

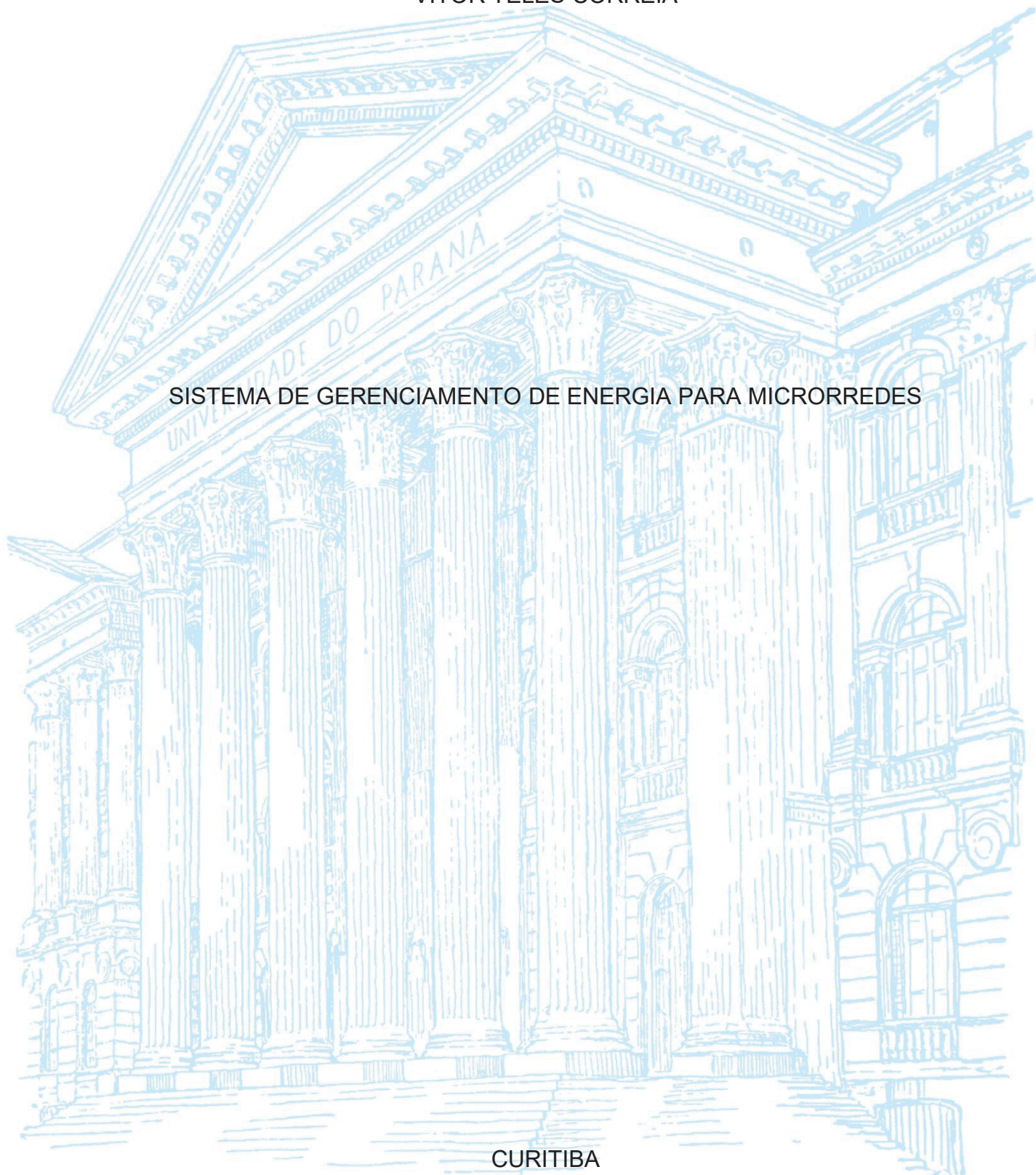
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VITOR TELES CORREIA

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA PARA MICRORREDES

CURITIBA

2021



VITOR TELES CORREIA

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA PARA MICRORREDES

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de concentração Sistemas de Potência, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C824s Correia, Vitor Teles
Sistema de gerenciamento de energia para microrredes [recurso eletrônico] / Vitor Teles Correia – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de concentração Sistemas de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki

1. Redes elétricas. 2. Programação linear. I. Universidade Federal do Paraná. II. Aoki, Alexandre Rasi. III. Título.

CDD: 621.3192

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **VITOR TELES CORREIA** intitulada: **Sistema de gerenciamento de energia para microrredes**, sob orientação do Prof. Dr. ALEXANDRE RASI AOKI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 30 de Novembro de 2021.

Assinatura Eletrônica
06/12/2021 15:23:58.0
ALEXANDRE RASI AOKI
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
07/12/2021 08:17:08.0
THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
06/12/2021 15:19:45.0
CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
13/01/2022 19:11:44.0
RODRIGO BUENO OTTO
Avaliador Externo (FUNDAÇÃO PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU)

À minha companheira, Júlia, e aos três pequenos Frederico, Niki e Peperoni.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Romino e Marília, por todo o zelo e suporte que me deram durante todos estes anos. Pela educação que me deram em casa que moldaram o homem que sou e pelo investimento que fizeram na minha educação formal durante anos, permitindo que eu alçasse voos profissionais maiores para chegar aonde estou hoje. Muito obrigado. Amo vocês dois!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki, pela oportunidade de realização deste trabalho. Obrigado pela confiança depositada em mim em mais um trabalho realizado sob sua orientação. Agradeço também pela paciência durante todo o percurso e pelos ensinamentos compartilhados na trajetória que contribuíram não só para o desenvolvimento deste trabalho, mas também para me tornar um professor mais preparado para o que nos é exigido diariamente.

À minha amiga, esposa e companheira, Júlia, por ser meu guia nessa trajetória permeada de desafios pessoais, profissionais e acadêmicos. Pelas felicidades, realizações e sonhos compartilhados nestes anos, tornando o caminho mais leve e recompensador. Pelo tempo dedicado a mim e a nós dois, seja como companheira ou como uma banca de dissertação improvisada. Obrigado por ser parte essencial da minha vida. Sem você, nada teria o mesmo encanto. Amo você!

Aos colegas de PPGEE e a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho atingisse seus objetivos.

“É melhor escrever errado a coisa certa
do que escrever certo a coisa errada...”

Patativa do Assaré

RESUMO

Na atualidade, a busca por eficiência energética e por tecnologias que a possibilite é uma realidade em praticamente todas as partes da sociedade. As microrredes surgem como alternativa tecnológica para atender esta questão, melhorando a eficiência, resiliência e confiabilidade do sistema elétrico, devido a presença de recursos energéticos distribuídos, como os geradores fotovoltaicos e eólicos bem como os sistemas de armazenamento de energia de baterias. Porém, a presença destes adiciona complexidade à operação destes sistemas elétricos, em especial devido a característica variável da geração, bem como a incerteza na demanda, surgindo novos desafios relacionados ao gerenciamento de energia. Assim, esta dissertação propõe um sistema de gerenciamento de energia em tempo real para microrredes conectadas à rede de distribuição e no modo ilhado, utilizando uma abordagem com técnicas de inteligência artificial para avaliar as divergências entre o despacho (realizado ontem visando o dia seguinte) e o tempo real (acontecendo hoje). Técnicas de redes neurais artificiais são utilizadas para prever a demanda e a geração no próximo ponto de operação da microrrede (adotado como um intervalo de 10 minutos) com base em dados históricos. Uma abordagem de cálculo do desvio entre despacho e tempo real em três dimensões de análise é apresentada, considerando a geração de energia fotovoltaica, curva de carga e estado de carga (SOC) das baterias. O sistema categoriza o desvio em três conjuntos fuzzy (pequeno, médio e grande) e atua de acordo. Um sistema de apoio a decisão com inferência fuzzy é utilizado para ajustar o próximo ponto de operação, e uma abordagem de programação linear inteira-mista (PLIM) é utilizada para otimizar um novo ponto de operação quando o desvio é grande e o ponto de operação do despacho é infactível. São apresentadas simulações em oito diferentes cenários de operação da microrrede para análise da atuação do sistema. Além destes, uma simulação de um dia completo é analisada considerando uma microrrede real com intervalos de tempo de atuação de 10 minutos, utilizando os dados dos pontos de operação realizados pela microrrede para o sistema de previsão do próximo ponto. Os resultados mostram que a metodologia utilizada consegue atender a questão das incertezas de geração e demanda, através da categorização dos desvios para que o sistema atue de acordo. Ainda, na simulação do dia inteiro é observada uma redução de custo operacional da microrrede através do controle da taxa de carga e descarga da bateria.

Palavras-chave: Microrredes. Gerenciamento de energia. Tempo real. Fuzzy. Programação linear inteira-mista.

ABSTRACT

Nowadays, the pursue for energy efficiency and technologies that makes it possible is a reality in almost all parts of society. Microgrids arise as a technological alternative to address this issue, improving the efficiency, resilience, and reliability of the electrical system, due to the presence of distributed energy resources, such as photovoltaic and wind generators as well as battery energy storage systems. However, their presence adds complexity to the operation of these electrical systems, especially due to the intermittent characteristic of generation, as well as the uncertainty in demand, creating new challenges related to energy management. Thus, this dissertation proposes a real time energy management system for microgrids connected to the wider electrical grid and in island mode, using an approach with artificial intelligence techniques to evaluate the deviation between dispatch (carried out in the day before for the day-ahead) and real-time (happening today). Artificial neural network techniques are used to forecast demand and generation at the next microgrid operating point (adopted as a 10-minute interval) based on historical data. An approach to calculate the deviation between dispatch and real time in three dimensions of analysis is presented, considering the photovoltaic energy generation, load curve and batteries state of charge (SOC). The system categorizes the deviation into three fuzzy sets (small, medium, and large) and acts accordingly. A decision support system with a fuzzy inference system is used to adjust the next operating point, and a mixed-integer linear programming (MILP) approach is used to optimize a new operating point when the deviation is large, and the operating point of dispatch is unfeasible. Simulations in eight different microgrid operation scenarios are presented to analyze the system performance. In addition to these, a full-day simulation is analyzed considering a real microgrid with operating time 10-minutes intervals, using data from the operating points performed by the microgrid for the next operation point forecasting system. The results shows that the methodology used manages to address the issue of generation and demand uncertainties, through the categorization of deviations so that the system acts accordingly. Also, in the full-day simulation, a reduction in the operating cost of the microgrid is observed through the control of the charge and discharge rate of the battery.

Keywords: Microgrids; Energy management; Real time; Fuzzy; Mixed-integer linear programming.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - POTÊNCIA INSTALADA POR FONTE DE ENERGIA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDOS	16
FIGURA 2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE	23
FIGURA 3 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	24
FIGURA 4 - EXEMPLO DE ESTRATÉGIA DE RESPOSTA DA DEMANDA - DESLOCAMENTO DE CARGA.....	27
FIGURA 5 - NÍVEL HIERÁRQUIVO DE UMA MICRORREDE	28
FIGURA 6 - TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO PARA APLICAÇÕES EM MICRORREDES	31
FIGURA 7 - ARQUITETURA DE UMA RNA.....	34
FIGURA 8 - EXEMPLO DE CONJUNTO FUZZY	35
FIGURA 9 - CURVA DE CARGA BASE PARA DIAS ÚTEIS.....	51
FIGURA 10 - CURVA DE CARGA BASE PARA SÁBADOS	51
FIGURA 11 - CURVA DE CARGA BASE PARA DOMINGOS E FERIADOS	51
FIGURA 12 – DESPACHO DO DIA PARA O DIA SEGUINTE	54
FIGURA 13 - DESPACHO PARA O DIA SEGUINTE – PERÍODO DE BAIXA DEMANDA ENERGÉTICA.	54
FIGURA 14 - DESPACHO DO DIA PARA O DIA SEGUINTE – PERÍODO COM GERAÇÃO DE ENERGIA.	55
FIGURA 15 - DESPACHO DO DIA PARA O DIA SEGUINTE – PERÍODO NOTURNO.....	55
FIGURA 16 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA PARA MICRORREDES	56
FIGURA 17 - FLUXOGRAMA DO PREVISOR DO PRÓXIMO PONTO DE OPERAÇÃO.....	57
FIGURA 18 - FLUXOGRAMA COM DESTAQUE AS ETAPAS DO SISTEMA DE APOIO A DECISÃO	61
FIGURA 19 - EXEMPLO GRÁFICO DESVIO 3D	62
FIGURA 20 - SISTEMA FUZZY DE AJUSTE	63

FIGURA 21 - TRÊS DIAS ÚTEIS CONSECUTIVOS GERADOS PELO EMULADOR DE CARGA	68
FIGURA 22 - CURVA DE CARGA GERADA PELA RNA PARA OS TRÊS DIAS-TIPO	69
FIGURA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE CURVA DE CARGA EMULADA E CURVA DE CARGA GERADA PELA RNA	70
FIGURA 24 - COMPARAÇÃO ENTRE IRRADIAÇÃO BASE E IRRADIAÇÃO PREVISTA	71
FIGURA 25 - PANORAMA DOS CENÁRIOS 1 A 4 SIMULADOS	73
FIGURA 26 - CENÁRIO 1: DESVIO PEQUENO	74
FIGURA 27 - CENÁRIO 2: AJUTE MÉDIO COM ATUAÇÃO NO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	75
FIGURA 28 - CENÁRIO 3: AJUSTE MÉDIO COM ALTERAÇÃO NO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO E CORTE DE CARGAS CONTROLÁVEIS	76
FIGURA 29 - CENÁRIO 4: SEM DESVIO	77
FIGURA 30 - PANORAMA DOS CENÁRIOS DE 5 A 8.....	78
FIGURA 31 - PONTOS DE OPERAÇÃO COM DESVIO PEQUENO	79
FIGURA 32 - PONTOS DE OPERAÇÃO COM DESVIO MÉDIO	80
FIGURA 33 - PONTOS DE OPERAÇÃO COM DESVIO GRANDE.....	80
FIGURA 34 - BALANÇO ENERGÉTICO DO PONTO DE OPERAÇÃO REALIZADO PELA MICRORREDE.....	81
FIGURA 35 - BALANÇO ENERGÉTICO DO PONTO DE OPERAÇÃO REALIZADO PELA MICRORREDE – PERÍODO DE BAIXA DEMANDA ENERGÉTICA.....	82
FIGURA 36 - BALANÇO ENERGÉTICO DO PONTO DE OPERAÇÃO REALIZADO PELA MICRORREDE – PERÍODO COM GERAÇÃO DE ENERGIA PV.	82
FIGURA 37 - BALANÇO ENERGÉTICO DO PONTO DE OPERAÇÃO REALIZADO PELA MICRORREDE – PERÍODO NOTURNO.....	82
FIGURA 38 - COMPARAÇÃO – DESVIO PEQUENO. (a) PONTOS DE OPERAÇÃO DO DESPACHO PARA O DIA SEGUINTE; (b) PONTOS DE OPERAÇÃO REALIZADOS.	83

FIGURA 39 - COMPARAÇÃO – DESVIO MÉDIO. (a) PONTOS DE OPERAÇÃO DO DESPACHO PARA O DIA SEGUINTE; (b) PONTOS DE OPERAÇÃO REALIZADOS.	84
FIGURA 40 - COMPARAÇÃO – DESVIO GRANDE. (a) PONTOS DE OPERAÇÃO DO DESPACHO PARA O DIA SEGUINTE; (b) PONTOS DE OPERAÇÃO REALIZADOS.	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PALAVRAS-CHAVE UTILIZADAS PARA ELABORAÇÃO DA LISTA INICIAL	39
TABELA 2 - VISÃO PANORÂMICA DA REVISÃO DE LITERATURA	47
TABELA 3 - VALORES DE CONSUMO MENSAL UTILIZADOS PARA EMULAÇÃO DE CARGA	52
TABELA 4 - SAÍDAS DEFFUZIFFICADAS PARA O AJUSTE DE SOC	64
TABELA 5 - SAÍDAS DEFFUZIFFICADAS PARA CARGAS CONTROLÁVEIS.....	65
TABELA 6 - CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
CGH	- Centrais Geradoras Hidrelétrica
CAMC	- <i>Central Autonomous Management System</i>
DER	- <i>Distributed Energy Resources</i>
DES	- <i>Distributed Energy Storage</i>
DG	- <i>Distributed Generators</i>
DES	- <i>Distributed Energy Storage</i>
DMS	- <i>Distribution Management System</i>
DSM	- <i>Demand Side Management</i>
DR	- <i>Demand Reponse</i>
EMS	- <i>Energy Management System</i>
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
GLD	- Gerenciamento pelo Lado da Demanda
G2V	- <i>Grid to Vehicle</i>
IEA	- <i>International Energy Agency</i>
LC	- <i>Load Controllers</i>
MGCC	- <i>Microgrid Central Controller</i>
UTE	- Usina Termelétrica
V2G	- <i>Vehicle to Grid</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 MICRORREDES.....	20
2.2 TECNOLOGIAS DE MICRORREDES.....	22
2.2.1 Sistema Fotovoltaico.....	22
2.2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia com baterias.....	24
2.2.3 Resposta da Demanda.....	25
2.3 SISTEMA DE CONTROLE DE UMA MICRORREDE.....	27
2.4 SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA PARA MICRORREDES.....	29
2.5 CAMADA DE COMUNICAÇÃO – MICRORREDES.....	30
2.6 PREVISÃO DE SÉRIES TEMPORAIS.....	32
2.6.1 Redes Neurais Artificiais.....	32
2.7 SISTEMAS DE APOIO A DECISÃO.....	34
2.8 SISTEMAS DE OTIMIZAÇÃO.....	36
2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	37
3 REVISÃO DA LITERATURA	38
3.1 PROCESSO DE SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO.....	38
3.2 ANÁLISE DA LITERATURA.....	40
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA.....	45
4 MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1 MATERIAIS.....	50
4.1.1 Despacho para o dia seguinte.....	53
4.2 MÉTODOS.....	55
4.2.1 Previsor do próximo ponto de operação.....	56
4.2.2 Sistema de Apoio a Decisão (SAD).....	60
4.2.3 Sistema de Otimização para Ponto de Operação.....	65
5 TESTES E ANÁLISES DE RESULTADOS	68
5.1 PREVISOR DO PRÓXIMO PONTO DE OPERAÇÃO.....	68
5.2 SIMULAÇÃO DE PONTOS DE OPERAÇÃO.....	72

5.3 SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO DE UM DIA INTEIRO	78
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	85
REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos vem sendo observado um grande aumento no consumo de energia elétrica ao redor do mundo. Segundo dados da Agência Internacional de Energia (do inglês, *International Energy Agency* – IEA) em 1990 o consumo de eletricidade no mundo foi de aproximadamente 10.900 TWh enquanto no ano de 2017 este valor subiu para 23.696 TWh. Já no Brasil, no mesmo período, o consumo de eletricidade passou de 218 TWh para 528 TWh (IEA, 2020).

Segundo o Balanço Energético Nacional do ano de 2020 (EPE, 2020), o Brasil teve um aumento do consumo de eletricidade de 1,3% no ano de 2019, atingindo o valor de 545,6 TWh. Em contrapartida, a geração de energia elétrica no Brasil apresentou um crescimento de 4,1% dentro do mesmo período, totalizando 626,3 TWh. Segundo o Plano Decenal de Expansão (PDE), na projeção para esta década, é previsto um aumento anual de aproximadamente 3,5%, com a expectativa de um consumo anual de 792 TWh no ano de 2031 (EPE, 2020).

Além do receio quanto ao aumento do consumo, ainda existe a preocupação quanto ao impacto ambiental gerado para atender esta demanda, abrindo espaço para as fontes renováveis de energia, em especial a eólica e a fotovoltaica. Nos últimos anos vem sendo percebido um aumento expressivo da contribuição destas fontes de energia para o suprimento da demanda, contribuindo em 10,5% do total da oferta interna de energia nacional, sendo 9,0% referente a energia eólica (EPE, 2020).

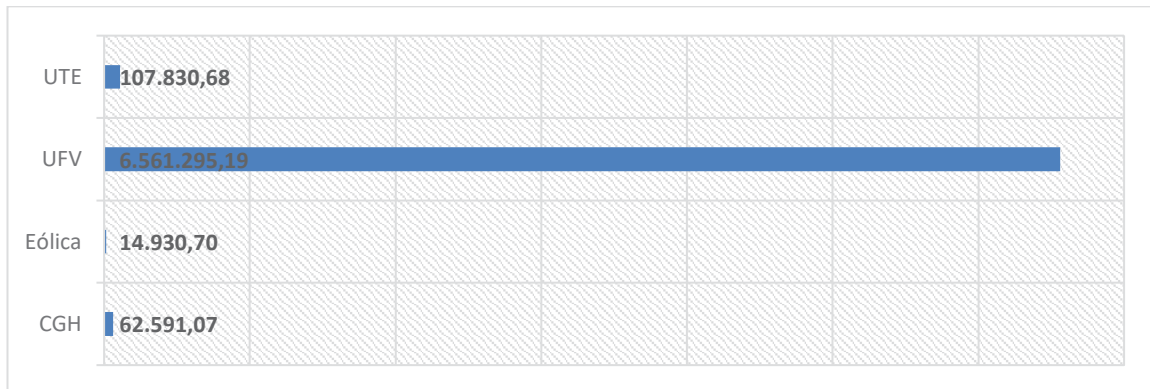
Em um sistema tradicional, a geração de energia se dá de forma centralizada, ou seja, a energia é gerada em grandes centrais de energia e, usualmente, distantes dos centros de carga. Porém, fontes de energia como a eólica e a solar possibilitam que a geração esteja bem próxima aos centros de carga. Este conceito é chamado de geração distribuída.

De forma a incentivar a geração distribuída, a ANEEL regulamentou um sistema de créditos de energia através da Resolução Normativa nº 482 de 2012, posteriormente complementada pela REN 687 de 2015. Nestas resoluções constam também as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração aos sistemas de distribuição de energia.

Segundo a ANEEL (2020) a geração distribuída no país se dá basicamente através de geração fotovoltaica, representado por um total de 97,25%, seguido das Centrais Geradoras Termelétricas que possuem uma representatividade de 1,60%. A

FIGURA 1 mostra como é esta distribuição em números absolutos de potência instalada, dados em kW. Os dados são de agosto de 2021.

FIGURA 1 - POTÊNCIA INSTALADA POR FONTE DE ENERGIA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDOS



Fonte: Adaptado de ANEEL (2020) mudar ano da referência

Neste contexto, existe um ambiente favorável para a disseminação das microrredes (do inglês, *microgrid*) que pode ser definida como sendo um sistema elétrico de distribuição com limites elétricos bem definidos e que possua cargas (controláveis ou não), geração de energia independentes e que possa funcionar tanto conectado ao sistema de distribuição da concessionária como de forma ilhada.

Com estas gerações de energia de forma distribuída além de sua característica variável, o sistema clássico de gerenciamento do atendimento de energia, realizado único e exclusivamente pela concessionária, enfrenta um cenário mais desafiador. Cabe agora à concessionária influenciar o consumidor a mudar o seu perfil de carga, seja de forma direta ou indireta. Esta ação é chamada de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD), referindo-se ao planejamento, a implementação, ao monitoramento de ações que possam influenciar a maneira de uso de energia elétrica dos consumidores de forma a modificar a curva de carga da maneira desejada.

De forma direta, a concessionária pode determinar quais cargas devem ser reduzidas e/ou interrompidas conforme um contrato com o consumidor. De forma indireta, o consumidor pode remanejar a sua demanda devido a um incentivo no preço da energia oferecido pela concessionária (CUNHA, 2016).

Para auxiliar o consumidor no gerenciamento destas, faz-se necessário um sistema de gerenciamento de energia (do inglês, *energy management system* – EMS) que fornece as funcionalidades necessárias para a operação efetivas das instalações

elétricas de geração e transmissão de energia, garantindo a segurança necessária no fornecimento de energia a um custo mínimo. Segundo Zia (2018), o EMS em uma microrrede segue estes pontos mencionados, consistindo em módulos que permitem a decisão de estratégias a serem tomadas a fim de atingir um certo objetivo.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo geral desenvolver um sistema de gerenciamento de energia em tempo real para microrredes, levando em consideração aspectos técnicos e econômicos.

Para o desenvolvimento desta, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Emular dados de carga para um ano a partir de curvas de carga reais de três dias-tipo;
- Avaliar dados do despacho para o dia-seguinte;
- Desenvolver previsor de próximo ponto de operação (PPO) em $t+1$;
- Propor sistema de cálculo de desvios entre previsto e tempo real para tomada de decisão;
- Desenvolver sistema de tomada de decisão para realizar ajustes no ponto de operação previsto;
- Desenvolver sistema de otimização utilizando conceitos de programação linear inteira mista para otimização de novo ponto de operação visando o menor custo;
- Implementar em ferramenta computacional (MATLAB) o modelo matemático do sistema;
- Analisar e validar os resultados obtidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do exposto, é possível perceber que o sistema de energia elétrica no Brasil está cada vez mais seguindo para uma forma distribuída, visto as diversas tecnologias que estão surgindo facilitando a implementação da geração distribuída e, por consequência, das microrredes. Porém, também é possível verificar uma forte correlação entre as microrredes e as fontes renováveis de energia, o que torna estes

sistemas de geração vulneráveis à variação de fatores climáticos como a velocidade do vento e a irradiância solar, tornando estas fontes de energia não despacháveis.

Aliadas a um sistema de armazenamento de energia, estas fontes podem ser consideradas despacháveis, reforçando a necessidade de uma microrrede possuir um sistema como estes. Assim, a energia que é gerada pode ser armazenada em baterias para que possa ser utilizada posteriormente para resolver algum problema de contingência interna ou externa a microrrede.

Um outro reflexo da característica variável destas fontes de energia: pode haver uma divergência entre o que foi planejado para o despacho de uma microrrede um dia antes e o que de fato está acontecendo em tempo real. Bastaria um período nublado não previsto no dia anterior para inviabilizar todo o planejamento, tornando o despacho não factível. Portanto, faz-se necessária alguma ferramenta que possa estabelecer esta relação e realizar ajustes quando necessário.

Assim, é importante que um sistema de gerenciamento seja desenvolvido pensando nas peculiaridades da microrrede, atendendo as suas peculiaridades de geração e armazenamento de energia, observando seus aspectos de cargas controláveis ou não, fazendo-as atender aos possíveis programas de incentivo da concessionária de energia. Por fim, uma microrrede necessita de um sistema de gerenciamento de energia que tenha sido concebido a partir de sua realidade, levando em consideração todos os detalhes que a diferenciam de outros sistemas elétricos.

Dentro deste contexto se insere esta dissertação, que tem por principal objetivo desenvolver um sistema de gerenciamento de energia para microrredes, analisando e levando em consideração todos estes aspectos, buscando um atendimento da demanda energética da melhor forma possível, respeitando as restrições tanto da microrrede quanto as do sistema de distribuição de energia.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O presente capítulo apresenta a introdução do trabalho, contextualizando-o e apresentando os seus objetivos. Além disso, é apresentada uma justificativa para a elaboração deste trabalho, evidenciando sua importância e contribuição.

No capítulo 2 são apresentados os principais conceitos teóricos a respeito deste tema. São abordados os principais temas a respeito de microrredes e que

tangem os objetivos deste trabalho. Além disso, são apresentados os conceitos de modelos matemáticos que serão utilizados no desenvolvimento do sistema de gerenciamento.

No capítulo 3 está descrita a revisão de literatura, demonstrando a forma sistemática que foi utilizada para realizar o levantamento do estado da arte do tema, apresentando os resultados deste levantamento, compondo o portfólio bibliográfico. Com isso, é realizada uma discussão sobre os principais pontos encontrados nestes trabalhos.

No capítulo 4 são apresentados os materiais utilizados para execução deste trabalho, com ênfase nos dados utilizados e nas ferramentas que foram utilizadas. Os métodos também são definidos neste capítulo, consistindo em como os dados e ferramentas utilizados serão utilizados para atingir os objetivos estabelecidos neste trabalho.

No capítulo 5 são apresentados os resultados encontrados após as simulações, bem como realizada uma análise e discussão sobre estas.

No capítulo 6 é apresentada as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo expor os conteúdos dos principais temas que cercam o tema desta dissertação. Ao final do capítulo, são feitas considerações de como relacionar estes conteúdos com o desenvolvimento do trabalho.

2.1 MICRORREDES

Segundo o grupo de pesquisa WG C6.22 da CIGRÉ (MARNAY et al., 2015) uma microrrede é um sistema elétrico de distribuição contendo cargas e recursos de energia distribuídos e que pode ser operada de forma controlada e coordenada tanto conectada à rede de distribuição quanto de forma ilhada. Além disso, uma microrrede possui limites elétricos muito bem definidos e atua como entidade única com relação a rede (TON e SMITH, 2012).

Analisando esta definição, para que um sistema elétrico seja definido como uma microrrede, devem ser atendidos três requisitos básicos: possuir cargas e recursos de energia distribuídos; deve ser controlável; e pode ser operada tanto em modo ilhado quanto conectada ao sistema de distribuição de energia. Além disso, uma microrrede deve possuir recursos energéticos distribuídos (do inglês, *Distributed Energy Resources* - DER) que a caracterizam, sendo eles o sistema de geração distribuído, o sistema de armazenamento de energia e as cargas controláveis (MARNAY et al., 2015).

Desta forma, podemos dizer que uma microrrede pode atuar de forma distinta, a depender da localização e dos objetivos definidos no momento de sua implementação. Quando conectados ao sistema de distribuição, estas podem atuar gerenciando os seus DERs de forma a melhorar a confiabilidade e qualidade da energia fornecida, bem como buscar uma otimização dos seus sistemas de armazenamento de energia na reduzindo assim os custos globais com energia elétrica. Ainda, uma microrrede pode ser concebida para atuar somente de forma ilhada e estar inserida em uma localização remota na qual o fornecimento de energia tradicional encontra dificuldades de atendimento.

Como mencionado anteriormente, uma microrrede precisa possuir um sistema de geração de energia, favorecendo assim a geração distribuída, reduzindo a distância entre o local de geração de energia e onde ela é consumida. Os benefícios

desta combinação são conhecidos e vastos na sua abrangência, como por exemplo o aumento da eficiência energética, ofertando uma redução de custo energético para o consumidor, postergando investimentos para a concessionária de energia e, ainda reduzindo os impactos ambientais causados pelo sistema elétrico (MARNAY et al., 2015; TON e SMITH, 2012).

Com isso, as microrredes encontram um ambiente favorável para sua proliferação na sociedade atual devido ao crescente aumento do consumo de energia elétrica e no surgimento de ações e estratégias que visam o incentivo para que o consumidor mude seus hábitos com relação ao seu uso. Dentre estas, um destaque a ser mencionado é o gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) que consiste em ações por parte da concessionária para que o consumidor gerencie e modifique seu perfil de consumo (PALENSKY e DIETRICH, 2011). Na seção 2.2.3 este tema é abordado com mais detalhes.

Quanto a sua composição, uma microrrede é constituída de DERs que formam uma entidade elétrica única que tem por objetivo atender as demandas elétricas de um conjunto de cargas elétricas contidas nela no menor custo possível, respeitando as restrições da rede elétrica (Gárate et al., 2014). Estes recursos da microrrede podem ser classificados em dois grupos distintos, sendo eles os geradores distribuídos (do inglês, *distributed generators* – DG) e os sistemas de armazenamento de energia (do inglês, *distributed energy storage* – DES).

Os geradores distribuídos são responsáveis pela geração de energia na microrrede, estes podem ser de fontes renováveis ou não, aproveitando os recursos energéticos de maior disponibilidade da região de implementação. Usualmente são implementados com fontes de energia renováveis, como a eólica e a solar. O grande problema destas é que devido a sua dependência de fatores climáticos são consideradas fontes variáveis de energia, tornando-as não-despacháveis. Este grande problema para o gerenciamento do sistema é superado com a utilização de DES.

Os DES são compostos de equipamentos e dispositivos capazes de armazenar energia, como por exemplo o sistema de armazenamento com baterias. Devido a ser facilmente gerenciável, é possível utilizar estes sistemas para tornar a geração de energia não-despachável em despachável. A energia gerada é armazenada neste sistema e, por causa disso, é possível prever uma quantidade de energia que pode ser fornecida às cargas elétricas em um dado intervalo de tempo,

sem preocupações quanto a não ser possível atender a demanda devido à geração de energia ter sido inferior àquela prevista para o período.

Além disso, o DES possibilita uma maior penetração da microrrede em relação a resposta da demanda. Com um gerenciamento da energia contida nele, é possível desligar cargas que estão sendo atendidas pela rede elétrica da concessionária e, se for preciso, atendê-las com a reserva de energia contida nele.

São diversas as tecnologias atualmente que podem ser implementadas nas microrredes a fim de executar estas funções. As principais são abordadas na próxima seção.

2.2 TECNOLOGIAS DE MICRORREDES

As microrredes são sistemas integrados em que os DER compõem uma rede que alimentam diversas cargas. Estes dois elementos compõem a estrutura básica de uma microrrede. Os DER são subdivididos em geradores distribuídos e sistemas de armazenamento, enquanto as cargas podem ser classificadas como controláveis ou não (GÁRATE et al., 2014).

Dentre os sistemas de geração disponíveis no mercado, o sistema fotovoltaico tem se destacado, especialmente devido à natureza de sua geração de energia ser renovável e sustentável. Porém, ela é considerada uma geração não despachável por depender das condições climáticas e de períodos de irradiação solar considerável para seu funcionamento. Ou seja, não existe uma certeza dos momentos de geração. Porém, com controles adequados aliados a um DES, uma geração não despachável pode comportar-se como uma despachável, dentro de alguns parâmetros de operação pré-estabelecidos (MARNAY et al., 2015).

Diante do apresentado, esta seção objetiva apresentar algumas das tecnologias utilizadas atualmente em microrredes de baixa tensão, demonstrando o funcionamento destas, bem como as vantagens e desvantagens na sua utilização.

2.2.1 Sistema Fotovoltaico

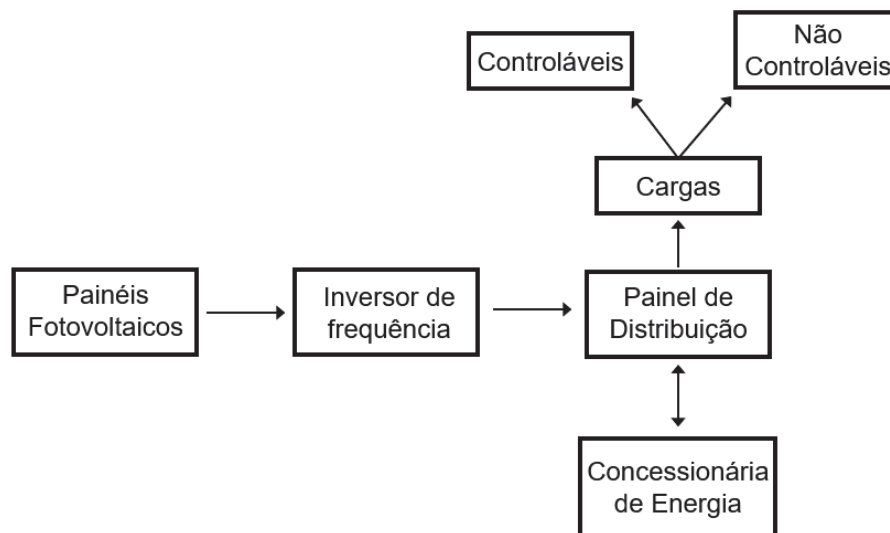
As células solares são dispositivos compostos por duas camadas semicondutoras com propriedades específicas que com a incidência de radiação solar, tem a capacidade de gerar eletricidade. A energia proveniente da luz solar ao

incidir em uma das camadas, fornece energia aos elétrons, estimulando uma troca de elétrons, criando uma corrente elétrica entre elas.

O sistema fotovoltaico tem em sua composição diversos painéis solares fotovoltaicos que, por sua vez, são compostos por diversas células solares, conectadas em série ou em paralelo. Além desses painéis, são necessários diversos outros equipamentos para conduzir, controlar e ainda armazenar a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos. Equipamentos como conversores de energia, banco de baterias, sistema de controle de carga de baterias etc., são escolhidos e utilizados conforme os requisitos funcionais e operacionais do sistema fotovoltaico.

O sistema fotovoltaico mais simples é aquele que funciona somente conectado à rede, reduzindo as possibilidades de funcionamento de forma ilhada. Neste sistema, representado em diagrama de blocos na FIGURA 2, a energia produzida é utilizada para suprir a demanda interna de energia. Porém, quando a energia gerada supera os valores da demanda interna, o excedente de energia é injetado na rede de energia.

FIGURA 2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

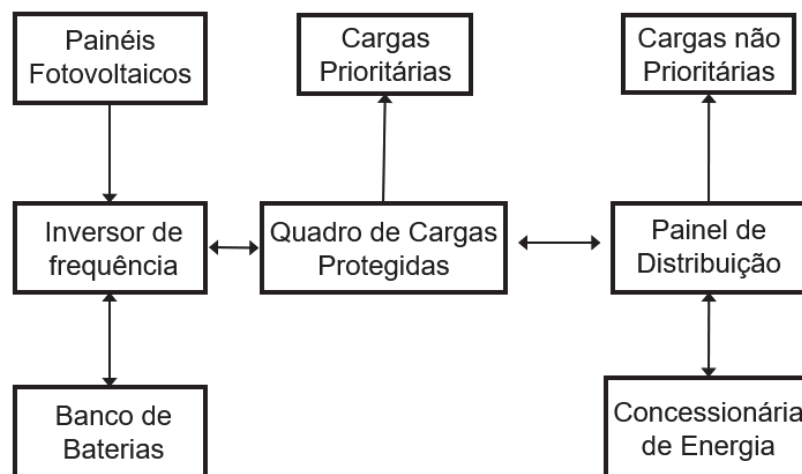


Adaptado de Marnay et al. (2015)

Em um sistema utilizando um sistema de armazenamento de energia (FIGURA 3), o sistema fotovoltaico pode operar tanto em modo conectado à rede quanto em modo ilhado, quando da falta de energia, por exemplo. Em operação normal, este sistema opera como o sistema mais simples, descrito anteriormente, com

a diferença de que o sistema de baterias é mantido totalmente carregado, utilizando a energia gerada pelo sistema fotovoltaico. Em caso de uma falha no fornecimento de energia, o controle do sistema o desconecta da rede principal e o sistema de armazenamento fornece a energia necessária às cargas prioritárias/críticas.

FIGURA 3 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA



Adaptado de Marnay et al. (2015)

A grande diferença entre estas duas arquiteturas é que a primeira não tem autonomia quanto a entrar em modo ilhado a qualquer momento, devido a sua dependência pela geração de energia no momento que está sendo utilizado. Já a segunda, por possuir um sistema de armazenamento, desde que o banco de baterias esteja carregado, ele pode ser utilizado a qualquer momento, independente da hora do dia e condição climática.

2.2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia com baterias

A grande maioria das tecnologias de DG utilizadas em microrredes não conseguem gerar a energia que é requisitada pelas cargas ou até mesmo pela concessionária de energia. A utilização dos DES vem para suprir esta inabilidade. Além disto, estes sistemas podem ser utilizados para melhorar a qualidade da energia e para garantir o fornecimento ininterrupto de energia para cargas sensíveis e/ou críticas (MARNAY et al., 2015).

Além disto, um sistema fotovoltaico usando baterias é capaz de injetar potência reativa e, ainda, gerar uma redução de custos para os seus usuários através de uma combinação de funcionalidades, como a redução do pico e o acúmulo de energia para utilização posterior. Estas ações também podem gerar uma redução de custos na integração dos DER à rede (MARNAY et al., 2015).

Dentre as tecnologias existentes, são consideradas mais promissoras as baterias, os super capacitores e os sistemas de *flywheel* (MARNAY et al., 2015). Estes dois últimos ainda se encontram em fases de pesquisas e desenvolvimento e, portanto, não possuem muitos exemplos de aplicação em microrredes em funcionamento. Já as baterias são uma tecnologia muito bem difundida e utilizada ao redor do mundo.

Uma consideração a ser feita em relação ao uso das baterias é o impacto existente do ciclo de carga e descarga em relação à vida útil destas. Isto se deve ao fato de a bateria ir perdendo suas características elétricas de armazenamento conforme a sua utilização. Como exemplo, a bateria de chumbo ácido tem uma estimativa de uso de algumas centenas de ciclos (MARNAY et al., 2015).

Um sistema de armazenamento de baterias é composto basicamente de um banco de baterias, um sistema de controle de carga, conversor CC-CA, circuito de proteção e um transformador, que tem como função de elevar o nível de tensão aos níveis da rede (GRADY et al., 2012).

2.2.3 Resposta da Demanda

O sistema clássico de gerenciamento do atendimento da demanda de energia é baseado em grandes unidades geradoras e o fornecimento sendo gerenciado da concessionária para o cliente, de forma unidirecional. Devido ao crescente aumento da geração distribuída e das microrredes, esta forma de gerenciamento torna-se cada vez mais ineficiente e trabalhosa. Uma forma diferente para isto é o Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD), que consiste em ações por parte da concessionária de energia de forma a incentivar o consumidor a modificar seu perfil de consumo de energia elétrica.

A ideia por trás do GLD é que a demanda deixe de ser controlada pela concessionária e passe a ser controlada pelo consumidor, envolvendo desde a busca por uma melhor eficiência energética, como a troca de equipamentos por outros mais

eficientes, até a instalação e implementação de um sistema de gerenciamento de cargas. Em outras palavras, o objetivo do GLD é balancear a demanda com relação ao fornecimento de energia. Dependendo do tempo e como é feita a implementação, o GLD pode ser categorizado da seguinte forma (PALENSKY e DIETRICH, 2011):

- a) Eficiência Energética
- b) Tempo de uso
- c) Resposta da demanda
- d) Reserva girante

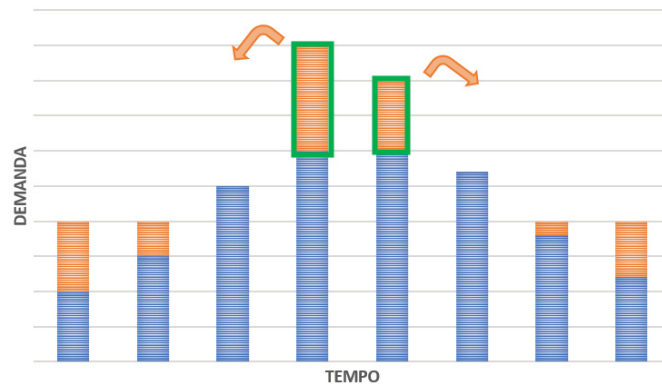
Segundo Han e Piette (2008), a resposta da demanda (RD) é uma estratégia do GLD que tem como princípio a mudança de curto prazo no padrão de consumo de energia por parte do consumidor, tendo como incentivo a variação através da redução do consumo ou até mesmo a reorganização da utilização de uma certa carga controlável, fazendo com que esta opere em um outro horário do dia. Devido à uma microrrede possuir cargas controláveis, esta estratégia é favorecida e está diretamente ligada ao sistema de gerenciamento de energia que irá auxiliar neste contexto.

A implementação da RD pode se dar tanto pelo lado da demanda como pelo lado do fornecimento. A concessionária oferece programas diversos e cabe ao consumidor decidir por utilizar um ou mais programas, sendo classificados em dois tipos distintos: baseada em incentivos ou baseada em taxas variáveis com o tempo. O primeiro consiste em o consumidor receber vantagens financeiras por utilização de energia fora do pico ou permitir que a concessionária controle de forma direta um grupo de cargas do consumidor. O segundo refere-se a redução da demanda por parte do consumidor quando este recebe mensagens de alta nos preços enviado pela concessionária (HAN e PIETTE, 2008).

Na pesquisa de Palesnky e Dietrich (2011) são mencionados alguns exemplos de sucesso de implementação de RD ao redor do mundo, como por exemplo o controle direto de cargas, taxas de interrupção do fornecimento, tarifas por tempo de uso, precificação por pico crítico e precificação em tempo real. Em todos estes programas a concessionária objetiva o alívio na demanda da rede elétrica, seja por causa de um problema contingencial ou por uma requisição de demanda maior que o previsto. Na FIGURA 4 pode-se ver um exemplo de como um deslocamento de carga poderia acontecer, realocando uma demanda prevista para um horário a um outro que

a demanda é menor, buscando um custo menor de energia para o consumidor e para a concessionária.

FIGURA 4 - EXEMPLO DE ESTRATÉGIA DE RESPOSTA DA DEMANDA - DESLOCAMENTO DE CARGA



Fonte: o Autor (2021)

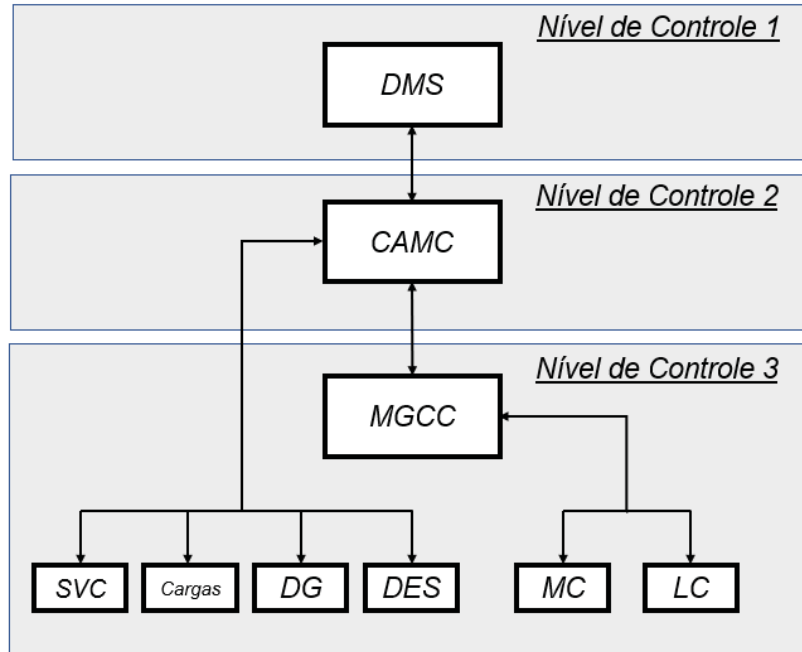
Para uma microrrede, é essencial que haja alguma forma de acompanhar estas variações e ofertas por parte da concessionária a fim de minimizar o seu custo global de energia. Como em uma microrrede sempre haverá cargas controláveis, é de suma importância que esteja previsto em um sistema de gerenciamento possibilidades de controles das cargas controláveis, seja através do desligamento de cargas não-essenciais ou deslocamento de carga.

2.3 SISTEMA DE CONTROLE DE UMA MICRORREDE

O controle de uma microrrede é subdividida em diversos controladores, sejam estes locais ou não, cada um executando uma tarefa distinta de forma a atender o objetivo do usuário e/ou da concessionária. Esta pode ser dividida em 3 níveis distintos. O sistema de gerenciamento de distribuição (do inglês, *distribution management system*, DMS) compõe o primeiro nível. O segundo é composto pelo controlador de gerenciamento central autônomo (do inglês, *central autonomous management controller*, CAMC). Por fim, o terceiro nível é composto especialmente pelo controlador central da microrrede (do inglês, *microgrid central controller*, MGCC). (HATZIARQYRIOU, 2014). Estes três níveis trabalham em conjunto de forma hierárquica para garantir o funcionamento da microrrede, independentemente do

modo de operação deste, conforme pode ser observado na FIGURA 5 (MARNAY et al., 2015).

FIGURA 5 - NÍVEL HIERÁRQUIVO DE UMA MICRORREDE



Adaptado de Marnay et al. (2015)

A microrrede é controlada e gerenciada pelo MGCC, usualmente encontrado na subestação de distribuição ou estação de transformação da microrrede. O MGCC se comunica com outros controladores que atuam diretamente nas unidades de geração, sendo estes os controladores dos micro geradores (do inglês, *micro-source controllers*, MC) ou atuam no sistema de armazenamento através dos controladores de carga (do inglês, *load controllers*, LC) (MARNAY et al., 2015).

O DMS é o sistema que tem a função de controlar todo o sistema de distribuição. É este sistema que passará informação de possíveis falhas ou necessidades da rede de distribuição para o CAMC. Este último tem a função de fazer o intermédio entre os outros dois níveis. Com as informações recebidas, este controlador comunica-se com o MGCC para que este atue diretamente nos controladores individuais da microrrede de forma a atender os requisitos do DMS (MARNAY et al., 2015).

2.4 SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA PARA MICRORREDES

Segundo a IEC 61970-301:2003 o sistema de gerenciamento de energia (do inglês, *Energy Management System - EMS*) é um sistema de computador constituído por uma plataforma de *software* que fornece serviços básicos de suporte e um conjunto de aplicações que fornecem a funcionalidade necessária para a operação efetiva das instalações elétricas de geração e transmissão, de modo a garantir a segurança adequada no fornecimento de energia a um custo mínimo. O EMS de uma microrrede (MGCC) também segue esta mesma definição, consistindo em módulos que permitem a decisão de estratégias a serem tomadas (ZIA et al., 2018).

Dentre as funções que um MGCC pode desempenhar, podem ser destacados o monitoramento, análise e previsão dos seguintes parâmetros (ZIA et al., 2018):

- Geração de energia;
- Consumo de energia;
- Custo de energia;
- Fatores meteorológicos;
- Armazenamento de energia.

Estas funções auxiliam na otimização da operação da microrrede, atendendo os requisitos técnicos desta.

Quanto à arquitetura do MGCC, este pode ser dividido entre modelo centralizado e descentralizado. No primeiro modelo, o MGCC em posse de todas as informações coletadas, analisá-las a fim de encontrar a melhor solução de otimização para a operação. Após este processamento, envia as decisões a serem tomadas para os controladores locais (do inglês, *Local Controllers – LC*) executarem. Em um modelo descentralizado, os LC auxiliam na tomada de decisão, recebendo informações não processadas do MGCC para que possam propor uma previsão de geração e consumo local. Após esta etapa, estas previsões são enviadas de volta ao MGCC que irá propor um agendamento otimizado e enviar de volta aos LC. Porém, neste modelo, os LC podem não aceitar a primeira proposta, barganhando com o sistema de gerenciamento da microrrede até que os objetivos globais e locais sejam atingidos (ZIA et al., 2018).

Ainda, o MGCC pode atuar com objetivos da microrrede em prioridade máxima, ou seja, ele pode executar as tarefas programadas mesmo que estas ações

não estejam de acordo com os objetivos globais que foram recebidos dos níveis hierárquicos superiores.

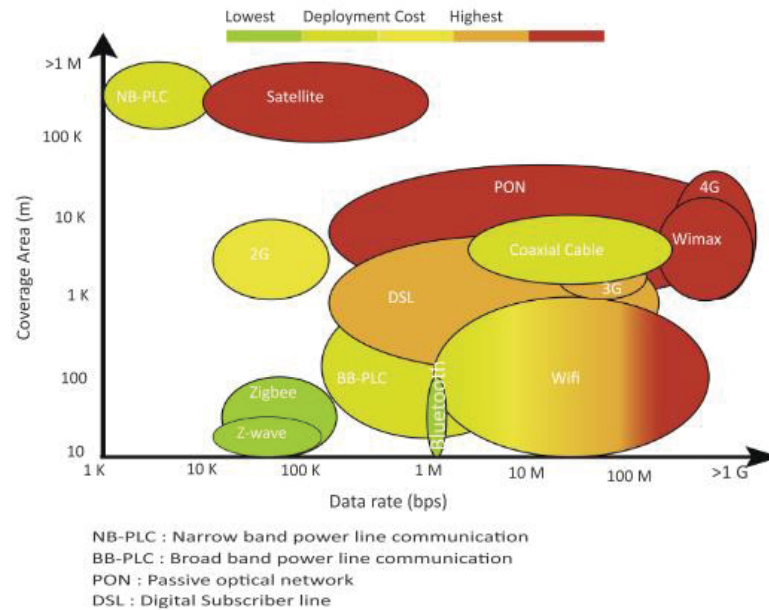
Quanto a sua atuação temporal, um sistema de gerenciamento pode ser classificado como um sistema de gerenciamento em tempo real ou não. Ainda, este pode ser de dois estágios, tendo atuação tanto em tempo real quanto em um período anterior a este, usualmente no dia anterior. Para estes sistemas de dois estágios, sua atuação basicamente consiste no estágio em tempo real corrigir possíveis desvios que possa existir entre o que foi previsto no dia anterior e o que está acontecendo em tempo real. Na seção 3.2 deste trabalho são discutidas algumas abordagens implementadas tanto em sistemas de dois estágios quanto aqueles de estágio único.

2.5 CAMADA DE COMUNICAÇÃO – MICRORREDES

Com a possível inserção de um sistema de geração dentro de uma microrrede e a integração desta com os demais REDs da microrrede, o uso de um sistema de comunicação é fundamental para que seja possível estabelecer a comunicação entre os componentes desta visando otimizar o processo internamente (ZIA et al., 2018). Diversas são as tecnologias que poderiam executar esta função, porém o custo de implementação aliados as limitações técnicas fazem com que sejam utilizadas algumas tecnologias em detrimento de outras. De forma geral, as tecnologias podem ser diferenciadas entre comunicação cabeada ou sem fio (MARNAY et al., 2015).

Segundo Zia et al. (2018) aspectos como taxa de transferência área de cobertura, qualidade do serviço, confiabilidade, latência e consumo de energia, são levados em consideração na escolha do sistema de comunicação a ser utilizado em cada caso. Na FIGURA 6 é apresentado um comparativo entre as diversas tecnologias existentes, levando em consideração a área de cobertura e a taxa de transferência.

FIGURA 6 - TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO PARA APLICAÇÕES EM MICRORREDES



Fonte: ZIA et al. (2018).

Para os sistemas cabeados (DSL, PLC, fibra ótica, por exemplo) é observada uma alta taxa de transferência aliado com uma grande confiabilidade, porém o custo de implementação é muito alto quando comparados com os sistemas sem fio. Nestes sistemas, como *Zigbee*, GSM e *wifi*, a sua implementação é relativamente fácil, o que justifica o menor custo de instalação. Porém, estas tecnologias têm uma confiabilidade reduzida, devido a interferências no sinal, e ainda uma baixa taxa de transferência. Por fim, com o desenvolvimento de novas tecnologias para microrredes, maior é o número de sensores, medidores e controladores que devem ser integrados ao sistema, favorecendo a implementação de sistemas de comunicação sem fio (ZIA et al., 2018).

Segundo Otto (2019), a camada de comunicação de uma microrrede é de suma importância pois é através dela que haverá a comunicação entre os REDs e os controladores da microrrede, para que assim seja possível ajustar e definir pontos de operação, bem como enviar informações sobre desconexão de cargas não controláveis. Por esta razão, é importante a escolha de um protocolo de comunicação que traga confiabilidade e, ainda, atenda às necessidades da microrrede.

Um protocolo de comunicação é um conjunto de regras e procedimentos que definem como os equipamento inseridos dentro da rede irão se comunicar. Dentre os protocolos, podem ser destacados o TCP/IP, o Modbus e o DNP3. Na literatura

encontra-se uma vasta quantidade de informações sobre estes protocolos, trazendo vantagens e desvantagens de cada um deles. Como este tema foge um pouco dos objetivos deste trabalho, recomenda-se a leitura dos trabalhos de Otto (2019) e Marzal et al. (2018) para maiores detalhes sobre os protocolos de comunicação.

2.6 PREVISÃO DE SÉRIES TEMPORAIS

Diversos são os casos em que se faz necessário prever uma série de dados futuros a partir de uma base de dados, como no caso desta dissertação. Atualmente na literatura é possível encontrar diversos métodos e modelos que podem ser utilizados para a previsão de séries temporais. Dentre elas podemos citar os modelos de Box & Jenkins, como o modelo ARIMA, que já é uma técnica bem difundida e consagrada para este fim. Além desta, a técnica de redes neurais artificiais (RNA) tem sido utilizada para problemas similares.

O modelo ARIMA é uma derivação da língua inglesa referindo-se a “*Auto-Regressive Integrated Moving Average model*”, ou seja, um modelo auto-regressivo integrado de médias móveis. Em outras palavras, este modelo consiste na diferenciação de séries temporais originais a fim de transformá-las em estacionárias e, a partir disto, avaliá-la a partir de funções de erro conhecidas.

A grande dificuldade de utilização deste modelo é a sua maior dificuldade de tratamento da série temporal original para torná-la estacionária e, assim, ser possível utilizá-la para fins de previsão da série temporal. Esta pode ser utilizada tanto para previsão de um ponto como de múltiplos pontos.

Apesar de bem difundida e de entregar um bom resultado, estudos recentes mostram que o modelo ARIMA apresenta uma resposta menos precisa que o modelo de RNA. O estudo comparativo elaborado por Saúde (2018) consiste na comparação dos dois modelos em 27 problemas sedimentados, no qual ela concluiu que sistemas preditivos implementados com RNA resultam em um erro estatístico menor, com 95% de confiança. Diante desta questão, nesta dissertação foi escolhido utilizar a RNA como método para os sistemas preditivos.

2.6.1 Redes Neurais Artificiais

Apesar de os primeiros estudos de redes neurais artificiais (RNA) remeterem há mais de 50 anos atrás, a RNA começou a se popularizar nos anos 1990 devido ao

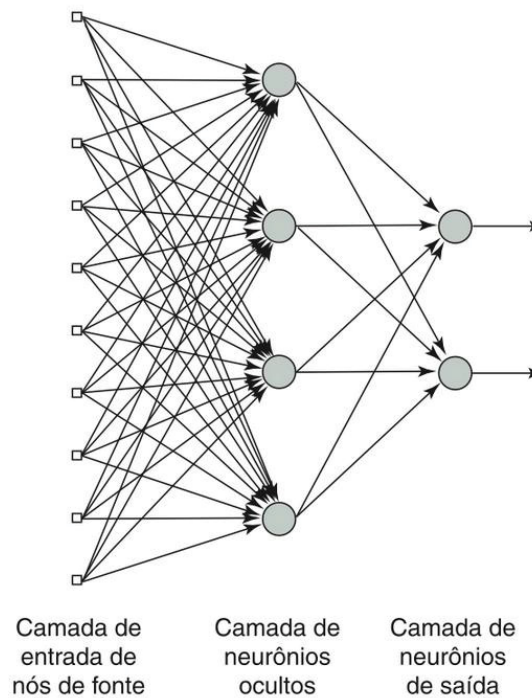
aumento da capacidade dos computadores pessoais. Assim, pesquisadores começaram a utilizar esta metodologia para diversos fins, inclusive para previsão de séries temporais, especialmente devido a sua elevada habilidade em mapear sistemas não-lineares, aprendendo os comportamentos a partir de informações obtidas previamente.

Os modelos de RNA são inspirados no sistema nervoso de seres vivos, mais especificamente em neurônios e na conexão entre eles, devido a sua capacidade de aquisição e manutenção do conhecimento. Portanto, uma RNA é composta por conjuntos de unidades de processamento (neurônios artificiais) que são interligados através de um número de interconexões (sinapses artificiais).

Na técnica usual de uma RNA, primeiramente existe um estágio de treinamento, para posteriormente poder ser utilizada. Na fase de treinamento, a RNA mostra sua capacidade de aprender através dos dados informados e a sua capacidade de generalizar para fornecer respostas aceitáveis para um conjunto de dados desconhecidos. Ou seja, a RNA consegue extrair informações não-explicítas de um conjunto de dados fornecidos.

A arquitetura de uma rede neural consiste basicamente em camadas, sendo estas divididas em três partes: a camada de entrada, responsável pelo recebimento de informações advindas do meio externo; camadas escondidas (ou ocultas) são compostas de neurônios artificiais e são responsáveis de extrair as características do processo; e camada de saída, que também possui neurônios e tem a função de produzir e apresentar os resultados da rede. Na FIGURA 7 pode ser percebida estas relações entre as camadas.

FIGURA 7 - ARQUITETURA DE UMA RNA



Fonte: Haykin (2007)

As principais arquiteturas de RNA, considerando a disposição e interligação dos seus neurônios, bem como a constituição de suas camadas são as redes *feedforward* de camada simples e de múltiplas camadas, redes recorrentes e redes reticuladas. Para maiores detalhes sobre as arquiteturas bem como a diferença entre elas, recomenda-se consulta ao livro base deste tema do autor Simon Haykin, *Redes Neurais* (2007).

2.7 SISTEMAS DE APOIO A DECISÃO

Os SAD (Sistemas de Apoio a Decisão) são sistemas computacionais que auxiliam o decisor a tomar uma decisão através de análise de um certo conjunto de dados. Watson *et. al*, definem SAD como sendo um sistema interativo que fornece ao usuário subsídios para a tomada de decisão, auxiliando assim o processo de tomada de decisão a partir da análise de dados. Ainda, é um sistema interativo, flexível e adaptável.

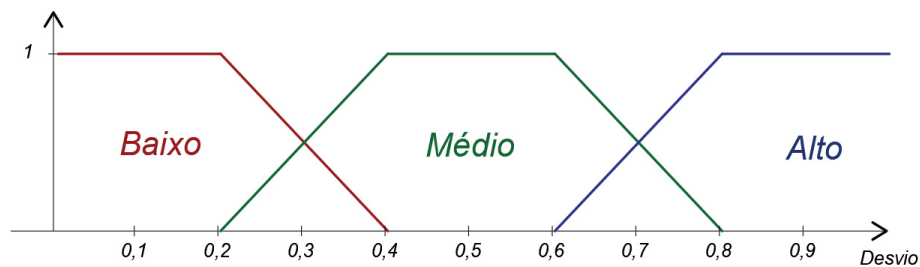
Devido à característica do problema desta dissertação, que trabalha com a lógica clássica apresentada por Aristóteles que consiste em premissas e decisões em

uma lógica binária seria um tanto quanto dispendioso e complexo. A lógica *Fuzzy*, baseada em conjuntos nebulosos, proposta inicialmente por Zadeh (1965), flexibiliza a lógica clássica objetivando formalizar conceitos imprecisos. Para estes conjuntos, é possível valorar conceitos considerados subjetivos, como a sensação de quente e frio, através de graus de pertinência que consistem entre falso e o verdadeiro.

Na lógica *Fuzzy*, a questão de uma proposição ser verdadeira ou falsa não mais é tratada de forma binária, e sim tratada como uma valoração em função do grau de pertinência a um dado conjunto. Com isso, é possível que através da lógica *Fuzzy*, possa existir um sistema que atue com um pensamento similar ao do pensamento humano, processando informações matemáticas em expressões subjetivas, como um desvio baixo, médio ou alto.

Na FIGURA 8 pode ser observado um exemplo definição de conjuntos nebulosos, com as opções de alto, médio e baixo para um certo desvio. Ao invés de ser definido um valor limitante para cada uma dessas, são definidos intervalos que estão atrelados ao seu grau de pertencimento. No exemplo, qualquer valor entre 0,2 e 0,8 poderia ser considerado como sendo um desvio médio.

FIGURA 8 - EXEMPLO DE CONJUNTO FUZZY



Fonte: O Autor (2021)

Por causa das razões acima mencionadas, decidiu-se então que seria utilizado a lógica Fuzzy como método para o sistema de apoio a decisão, facilitando assim a interpretação dos dados. Ainda, com a implementação em conjuntos nebulosos, o tratamento de incertezas torna-se mais assertivo.

2.8 SISTEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Na atualidade, a busca por otimização em processos torna-se cada vez importante, seja essa na busca de maiores lucros ou na redução do impacto ambiental causado por descarte de material desnecessário. Em sistemas de energia não é diferente. Busca-se incessantemente por otimizar os processos, em especial, atender a demanda no menor custo possível atendendo as restrições de todos os envolvidos no processo. Diversos são as metodologias que podem ser aplicadas para este fim, como os métodos heurísticos e a otimização linear.

Um método heurístico consiste em um procedimento que objetiva descobrir uma boa solução em um dado problema, porém não garante encontrar uma solução ótima. Porém, se este método for muito bem estruturado, as chances de que a solução encontrada esteja pelo menos próxima do ótimo é muito grande. Diante desta questão, os métodos heurísticos tendem a ser específicos e circunstancial para cada aplicação, tendo que ser pensado do zero a cada novo problema proposto (HILIER e LIEBERMAN, 2013).

Este panorama mudou com o desenvolvimento da meta-heurística que reúnem certos conceitos que são utilizados para definir métodos heurísticos, os quais podem ser aplicados a um conjunto amplo de problemas distintos realizando pequenas modificações tornando-a adaptável ao problema a ser estudado. Esta metodologia utiliza o que se sabe do problema para que, de forma heurística, explore os espaços de busca com base em uma estratégia objetivando encontrando a solução ótima. Dentre as diversas meta-heurísticas atualmente difundidas cientificamente, podem ser citados os Algoritmos Genéticos, *Simulated Annealing*, Algoritmo de enxame de abelhas, dentre outros (BECCENERI, 2010).

Apesar desta adaptabilidade, robustez e eficácia comprovada e de ser consolidado cientificamente, utilizar meta-heurística para o problema de otimização desta dissertação não é vantajoso pois este exige um trabalho computacional maior, impactando negativamente na velocidade de resposta do sistema de gerenciamento. Por esta razão, optou-se por abordar uma metodologia de programação linear por ser uma estratégia mais simples, de mais rápida implementação e de resposta mais rápida.

A programação linear é reconhecida como um dos maiores avanços do século XX devido aos benefícios que esta trouxe para as indústrias. Esta otimização é de

fácil implementação e apresenta uma resposta rápida, visto que as relações analisadas são basicamente comparação entre valores. Na otimização linear, busca-se um valor máximo ou um valor mínimo com base em variáveis pré-definidas e em restrições que limitam o espaço de buscas da resposta. A grande desvantagem é que a otimização linear, como o nome sugere, não funciona para casos não lineares (HILIER e LIEBERMAN, 2013).

Nesta dissertação, será necessária a otimização para dois fins: minimização de cortes do conjunto de cargas controláveis e, também, para otimização de um novo ponto de operação em caso de as informações de ilhamento não coincidirem. Como nenhum destes casos têm comportamento não linear e são problemas relativamente simples em termos computacionais, a otimização linear será suficiente para o desenvolvimento desta parte do sistema.

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta os conteúdos relacionados ao tema de gerenciamento de energia em microrredes. Foram apresentados os principais conceitos e tecnologias em microrredes, bem como algumas técnicas/modelos matemáticas que integram partes de um sistema de gerenciamento de energia.

Com isso, este capítulo traz informações essenciais para a continuidade do estudo e serve como guia para as tomadas de decisões com relação ao trabalho, que serão novamente abordadas no capítulo 4 desta dissertação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada a revisão de literatura e tecnológica, além de descrever o método utilizado para a escolha dos artigos utilizados nesta revisão.

3.1 PROCESSO DE SELEÇÃO DE PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

A revisão de literatura a respeito de sistemas de gerenciamento de energia para microrredes foi realizada utilizando o método elaborado por Ensslin et al. (2010). Trata-se de uma revisão sistemática do assunto para que a seleção dos artigos sobre o tema de pesquisa seja feita de forma organizada e cuidadosa, aumentando as chances de encontrar os trabalhos mais relevantes para o tema de estudo. Uma pesquisa inicial em uma ferramenta de busca qualquer retorna milhares de resultados. O método proposto por Ensslin consiste em reduzir a quantidade de artigos de alguns milhares de artigos a somente algumas dezenas. Alguns critérios de seleção são utilizados no decorrer do processo a fim de que esta tarefa seja eficiente, visto que os artigos selecionados devem ser aqueles que melhor representam o objetivo de estudo.

O processo consiste em basicamente duas etapas, sendo a primeira uma busca de artigos a partir de palavras-chave selecionadas e o segundo é o processo de filtragem/seleção dos artigos a partir de critérios bem estabelecidos.

Inicialmente são realizadas buscas estruturadas para composição da lista inicial. Assim, foram criados dois eixos distintos, e cada um destes eixos são compostos de palavras-chave. As palavras-chave podem ser somente uma palavra ou uma composição de palavras, como por exemplo, "*distributed energy resources*". Para as pesquisas, foram realizadas combinações entre as palavras-chave, conforme mostra a TABELA 1.

TABELA 1 – PALAVRAS-CHAVE UTILIZADAS PARA ELABORAÇÃO DA LISTA INICIAL

Eixo 1	Eixo 2
<i>Microgrid</i>	“ <i>Energy management</i> ”
“ <i>distributed energy resources</i> ”	“ <i>real time</i> ”

Fonte: o Autor (2020)

O processo de busca da literatura foi realizado utilizando o *software Publish or Perish* (PoP) versão 7, o qual utiliza a base de dados do *Google Scholar*. Este *software* permite a busca utilizando mais de uma palavra-chave, retornando um número máximo de 1000 trabalhos para cada pesquisa, sendo apresentados aqueles com maior quantidade de citações. Foram realizadas 4 buscas, totalizando 4000 artigos.

Após este processo, foram escolhidos 5 artigos aleatoriamente para verificação de aderência da pesquisa ao tema deste estudo. Após análise, foi verificado que todos os artigos têm aderência com o tema da pesquisa, não sendo necessária a modificação ou inserção de novas palavras-chave.

Sem a necessidade de modificação nos termos de pesquisa, iniciou-se o processo de seleção. Primeiramente, utilizando a o *software* de gerenciamento de referências *Mendeley*, foram retirados todos os artigos redundantes entre as listas de pesquisa inicial, resultando em uma nova lista de 2971 artigos.

Com esta lista é iniciado o processo de seleção de artigos, sendo o primeiro critério de seleção é a seleção por editora, escolhendo aquelas com maior relevância, a saber, IEEE, Elsevier e Springer. Como resultado, o número de artigos foi reduzido para 2323 artigos.

Como segundo critério, foram escolhidos somente os artigos que tivessem alguma relação com o tema, obtendo uma nova lista de 190 artigos. Após isto, foi estabelecido um critério de representatividade destes artigos, selecionando somente os artigos que tiveram mais do que 10 citações por ano em média desde sua publicação, reduzindo a lista para 63 artigos.

Em posse desta lista, foi realizada a leitura do *abstract* destes selecionados, a fim de descartar aqueles que não tem aderência ao tema deste estudo. Após a leitura, findou-se com uma lista de 16 artigos com bastante relevância para o trabalho, sendo estes aqueles que serão utilizados para a revisão de literatura deste estudo.

3.2 ANÁLISE DA LITERATURA

O trabalho de Stluka et al. (2011) apresenta uma abordagem de otimização para gerenciamento de energia em microrredes tomando como premissas tanto as decisões do lado do fornecimento como do lado da demanda. É realizada a formulação do problema para cada uma das situações em separado, sendo apresentada a mudança que cada incorporação na microrrede traz no modelo de gerenciamento. É utilizado o *software* de gerenciamento de energia VERA (*Versatile Energy Resource Allocation*) para encontrar a solução do problema. A fim de testar o modelo proposto, foi implementado este sistema em uma microrrede de um hospital na Holanda, obtendo redução anuais em custos com eletricidade entre 6 e 12%.

Em Jiang et al. (2013) é abordada uma estratégia de duas camadas, visando o atendimento tanto dos objetivos econômicos como técnicos. A primeira camada é chamada de camada de agendamento (*schedule*), que visa analisar a microrrede e tomar decisões visando maximizar as receitas da microrrede, reduzindo os custos operacionais dela. A segunda camada é a de despacho, que toma como instrução inicial aquela estabelecida pela camada de agendamento, porém avalia se existem divergências entre os dados da previsão utilizados e os dados de tempo real, em especial relacionado aos dados de geração de energia não despachável e das cargas da microrrede. Em caso de divergência, a camada de despacho faz as alterações necessárias e busca atender também aspectos técnicos também como a correção dos níveis de tensão na microrrede. Além disto, o sistema prevê uma atuação diferenciada dependendo do modo em que a microrrede está operando. Se a microrrede estiver conectada à rede, não existe problema para suprir a demanda, logo o sistema de gerenciamento de energia para microrredes (do inglês, *Microgrid Management System* – MGMS) tenta maximizar os ganhos monetários da microrrede. Em caso de operação ilhada, o sistema substitui a preferência de um ganho monetário pelo aumento da confiabilidade de fornecimento de energia. O sistema foi testado em ambos os modos de operação, obtendo resultados satisfatórios.

Subramanian et al. (2013) aborda o desenvolvimento de algoritmos para despacho de cargas interrompíveis e do sistema de armazenamento de energia, comparando-os posteriormente. Estes recursos podem garantir a flexibilidade necessária que a integração de energias renováveis necessita. São analisadas três formas de despacho. É verificado que aplicando qualquer uma destas políticas

garante uma redução dos custos de reserva de energia, independente de qual das políticas é utilizada. Os autores ainda atestam que estes custos podem ser obtidos em sua maioria com uma maior penetração em cargas passíveis de deslocamento e de deslocamento de carga.

Rahbar et al. (2015) propõem um algoritmo em tempo real que objetiva reduzir os custos com a energia consumida da concessionária de energia. Para resolver este problema, é proposto otimizar o fluxo de energia no sistema de armazenamento de energia. Assume-se saber *a priori* o perfil de consumo/geração de energia em um dado intervalo de tempo finito. Assim, é proposto um algoritmo janela deslizante para o gerenciamento em tempo real, assumindo erros arbitrários relacionado aos perfis de energia assumidos.

É importante que o sistema de gerenciamento leve em consideração aspectos reais de um sistema elétrico. Em Hu et al. (2016) é realizada uma abordagem de otimização em dois estágios levando em consideração as incertezas com relação a geração de energia. No primeiro estágio é feito um despacho horário baseado em uma estimativa de um dia para frente. No segundo estágio é realizado um despacho econômico de todos os componentes da microrrede. O primeiro estágio é formulado como um problema de programação inteira mista (do inglês, *Mixed-integer programming* – MIP) e o segundo utilizando o método de otimização de Lyapunov. Os autores fazem uma comparação com sistemas sem levar em consideração o segundo estágio bem como a não consideração das restrições de um sistema real. Como conclusão, foi observado que este modelo tem um resultado técnico-econômico melhor que àqueles modelos simplificados.

Shi et al. (2017) propõem uma estratégia de gerenciamento de energia baseado na otimização de Lyapunov levando em consideração o fluxo de potência e as restrições operacionais do sistema de distribuição, como por exemplo a variação da tensão elétrica, diferenciando-se assim de outras estratégias. Os autores fazem uma comparação do sistema proposto comparando-o com uma estratégia *offline* que analisa todo o período de tempo de uma só vez e com um algoritmo ganancioso que procura o melhor custo para a microrrede para cada instante de tempo independentemente. O sistema proposto obteve uma melhor resposta que o algoritmo ganancioso, porém pior que o algoritmo *offline*. Porém, este último não considera como restrição os valores admissíveis de tensão na microrredes. O sistema proposto

obteve resposta rapidamente, mostrando que pode ser utilizada em sistema de tempo real.

Uma revisão de métodos e estratégias de gerenciamento de energia para sistemas de armazenamento de energias é realizado por Byrne et al. (2017). Os autores trazem à discussão os principais benefícios que um bom gerenciamento de energia pode trazer benefícios aos envolvidos com o sistema, como a concessionária de energia e os proprietários, através de aplicações de energia (por exemplo a arbitragem o deslocamento de energia) ou de aplicações de potência (como por exemplo a regulação de tensão e frequência). Ainda, os autores discorrem sobre os principais métodos que estão sendo utilizados para este fim.

Em Luna et al. (2017) é desenvolvido um MGMS online adaptativo com o intuito de lidar com as variações intrínsecas dos geradores de energia renovável. Para tanto, é proposto um sistema com 4 módulos, que tem como função o despacho, o processamento, a previsão e a coleta de dados respectivamente. De forma a verificar sua eficácia, o sistema foi implementado na microrrede laboratorial da Universidade de Aalborg. Foi implementado basicamente utilizando-se o *Labview*, com exceção do problema de otimização, que foi desenvolvido utilizando GAMS (*General Algebraic Modelling System*) e compilado utilizando o CPLEX. Um grande diferencial é que o sistema foi testado em duas possíveis situações críticas em uma microrrede: desconexão inesperada de um conjunto de cargas e interrupção de fornecimento de energia de uma turbina eólica. Em ambos, o sistema atuou de forma satisfatória. Além disto, o resultado obtido pelo MGMS proposto foi comparado com um *benchmark* conhecido, chegando a um valor satisfatório, tendo como resultado 81% de economia se comparado com o pior caso e 32% pior que o melhor caso. Este último evidencia que ainda há trabalho que pode ser feito para melhorar este sistema.

Dentro da linha de sistemas de gerenciamento distribuídos, Dehghanpour e Nehrir (2017) demonstram o funcionamento de seu modelo com multiobjetivos em um sistema de gerenciamento de energia baseado na teoria de jogos. A Solução de Barganha de Nash (do inglês, *Nash Bargaining Solution* – NBS) é utilizada para solucionar o problema proposto para que os diversos controladores distribuídos encontrem a melhor solução para o sistema como um todo. Para cada DER é feito um controlador com funções objetivos e restrições específicas. Obedecendo regras individuais e mesmo havendo uma negociação entre os diversos agentes, não são passadas informações relacionadas aos custos e viabilidade individuais de cada um.

Ao fim, é feita uma análise para um sistema computacional tanto na forma ilhada como interligado ao sistema de distribuição. Os resultados são comparados em 3 cenários diferentes, sendo dois com precificações por tempo de uso (do inglês, *Time of Use – ToU*) e uma com preço constante. É realizada uma comparação entre estes cenários, mostrando as implicações do uso de tarifação diferenciado no sistema de gerenciamento.

Em Ma et al. (2018) é proposto um algoritmo para gerenciamento de energia *online* para microrredes conectadas entre si com grande utilização de recursos de energia distribuídos. Os autores focam na perspectiva do distribuidor de energia, buscando reduzir o seu custo com a geração. Ainda, os autores não incluem uma previsão de longo prazo para geradores não despacháveis (como a geração fotovoltaica e a eólica) devido a sua imprevisibilidade. Para contornar esta questão, utiliza-se os dados coletados de geração no final a janela de tempo t são gravados e utilizados no tempo $t+1$.

No trabalho de Cheng et al. (2018) são discutidos os conceitos e o estado da arte de soluções para os MGMS comparando a abordagem centralizada e distribuída com relação aos controladores, demonstrando uma forte tendência da utilização do MGMS de forma distribuída. Os autores mostram de forma sucinta que o MGMS distribuído consegue fornecer as mesmas funções que o sistema centralizado, porém com maior confiabilidade e resiliência. Quanto a confiabilidade, é apresentado um exemplo numérico demonstrando que usando controladores de mesmo nível de confiabilidade, consegue-se obter uma maior continuidade e robustez no fornecimento de eletricidade em um sistema distribuído comparado ao centralizado. Quanto a resiliência, é abordada uma técnica de controle e proteção contra-ataques para se precaver destes problemas.

Wang et al. (2018) propõem uma estratégia de gerenciamento em dois estágios para multimicrorredes com alta penetração de energia renováveis, na tentativa de amenizar os efeitos das variações de recursos de energia, de cargas na microrrede e de preço de eletricidade. Os custos operacionais são minimizados com um despacho dia a frente (primeiro estágio) e os efeitos das variações mencionadas anteriormente são suavizadas com o despacho em tempo real (segundo estágio). A estratégia foi validada através de simulações, comparando o modelo proposto com uma estratégia descentralizada. Os resultados mostraram que o método proposto

consegue obter resultados ótimos, reduz custos de operação e minimiza os efeitos das incertezas.

Um sistema de dois estágios de gerenciamento de energia pelo lado da demanda *online* (do inglês, Real-time Demand Side Management - RDSM) é proposto por Yang et al. (2018). Além de ser um sistema *online*, seu sistema se diferencia por considerar alguns pontos que não são levados em consideração na grande maioria dos sistemas similares de GLD que atuavam de forma descentralizada. Sua principal diferença está relacionada a lidar com as incertezas dos recursos da microrrede, como os veículos elétricos. Este sistema também oferece suporte ao chamado *vehicle-to-grid* (V2G) que está relacionado com o conceito de bidirecionalidade da energia em veículos elétricos. Através de testes realizados é possível comprovar que traz benefícios econômicos tanto pra microrrede quanto para os veículos elétricos e demais sistemas de armazenamento gerenciados por ele.

Uma abordagem em tempo real visando uma operação econômica da microrrede é apresentada por Zeng et al. (2018). Primeiramente o problema de despacho é modelado como um Processo de Decisão de Markov (do inglês, *Markov Decision Process* – MDP) com horizonte finito para um dia antes. Para a solução em tempo real, lidando com as incertezas da carga, geração de energia e preços de energia da concessionária, é implementado um processo de programação dinâmica aproximada e de redes neurais para chegar a uma resposta próxima ao despacho ótimo em tempo real. A fim de verificar a eficácia do método, foi implementado o sistema de gerenciamento em uma microrrede de referência. Os resultados obtidos foram comparados com outros métodos de referência, mostrando a eficácia do método levando em consideração as políticas de resposta da demanda e as restrições de fluxo de potência impostas.

Wang et al. (2020) abordam a questão de gerenciamento de uma microrrede tomando como objetivo a redução do custo de operação, bem como visando reduzir o impacto ambiental. Os autores tratam este problema como um problema de otimização multiobjetivo dinâmica com múltiplos parâmetros. O sistema trata a microrrede em três cenários distintos com objetivos específicos para cada um deles. Quando a microrrede está ilhada, objetiva-se a redução do custo de operação e manutenção através da escolha de qual fonte de geração de energia deve-se utilizar para atender a demanda; quando está conectada à rede e comprando energia da rede, objetiva-se a redução do consumo de energia e minimizar os custos

operacionais; quando conectada e vendendo energia, busca-se a maximização dos lucros obtidos com a transação. Para agilizar o processamento, o sistema foi dividido em três camadas, sendo a primeira responsável por detectar o cenário em que a microrrede se encontra; na segunda é realizada um balanço de energia entre as gerações de energia e sistema de armazenamento; e a terceira realiza ajustes em cada um dos subsistemas. Os autores evidenciam a efetividade e rapidez do sistema através de simulações em uma microrrede proposta.

Uma outra proposta com três camadas é apresentada por Rana et al. (2021). Neste sistema, é inserida uma camada intermediária entre a camada de planejamento do dia anterior e a de despacho em tempo real, a qual é nomeada de camada *intra-day*, com o objetivo de resolver problemas decorrentes das variações de geração e demanda entre planejado e operação em tempo real. A camada de planejamento possui um mecanismo de realimentação com os dados coletados na camada de *intra-day*, obtendo uma melhor resposta com estes dados atualizados. Para a segunda camada, é desenvolvido um modelo heurístico evolucionário visando a redução do tempo para encontrar uma solução viável que atenda as restrições de igualdade impostas. Na terceira camada, a solução da camada *intra-day* é ajustada e implementada. Devido à falta de dados na literatura, o sistema foi analisado em comparação com alguns *benchmarks* encontrados na literatura, obtendo melhor resultado que todos os modelos existentes e em um tempo reduzido. Os autores concluem que o sistema ainda requer alguns melhoramentos no quesito da inserção da intermitência em fontes renováveis e consideração de programas de resposta da demanda.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA

Esta revisão de literatura iniciou com o total de 4000 artigos e, após um processo de seleção, chegou-se ao número de 14 artigos para este portfólio bibliográfico, que, em conjunto, possuem ao todo 4762 citações, totalizando uma média de 366 citações nos últimos dez anos para cada artigo.

De forma a fundamentar uma melhor análise da revisão de literatura, foram realizados alguns questionamentos para que fosse inspecionado em cada um dos artigos do portfólio, para que assim fosse possível criar um panorama geral do estado

da arte sobre o gerenciamento de energia em microrredes. Os questionamentos estão listados abaixo:

1. Qual o tipo de fonte de energia considerada no estudo?
2. Qual o sistema de armazenamento considerado no estudo?
3. O sistema de gerenciamento proposto encontra-se em qual nível de controle de uma microrrede?
4. Em relação temporal, em que momento o gerenciamento está sendo realizado?
5. Qual a estratégia de controle utilizada?
6. Como foi desenvolvido o sistema proposto?

Assim, a TABELA 2 mostra as respostas encontrada para cada um dos trabalhos que foram discutidos na seção 3.2 deste trabalho, seguindo a cronologia de publicação dos artigos. Os trabalhos de Byrne et al. (2017) e de Cheng et al. (2018) não foram inseridos na tabela mencionada por serem revisões de literatura e, por consequência, citarem diversos trabalhos com diferentes configurações em seu corpo de texto.

TABELA 2 - VISÃO PANORÂMICA DA REVISÃO DE LITERATURA

	1	2	3	4	5	6
Stluka et al. (2011)	Solar PV, eólica e CHP	Sistema de baterias elétricos (G2V e V2G)	Nível III	Despacho de dois dias antes	Leva em consideração tanto questões do lado de fornecimento de energia quanto do lado do consumo.	O sistema foi testado utilizando o software de gerenciamento VERA em uma microrrede de uma instalação hospitalar.
Jiang et al. (2013)	Solar PV, eólica, microturbinas e geradores a diesel	Sistema de Baterias	Nível III	Dia anterior e tempo real	Sistema de duas camadas: a camada de agendamento no dia anterior busca um despacho ótimo. A camada de despacho executada em tempo real levando em consideração restrições técnicas, realizando ajustes	O sistema foi testado em uma mesma microrrede tanto conectada à rede como de forma ilhada. O sistema foi desenvolvido utilizando o CPLEX.
Subramanian et al. (2013)	Solar PV	Veículos elétricos (G2V e V2G)	Nível III	Tempo real	Deslocamento de carga através de políticas de agendamento diferentes, sendo apresentadas três tipos distintos. O intuito é reduzir os custos com reserva de energia.	As simulações foram realizadas utilizando <i>Matlab</i> com <i>dados de carga e simulação PV</i> . Os processos de otimização foram desenvolvidos com <i>Solver Gurobi Optimizer</i> .
Rahbar et al. (2015)	Eólica	Sistema de Baterias	Nível III	Tempo real	Redução do custo total de energia pela utilização otimizada dos sistemas de armazenamento de energia. Busca isto através de um algoritmo com dois estágios, assumindo erros para as previsões.	Utiliza dados reais de uma planta de geração eólica e faz comparação com outros quatro algoritmos.
Hu et al. (2016)	Geradores convencionais a diesel e eólica	Sistema de Baterias Lítio-Ion	Nível III	Dia anterior e tempo real	Estratégia em duas camadas sendo a primeira realizando o despacho das unidades geradoras de um dia antes e a segunda faz o despacho econômico da microrrede	Simulações realizadas com dados de uma microrrede virtual. Ferramenta utilizada para simulações não informada.
Shi et al. (2017)	Solar PV, eólica geradores diesel	Sistema de Baterias – tipo não especificado.	Nível III	Tempo real	Utiliza otimização de Lyapunov para resolver o problema de despacho como um problema de fluxo de potência ótimo estocástico. Com isto, consegue resolver o problema somente com os dados atuais do sistema, desconsiderando dados históricos	Testado em uma microrrede real na China avaliando a performance em relação a dois outros algoritmos: um ganancioso e outro offline. Desenvolvido utilizando o pacote CVX do <i>Matlab</i> .
Luna et al. (2017)	Solar PV e eólicas	Sistema de Baterias chumbo-ácido reguladas por válvula (VRLA)	Nível III	Online	Sistema composto de quatro módulos, de forma a tentar melhorar o tempo de resposta do sistema. O módulo de otimização tem a função de ajustar as referências para os dispositivos da microrrede, sendo acionado pelo processador. Este último recebe informações do módulo de previsão bem como do próprio usuário.	Foi testado na microrrede do laboratório da Universidade de Aalborg. A implementação do software foi realizada utilizando <i>Labview</i> e o problema de otimização foi desenvolvido utilizando o CPLEX.
Dehghanpour e Nehrir (2017)	Solar PV	Sistema de Baterias	Nível III	Tempo real	Sistema de gerenciamento distribuído, no qual cada um dos controladores barganha com os demais tentando atingir o seu resultado ótimo e, assim, encontram um melhor resultado global.	Validado através de simulação tanto em modo ilhado quanto conectado à rede. Ferramenta utilizada para simulações não informada.

(continua)

	1	2	3	4	5	6
Ma et al. (2018)	Solar PV	Não especificado.	Nível III	Online	Utilizam os dados coletados de geração ao final do tempo t para o tempo $t+1$. Implementado de forma distribuída. Resolve os problemas de incerteza sem utilizar dados históricos.	Testes realizados com o sistema de 37 barras do IEEE. MATLAB foi utilizado como ferramenta de desenvolvimento.
Wang et al. (2018)	Solar PV e eólicas	Sistema de Baterias – tipo não especificado.	Nível III	Dia anterior e tempo real	Estratégia de múltiplas microrredes. No primeiro estágio faz minimização de custos individualmente, analisando o conjunto de microrredes posteriormente. No segundo estágio, o despacho em tempo real é realizado fazendo ajustes no do dia anterior.	Teste realizado em uma comunidade de microrrede artificial composta de três microrredes. Simulação realizada utilizando a <i>toolbox</i> MOSEK do MATLAB.
Yang et al. (2018)	Solar PV e eólicas	Sistema de Baterias. Carros elétricos (G2V e V2G)	Nível III	Tempo real	Dois estágios: no primeiro, é realizada uma otimização visando a minimização dos custos operacionais. O segundo tem como ponto balancear a incompatibilidade entre geração e demanda.	Vários estudos de caso foram realizados através de simulações de uma microrrede residencial. O ambiente utilizado para as simulações foi o <i>Matlab</i> .
Zeng et al. (2018)	Solar eólica e geradores diesel	Sistema de baterias	Nível III	tempo real e dia anterior	Estratégia em dois períodos sendo o primeiro um dia antes estabelecendo um pré-despacho. A segunda etapa atua em tempo real buscando uma resposta próxima ao ótimo.	As simulações foram realizadas utilizando MATLAB. Para o problema de fluxo de potência CA, foi utilizado o MATPOWER.
Wang et al. (2020)	Solar PV, geração térmica a gás	Sistema de baterias	Nível III	Dia anterior	Tratamento da microrrede através de cenários e para cada um destes existe um problema de otimização específico. Dividido em três camadas (detecção de cenários, balanço energético e atuação nos subsistemas)	A plataforma utilizada para desenvolvimento não foi especificada. Utilizada programação dinâmica multiobjetivo. Foram realizadas simulações para comparar o método e validá-lo.
Rana et al. (2021)	Solar eólica, microturbinas	Sistema de baterias	Nível II e III	Dia anterior, Intra-day e tempo real	O sistema proposto insere uma camada a intermediária (Intra-day) objetivando reduzir as variações entre o planejado e operação em tempo real. Uma grande contribuição é a realimentação dos dados encontrados no intra-day na camada de planejamento para obter melhores respostas.	A plataforma utilizada para implementação foi o Matlab. Em sua implementação, são utilizadas programação linear e métodos heurísticos. Sua validação foi realizada com simulações e comparações com benchmarks.
Esta dissertação	Solar PV	Sistema de baterias	Nível III	Tempo real	Sistema de gerenciamento utilizando um sistema preditivo para o próximo ponto de operação em $t+1$, o qual é utilizado para comparar com os dados repassados pelo planejamento. A partir da comparação, o sistema de gerenciamento tem métodos distintos para atuação conforme a magnitude dessa diferença. Dependendo da situação, o sistema pode optar por utilizar valores do planejamento, ajustar o ponto de operação previsto ou otimizar o próximo ponto de operação. Os intervalos de observação são de 10 minutos.	A plataforma foi desenvolvida em Matlab. No desenvolvimento do sistema foram utilizados conceitos de RNA, Fuzzy e otimização linear inteira mista. O sistema foi validado através de simulações de cenários possíveis de atuação, bem como atuação durante um dia inteiro de atuação.

Fonte: O Autor (2021)

Com essa visão panorâmica, é possível delinear uma tendência nesta área de estudo de sistemas de gerenciamento de energia em microrredes. Percebe-se que existe uma predileção pelas fontes de energias renováveis. A energia fotovoltaica só não está presente em duas referências, as quais utilizam energia eólica como fonte de energia elétrica principal. Já para o sistema de armazenamento de energia, é utilizado majoritariamente sistemas de baterias, seja em banco de baterias estático ou nas baterias presentes em veículos elétricos com tecnologia V2G.

Todos os sistemas de gerenciamento vistos na revisão atuam no nível III de controle, ou seja, no nível da microrrede através do seu controlador central e os controladores individuais dos DERs. Quanto ao aspecto temporal, nove dos doze sistemas têm funcionalidade de tempo real ou *online*, mostrando que esta tem muito a agregar além do despacho para o dia seguinte, especialmente em relação ao tratamento das incertezas existentes na geração de energia, nas cargas e no mercado de energia como um todo.

Quanto às ferramentas utilizadas, percebe-se o Matlab como o *software* que mais é utilizado nesta área de pesquisa, demonstrando a versatilidade que este *software* possui, além da facilidade que os aplicativos internos dele podem oferecer quando do desenvolvimento de um sistema.

Com isso, foi possível traçar os principais pontos considerados no estudo apresentado por esta dissertação, sendo eles uma microrrede de pequeno porte utilizando energia solar fotovoltaica como fonte de geração de energia elétrica; sistema de armazenamento de energia com baterias; controle da microrrede atuando no nível III, utilizando os dados do despacho para o dia seguinte para realizar ajustes em tempo real.

Este estudo foi de suma importância para o trabalho pois assim foi possível traçar algumas premissas para o sistema, traçando os principais pontos que foram considerados no decorrer do desenvolvimento dele. Estes pontos e etapas são descritos e discutidos no capítulo 4.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados alguns dados e documentos que serviram como premissas desta pesquisa, sendo estes dados de carga de uma edificação comercial, dados meteorológicos fornecidos por um projeto de pesquisa da Itaipu Binacional e informações de projeto de implementação de um sistema fotovoltaico.

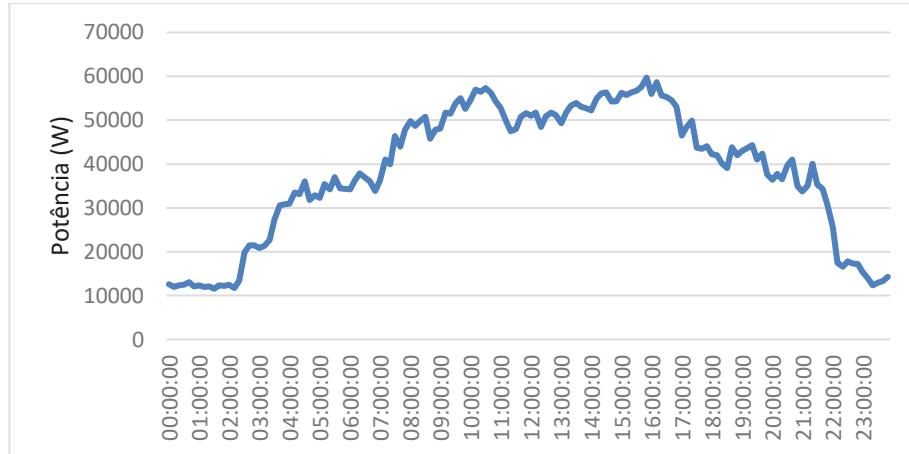
Os dados do sistema fotovoltaico, capacidade de geração e sistema de armazenamento, são de um memorial descritivo a respeito de um projeto a ser implementado no Parque Barigui, em Curitiba - PR. O arranjo proposto é composto de quatro arranjos com 24 módulos fotovoltaicos de 340 W de potência máxima, totalizando uma capacidade instalada de 32,64 kWp. O sistema de armazenamento de energia é composto por três baterias de fosfato de lítio com capacidade unitária de 9,6 kWh, totalizando 28,8 kWh, tendo como potência nominal 2,9 kW e corrente de carga e descarga de 100 A.

Os dados meteorológicos foram coletados por um projeto de pesquisa da Itaipu Binacional, sendo eles os dados de irradiância, temperatura ambiente, temperatura do módulo fotovoltaico e velocidade do vento. Os dados foram coletados na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, durante 11 meses, intervalados em dez minutos.

Os dados de carga são de uma curva de carga comercial apresentada por Yamakawa (2007) e consistem em 3 curvas de carga tipo, sendo elas: curva de carga de dia útil; curva de carga para sábados; e curva de carga para domingos e feriados. Estas curvas podem ser observadas respectivamente na FIGURA 9, FIGURA 10 e FIGURA 11.

Visto que o comportamento da irradiação solar é previsível no decorrer do dia e que as curvas de carga utilizadas são para fins de emulação de curvas de carga diária, entende-se que a divergência entre os locais das informações coletadas não interfira no resultado do trabalho, visto que o ponto principal é validar a estratégia de gerenciamento de energia na microrrede.

FIGURA 9 - CURVA DE CARGA BASE PARA DIAS ÚTEIS



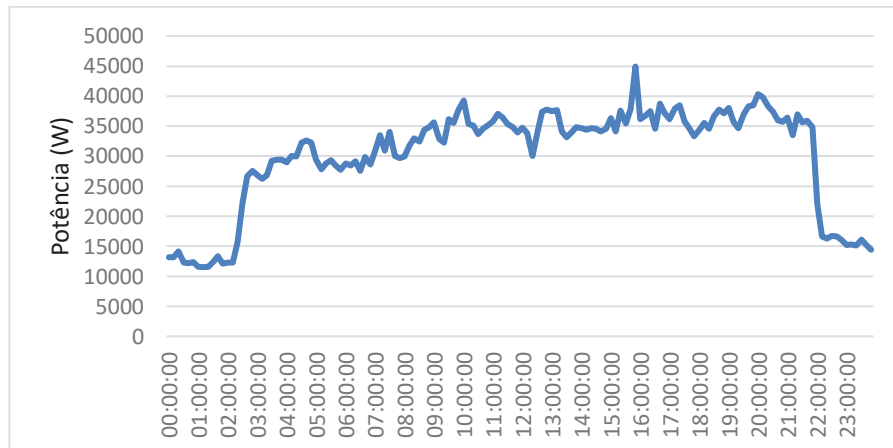
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 10 - CURVA DE CARGA BASE PARA SÁBADOS



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 11 - CURVA DE CARGA BASE PARA DOMINGOS E FERIADOS



FONTE: O Autor (2021)

De forma a compatibilizar o quantitativo de dados de carga e de dados meteorológicos, foi realizada uma emulação de carga com base nas três curvas de carga apresentadas. Para isso, foi realizado um ajuste nas curvas para que estas se adequassem melhor a média de consumo mensal do Salão de Atos do Parque de Barigui, foco do estudo do sistema fotovoltaico a ser implementado. As médias de consumo mensal utilizadas estão listadas na TABELA 3.

TABELA 3 - VALORES DE CONSUMO MENSAL UTILIZADOS PARA EMULAÇÃO DE CARGA

Mês / ano	Consumo mensal (kWh)
Janeiro / 2019	1843
Fevereiro / 2019	2285
Março / 2019	3012
Abril / 2019	2938
Maio / 2019	2570
Junho / 2019	2763
Julho / 2019	2507
Agosto / 2019	2731
Setembro / 2019	2821
Outubro / 2019	3080
Novembro / 2019	3383
Dezembro / 2019	2663

FONTE: O Autor (2021)

Em posse das curvas de cargas ajustadas mês a mês, geraram-se curvas para todos os dias do ano levando em consideração o calendário de 2019 para fins de verificação de feriados. Para este fim, inseriu-se um ruído com média diária zero com variação de cada medição de no máximo 5%, conforme equação (1).

$$x' = x + (0,05 \cdot x \cdot RB) \quad (1)$$

Na qual,

x' – Potência após inserção do ruído (W)

x – Potência original da curva de carga (W)

RB - Ruído branco com distribuição normal

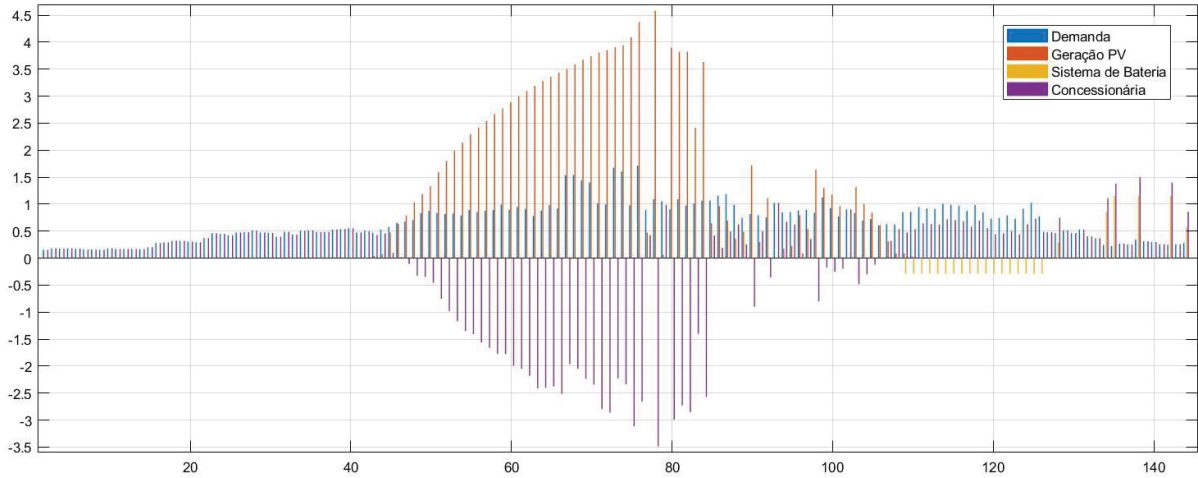
Com isso, é possível gerar curvas de cargas diárias similares e infinitas, sem perder as características estipuladas pelas curvas de carga base.

4.1.1 Despacho para o dia seguinte

Os dados do despacho para o dia seguinte são importantes para este estudo, visto que o sistema em tempo real necessita destes para realizar a comparação com os dados em tempo real. A dissertação de Lara Filho (2021) apresenta um modelo robusto orientado a dados para a programação da operação de microrredes, considerando recursos energéticos distribuídos, com dados fornecidos de hora em hora. Este modelo busca retornar a melhor forma de atendimento a demanda de energia, buscando o menor custo operacional possível.

Para que fosse possível a utilização deste para gerar os dados necessários do despacho para o dia seguinte, foi necessária uma adaptação deste modelo, fazendo com que fossem fornecidos dados com um intervalo condizente com o presente estudo, ou seja, a cada 10 minutos. Após as devidas adaptações foi realizado o despacho levando em consideração a microrrede e os dados apresentados na seção 4.1, obtendo como resposta o despacho apresentado na FIGURA 12. Devido a grande quantidade de informação, para auxiliar na visualização dos dados, o gráfico apresentado foi dividido em três períodos distintos, sendo eles: o período com baixa demanda energética (FIGURA 13); o período em que a geração de energia PV é existente (FIGURA 14); e o período noturno, no qual existe diferenciação tarifária de energia (FIGURA 15).

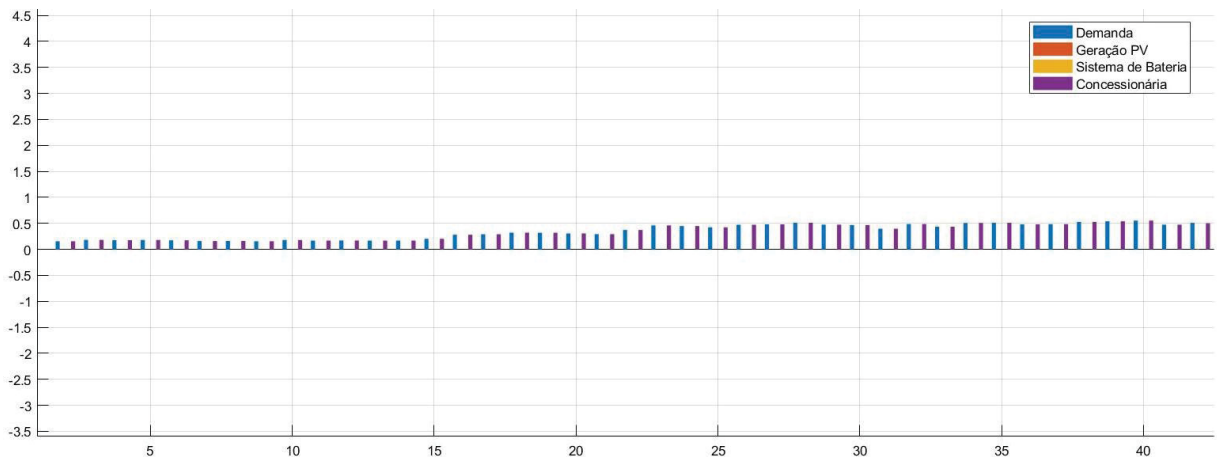
FIGURA 12 – DESPACHO DO DIA PARA O DIA SEGUINTE



FONTE: O Autor (2021)

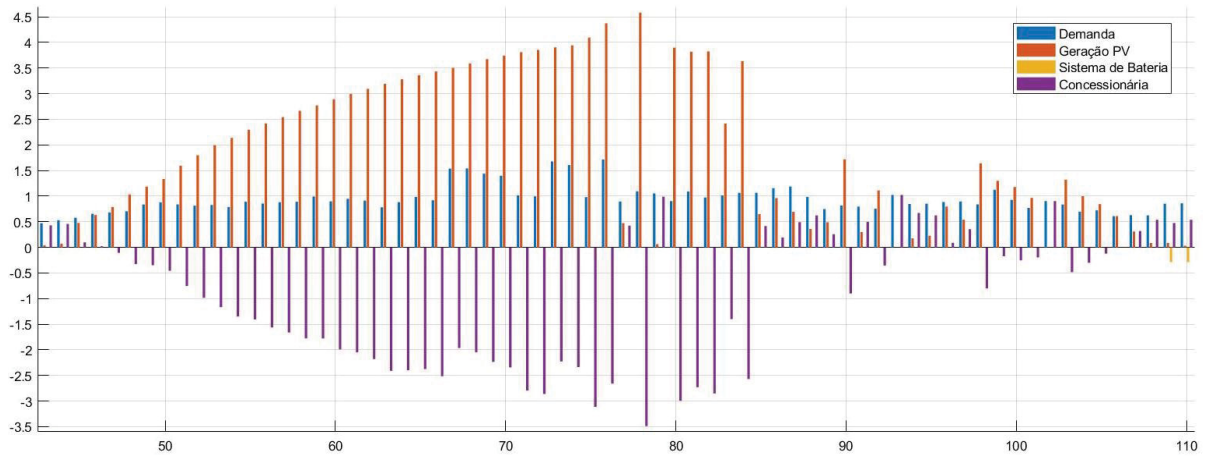
A FIGURA 12 apresenta graficamente em barras o balanço energético do despacho, sendo apresentados os valores de demanda (na cor azul), geração de energia PV (na cor laranja), do fluxo de energia no sistema de armazenamento por baterias (na cor amarela) e o fluxo de energia com a concessionária (na cor roxa), demonstrando como o modelo optou por atender a demanda a cada intervalo de dez minutos.

FIGURA 13 - DESPACHO PARA O DIA SEGUINTE – PERÍODO DE BAIXA DEMANDA ENERGÉTICA.



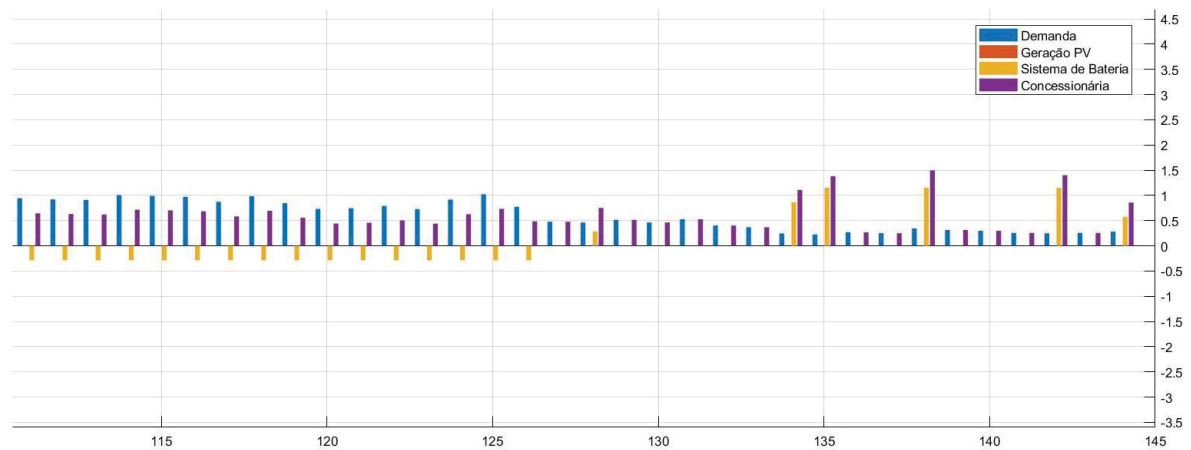
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 14 - DESPACHO DO DIA PARA O DIA SEGUINTE – PERÍODO COM GERAÇÃO DE ENERGIA.



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 15 - DESPACHO DO DIA PARA O DIA SEGUINTE – PERÍODO NOTURNO.

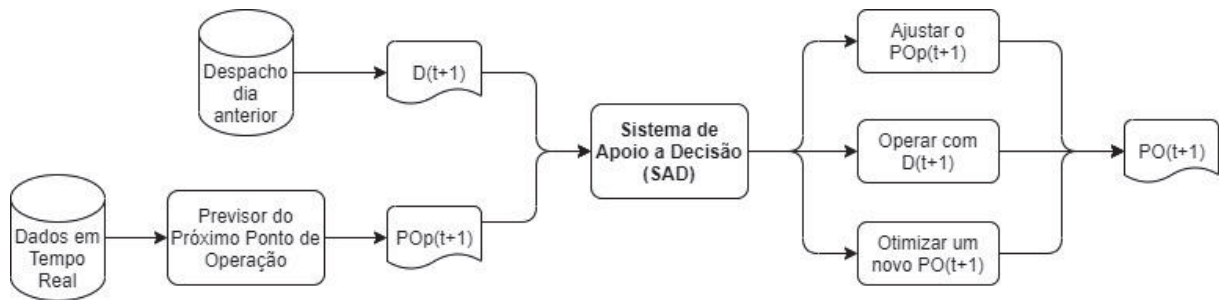


FONTE: O Autor (2021)

4.2 MÉTODOS

Nesta seção do trabalho são descritos os métodos utilizados no sistema de gerenciamento de energia para microrredes. O sistema proposto é composto basicamente por três partes, sendo elas o sistema predictor do Próximo Ponto de Operação (PPO); o sistema de apoio a decisão; e sistema de otimização (SO). Na FIGURA 16 é possível verificar como estas partes interagem entre si. Note que este fluxograma representa uma iteração do sistema, que irá acontecer a cada instante t de forma a prever e tomar decisões relacionadas à $t + 1$.

FIGURA 16 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA PARA MICRORREDES



FONTE: O Autor (2021)

As metodologias utilizadas para cada uma das partes do sistema são abordadas nas subseções seguintes e estão organizadas da seguinte forma: na seção 4.2.1 é descrito o previsor do próximo ponto de operação, utilizado para comparação com os dados do despacho para o dia seguinte; na seção 4.2.2 é descrito o sistema de apoio a decisão, utilizando metodologia de cálculo do desvio em três dimensões de análise, implementado com lógica *fuzzy*; e na seção 4.2.3 discorre sobre o sistema de otimização, o qual possui duas formas a depender da situação de ilhamento da microrrede.

4.2.1 Previsor do próximo ponto de operação

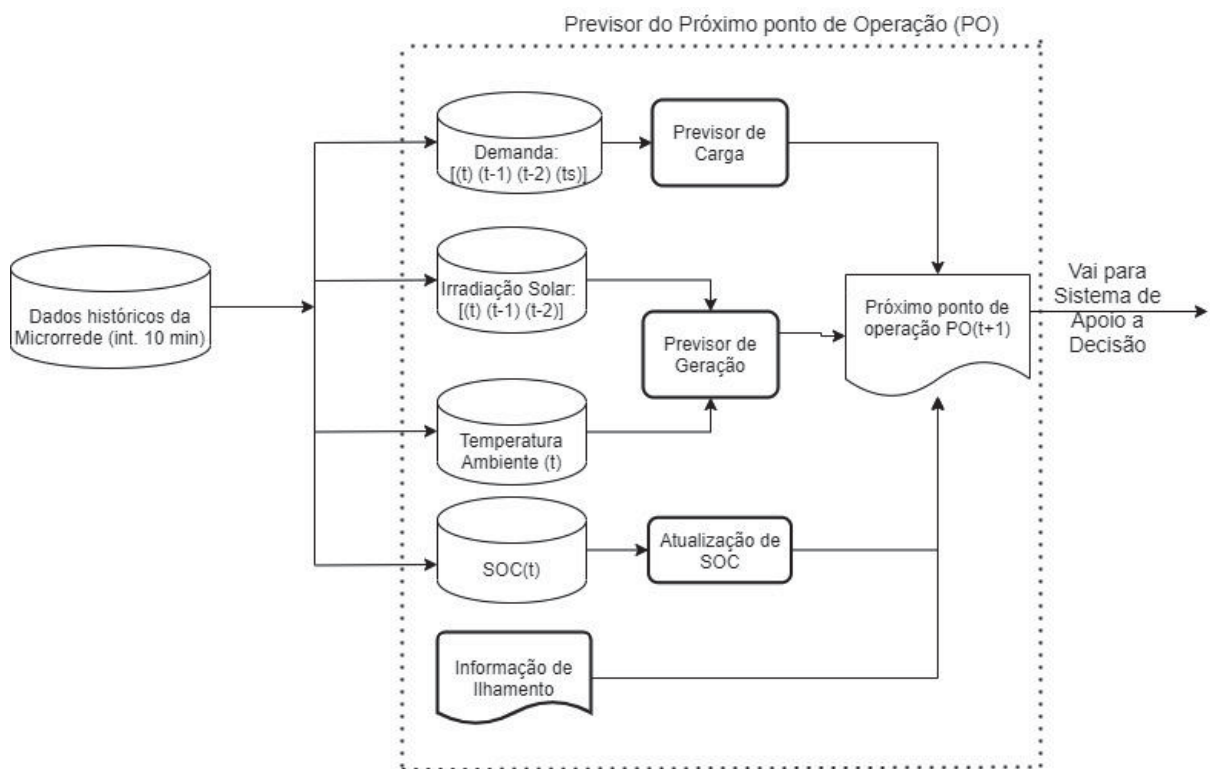
Para que o sistema de gerenciamento possa atuar de forma satisfatória, algumas informações internas e externas à microrrede precisam ser conhecidas. Informações externas estão relacionadas a algum evento da rede de distribuição em que a microrrede está conectada, como por exemplo custo da energia e problemas técnicos na rede. As informações internas estão relacionadas a grandezas elétricas dos recursos energéticos distribuídos da microrrede.

As informações atuais (no período de tempo t) da microrrede infelizmente não são suficientes se olhadas isoladamente. Fez-se necessária uma projeção destas grandezas para o próximo ponto de operação (PO em $t + 1$). O sistema opera com intervalos de tempo de dez minutos, sendo alimentados com os dados discutidos na seção 4.1.

De forma geral, o previsor de PPO divide-se em 4 partes, sendo elas: previsão da demanda de energia; previsão da geração de energia; previsão do sistema de armazenamento de energia; e eventos de ilhamento. Para os dois primeiros, por se tratar de uma previsão de uma série temporal, foi utilizado redes neurais artificiais

pelas razões apresentadas na seção 2.5. Para a previsão do armazenamento, utilizou-se um método determinístico, atualizando o estado de carga do sistema de armazenamento para PO em $t + 1$ com base no seu uso no período t . Os eventos de ilhamento são processados e utilizados no sistema de apoio a decisão (seção 4.2.2). A FIGURA 17 mostra um fluxograma de como as partes do predictor estão interligadas e quais dados são utilizados para cada uma destas.

FIGURA 17 - FLUXOGRAMA DO PREVISOR DO PRÓXIMO PONTO DE OPERAÇÃO



FONTE: O Autor (2021)

Para a previsão de carga, foram utilizadas técnicas de redes neurais artificiais (RNA) utilizando o *software* Matlab. Foi utilizado uma rede neural de arquitetura *feedforward* com múltiplas camadas, tendo 2 camadas ocultas de 15 neurônios cada. A camada de entrada da rede neural recebe dados de demanda dos três últimos intervalos de tempo, bem como informação da estampa de tempo e sobre qual o dia-tipo em questão. A camada de saída da RNA fornece um valor de potência média para $t + 1$ e é realizada uma integralização para o intervalo de 10 minutos, obtendo assim o valor da demanda de energia para o período inteiro.

Para o previsor de irradiação solar foi utilizada a mesma estratégia e arquitetura para a RNA, porém, a camada de entrada recebe uma quantidade menor de dados, sendo eles as últimas três medidas de irradiância e a estampa de tempo. Não foi utilizada a informação de qual é o dia-tipo pois este não interfere nas medições de irradiância. Com isso, a camada de saída fornece um valor de irradiância para $t + 1$, a qual é utilizada para o cálculo da geração fotovoltaica.

Em posse de um valor de irradiância para o próximo intervalo de tempo, é possível realizar o cálculo de quanto de energia será gerada pelo sistema fotovoltaico. A energia gerada pode ser encontrada utilizando a equação (2), proposta por Wamusse (2019). É possível perceber que a equação é multiplicada por duas constantes, sendo a primeira referente ao tempo (dez minutos do intervalo de observação), transformando o valor de potência da irradiância incidente em energia incidente. O segundo termo refere-se à transformação de watts para kilowatts.

$$E_{PV} = \frac{10}{60} \cdot \frac{1}{1000} \cdot G \cdot (A_{mod} \cdot n) \cdot \eta \cdot P_r \quad (2)$$

Na qual,

E_{PV} – Energia gerada pelo sistema fotovoltaico (kWh)

G – Irradiância incidente no módulo (W/m^2)

A_{mod} – Área do módulo (m^2)

n – Número de módulos

η – Rendimento do módulo fotovoltaico

P_r – Taxa de performance ou coeficiente de perdas (usualmente 75%)

$\frac{10}{60} \left[\frac{min}{min/h} \right]$ - Constante de tempo para transformação de potência em energia no

intervalo de tempo de 10 minutos

$\frac{1}{1000}$ – Constante de transformação de unidade de W para kW.

Porém, a energia calculada somente estaria correta se as condições de operação do módulo forem exatamente iguais àquelas em que foi submetido durante os testes padrão. Devido a probabilidade que isto aconteça é muito pequena, faz-se necessário corrigir este valor de energia devido ao aquecimento natural do módulo. A temperatura do módulo é afetada pelas condições climáticas, sabidamente a

irradiância incidente e a temperatura ambiente. Desta forma, a temperatura do módulo pode ser calculada pela equação (3) (NARAYAN, 2013):

$$T_{mod} = T_a + (T_{NOCT} - 20) \cdot \frac{G}{G_{NOCT}} \quad (3)$$

Na qual,

T_{mod} – Temperatura do módulo corrigida (°C)

T_a – Temperatura ambiente (°C)

T_{NOCT} – Temperatura nominal de operação do módulo (°C)

G_{NOCT} – Irradiância em condições NOCT (800 W/m^2).

Em posse da temperatura do módulo corrigida, pode-se calcular a energia gerada pelo módulo fotovoltaica influenciada pela temperatura do módulo. Este valor de energia será utilizado para compor o próximo ponto de operação (WAMUSSE, 2019).

$$E_{PV_C} = E_{PV} - \frac{k}{100} \cdot (T_{mod} - T_a) \cdot E_{PV} \quad (4)$$

Na qual,

E_{PV_C} – Energia gerada pelo sistema fotovoltaico corrigida pela influência da temperatura (kWh)

k – Coeficiente de temperatura do módulo (%/°C).

A última grandeza necessária a calcular é o estado de carregamento (SOC) do sistema de armazenamento de baterias. Para tanto, basta que seja conhecido o estado de carregamento atual ($SOC(t)$) e o que está sendo operado para o sistema de armazenamento no intervalo de tempo corrente. Com isso, determina-se matematicamente conforme equação (5).

$$SOC(t + 1) = SOC(T) + \frac{\Delta E}{C} \quad (5)$$

Na qual,

$SOC(t + 1)$ – Estado de carregamento da bateria no intervalo de tempo ($t + 1$) (%)

$SOC(t)$ – Estado de carregamento da bateria no intervalo de tempo (t) (%)

ΔE – Quantidade de energia de carga ou descarga no intervalo de tempo (t) ($W \cdot h$)

C – Capacidade nominal do sistema de armazenamento ($W \cdot h$).

Deve-se atentar para os limites de carga e descarga previstos para o sistema de baterias. Para tanto, sabendo que uma hora possui seis intervalos de dez minutos e este é o intervalo de tempo analisado, deve-se dividir a potência máxima de saída do sistema de baterias por seis, assim tendo a máxima energia a ser fornecida ou recebida neste intervalo.

Para a informação de ilhamento é realizada uma verificação entre o que foi planejado no despacho para o dia seguinte e o que está acontecendo em tempo real. Esta verificação é realizada pelo Sistema de Apoio a Decisão, abordado na seção 4.2.2.

Com isso, o sistema previsor é capaz de gerar o próximo ponto de operação previsto ($PO_p(t + 1)$) com as informações de demanda energética, geração de energia, SOC e informação de ilhamento.

4.2.2 Sistema de Apoio a Decisão (SAD)

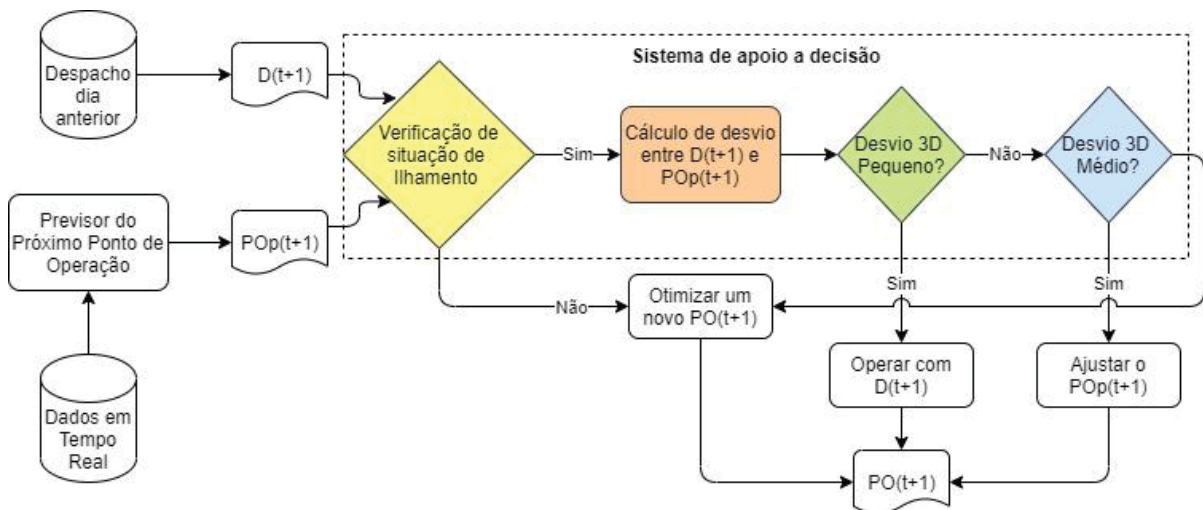
Seguindo o escopo delimitado na seção 1.1, este trabalho foca no gerenciamento de energia de uma microrrede em tempo real. Para execução desta tarefa, o sistema recebe informação de despacho dia à frente (*day-ahead dispatch*), realizado no dia anterior, a fim de comparar esta previsão com os dados do sistema em tempo real, advindos do Previsor PPO. Os dados são recebidos separados em pacotes de intervalo de tempo de dez minutos, sendo estes a previsão de energia gerada, a previsão de demanda, o estado de carregamento (SOC) do sistema de armazenamento de energia e informações de ilhamento programado para microrrede.

Para este fim, foi utilizada uma metodologia que compara todas estas informações em conjunto. Devido as suas particularidades e capacidades, para que seja obtido um melhor resultado na comparação destes valores recebidos, as grandezas contínuas (geração, demanda e SOC) serão normalizadas

individualmente. As informações de ilhamento, devido a sua natureza, é tratada como uma grandeza binária.

Para melhor entendimento, o fluxograma do sistema de gerenciamento é rerepresentado na FIGURA 18, destacando as etapas do SAD com cores. O SAD pode então ser dividido em três etapas: verificação de compatibilidade de ilhamento (cor amarela), cálculo do desvio das grandezas elétricas (cor laranja) e atuação com base no desvio (cores verde e azul). Visando a economia de trabalho computacional, este trabalho propõe um método de verificação das grandezas de forma conjunta a partir da distância linear entre o próximo ponto do despacho ($D(t+1)$) e o ponto de operação previsto ($PO_p(t+1)$) e a partir do valor calculado, o sistema atua de acordo.

FIGURA 18 - FLUXOGRAMA COM DESTAQUE AS ETAPAS DO SISTEMA DE APOIO A DECISÃO



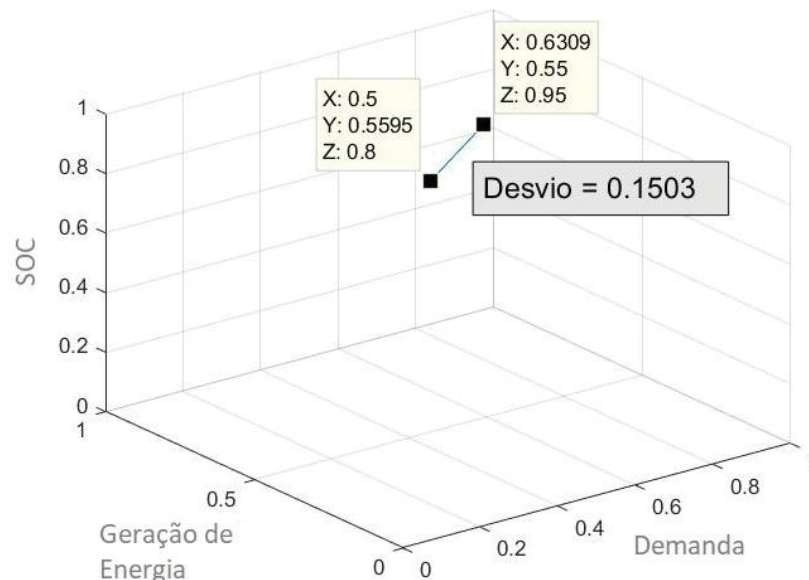
FONTE: O Autor (2021)

A situação de conexão atual da microrrede com a rede de distribuição é a primeira a ser analisada pois é a que mais pode inviabilizar o despacho realizado no dia anterior, seja este ocasionado por um evento interno ou externo à microrrede. Desta forma, o SAD realiza uma comparação entre a informação de ilhamento repassada pelo despacho do dia anterior ($I_{D(t+1)}$) e a situação atual da microrrede ($I_{POp(t+1)}$). Caso a informação não seja igual, o SAD irá chamar o sistema de otimização para que um novo ponto de operação seja encontrado a partir dos dados atuais da rede. Em caso de igualdade, o sistema irá calcular o desvio existente entre as grandezas planejadas ($D(t+1)$) e previstas ($PO_p(t+1)$).

Além desta conferência, o SAD ainda realiza uma outra verificação para entender se a situação de conexão irá mudar no próximo intervalo de observação, como por exemplo, um evento de ilhamento. Para isso, é realizada a comparação entre o estado atual da microrrede e o que está planejado para o próximo ponto de operação. Se estes forem distintos, significa uma transição de estados.

O desvio entre planejado e tempo real é utilizado como parâmetro de decisão do SAD. Este desvio será analisado de forma tridimensional, com as grandezas normalizadas, sendo igual a distância cartesiana entre estes dois pontos. Dependendo da magnitude deste desvio, o sistema atuará de formas distintas. Na FIGURA 19 é mostrado um exemplo em que a reta marca a distância linear entre dois pontos, sendo os eixos x, y e z respectivamente demanda, geração e SOC. Para um desvio pequeno ($Desvio < 0,05$), o sistema opera com o despacho planejado. Para um desvio médio ($0,05 < Desvio < 0,25$), já é considerado um desvio que impacta na operacionalização da microrrede, sendo necessário ajustes na operação. Para desvios maiores, o sistema incorre na mesma situação que um ilhamento não previsto, ou seja, otimiza um novo ponto de operação.

FIGURA 19 - EXEMPLO GRÁFICO DESVIO 3D

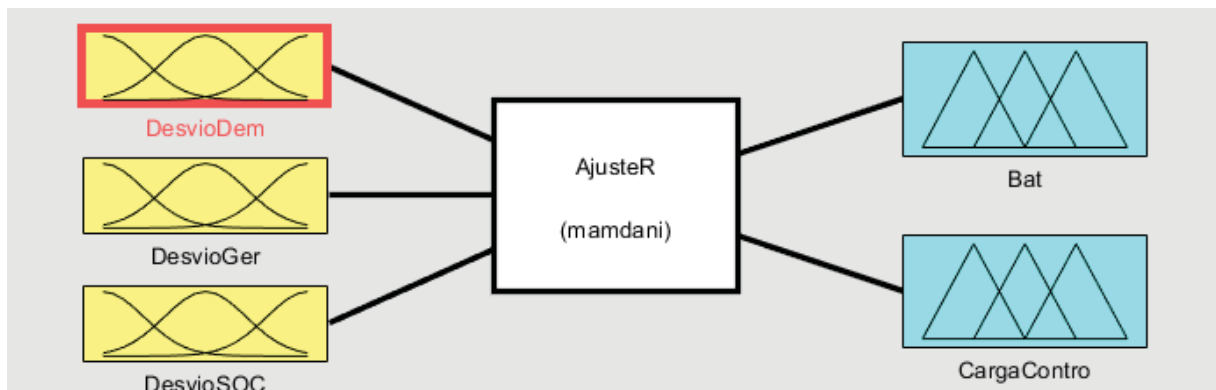


FONTE: O Autor (2021)

No ajuste do ponto de operação, o sistema irá examinar os desvios de cada uma das grandezas individualmente. Dessa forma, é possível ter uma noção do que

de fato ocasionou a divergência entre o despacho planejado e o ponto de operação previsto. Para essa análise, foi implementado um sistema de inferência Fuzzy (método Mamdani) com três conjuntos *Fuzzy* de entrada, sendo um para cada desvio calculado, que possibilitam 27 regras abrangendo todas as situações possíveis, tendo como saída dois conjuntos nebulosos, sendo estes relativos ao controle do sistema de armazenamento e das cargas controláveis da microrrede.

FIGURA 20 - SISTEMA FUZZY DE AJUSTE



FONTE: O Autor (2021)

Assim, os desvios calculados são examinados pelo sistema de inferência observando seu grau de pertinência aos conjuntos *Fuzzy* de entrada e obedecendo as regras estabelecidas, tendo como resultado o que fazer com o sistema de armazenamento (descarregar, carregar ou nada fazer) e com as cargas controláveis (quantitativo de corte) para que sejam reduzidas as divergências observadas nos desvios.

Com as saídas defuzzificadas, é possível assim calcular os valores ajustados para POp. Para a bateria, a saída defuzzificada refere-se a uma porcentagem da máxima capacidade de carga e descarga do sistema de baterias e pode assumir os valores conforme TABELA 4. Para o ajuste, deve-se utilizar a equação (6), na qual é somado ao valor anterior ao ajuste a saída defuzzificada multiplicada pela capacidade de fornecimento do período de 10 minutos ($E_{bat_{max}}$) e dividida pela capacidade total do sistema de armazenamento (C_{bat}). Conforme dados apresentados na seção 4.1, estes valores são de 2,4 e 28,8 kWh, respectivamente.

TABELA 4 - SAÍDAS DEFFUZZIFICADAS PARA O AJUSTE DE SOC

Conjunto Fuzzy para Ajuste de SOC	Saída defuzzificada (AjusteBat)
Descarregar muito	-0,82
Descarregar Pouco	-0,30
Nada fazer	0
Carregar pouco	0,3
Carregar muito	0,82

FONTE: O Autor (2021)

$$SOC_{ajustado} = SOC_{anterior} + \left(AjusteBat \cdot \frac{E_{bat_{max}}}{C_{bat}} \right) \quad (6)$$

Na qual,

$SOC_{ajustado}$ – Valor do SOC do sistema de armazenamento após ajuste em t+1 (kWh)

$SOC_{anterior}$ – Valor de SOC no instante de tempo t (kWh)

$AjusteBat$ – Saída defuzzificada de ajuste de baterias, conforme TABELA 4

$E_{bat_{max}}$ – Quantidade de energia máxima que o sistema de baterias pode fornecer em um intervalo de tempo (kWh)

C_{bat} – Capacidade total do sistema de armazenamento por baterias (kWh).

Para o ajuste nas cargas controláveis, a saída defuzzificada relaciona-se à uma quantidade do percentual das cargas controláveis que serão desligadas. As cargas controláveis foram consideradas como sendo variáveis binárias, podendo estar ou não acionadas, sem permissão para estarem funcionando com carga reduzida individualmente. Foram considerados quatro grupos de carga controláveis da microrrede, sendo suas potências de 1000 W, 750 W, 1500 W e 1250 W. Idealmente estes valores deveriam ser coletados em tempo real e atualizados a cada ciclo do sistema, porém por falta de dados em tempo real, foram considerados os valores fixos mencionados. As saídas defuzzificadas estão apresentadas na TABELA 5.

Visando aplicação futura em caso de medição em tempo real da potência dos grupos de cargas controláveis, tornando a potência instantânea de cada grupo de carga controlável variável no tempo, foram aplicados conceitos de otimização linear inteira mista com o intuito de reduzir o número de grupos de cargas controláveis da

microrrede que deverão ser desligados de forma a atender o valor de corte definido pelo SAD.

TABELA 5 - SAÍDAS DEFFUZZIFICADAS PARA CARGAS CONTROLÁVEIS

Conjunto Fuzzy para Corte de Cargas Controláveis	Saída defuzzificada (AjusteCarga)
Corte Máximo	0
Corte Alto	0,25
Corte Médio	0,5
Corte Baixo	0,75
Sem Corte	1,00

FONTE: O Autor (2021)

Ao final do ajuste do ponto de operação, o fechamento do balanço energético é realizado utilizando a concessionária de energia, considerando a situação conectada à rede. Ou seja, quando existe sobra de energia do sistema de geração da microrrede, esta é injetada na rede da concessionária. Em caso oposto, a concessionária irá suprir o restante da demanda que está sendo solicitada pela microrrede.

4.2.3 Sistema de Otimização para Ponto de Operação

O sistema de otimização para um novo ponto de operação pode ser utilizado em duas situações distintas: quando as informações deilhamento não coincidirem ou quando o desvio tridimensional calculado for grande. Apesar das informações recebidas do despacho do dia anterior sejam em pacotes com POs do dia inteiro, a otimização será realizada somente para o próximo ponto de operação. Dessa forma, a resposta torna-se mais rápida e não prejudica as verificações futuras, visto que a cada passo de atuação será realizada nova verificação.

Para esta otimização, optou-se por utilizar a programação linear inteira mista visto que se busca uma resposta rápida e confiável para uma solução somente para o próximo ponto de operação. Porém, devido a situação de ilhamento, existem duas possibilidades para a otimização. Quando conectada à rede da concessionária, deve-se buscar o atendimento da demanda no menor custo possível. Desta forma, a função objetivo (7) busca a minimização do custo para atendimento da demanda e está sujeita a restrições de quantidade de geração de energia fotovoltaica (8), balanço energético (9) e de capacidade da bateria (10). Foram inseridos pesos (w_n) como forma de

penalização em caso de corte de cargas controláveis, com valores muito maiores que os custos de energia.

$$\min(Z) = C_{PV} \cdot E_{PV} + C_{bat} \cdot E_{bat} + C_{conc} \cdot E_{conc} + w_a \cdot a + w_b \cdot b + w_c \cdot c + w_d \cdot d \quad (7)$$

s.t.

$$E_{PV} = E_{PVc} \quad (8)$$

$$E_{PV} + E_{bat} + E_{conc} + a \cdot cc_1 + b \cdot cc_2 + c \cdot cc_3 + d \cdot cc_4 \geq demanda \quad (9)$$

$$0 \leq SOC - \frac{E_{bat}}{C_{bat}} \leq 1 \quad (10)$$

Nas quais,

E_{PV} – Quantidade de energia suprida pela geração fotovoltaica (kWh)

E_{bat} – Quantidade de energia suprida pelas baterias (kWh)

E_{conc} – Quantidade de energia suprida pela Concessionária (kWh)

C_{PV} – Custo da energia da geração fotovoltaica (R\$/kWh)

C_{bat} – Custo da energia fornecida pelas baterias (R\$/kWh)

C_{conc} – Custo da energia fornecida pela concessionária (R\$/kWh)

w_a, w_b, w_c, w_d – Pesos para desligamento de cargas controláveis.

a, b, c, d – Variáveis binárias para corte de cargas controláveis

cc_n – Potência das cargas controláveis (kW).

Para o custo da energia da concessionária (C_{conc}), foi utilizada a tarifação horária verde, tendo as tarifas de pico e fora de pico de R\$ 1,975745 e R\$ 0,496825, respectivamente. Para o custo da energia fotovoltaica (C_{PV}), foi considerado o mesmo valor da tarifa da concessionária fora de pico, visto que esta energia pode ser injetada na rede em troca de créditos de energia. Para o custo da bateria, foi levado em consideração o custo de aquisição do sistema de armazenamento, a vida útil e as perdas no processo de carga e descarga, sendo este no valor de R\$ 0,51321.

Quando a microrrede estiver ilhada, deve-se buscar atender a demanda da microrrede com a menor quantidade de cortes possível, utilizando os DER disponíveis, sendo eles a geração PV e o sistema de armazenamento de energia com baterias. Desta forma, busca-se maximizar a quantidade de energia suprida pela bateria (11), sendo sujeita as restrições de capacidade de descarga do sistema de baterias em um intervalo de tempo (12) e do balanço energético (13).

$$\max(Z) = E_{bat} - (a \cdot cc_1 + b \cdot cc_2 + c \cdot cc_3 + d \cdot cc_4), \quad (11)$$

s.t.

$$E_{bat} \leq E_{bat_{max}}, \quad (12)$$

$$E_{bat} + a \cdot cc_1 + b \cdot cc_2 + c \cdot cc_3 + d \cdot cc_4 \leq demanda, \quad (13)$$

Nas quais,

E_{bat} – Quantidade de energia suprida pelas baterias (kWh)

$E_{bat_{max}}$ – Quantidade de energia máxima que o sistema de baterias pode fornecer em um intervalo de tempo (kWh)

a, b, c, d – Variáveis binárias para corte de cargas controláveis

cc_n – Potência das cargas controláveis (kW).

Para a otimização quando a microrrede estiver ilhada não foi considerada a possibilidade de atendimento da demanda utilizando a geração fotovoltaica devido a particularidade da microrrede tomado como base deste estudo (ver seção 4.1), em que a geração fotovoltaica está fora da parte ilhada por razões específicas do projeto.

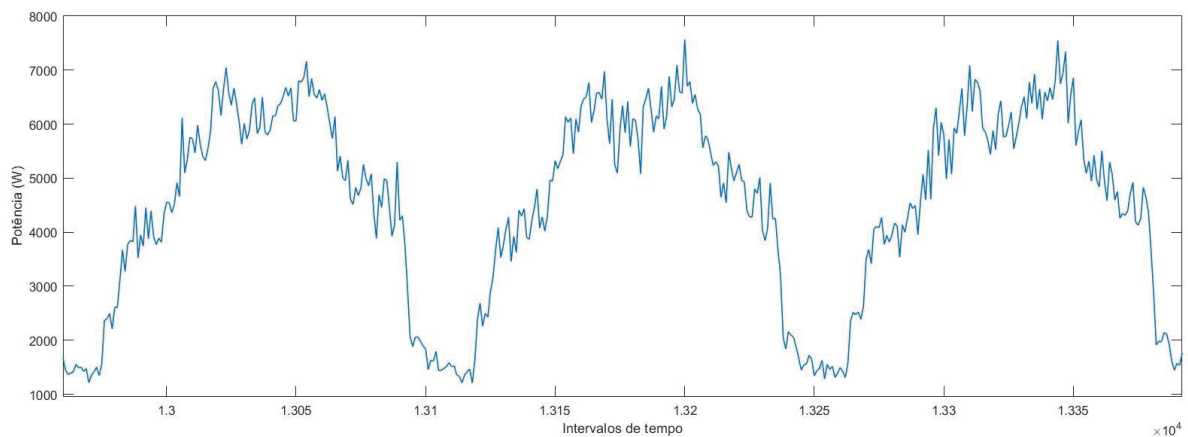
5 TESTES E ANÁLISES DE RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os testes realizados com base nos métodos descritos na seção 4.2, bem como é feita uma análise dos resultados encontrados. Para o desenvolvimento do sistema de gerenciamento de energia para microrredes foi utilizado o *software Matlab*.

5.1 PREVISOR DO PRÓXIMO PONTO DE OPERAÇÃO

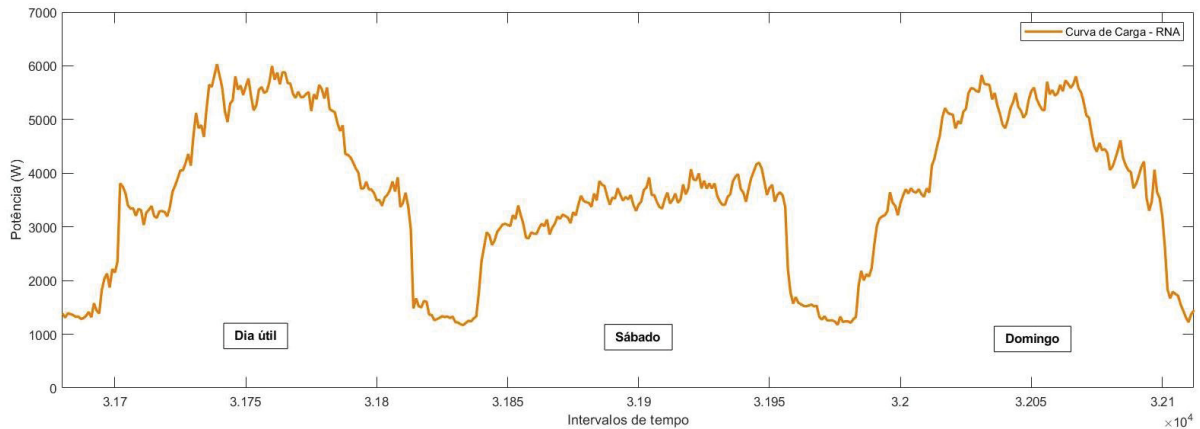
Para o desenvolvimento do previsor do próximo ponto de operação, o primeiro passo foi emular os dados a partir da base de dados existente e utilizando a diferenciação proposta na seção 4.1. Na FIGURA 21 é possível perceber que, apesar das três curvas serem emuladas a partir do mesmo conjunto de dados, estas são diferentes, representando melhor três dias úteis consecutivos reais. Na FIGURA 22 pode ser observada a diferença entre três curvas emuladas para três dias-tipo distintos.

FIGURA 21 - TRÊS DIAS ÚTEIS CONSECUTIVOS GERADOS PELO EMULADOR DE CARGA



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 22 - CURVA DE CARGA GERADA PELA RNA PARA OS TRÊS DIAS-TIPO



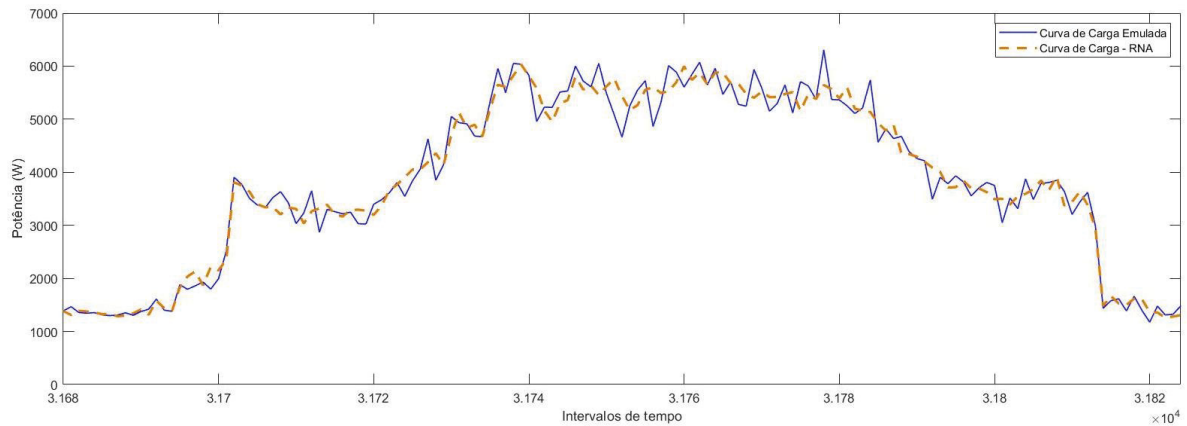
FONTE: O Autor (2021)

Utilizando o método de emulação explanado no item 4.1 foram emulados dados para um ano inteiro, utilizando como base para fins de contabilização de finais de semana e feriados o calendário do ano de 2019 e levando em consideração os dados de consumo mensal (TABELA 3) do Salão de Atos do Parque Barigui para ajuste das curvas mês a mês.

Assim, com esses dados prontos, foi possível realizar o treinamento da RNA para a previsão de carga para o próximo ponto de operação. O treinamento foi finalizado com 795 épocas, tendo apresentado a melhor performance na época 745 no valor de 0,0047. A performance foi calculada a partir erro médio quadrático (*mean squared error – mse*).

Com a fase de treinamento finalizada foi possível fazer as simulações comparativas que são apresentadas na FIGURA 23. É possível perceber que a rede consegue representar muito bem as oscilações de carga que ocorrem no decorrer do dia. Apenas na detecção de picos de carga de curta duração que a rede apresenta alguma deficiência na previsão.

FIGURA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE CURVA DE CARGA EMULADA E CURVA DE CARGA GERADA PELA RNA

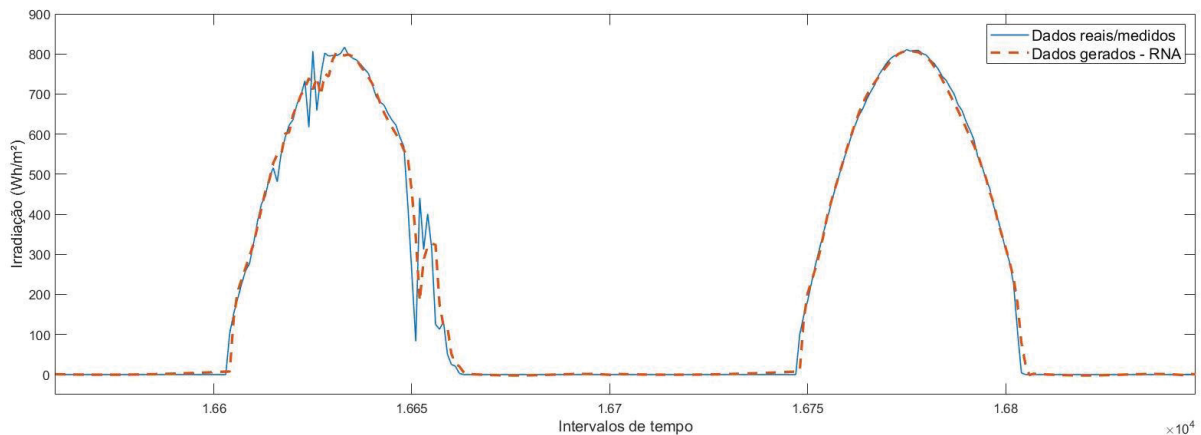


FONTE: O Autor (2021)

Para a previsão da irradiância, o processo de desenvolvimento foi similar ao realizado para a previsão de carga, com a diferença que os dados de entrada utilizados neste caso são dados reais coletados (seção 4.1). O treinamento foi finalizado com 113 épocas, tendo apresentado a melhor performance na época 63 no valor de 0,0207. A performance foi calculada a partir erro médio quadrático (mse).

A FIGURA 24 mostra o resultado obtido para dois dias consecutivos. Foram escolhidos dois dias com comportamentos das medições distintos, sendo o primeiro com diversas variações, possivelmente por causa de sombreamento nos módulos, e um segundo com quase nenhuma perturbação externa. Desta forma, é possível analisar o comportamento da rede nestas das situações passíveis de acontecer.

FIGURA 24 - COMPARAÇÃO ENTRE IRRADIAÇÃO BASE E IRRADIAÇÃO PREVISTA



FONTE: O Autor (2021)

Analisando a curva da direita, percebe-se que para um dia sem perturbações externas, a rede consegue retornar resultados bastante precisos, praticamente contornando a curva dos dados reais. O mesmo não pode ser observado durante as variações abruptas, na qual a rede consegue traçar um padrão, mas não responde tão rapidamente a ponto de retornar respostas tão precisas.

Uma forma de contornar o problema das variações abruptas seria a utilização de dados com intervalos de tempo menor, por exemplo de cinco minutos. Assim, possivelmente, a rede conseguiria estabelecer a tendência de queda e conseguir responder de forma mais precisa.

A próxima informação do previsor é o estado de carga do sistema de armazenamento. Como mencionado na seção 4.2.1, sabendo o SOC atual e como será utilizada o sistema de armazenamento no intervalo de tempo atual, é possível determinar o SOC em $(t + 1)$. Dessa forma, é realizada uma conta aritmética, na qual o SOC no próximo ponto será o SOC atual atualizado com o fluxo de carga do sistema de baterias. Para o fluxo, é adotado como positivo para carga e negativo para descarga.

A informação relacionada a situação de ilhamento da microrrede é tratada através de uma comparação entre o despacho para o dia seguinte e a situação em tempo real e, conforme abordado na seção 4.2.2, em caso de não coincidência o sistema incorre na mesma situação de um desvio grande, ou seja, um novo ponto de operação para $(t + 1)$ é otimizado.

5.2 SIMULAÇÃO DE PONTOS DE OPERAÇÃO

Para um primeiro teste do sistema de gerenciamento, foi pensado em realizar testes considerando diferentes cenários de operação. Objetiva-se nesta fase do estudo a análise de comportamento do sistema de gerenciamento, em especial o comportamento do SAD conforme as diferentes variações possíveis de desvio entre despacho e tempo real.

Os cenários divergem entre si de forma a contemplar todas as possíveis atuações do sistema com relação ao ponto de operação, totalizando oito cenários distintos que serão analisados e discutidos nesta seção. De forma a facilitar a explanação, os cenários foram divididos em dois grupos: um com desvio entre ponto de operação previsto e despacho até médio (cenários 1 a 4) e o segundo com desvios grandes (cenários 5 a 8). Os cenários e suas descrições estão listados na TABELA 6.

TABELA 6 - CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

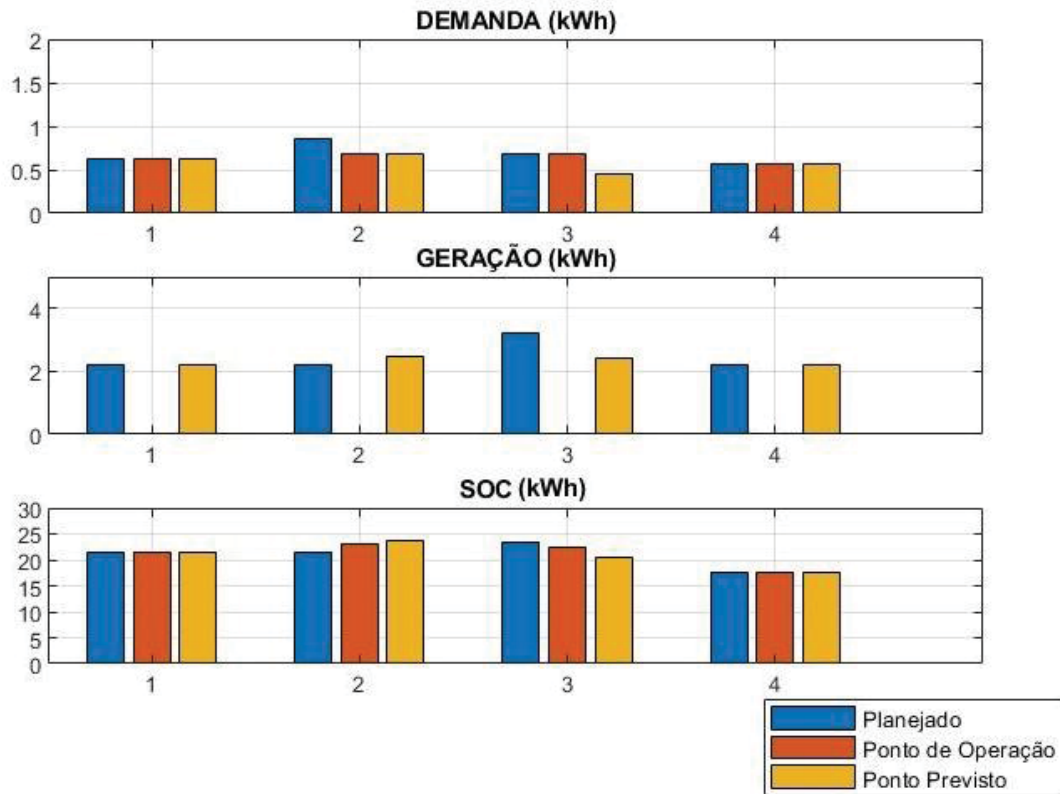
Cenário	Descrição
1	Com desvio pequeno
2	Com desvio médio com ajuste somente do sistema de baterias
3	Com desvio médio com ajuste no sistema de baterias e cargas controláveis
4	Sem desvio
5	Otimização de novo PO tendo geração maior que a carga
6	Otimização de novo PO tendo a geração nula com carga maior que zero
7	Otimização de novo PO tendo a geração menor que a carga e SOC suficiente para atendimento
8	Otimização de novo PO tendo a geração menor que a carga e SOC insuficiente para atendimento

FONTE: O Autor (2021)

No primeiro grupo tem-se os cenários conforme mostrado na FIGURA 25, na qual as cores azul, laranja e amarelo representam respectivamente os pontos de operação planejado (despacho dia anterior), ponto de operação após tomada de decisão e ponto de operação previsto. Os cenários são com o desvio pequeno (1), desvio médio com ajuste somente do fluxo do sistema de armazenamento de energia

(2), desvio médio com ajuste no fluxo da bateria e desligamento de cargas controláveis (3) e sem desvio (4).

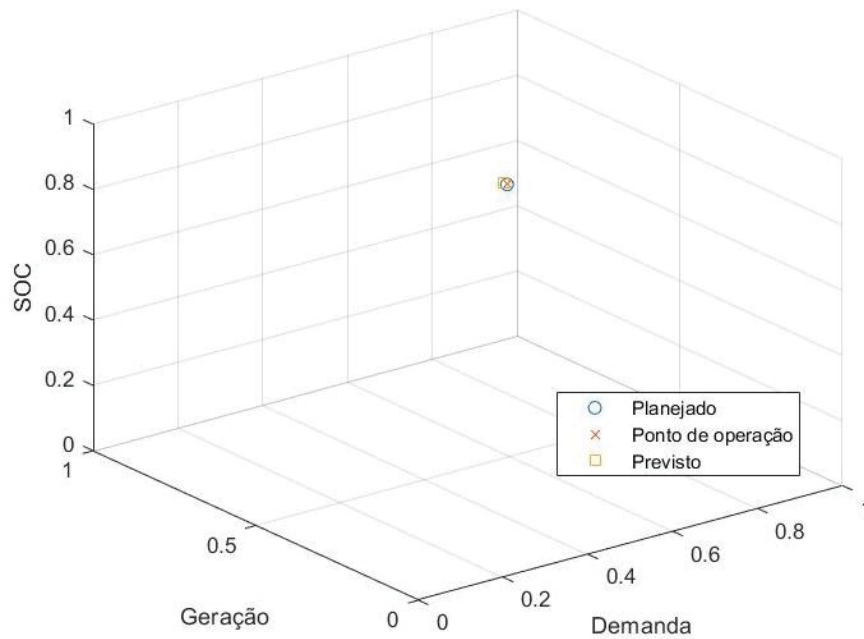
FIGURA 25 - PANORAMA DOS CENÁRIOS 1 A 4 SIMULADOS



FONTE: O Autor (2021)

No cenário 1, tem-se a situação de um desvio entre planejado e previsto igual a 0,0095, sendo assim considerado como um desvio pequeno. Por esta razão, o ponto de operação será considerado igual ao despacho. Na FIGURA 26 é demonstrada uma representação dos pontos nas três dimensões de análise, sendo possível perceber que o despacho diverge levemente do ponto de operação e este coincide com o ponto previsto pelo sistema de gerenciamento.

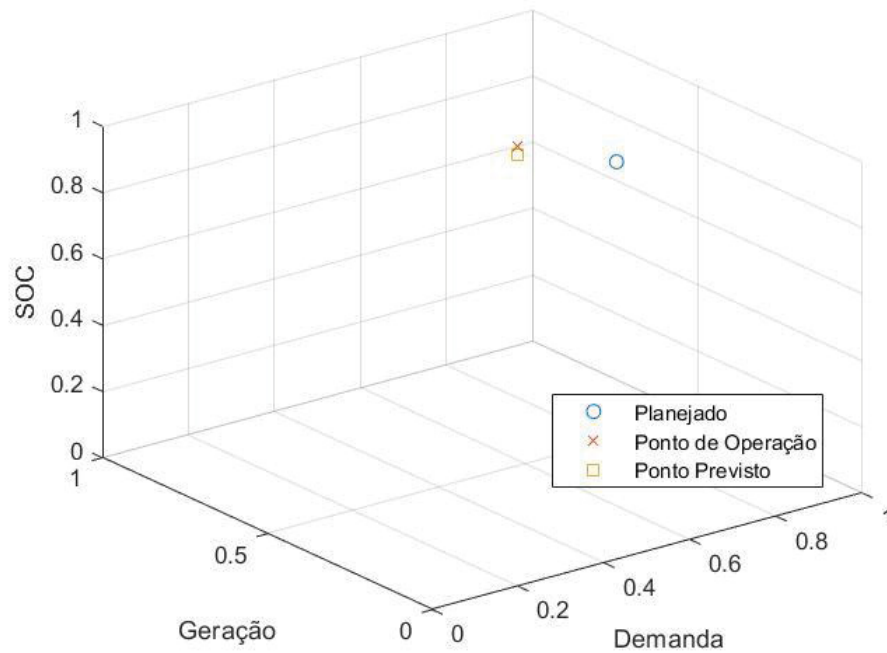
FIGURA 26 - CENÁRIO 1: DESVIO PEQUENO



FONTE: O Autor (2021)

Já para o cenário 2, o sistema encontra um desvio um pouco maior no valor de 0,1961, fazendo-se necessário o ajuste do ponto de operação. Este desvio é devido a uma demanda maior do que a esperada com também um aumento de geração de energia. Para realizar o ajuste, o SAD é chamado e, utilizando seu sistema de inferência, opta por utilizar a energia sobressalente da geração para carga do sistema de baterias. Na FIGURA 27 é possível perceber a distância existente entre o despacho e o ponto previsto, bem como o aumento do SOC do previsto para o ponto de operação, reduzindo assim o desvio.

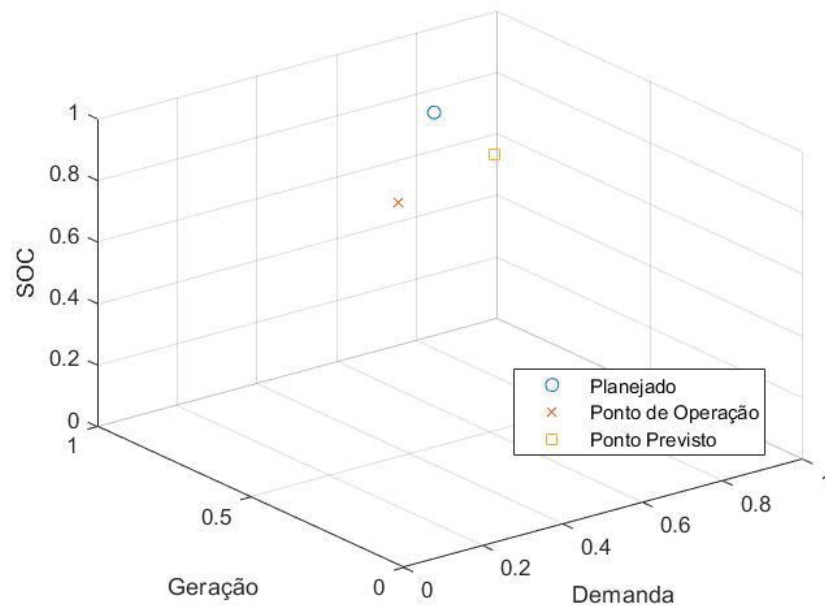
FIGURA 27 - CENÁRIO 2: AJUSTE MÉDIO COM ATUAÇÃO NO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA



FONTE: O Autor (2021)

No cenário 3, existem divergências consideráveis em duas das grandezas, tendo a geração menor que o planejado e o SOC também com menor valor. Apesar de uma situação totalmente diferente da situação 2, o SAD também optou pelo ajuste do ponto previsto. Porém, neste cenário, além de realizar um ajuste na bateria aumentando a taxa de descarga e, conseqüentemente, a quantidade de energia a ser utilizada para suprir a demanda, também é realizado corte nas cargas controláveis do sistema, reduzindo assim a demanda no ponto de operação. Na FIGURA 28 podem ser observados os pontos relativos a este cenário, evidenciando a diferença entre planejamento, previsão e ponto de operação.

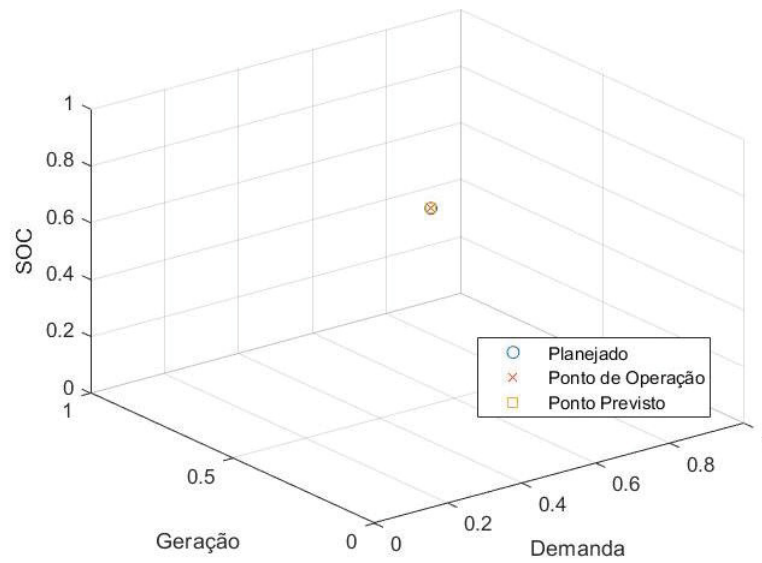
FIGURA 28 - CENÁRIO 3: AJUSTE MÉDIO COM ALTERAÇÃO NO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO E CORTE DE CARGAS CONTROLÁVEIS



FONTE: O Autor (2021)

O cenário 4 seria aquele considerado perfeito, com desvio nulo. Porém, a probabilidade deste ponto acontecer é muito remota, em especial devido variação da geração de energia fotovoltaica e a alguns aspectos imprevisíveis da carga que dificilmente conseguem ser previstos com exatidão com um dia de antecedência. A FIGURA 29 mostra o esboço em três dimensões de análise dos pontos deste cenário, evidenciando os três pontos localizados no mesmo local no espaço.

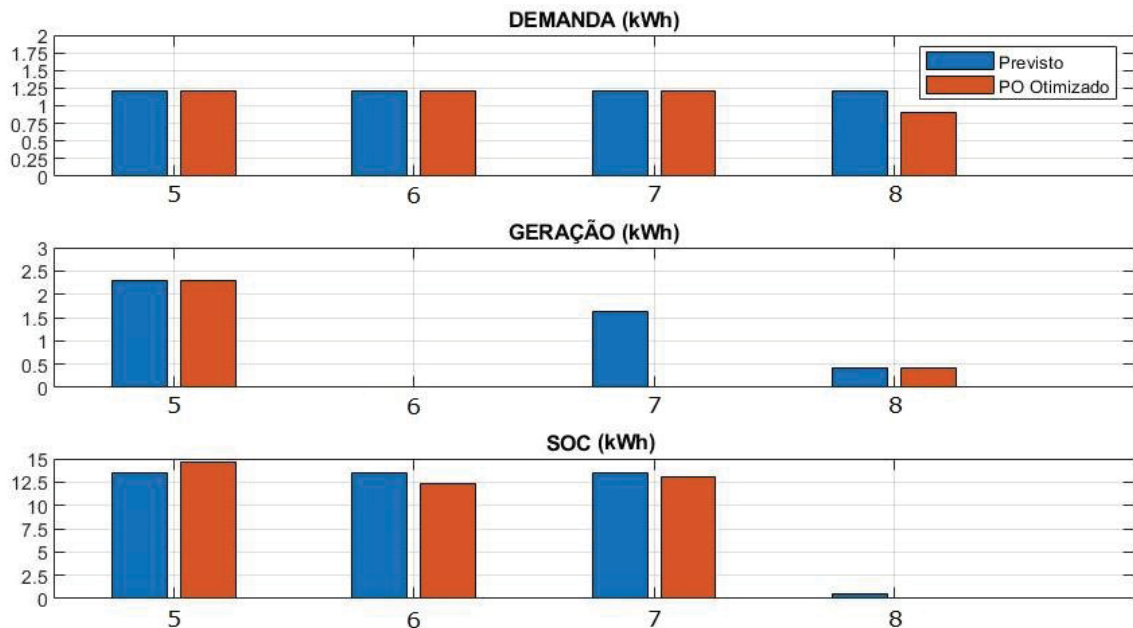
FIGURA 29 - CENÁRIO 4: SEM DESVIO



FONTE: O Autor (2021)

Os próximos quatro cenários são quando o sistema opta por realizar a otimização de um novo ponto de operação. Isto ocorre em duas situações distintas: a primeira quando da situação de conexão com a rede não foi prevista (ilhamento não programado, por exemplo); a segunda é quando o desvio calculado é maior que 0,25. Na FIGURA 30 é apresentado o resultado obtido para a simulação destes cenários.

FIGURA 30 - PANORAMA DOS CENÁRIOS DE 5 A 8



FONTE: O Autor (2021)

O cenário 5 consiste em ter uma geração de energia superior à carga no período de observação. Neste caso, a geração é suficiente para atender toda a demanda de energia e, além disso, utilizar a energia sobressalente para carga do sistema de armazenamento. O cenário 6 consiste em existir uma geração nula, apesar da carga ser maior que zero. Neste caso, o sistema só tem uma forma de atendimento a demanda que é através da descarga da bateria. Este cenário é complementado pelos próximos dois.

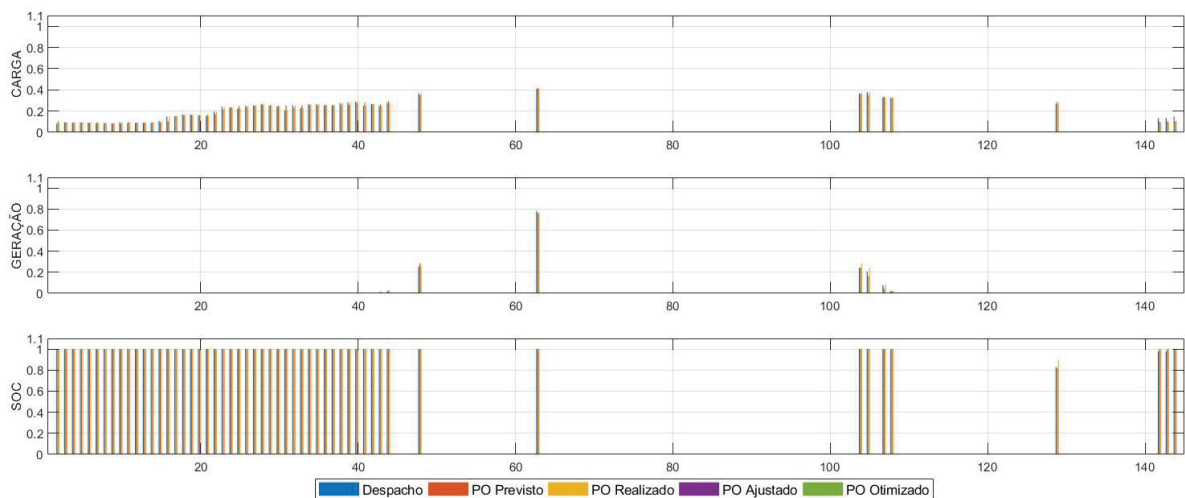
Tanto o cenário 7 quanto o 8 tem-se a situação em que a geração é menor do que a carga, divergindo somente quanto ao estado de carga do sistema de armazenamento o que irá interferir no resultado obtido. No cenário 7, existe SOC suficiente para atendimento da carga sobressalente, enquanto no 8 o SOC é insuficiente. Nesse último, será realizado um corte de cargas controláveis a fim de atender o máximo da potência demandada possível.

5.3 SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO DE UM DIA INTEIRO

Após a verificação de como o sistema de gerenciamento se comportaria nas diferentes situações e tendo os dados do despacho para o dia seguinte, foi realizada a simulação de atuação ponto a ponto para um dia inteiro, tendo sido utilizados dados

de um dia útil para as simulações. Nesta simulação, foi considerado o encadeamento de eventos, ou seja, o ponto de operação realizado em $(t - 1)$ é utilizado como entrada de dados para o predictor do próximo ponto de operação a ser realizado no tempo t . Para cada ponto, é realizado o cálculo do desvio e a sua magnitude é verificada pelo sistema de gerenciamento, de forma que o SAD tomará uma decisão sobre como atuar de forma a minimizar problemas na operação da microrrede. A FIGURA 31 traz os pontos nos quais aconteceram os desvios pequenos, e é percebido que estes acontecem em sua maioria durante a madrugada e a manhã, nos quais não existe geração de energia e as incertezas de carga são menores.

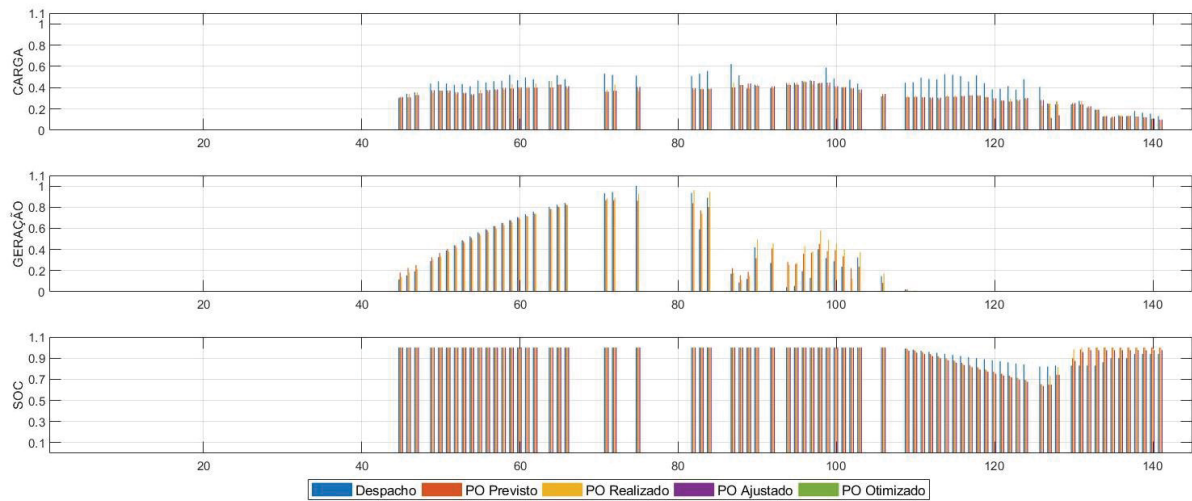
FIGURA 31 - PONTOS DE OPERAÇÃO COM DESVIO PEQUENO



FONTE: O Autor (2021)

Os pontos com desvio médio (FIGURA 32) ocorrem em grande parte do dia, na qual as incertezas na carga e na geração estão mais acentuadas. É possível perceber uma grande variação entre os valores de carga despachada e o que de fato está acontecendo em tempo real. Ainda, é possível perceber que no período de maior tarifa da concessionária (pontos 109 à 126), o sistema de gerenciamento optou por aumentar a taxa de descarga do DES de forma a reduzir ainda mais o custo de operação em relação à concessionária e, também, evitando o desligamento de cargas controláveis, o qual somente acontecerá em caso de desconexão do sistema de distribuição da concessionária e a demanda seja maior do que o DES pode prover à microrrede no intervalo de 10 minutos.

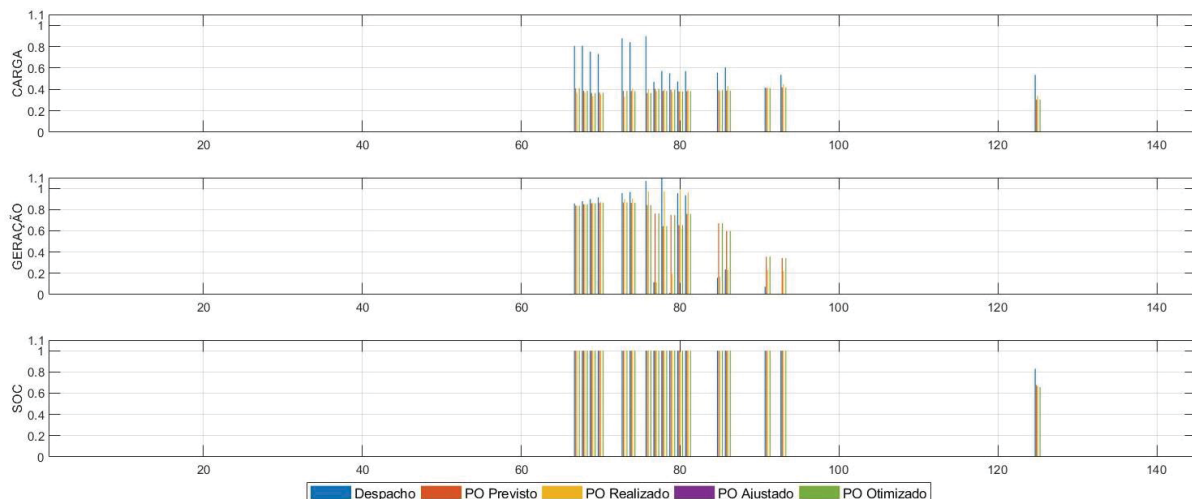
FIGURA 32 - PONTOS DE OPERAÇÃO COM DESVIO MÉDIO



FONTE: O Autor (2021)

Os pontos com desvios grandes (FIGURA 33) ocorreram principalmente devido às incertezas da carga, na qual podem ser percebidos que a carga que de fato ocorreu é metade daquela prevista no despacho para o dia seguinte. Como mencionado anteriormente, neste caso o sistema opta por otimizar um novo ponto de operação, os quais estão representados pela barra verde. Na simulação somente ocorreram casos de desvio grande com a microrrede conectada ao sistema de distribuição.

FIGURA 33 - PONTOS DE OPERAÇÃO COM DESVIO GRANDE

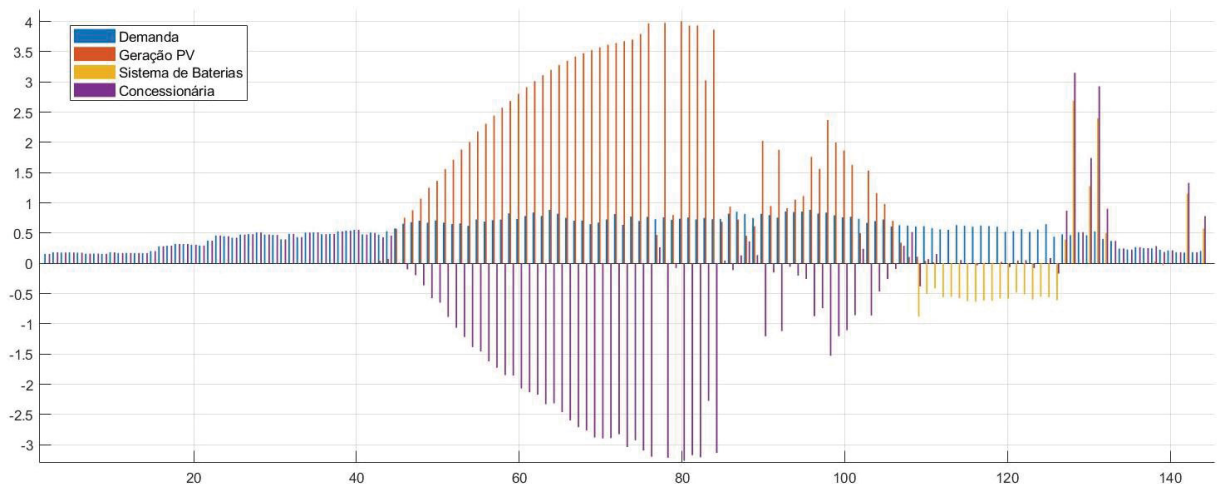


FONTE: O Autor (2021)

Independente do desvio encontrado, o balanço energético é realizado utilizando a concessionária como barra swing. A FIGURA 34 mostra o balanço

energético dos pontos de operação realizados pela microrrede, sendo apresentados os valores de demanda (na cor azul), geração de energia PV (na cor laranja), do fluxo de energia no sistema de armazenamento por baterias (na cor amarela) e o fluxo de energia com a concessionária (na cor roxa), demonstrando como o modelo optou por atender a demanda a cada intervalo de dez minutos. Devido a grande quantidade de informação, para auxiliar na visualização dos dados, o gráfico apresentado foi dividido em três períodos distintos, sendo eles: o período com baixa demanda energética (FIGURA 35); o período em que a geração de energia PV é existente (FIGURA 36); e o período noturno, no qual existe diferenciação tarifária de energia (FIGURA 37).

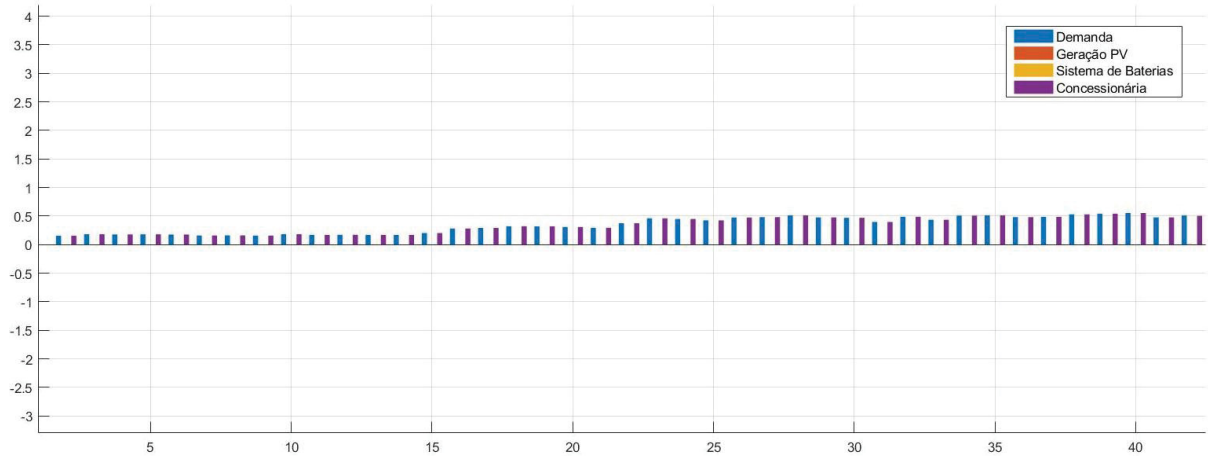
FIGURA 34 - BALANÇO ENERGÉTICO DO PONTO DE OPERAÇÃO REALIZADO PELA MICRORREDE



FONTE: O Autor (2021)

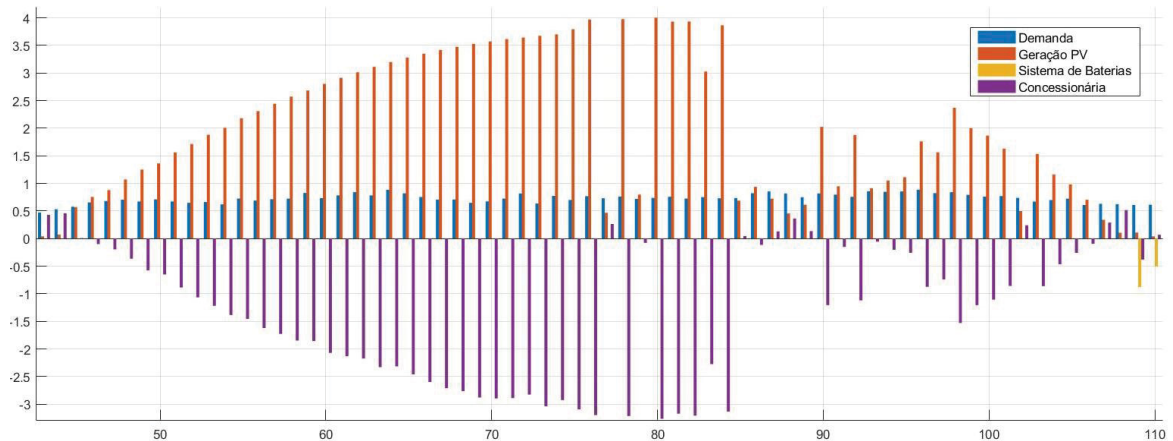
É possível perceber que existem algumas divergências entre o despacho para o dia seguinte, apresentado na FIGURA 12, com este que está sendo apresentado, sempre que existe um desvio médio ou grande, no qual o sistema de gerenciamento de energia opta, respectivamente, pelo ajuste do ponto de operação e pela otimização de um novo ponto de operação. Estas divergências evidenciam as variações de geração de energia PV, as variações de carga, bem como a atuação do sistema de gerenciamento no decorrer do dia simulado.

FIGURA 35 - BALANÇO ENERGÉTICO DO PONTO DE OPERAÇÃO REALIZADO PELA MICRORREDE – PERÍODO DE BAIXA DEMANDA ENERGÉTICA.



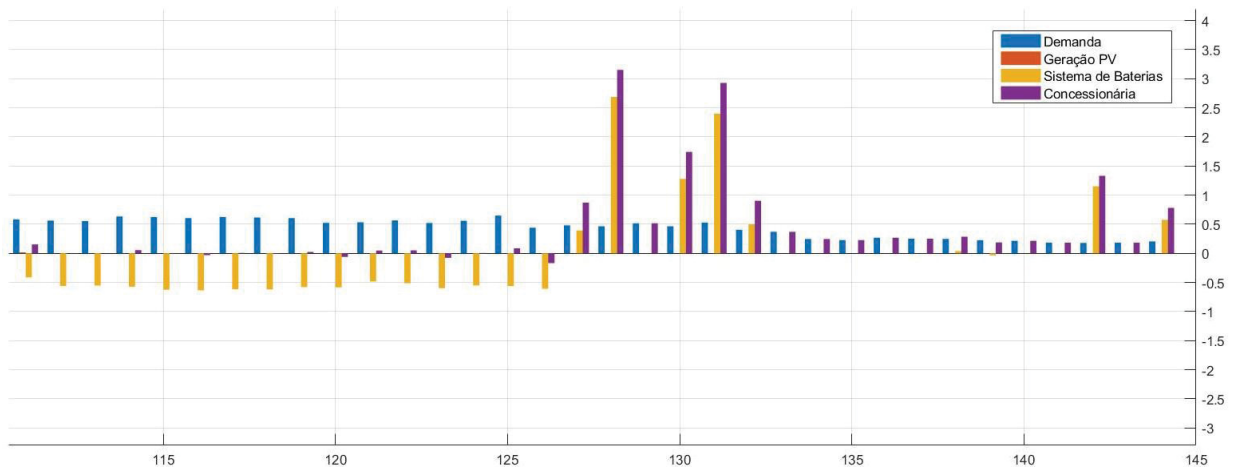
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 36 - BALANÇO ENERGÉTICO DO PONTO DE OPERAÇÃO REALIZADO PELA MICRORREDE – PERÍODO COM GERAÇÃO DE ENERGIA PV.



FONTE: O Autor (2021)

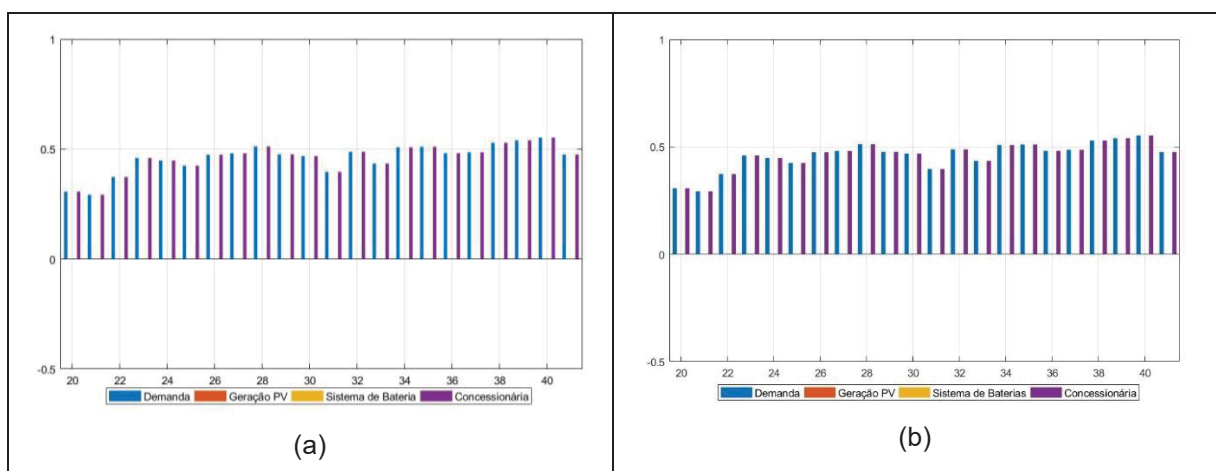
FIGURA 37 - BALANÇO ENERGÉTICO DO PONTO DE OPERAÇÃO REALIZADO PELA MICRORREDE – PERÍODO NOTURNO.



FONTE: O Autor (2021)

Para os pontos de desvio pequeno, não existe diferença entre o despacho para o dia seguinte e o que foi realizado pela microrrede. O sistema de gerenciamento opta por operar com os dados do despacho para o dia-seguinte, visto que a divergência não foi significativa. Na FIGURA 38 é possível visualizar que a operação é igual o planejado no dia anterior.

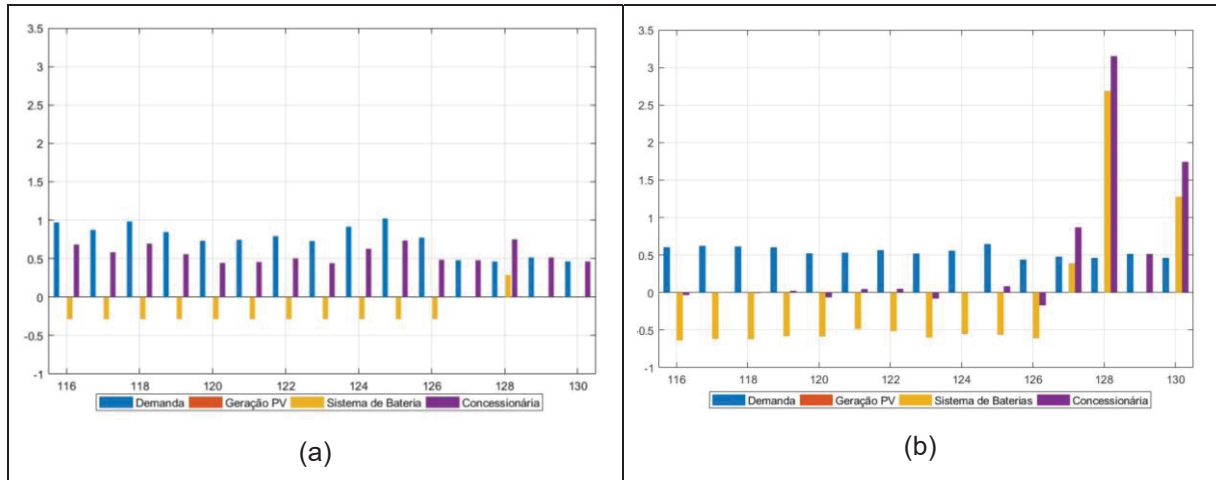
FIGURA 38 - COMPARAÇÃO – DESVIO PEQUENO. (a) PONTOS DE OPERAÇÃO DO DESPACHO PARA O DIA SEGUINTE; (b) PONTOS DE OPERAÇÃO REALIZADOS.



FONTE: O Autor (2021)

Para a situação de desvios médios (FIGURA 39), é possível perceber uma diferença entre as demandas planejadas e em tempo real, devido às incertezas de carga, em que a demanda realizada é quase a metade do valor daquela que havia sido estimada no despacho para o dia seguinte. Com isso, o sistema de gerenciamento aumenta a taxa de descarga do sistema de armazenamento, reduzindo para quase zero a quantidade de energia a ser suprida pela concessionária, neste período em que a tarifa de energia é mais alta e, conseqüentemente, reduzindo o custo operacional da microrrede. Quando a tarifa reduz ao valor mais baixo, uma grande quantidade de energia é solicitada da concessionária, para que seja realizada a carga da bateria. O sistema de gerenciamento em tempo real optou por uma forma de utilizar os RED da microrrede de forma a reduzir o custo operacional da microrrede.

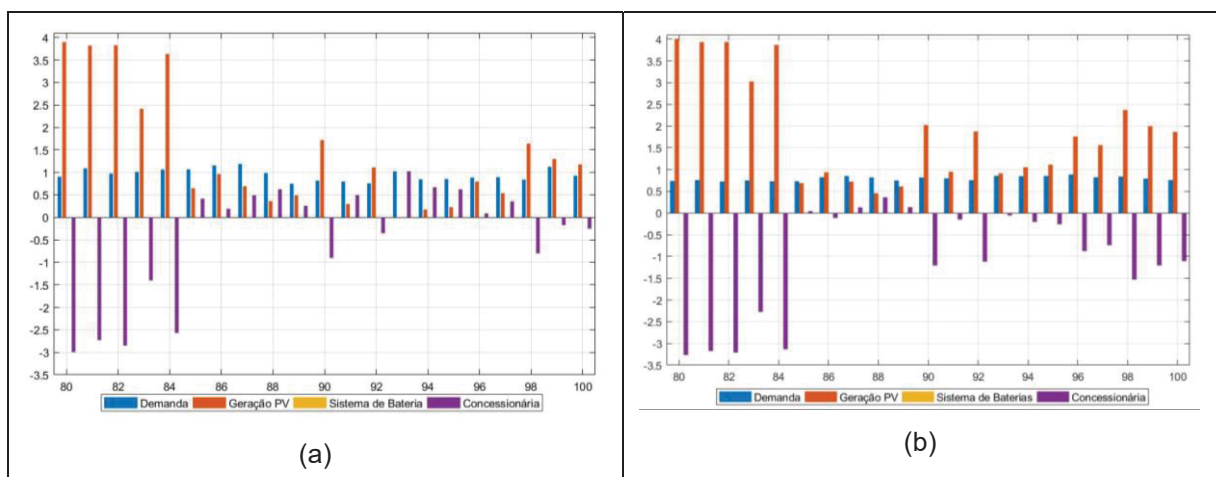
FIGURA 39 - COMPARAÇÃO – DESVIO MÉDIO. (a) PONTOS DE OPERAÇÃO DO DESPACHO PARA O DIA SEGUINTE; (b) PONTOS DE OPERAÇÃO REALIZADOS.



FONTE: O Autor (2021)

Na FIGURA 40, nos pontos 80 a 84 acontecem situações de desvio grande, ocasionado devido a diferenças da carga ainda maiores. Diante desta questão, o sistema de otimização busca a melhor forma de atender a demanda no menor curso possível, atendendo a demanda com a geração de energia da microrrede e o excedente de energia é injetada na rede da concessionária, em troca de créditos de energia.

FIGURA 40 - COMPARAÇÃO – DESVIO GRANDE. (a) PONTOS DE OPERAÇÃO DO DESPACHO PARA O DIA SEGUINTE; (b) PONTOS DE OPERAÇÃO REALIZADOS.



FONTE: O Autor (2021)

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizada a emulação de dados tendo como base três curvas de carga reais para três dias-tipo, objetivando criar um perfil de carga da microrrede para um ano inteiro, realizando um ajuste nas curvas de carga de forma a compatibilizá-las com o histórico de consumo da microrrede em estudo. Os dados para o ano inteiro foram criados a partir da inserção de ruído com média zero diária nos dados originais de forma a não alterar a característica comportamental da curva original. Desta forma, os dados de carga anual gerados foram utilizados como banco de dados para previsão da carga no próximo ponto de operação.

Foi elaborado um previsor do próximo ponto de operação que tem como função prever no tempo t qual será o ponto de operação da microrrede em $t+1$. Para este fim, fez-se necessário prever a geração de energia fotovoltaica, a demanda e qual o estado de carregamento do sistema de baterias. Para os dois primeiros, utilizaram-se técnicas de RNA e para o último um método determinístico foi utilizado. Com isto, o previsor do PPO serviu para que fosse possível analisar o que está acontecendo em tempo real, prevendo o que acontecerá no próximo intervalo de tempo, possibilitando a comparação com os dados advindos do despacho para o dia seguinte e, por consequência, podendo atuar na microrrede de forma a corrigir possíveis divergências encontradas.

Para os dados do despacho para o dia-seguinte, um modelo matemático para resolução de otimização *day-ahead* de microrredes, foi adaptado para os intervalos de tempo de 10 minutos utilizado nesta dissertação. Após isto, foram avaliados os dados e verificou-se que estes poderiam ser utilizados para base de dados do despacho para o dia-seguinte que são utilizados para comparação com os dados em tempo real.

Para análise destas divergências, foi proposto um método de cálculo de desvio em três dimensões de análise simultâneas, considerando geração de energia renovável, estado de carga da bateria e dados de carga, calculando a distância cartesiana entre os dois pontos das grandezas normalizadas. Desta forma, é possível verificar o desvio entre planejado e tempo real de forma conjunta destas grandezas da microrrede, tendo assim uma visão mais ampla do que está acontecendo e o que ocasionou o desvio, categorizando-o como pequeno, médio ou grande. Ainda, por se tratar de um único cálculo, economiza-se tempo computacional.

Ainda, foi elaborado um sistema de apoio a decisão utilizando um sistema de inferência *fuzzy* que, em caso de desvio médio, analisa os desvios individualmente e realiza um ajuste no ponto de operação. O ajuste pode acontecer na taxa de carga e descarga do sistema de baterias e, em caso de impossibilidade de atendimento da demanda, também pode ocorrer o desligamento de cargas controláveis. O SAD mostrou-se eficaz em realizar estes ajustes, e ainda reduzindo o custo operacional da microrrede através do atendimento da demanda com o sistema de armazenamento de energia por baterias.

Para os casos de desvio grande, foi implementado um sistema de otimização utilizando programação linear inteira-mista (PLIM) para que um novo ponto de operação seja otimizado, visto que neste caso, o que foi planejado no despacho para o dia-seguinte torna-se inviável devido as divergências encontradas. Este sistema consiste em duas implementações distintas, sendo uma para a microrrede conectada à rede e outra para a microrrede ilhada. Na primeira, busca-se atender a demanda no menor custo possível; na segunda, objetiva-se atender ao máximo a demanda da microrrede, evitando possíveis desligamentos de cargas controláveis.

Portanto, esta dissertação propôs um sistema de gerenciamento de energia em tempo real para microrredes, utilizando uma abordagem *fuzzy* para tratamento das divergências existentes entre o despacho para o dia-seguinte e as informações em tempo real. O sistema é composto de três partes principais: o previsor do próximo ponto de operação, implementado utilizando técnicas de RNA; sistema de apoio a decisão com um sistema de inferência *fuzzy*; e um sistema de otimização para o próximo ponto de operação em PLIM. O sistema prevê atuação para microrrede tanto conectada à rede da concessionária quanto ilhada, não sendo considerada a situação de microrredes isoladas.

O sistema de gerenciamento de energia em tempo real proposto, consegue prever, analisar e atuar no próximo ponto de operação da microrrede, buscando atender a demanda de energia apesar de alguma contingência que venha a acontecer. Como visto, o sistema é capaz de perceber divergências quanto à conexão da rede com a concessionária, quanto a demanda de energia, geração e o SOC do sistema de armazenamento da microrrede. Estas divergências são percebidas através de cálculos de desvios.

As simulações realizadas através de cenários de atuação ajudaram a analisar e validar a atuação do sistema para as diversas possibilidades que podem acontecer

no decorrer da operação da microrrede. Além destas, foi realizada uma simulação de um dia completo utilizando os dados da microrrede do Salão de Atos do Parque Barigui, o qual mostrou-se eficaz para encontrar as divergências e atuar de acordo, buscando a melhor operacionalização da microrrede minimizando os custos operacionais através dos ajustes no ponto de operação e da otimização linear.

Como trabalhos futuros, sugere-se a utilização do modelo em aplicação real, utilizando dados coletados da própria microrrede a ser gerenciada para alimentar os sistemas de previsão, tornando este menos suscetíveis a erros de previsão. Ainda, sugere-se a redução do intervalo de tempo de análise, podendo assim estar corrigindo possíveis divergências mais rapidamente. Por fim, poderia ser repensado o sistema de gerenciamento para que este pudesse ser implementado em microrredes isoladas.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Unidades Consumidoras com Geração Distribuída**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808?inheritRedirect=false>. Acesso em: 24/8/2021.

BECCENERI, J. C. **Meta-heurísticas e Otimização Combinatória**: Aplicações em Problemas Ambientais. . p.21, 2010. Disponível em: <http://www.lac.inpe.br/elac13/arquivos/MiniCurso_02ELAC2012.pdf>. .

BYRNE, R. H.; NGUYEN, T. A.; COPP, D. A.; CHALAMALA, B. R.; GYUK, I. Energy management and optimization methods for grid energy storage systems. **IEEE ...**, 2017. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8016321/>>. .

CHENG, Z.; DUAN, J.; CHOW, M. Y. To centralize or to distribute: That is the question: A comparison of advanced microgrid management systems. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, 2018. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8322317/>>.

CUNHA, M. V. DA. **Estratégias de Gerenciamento pelo Lado da Demanda Aplicadas aos Consumidores de BT Considerando a Tarifa Branca e a Geração Distribuída**, 2016. Universidade Federal de Santa Maria.

DEHGHANPOUR, K.; NEHRIR, H. Real-time multiobjective microgrid power management using distributed optimization in an agent-based bargaining framework. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2017. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7934324/>>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Estudos do Plano Decenal da Expansão de Energia 2031**: Demanda de Eletricidade. , p. 16, 2020. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno de Demanda de Eletricidade - PDE 2030 \(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno de Demanda de Eletricidade - PDE 2030 (1).pdf)>. .

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; LACERDA, R. T.; TASCA, J. E. ProKnow-C, knowledge development process-constructivist. **Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. Brasil**, v. 10, n. 4, p. 2015, 2010.

EPE. **Balço Energético Nacional**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. .

GÁRATE, J. I.; IBARRA, E.; MARTÍNEZ DE ALEGRÍA, I.; PLANAS, E.; ANDREU, J. AC and DC technology in microgrids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 726–749, 2014.

GRADY, W. M.; GONZALEZ, J.; SUCH, M. C.; CHEN, D.; HILL, C. A. Battery Energy

Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 2, p. 850–857, 2012.

HAN, J.; PIETTE, M. A. Solutions for Summer Electric Power Shortages : Demand Response and its Applications in Air Conditioning and Refrigerating Systems. **Refrigeration, Air Conditioning, and Electric Power Machinery**, v. 29, n. 1, p. 1–4, 2008.

HATZIARGYRIOU, N. **Microgrid: Architecture and Control**. 2014.

HAYKIN, S. **Redes Neurais**. 2º ed. 2007.

HU, W.; WANG, P.; GOOI, H. B. Toward optimal energy management of microgrids via robust two-stage optimization. **IEEE Transactions on smart grid**, 2016. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7491274/>>.

IEA. Data and statistics. Disponível em: <[https://www.iea.org/data-and-statistics?country=BRAZIL&fuel=Energy consumption&indicator=Carbon intensity of industry energy consumption](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=BRAZIL&fuel=Energy%20consumption&indicator=Carbon%20intensity%20of%20industry%20energy%20consumption)>. Acesso em: 1/7/2020.

JIANG, Q.; XUE, M.; GENG, G. Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes. **IEEE transactions on power systems**, 2013. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6472268/>>.

LARA FILHO, M. O. DE. **MODELO ROBUSTO ORIENTADO A DADOS PARA PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DE OPERAÇÃO DE MICRORREDES CONSIDERANDO RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS SOB INCERTEZAS**, 2021.

LUNA, A. C.; MENG, L.; DIAZ, N. L.; GRAELLS, M.; ... Online energy management systems for microgrids: experimental validation and assessment framework. ... **on Power Electronics**, 2017. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7915727/>>.

MA, W. J.; WANG, J.; GUPTA, V.; CHEN, C. Distributed energy management for networked microgrids using online ADMM with regret. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 9, n. 2, p. 847–856, 2018. IEEE.

MARNAY, CHRIS; CHATZIVASILEIADIS, S.; ABBEY, C.; et al. Microgrid evolution roadmap. **Proceedings - 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies, EDST 2015**, , n. August 2010, p. 139–144, 2015.

MARNAY, C; CHATZIVASILEIADIS, S.; ABBEY, C.; ... Microgrid evolution roadmap. ... **symposium on smart ...**, 2015. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7315197/>>.

MARZAL, S.; SALAS, R.; GONZÁLEZ-MEDINA, R.; GARCERÁ, G.; FIGUERES, E. Current challenges and future trends in the field of communication architectures for

microgrids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. September 2017, p. 3610–3622, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.101>>. .

N. S. NARAYAN. Solar Charging Station for Light Electric Vehicles: A Design and Feasibility Study. , p. 152, 2013.

OTTO, R. B. **Implementação de um Controle Centralizado para Operação em Tempo Real de Microrredes**. 2019.

PALENSKY, P.; DIETRICH, D. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 7, n. 3, p. 381–388, 2011.

RAHBAR, K.; XU, J.; ZHANG, R. Real-time energy storage management for renewable integration in microgrid: An off-line optimization approach. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 1, p. 124–134, 2015. IEEE.

RANA, M. J.; ZAMAN, F.; RAY, T.; SARKER, R. Real-time scheduling of community microgrid. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125419, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125419>>. .

SAÚDE, L. M. S. **Análise comparativa entre os métodos auto-regressivo, integrado de médias móveis e rede neural artificial para previsão de séries temporais**, 2018.

SHI, W.; LI, N.; CHU, C. C.; GADH, R. Real-Time Energy Management in Microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 1, p. 228–238, 2017.

STLUKA, P.; GODBOLE, D.; SAMAD, T. Energy management for buildings and microgrids. **Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control**, 2011. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6161051/>>. .

SUBRAMANIAN, A.; GARCIA, M. J.; ... Real-time scheduling of distributed resources. **IEEE Transactions on Smart Grid on Smart Grid**, 2013. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6670091/>>. .

TON, D T; SMITH, M. A. The US department of energy’s microgrid initiative. **The Electricity Journal**, 2012. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619012002254>>. .

TON, DAN T.; SMITH, M. A. The U.S. Department of Energy’s Microgrid Initiative. **Electricity Journal**, v. 25, n. 8, p. 84–94, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>>. .

WAMUSSE, V. A. R. **Otimização de Sistemas Isolados para Eletrificação Rural considerando a probabilidade de perda de cargaSustainability (Switzerland)**, 2019. UFPR. Disponível em:

<http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI>. .

WANG, D.; QIU, J.; REEDMAN, L.; MENG, K.; LAI, L. L. Two-stage energy management for networked microgrids with high renewable penetration. **Applied energy**, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918308328>>. .

WANG, X.; JI, Y.; WANG, J.; WANG, Y.; QI, L. Optimal energy management of microgrid based on multi-parameter dynamic programming. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 16, n. 6, 2020.

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

YANG, X.; ZHANG, Y.; HE, H.; REN, S.; ... Real-time demand side management for a microgrid considering uncertainties. **IEEE Transactions on ...**, 2018. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8334652/>>. .

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **IEEE International Symposium on Information Theory - Proceedings**, p. 4, 1965.

ZENG, P.; LI, H.; HE, H.; LI, S. Dynamic energy management of a microgrid using approximate dynamic programming and deep recurrent neural network learning. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2018. ieeexplore.ieee.org. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8419206/>>. .

ZIA, M F; ELBOUCHIKHI, E.; BENBOUZID, M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. **Applied energy**, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918306676>>. .

ZIA, MUHAMMAD FAHAD; ELBOUCHIKHI, E.; BENBOUZID, M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. **Applied Energy**, v. 222, n. March, p. 1033–1055, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918306676>>. .