse horário foi escolhido para o ilhamento da MG, como pode ser observado na FIGURA 54. O momento do

chaveamento é indicado no gráfico pelo traço vertical de cor vermelha. Sem o fornecimento de energia da rede principal, o sistema fotovoltaico teve de ser responsável tanto pela alimentação da carga quanto o carregamento da bateria. Às 15:00, o PV não foi suficiente para suprir a carga, sendo acionado o despacho da bateria. Às 17:50 a bateria deixou de fornecer energia por ter sido totalmente descarregada. Portanto, o sistema no modo ilhado conseguiu ficar independente da rede principal por 9 horas e 30 minutos.

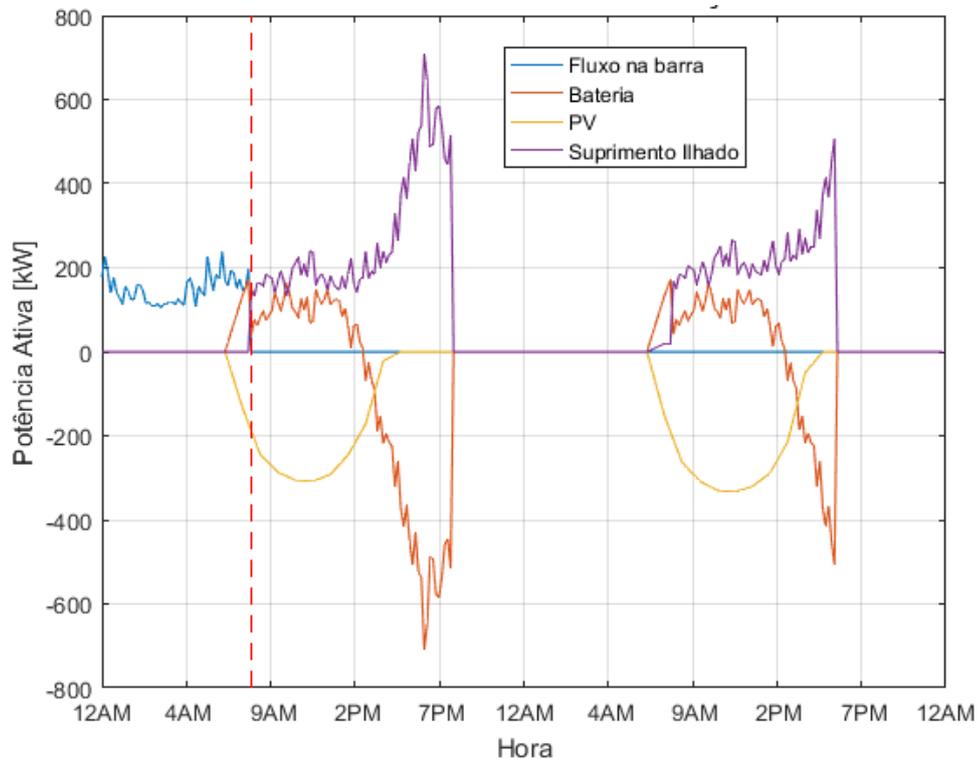
FIGURA 54 – POTÊNCIA NA BARRA 634 NO MODO ILHADO (35% DE PV E 0% DE SOC)



FONTE: O Autor (2018).

Para a penetração de 35% de geração fotovoltaica, foi observado que o valor de SOC inicial que possibilita uma maior autonomia da bateria e permite o total armazenamento de fluxo negativo do fotovoltaico é o de 60%. Como mostrado na FIGURA 55, o sistema de armazenamento foi completamente descarregado às 19:50, fazendo com que a MG pudesse operar no modo ilhado por 11 horas e 30 minutos. No segundo dia, a MG no modo ilhado teve um comportamento igual à apresentada no caso anterior pois a bateria começou a operar totalmente descarregada.

FIGURA 55 – POTÊNCIA NA BARRA 634 NO MODO ILHADO (35% DE PV E 60% DE SOC)

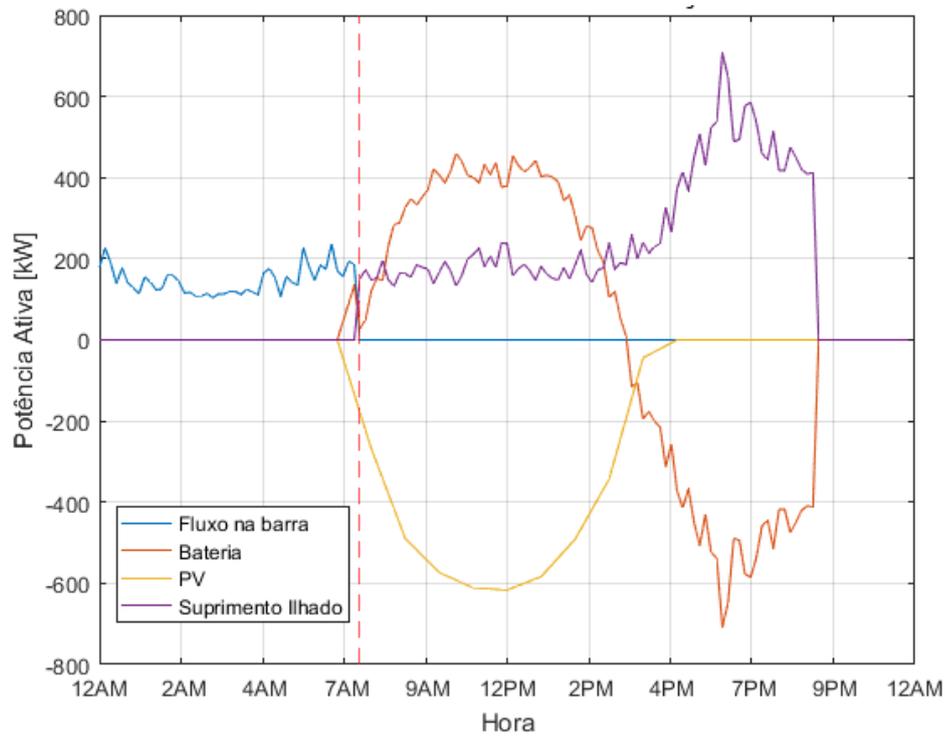


FONTE: O Autor (2018).

A FIGURA 56 apresenta o ilhamento do sistema com penetração fotovoltaica de 70% e SOC começando em 0%. A abertura da chave ocorreu às 7:40 e o despacho de energia da bateria foi realizado às 15:40. Por ser um sistema de armazenamento com maior capacidade se comparado com o do cenário anterior de 35%, o seu fornecimento de energia foi cessado às 21:10. Logo, o sistema no modo ilhado teve uma autonomia de 13 horas e 30 minutos.

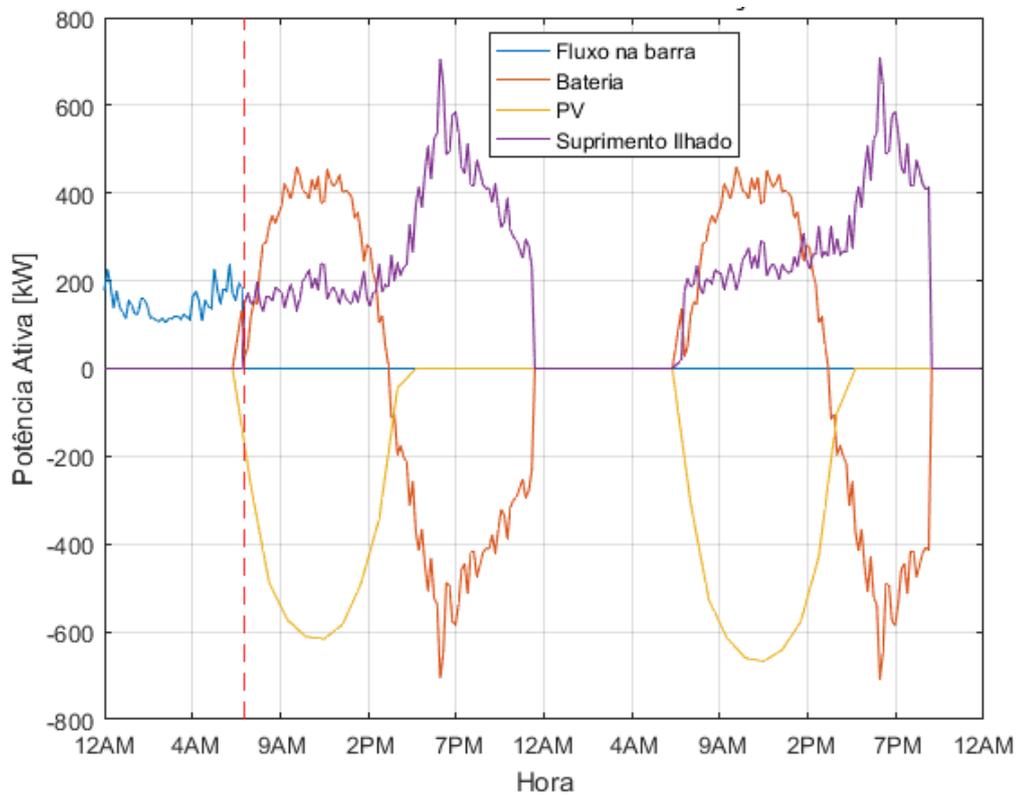
Para este cenário de alta penetração, o valor de SOC inicial que possibilitou maior tempo de duração no fornecimento de energia da bateria sem afetar o armazenamento do fluxo negativo foi de 20%. Analisando a FIGURA 57, observa-se que a bateria deixou de fornecer energia às 23:20, aumentando a autonomia do sistema para 15 horas e 40 minutos. No segundo dia, a MG no modo ilhado teve um comportamento igual à do caso anterior.

FIGURA 56 – POTÊNCIA NA BARRA 634 NO MODO ILHADO (70% DE PV E 0% DE SOC)



FONTE: O Autor (2018).

FIGURA 57 – POTÊNCIA NA BARRA 634 NO MODO ILHADO (70% DE PV E 20% DE SOC)



FONTE: O Autor (2018).

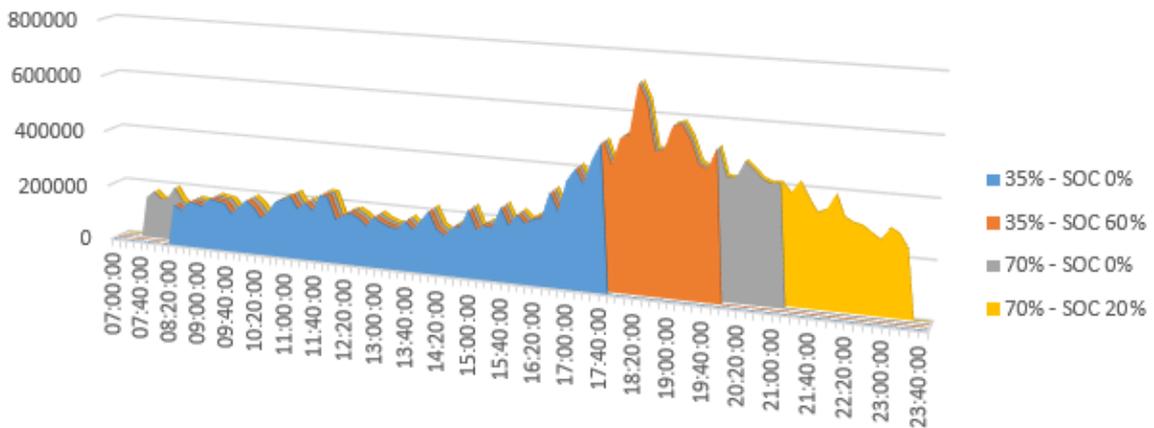
A TABELA 16 apresenta de forma resumida as características de cada caso apresentado anteriormente. A visualização da autonomia de cada configuração de ilhamento é mostrado na FIGURA 58. Como esperado, cenários com penetração e SOC maiores permitem uma autossuficiência maior.

TABELA 16 – CARACTERÍSTICAS DE CADA CONFIGURAÇÃO DE ILHAMENTO

Configuração	Abertura da chave	Início do despacho da bateria	Fim do despacho da bateria	Autonomia no modo ilhado
Penetração 10%		Não foi possível realizar o ilhamento		
Penetração 35% - SOC 0%	8:20	15:00	17:50	9h30min
Penetração 35% - SOC 60%	8:20	15:00	19:50	11h30min
Penetração 70% - SOC 0%	7:40	15:40	21:10	13h30min
Penetração 70% - SOC 20%	7:40	15:40	23:20	15h40min

FONTE: O Autor (2018).

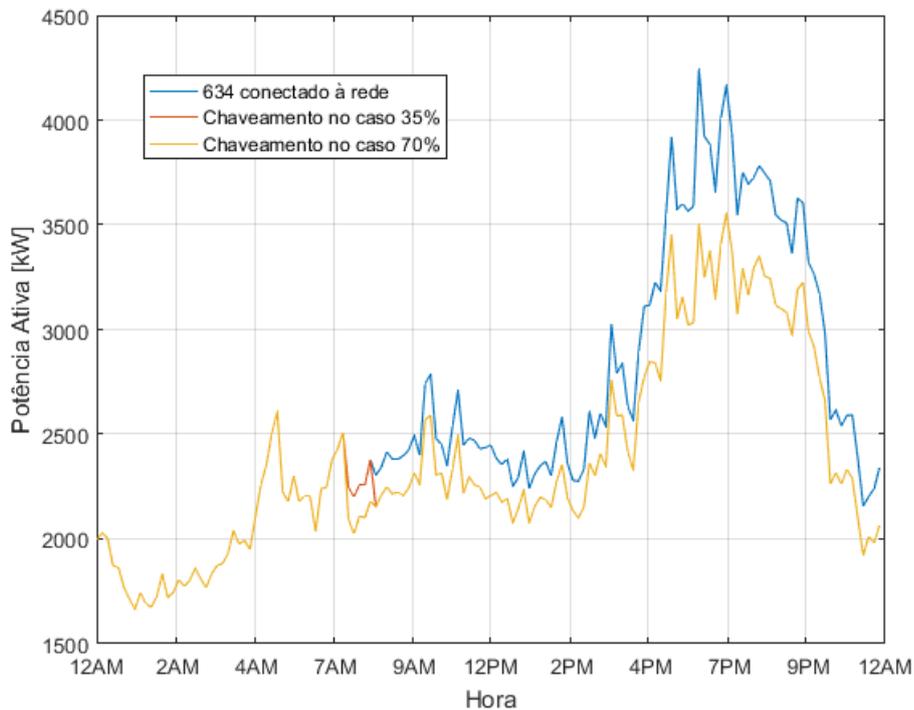
FIGURA 58 – AUTONOMIA DE ILHAMENTO EM CADA CASO



FONTE: O Autor (2018).

O comportamento da barra de alimentação 650 ao ilhar a MG pode ser visto na FIGURA 59. Nota-se que para ambos os cenários, a desconexão da barra 634 à rede principal diminuiu o fluxo de potência ativa. A carga na MG é suprida com a energia proveniente dos sistemas fotovoltaicos e de armazenamento, e com isso a rede principal (concessionária) não é mais responsável por ela.

FIGURA 59 – POTÊNCIA TRIFÁSICA NA BARRA 650 COM O ILHAMENTO DA MICRORREDE



FONTE: O Autor (2018).

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Na etapa da validação dos dados, os resultados de tensão e corrente apresentados pelo GridLab-D no modo *Newton-Raphson* foram satisfatórios. Por realizar o cálculo de fluxo de potência em cada fase, esta ferramenta computacional possibilita a simulação de sistemas de distribuição, que possuem como característica a presença de cargas com fases desbalanceadas.

Ao inserir as curvas de carga ao sistema de 13 barras no programa, foi notado a limitação de pontos que é possível inserir no objeto schedule. O uso de curvas de carga de 24 horas e intervalo de tempo de 5 minutos não foi possível, portanto foi inserido uma curva com intervalo de tempo de 10 minutos. Os resultados das simulações de fluxo de potência nas barras 650 e 634 foram condizentes com as

curvas originais, apresentando um pico de carga o início da noite e uma baixa demanda no período da madrugada. Foi observado no sistema de 13 barras o maior carregamento na fase A e o menor, na fase B.

Nas simulações realizadas com o sistema fotovoltaico, destaca-se o fato do GridLab-D permitir o uso de dados climáticos reais para o cálculo de geração de energia solar. A geração nos três cenários de penetração se inicia de manhã, atinge um pico de produção ao meio-dia e termina no fim da tarde, sendo condizentes com a realidade. No cenário de penetração de 10%, em nenhum momento a potência injetada pelo sistema fotovoltaico conseguiu superar o consumo da carga instalada na barra 634. Já nos cenários de 35% e 70% isso ocorreu, sendo observado nas medições da barra 634 fluxos de potência ativa negativos durante os períodos de alta produção. Os resultados das simulações de perfil de tensão com a presença de sistema fotovoltaico demonstraram a importância de se levar em conta que uma alta penetração de geradores pode gerar uma sobrelevação de tensão .

A etapa de simulação com baterias envolveu o uso do controle automático *Load Following*. Com ele, o usuário pode definir vários parâmetros de controle com o intuito de diminuir o pico de carga do sistema. Os resultados das simulações dos três cenários mostraram que o controle fornecido pelo GridLab-D possibilitou o armazenamento da energia gerada pelo sistema fotovoltaico e o seu despacho nos intervalos de pico. No cenário de 10%, foi observado no segundo dia o cessamento do armazenamento de energia pelo fato da bateria estar completamente cheia. No cenário de 70% o grande acúmulo de energia possibilitou uma redução drástica na dependência do fornecimento de energia pela concessionária. Nota-se nas medições de tensão da barra 634 que o sistema de armazenamento, por absorver o fluxo negativo, atenuou o efeito de elevação de tensão provocada pela penetração de fotovoltaico.

A última etapa descrita neste capítulo envolveu o ilhamento da MG através da abertura da chave que conecta ela à rede principal. Nela, o ilhamento foi realizado com o objeto *eventgen*. As simulações com o modo *Newton-Raphson* no GridLab-D exigem a presença de ao menos uma barra *SWING* para referência nos cálculos. Para isso, foi adicionado a configuração *BUSTYPE_SWING* à barra 634, ainda não documentada pelos desenvolvedores da ferramenta computacional. O funcionamento da bateria foi programado manualmente pois o modo *Load Following* não foi desenvolvido para operações de ilhamento. Foram descritos apenas os ilhamentos

dos cenários de 35% e 70% pois a penetração de 10%, como afirmado anteriormente, não conseguiu superar o consumo da carga. Nas simulações com penetração de 35% foram considerados casos de SOC em 0% e 60%, que tiveram uma autonomia de 9h30min e 11h30min, respectivamente. Já na penetração de 70% foram considerados SOC de 0% e 20%, que conseguiram ficar ilhados por 13h30min e 15h40min. Como esperado, a abertura da chave diminuiu o fluxo de potência que circula pela barra 650. Devido às limitações impostas pelas funções de ilhamento do GridLab-D, não foi possível analisar as curvas de tensão.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo a simulação de MG com a ferramenta computacional GridLab-D. Esse tipo de topologia de sistema ainda requer um maior amadurecimento e com a análise de sua simulação no programa viabilizar-se-á mais uma ferramenta para complementar os estudos de MG.

A validação de dados foi feita com a comparação de valores de magnitude de corrente e tensão em cada fase, assim como seus ângulos, da simulação do sistema de 13 barras. Os resultados obtidos apresentaram baixas diferenças de valores, sendo satisfatórios.

Na etapa de aplicação de curvas de carga no sistema com o objeto Schedule, foi observado a limitação no número de valores que podem ser inseridos dentro dele. Portanto, deve-se atentar ao intervalo de tempo em que for aplicado na simulação. Os resultados obtidos nesta fase foram condizentes com as curvas de cargas originais. Com o auxílio do programa Matlab foi possível analisar os resultados do comportamento de tensão, fluxo de potência e fator de potência nas barras de alimentação e microrrede.

A simulação de sistemas fotovoltaicos e bateria com o GridLab-D apresentaram um comportamento fidedigno com a realidade. Foi possível observar, com os resultados fornecidos pelo programa, a influência que ambos sistemas provocaram na MG e rede principal. A alteração de parâmetros desses componentes para cada cenários de penetração fotovoltaica, como a área de superfície do PV, capacidade, parâmetros de controle e SOC da bateria geraram resultados esperados.

Inicialmente foram obtidos problemas de convergência de resultado com a abertura da chave. Para resolver isso, foi necessário aplicar configurações de barra e abertura de chave ainda não documentadas pelos desenvolvedores do programa. As medições na barra 634 não consideraram no cálculo o fluxo gerado pelo PV e bateria, portanto foi exigido fazer a soma de balanço de energia para se obter o fluxo ativo da MG. O controle da bateria automático fornecido pelo GridLab-D não funciona em casos de ilhamento, sendo necessário aplicar programação manual do seu funcionamento. Após aplicar soluções a esses problemas enfrentados, foi possível simular MGs com várias configurações e observar o seu fluxo de potência e autonomia no modo ilhado. No entanto, devido às limitações do programa ao modelar sistemas ilhados, não foi factível analisar o comportamento de tensão.

Com essas conclusões obtidas a partir da simulação e modelagem de microrredes, foi possível realizar uma comparação da ferramenta computacional GridLab-D com o OpenDSS, estudado no trabalho de Veiga e Leandro (2018).

O GridLab-D foi lançado em 2008, já o OpenDSS, em 1997. Por ter sido lançado 11 anos antes, o segundo programa mencionado apresenta manual de instrução e documentações formalizadas mais detalhadas que do primeiro programa. A aprendizagem com o GridLab-D exigiu o acesso ao fórum oficial da ferramenta computacional e a sua *Wiki (website)* que permite a edição colaborativa) para o entendimento de cada função.

Tanto no GridLab-D quanto no OpenDSS, é possível o cálculo de fluxo de potência em cada fase. Isso é essencial para a realização de simulações de sistemas de distribuição, por apresentarem cargas com fases desbalanceadas. Nesses dois programas, a declaração dos componentes do sistema elétrico é feita através de linhas de comando, não permitindo a programação do circuito através do desenho de diagramas. Uma desvantagem notada do GridLab-D é a sua ausência de GUI, exigindo o tratamento de seus dados em programas externos como Excel ou Matlab. A interface do OpenDSS exibe alguns dos comandos disponíveis do programa e apresenta a função de plotagem de gráficos, que permite uma rápida visualização dos resultados obtidos.

Para a realização de simulações fotovoltaicas no GridLab-D, foram declarados a sua área de superfície, tipo de tecnologia e dados climáticos já prontos em um arquivo .tmy2 fornecido pela NREL. Foi notado que no OpenDSS devem ser informados mais parâmetros como o valor de PMP, curva de eficiência do PV e inversor, curvas climáticas de irradiação e temperatura e não é possível declarar a tecnologia do gerador.

Em ambos os programas, para o dimensionamento da bateria são declarados a potência nominal, capacidade de armazenamento e SOC. O GridLab-D possui a vantagem de ter o controle automático *Load Following* para a diminuição de pico de demanda, no trabalho de Veiga e Leandro (2018) esse procedimento foi realizado com a declaração manual de curvas de carga e descarga.

Na fase de ilhamento da MG, nota-se que nas duas ferramentas computacionais foi necessário a aplicação de soluções para resolver o problema da ausência de barra SWING na MG. Como dito anteriormente, o conceito desse tipo de sistema é relativamente novo, sendo necessário mais tempo para que os

desenvolvedores possam adaptar os programas para simulações destes casos. Foi observado que no GridLab-D é possível programar o instante em que ocorre a abertura da chave. No OpenDSS isso só é factível com a utilização de interfaces COM com programas como Matlab, tornando esse processo um entrave para o usuário deste programa.

6.1. TRABALHOS FUTUROS

Para sugestões de trabalhos futuros relacionados a esse tema, podem-se destacar:

- Método de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e de armazenamento da microrrede que levem em conta a viabilidade econômica e técnica;
- Análise da qualidade no fornecimento de energia de uma microrrede para as cargas tendo o Módulo 8 do PRODIST como base;
- Estudo de estabilidade da MG no GridLab-D;
- Criação de um algoritmo de controle automático de bateria no GridLab-D para microrredes;
- Inserção de elementos na MG como supercapacitores, veículos elétricos e geradores diesel.
- Criação de uma interface gráfica para o GridLab-D com foco em microrredes;
- Análise de futuras versões do GridLab-D que contenham mais funções de ilhamento.

REFERÊNCIAS

- ALTE STORE. **What is a Solar Charge Controller**. Disponível em: <<https://www.altestore.com/store/info/solar-charge-controller/>>. Acesso em: 9 ago. 2018.
- BORTONI, E. C.; SILVA, Y. F. F. C. DA. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM REDES INTELIGENTES: CARACTERÍSTICAS, OPORTUNIDADES E BARREIRAS. **Revista Brasileira de Energia**, v. 22, n. 1, p. 48–73, 2016.
- CHASSIN, D. P.; SCHNEIDER, K.; GERKENSMEYER, C. GridLAB-D: An Open-source Power Systems Modelling and Simulation Environment. **Transmission and Distribution Conference and Exposition**, p. 1–5, 2008.
- CRESESB. Energia solar princípios e aplicações. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**, p. 28, 2008.
- EGHTEDARPOUR, N.; FARJAH, E. Control strategy for distributed integration of photovoltaic and energy storage systems in DC micro-grids. **Renewable energy**, 2012.
- FARUQUE, M. A. AL; AHOURLAI, F. GridMat: Matlab toolbox for GridLAB-D to analyze grid impact and validate residential microgrid level energy management algorithms. **Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)**, 2014.
- FU, Q.; HAMIDI, A.; NASIRI, A.; BHAVARAJU, V. Microgrid generation capacity design with renewables and energy storage addressing power quality and surety. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 4, p. 2019–2027, 2012.
- GRIDLAB-D. **Powerflow - GridLAB-D Wiki**. Disponível em: <<http://gridlab-d.shoutwiki.com/wiki/Powerflow>>. Acesso em: 21 out. 2018a.
- GRIDLAB-D. **Battery - GridLab-D Wiki**. Disponível em: <<http://gridlab-d.shoutwiki.com/wiki/Battery>>. Acesso em: 11 nov. 2018b.
- GRIDLAB-D. **Solar - GridLab-D Wiki**. Disponível em: <<http://gridlab-d.shoutwiki.com/wiki/Solar>>. Acesso em: 11 nov. 2018.
- GRIDLAB-D. **Climate Guide - GridLab-D Wiki**. Disponível em: <http://gridlab-d.shoutwiki.com/wiki/Climate_Guide>. Acesso em: 11 nov. 2018.
- GRIDLAB-D. **History - GridLab-D Wiki**. Disponível em: <<http://gridlab-d.shoutwiki.com/wiki/History>>. Acesso em: 11 nov. 2018a.
- GRIDLAB-D. **Chapter 2 - GridLAB-D Key Attributes - GridLAB-D Wiki**. Disponível em: <http://gridlab-d.shoutwiki.com/wiki/Chapter_2_-_GridLAB-D_Key_Attributes>. Acesso em: 18 jun. 2018b.

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, n. March, p. 402–411, 2018.

IEA. World Energy Balances: Overview (2017 edition). **World Energy Balances 2017**, p. 21, 2017a.

IEA. **Energy Access Database**. Disponível em: <<https://www.iea.org/energyaccess/database/>>. Acesso em: 28 jun. 2018b.

IEEE PES. **IEEE 13 Node Test Feeder**, [s.d.].

IEEE PES. **PES Test Feeder | IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group**. Disponível em: <<http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/>>. Acesso em: 3 jul. 2018.

KARABIBER, A. et al. An approach for the integration of renewable distributed generation in hybrid DC/AC microgrids. **Renewable Energy**, 2013.

LIDULA, N. W. A.; RAJAPAKSE, A. D. Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 186–202, 2011.

PHOCOS. Comparing PWM & MPPT Charge Controllers. **Phocos North America, Inc**, p. 1–6, 2015.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual De Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos. **Cepel – Cresesb**, p. 530, 2014.

RAMPINELLI, G. A.; KRENZINGER, A.; ROMERO, F. C. Descrição e Análise de Inversores Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 15, n. 1, p. 25–50, 2013.

RIKOS, E.; TSELEPSIS, S.; HOYER-CLICK, S.; SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, M. Stability and power quality issues in microgrids under weather disturbances. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 1, n. 3, p. 170–179, 2008.

SCHNEIDER, K. P.; FULLER, J. C.; CHASSIN, D. P. Evaluating conservation voltage reduction: An application of GridLAB-D: An open source software package. **Power and Energy Society General Meeting**, 2011.

SINGH, B. R.; SINGH, O. Global Trends of Fossil Fuel Reserves and Climate Change in the 21st Century. **Fossil Fuel and the Environment**, 2012.

YAMAKAWA, E. K. **Sistema de controle nebuloso para bancos de capacitores automáticos aplicados em alimentadores de distribuição de energia elétrica**, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná - Curitiba.

ZIA, M. F.; ELBOUCHIKHI, E.; BENBOUZID, M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. **Applied Energy**, v. 222, n. April, p. 1033–1055, 2018.

VEIGA, E. C.; LEANDRO, M. G. R. **Modelagem e simulação da operação de microrredes usando o OpenDSS e Matpower**, 2018. Trabalho de conclusão do curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná - Curitiba.