

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Alexandre Schopf da Silveira

**MÉTODO HEURÍSTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO
DIMENSIONAMENTO DE UMA MICRORREDE DE ENERGIA**

Santa Maria, RS
2021

Alexandre Schopf da Silveira

**MÉTODO HEURÍSTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE UMA
MICRORREDE DE ENERGIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Dra. Eng.^a Alzenira da Rosa Abaide

Santa Maria, RS
2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Silveira, Alexandre Schopf da
Método heurístico para otimização do dimensionamento de
uma microrrede de energia / Alexandre Schopf da
Silveira.- 2021.
106 p.; 30 cm

Orientador: Alzenira da Rosa Abaide
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2021

1. Microrredes 2. Geração fotovoltaica 3.
Armazenamento 4. Otimização 5. Viabilidade econômica I. da
Rosa Abaide, Alzenira II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

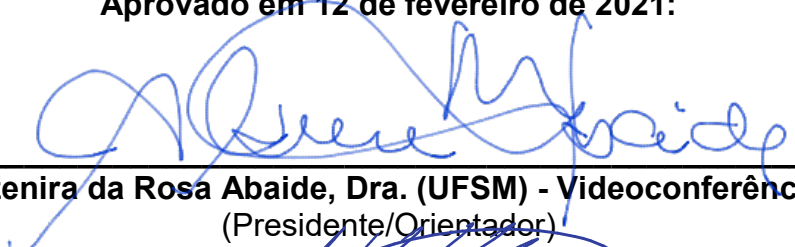
Declaro, ALEXANDRE SCHOPF DA SILVEIRA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Alexandre Schopf da Silveira

**MÉTODO HEURÍSTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE UMA
MICRORREDE DE ENERGIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Aprovado em 12 de fevereiro de 2021:



Alzenira da Rosa Abaide, Dra. (UFSM) - Videoconferência
(Presidente/Orientador)



Nelson Knak Neto, Dr. (UFSM) – Videoconferência



Enoque Dutra Garcia, Dr. (UNIPAMPA) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço infinitamente aos meus pais Airtom e Marineide que me deram condições e base para realizar essa etapa profissional. Aos meus irmãos Alessandra e Eduardo, aos meus avós e tios que também estiveram do meu lado nesta caminhada.

À minha namorada Nathália, que sempre me apoiou, deu-me forças e esteve do meu lado durante todo esse trajeto.

Aos meus colegas do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência, destacando os amigos Leonardo, Bruno e Felipe.

À minha orientadora, desde a graduação, Alzenira, cujos conselhos e ensinamentos foram essências para conclusão desta etapa.

Também, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a execução e apresentação desse trabalho.

“O sucesso nada mais é que ir de fracasso em fracasso sem que se perca o entusiasmo.”

(Winston Churchill)

RESUMO

MÉTODO HEURÍSTICO PARA OTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE UMA MICRORREDE DE ENERGIA

AUTOR: Alexandre Schopf da Silveira
ORIENTADORA: Alzenira da Rosa Abaide, Dra. Eng.^a

As microrredes são definidas como uma parte do sistema de distribuição de energia, capazes de operar conectadas a rede principal ou isoladas, apresentando sistema de geração e armazenamento de energia. É extremamente importante a realização de estudos e avaliação de uma metodologia que possa ser aplicada para obter o ótimo dimensionamento dos componentes de geração e armazenamento de uma microrrede. Assim, o presente trabalho apresenta um método heurístico de otimização baseado na busca exaustiva para obter o dimensionamento ideal de uma microrrede combinada com uma geração fotovoltaica e um sistema de armazenamento em bateria buscando obter o menor valor para os custos anuais do sistema. Além de realizar o dimensionamento da microrrede, foi realizado uma análise da expansão da microrrede para um horizonte determinado através do cálculo do valor presente líquido. A expansão foi realizada considerando 2 cenários para compensar a redução da eficiência dos componentes e também o aumento de consumo de carga dos usuários. No primeiro caso, a compensação é feita através da conexão de mais painéis fotovoltaicos e baterias, no segundo caso a compensação é feita por meio do aumento do consumo de energia da rede principal. A microrrede foi dimensionada para ter 162 painéis fotovoltaicos e 77 baterias. Dessa forma, com um custo anual de R\$ 45.720,00, foi calculado o preço da tarifa horária média da microrrede, resultando em R\$/kWh 0,425. Este preço é inferior a tarifa horária média da distribuidora responsável por suprir energia na região onde a microrrede será instalada. Já em relação a análise da expansão, o valor presente líquido mostrou que o cenário de aquisição de novos componentes é a melhor estratégia para mitigar os efeitos de redução de eficiência e aumento de carga citados. No final, foi feito uma projeção do comportamento da microrrede no final de sua vida útil.

Palavras-Chave: *Microrrede, Geração fotovoltaica, Armazenamento, Otimização, Viabilidade econômica.*

ABSTRACT

DYNAMIC TARIFF MODEL APPLIED TO EV FAST CHARGING STATIONS CONSIDERING OPERATIONAL FORECASTING AND REGIONAL MOBILITY ASPECTS

AUTHOR: Alexandre Schopf da Silveira
ADVISOR: Alzenira da Rosa Abaide, Dra. Eng.

Microgrids are defined as a part of the energy distribution system, capable of operating connected to the main network or isolated, presenting an energy generation and storage system. It is extremely important to carry out studies and evaluate a methodology that can be applied to obtain the optimal sizing of the generation and storage components of a microgrid. Thus, the present work presents a heuristic optimization method based on an exhaustive search to obtain the optimal sizing of a microgrid combined with a photovoltaic generation and a battery storage system seeking to obtain the lowest value for the annual costs of the system. In addition to sizing the microgrid, an analysis of the expansion of the microgrid for a given horizon was performed by calculating the net present value. The expansion was carried out considering 2 scenarios to compensate for the reduction in the efficiency of the components and also the increase in the load consumption of the users. In the first case, the compensation is made by adding more photovoltaic panels and batteries, in the second case the compensation is made by increasing the energy consumption of the main grid. The microgrid was sized to have 162 photovoltaic panels and 77 batteries. Thus, with an annual cost of R\$ 45,720.00, the average hourly rate for the micro network was calculated, resulting in R\$/kWh 0.425. This price is lower than the average hourly rate of the distributor responsible for supplying energy in the region where the microgrid will be installed. Regarding the expansion analysis, the net present value showed that the scenario of acquisition of new components is the best strategy to mitigate the effects of efficiency reduction and load increase mentioned. At the end, a projection of the microgrid's behavior was made at the end of its useful life.

Key words: Microgrid, Photovoltaic Generation, Battery Storage System, Optimization, Economic Feasibility.

Lista de Figuras

Figura 1 - Evolução do papel do consumidor.....	13
Figura 2 - Estado de desenvolvimento de microrredes.....	15
Figura 3 - Exemplo de microrrede e seus possíveis componentes.....	19
Figura 4 - Topologia de uma microrrede CA em baixa tensão.....	23
Figura 5 - Topologia de uma microrrede CC em baixa tensão	24
Figura 6 - Topologia de uma microrrede híbrida.....	25
Figura 7 – Componentes das microrredes.....	27
Figura 8 - Matriz energética brasileira em 2019.....	27
Figura 9 – Diagrama de blocos da otimização.....	50
Figura 10 - Modelo de microrrede empregado na otimização.....	51
Figura 11 - Fluxograma de operação da microrrede.....	53
Figura 12 - Fluxograma do processo de otimização	61
Figura 13 – Carga demandada típica para um dia.....	64
Figura 14 - Carga demanda segregada em estações climáticas	65
Figura 15 – Carga demanda segregada em dias úteis e não-úteis	65
Figura 16 - Tarifa horária de energia vigente na região.....	66
Figura 17 – Comportamento do índice de radiação solar anual, no verão e no inverno	68
Figura 18 – Comportamento da temperatura anual, no verão e no inverno	68
Figura 19 - Variação de potência dos componentes da microrrede.....	73
Figura 20 - Estado de carga do sistema de armazenamento durante 24 horas	74
Figura 21 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 2....	76
Figura 22 – Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 2	77
Figura 23 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 3....	78
Figura 24 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 3.....	79
Figura 25 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 4....	80
Figura 26 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 4.....	81
Figura 27 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 5....	82
Figura 28 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 5.....	83
Figura 29 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 6....	84
Figura 30 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 6.....	85
Figura 31 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 7....	86
Figura 32 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 7.....	87
Figura 33 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 8....	89
Figura 34 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 8.....	89
Figura 35 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 9....	91
Figura 36 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 9.....	91
Figura 37 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 10... 93	
Figura 38 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 10.....	93
Figura 39 - Fluxo de caixa dos casos de expansão analisados.....	95
Figura 40 - Valor presente líquidos dos casos de expansão analisados	96
Figura 41 - Taxa de excedente de energia para os casos analisados.....	97
Figura 42 - Fração de energia renovável para cada caso de expansão analisado... 98	
Figura 43 - Tendência da fração de energia renovável para cada caso de expansão	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre as topologias de uma microrrede.....	26
Tabela 2 - Comparativo entre as fontes de geração de uma microrrede	31
Tabela 3 - Comparativo entre as tecnologias de armazenamento	38
Tabela 4 - Média anual do consumo de energia	64
Tabela 5 - Projeção da tarifa para um horizonte de 10 anos.....	67
Tabela 6 - Especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos	69
Tabela 7 - Especificações técnicas das baterias.....	70
Tabela 8 - Especificações técnicas dos inversores	71
Tabela 9 - Dados econômicos.....	71
Tabela 10 - Descrição dos custos da microrrede	73
Tabela 11 - Comparação entre os custos da microrrede, geração e rede e somente rede	75
Tabela 12 - Análise da expansão da microrrede para o ano 2.....	76
Tabela 13 - Análise da expansão da microrrede para o ano 3.....	78
Tabela 14 - Análise da expansão da microrrede para o ano 4.....	80
Tabela 15 - Análise da expansão da microrrede para o ano 5.....	82
Tabela 16 - Análise da expansão da microrrede para o ano 6.....	84
Tabela 17 - Análise da expansão da microrrede para o ano 7.....	86
Tabela 18 - Análise da expansão da microrrede para o ano 8.....	88
Tabela 19 - Análise da expansão da microrrede para o ano 9.....	90
Tabela 20 - Análise da expansão da microrrede para o ano 10.....	92
Tabela 21 - Fluxo de caixa e Valor Presente Líquido para o horizonte analisado.....	94
Tabela 22 - Valores de FER e TEE para os dois casos analisados	97

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivos gerais	15
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 MICRORREDES.....	18
2.2 MODOS DE OPERAÇÃO.....	21
2.2.1 Operação conectada à rede	21
2.2.2 Operação ilhada	21
2.3 ARQUITETURA	22
2.3.1 Microrrede CA	22
2.3.2 Microrrede CC	24
2.3.3 Microrrede híbrida	25
2.4 COMPONENTES.....	26
2.4.1 Fontes de geração	27
2.4.2 Sistemas de armazenamento	32
2.4.3 Cargas	39
2.4.4 Sistema de gerenciamento de energia	40
2.4.5 Dispositivos eletrônicos	41
2.5 BENEFÍCIOS DAS MICRORREDES	42
2.5.1 Econômicos	43
2.5.2 Técnicos	44
2.5.3 Ambientais	44
2.5.4 Sociais	45
2.6 DESAFIOS DAS MICRORREDES.....	45
2.6.1 Econômicos	46
2.6.2 Técnicos	46
2.6.3 Regulatórios	47
2.6.4 Mercado	48
3 METODOLOGIA	49
3.1 OTIMIZAÇÃO DA MICRORREDE	49
3.1.1 Configuração da microrrede	50

3.1.2 Operação da microrrede	52
3.1.3 Recursos distribuídos	54
3.1.4 Função objetivo	55
3.1.5 Restrições	57
3.1.5.1 Configuração	57
3.2 ANÁLISE DA EXPANSÃO DA MICRORREDE	61
4 ESTUDO DE CASO	63
4.1 MODELO DE NEGÓCIO	63
4.2 DADOS DE CARGA	63
4.3 TARIFA HORÁRIA	66
4.4 DADOS METEREOLÓGICOS	67
4.5 COMPONENTES	69
4.5.1 Painéis fotovoltaicos	69
4.5.2 Baterias	69
4.5.3 Inversores	71
4.6 DADOS ECONÔMICOS	71
5 RESULTADOS	72
5.1 ÓTIMO DIMENSIONAMENTO DA MICRORREDE	72
5.2 ANÁLISE DA EXPANSÃO DA MICRORREDE	75
5.2.1 Ano 2	75
5.2.2 Ano 3	77
5.2.3 Ano 4	79
5.2.4 Ano 5	81
5.2.5 Ano 6	83
5.2.6 Ano 7	85
5.2.7 Ano 8	87
5.2.8 Ano 9	90
5.2.9 Ano 10	92
5.2.10 Valor Presente Líquido	94
5.3 TRABALHOS PUBLICADOS	99
6 CONCLUSÃO	100

1 INTRODUÇÃO

As fontes geradoras de energia baseadas em recursos renováveis assumiram um papel protagonista na mudança do setor elétrico. Com custo nivelado inferior às fontes fósseis, as fontes renováveis contribuem para a sustentabilidade da geração de energia, ao mesmo tempo que impulsiona a geração distribuída, levando a geração para um ponto mais próximo do consumidor.

Aliado a isso, existe uma busca incessante por dados do setor elétrico para possibilitar uma modernização do mesmo. Porém, a tecnologia antiga existente nas redes não permite a aquisição de informações em grande escala.

Dessa forma, observa-se, recentemente, que os sistemas elétricos do mundo estão passando por uma evolução em seu planejamento e operação. Em (GIFALLI, 2019) pode-se observar que esse desenvolvimento do setor deve-se a:

- Descarbonização: representado pela inserção fontes de geração de energia limpa e renovável;
- Descentralização: representado pela integração de Recursos Energéticos Distribuídos (RED, tais como sistemas de geração e armazenamento);
- Digitalização: representado pelo desenvolvimento de sistemas de comunicação e automação em toda a rede elétrica.

A descentralização, descarbonização e digitalização são vetores de transformação que apontam para um novo modelo energético que mudará sobremaneira o mercado de distribuição de energia elétrica nos próximos anos. Essa tendência é alavancada pela necessidade de controlar os custos de eletricidade, renovar os ativos depreciados, melhorar a resiliência e a confiabilidade, diminuir as emissões de CO₂ visando mitigar as mudanças climáticas e prover eletricidade de maneira confiável para áreas onde não há infraestrutura elétrica (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018).

A busca por esses objetivos acarreta no desenvolvimento de novas tecnologias e na transformação do sistema elétrico convencional em um sistema mais ativo, onde a estratégia de operação possa ser melhor prevista e otimizada, além de possibilitar aos consumidores exercer um papel mais dinâmico devido a sua capacidade de gerar energia. Dessa forma, percebe-se o surgimento das redes inteligentes, que podem

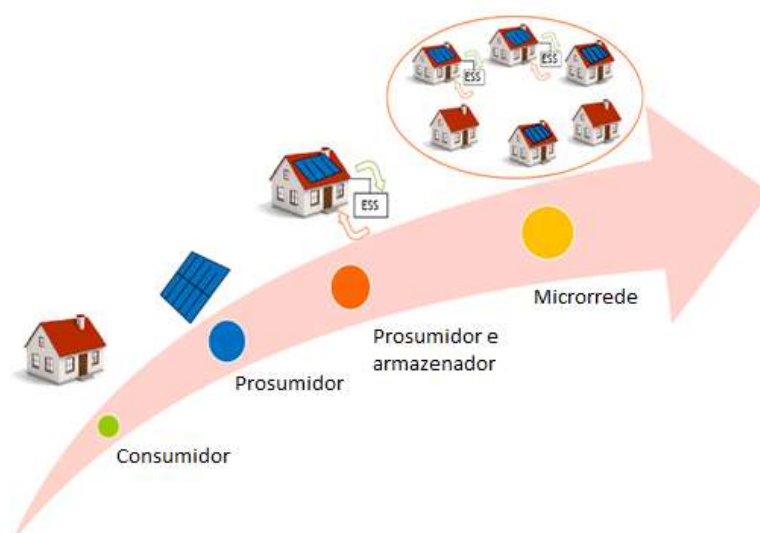
ser entendidas como a evolução das redes elétricas tradicionais (YOLDAŞ *et al.*, 2017).

A definição do Departamento de Energia dos EUA de uma rede inteligente consiste em um controle supervisionado e totalmente automatizado da rede de transmissão de energia de cada usuário e nó da rede, garantindo informações e energia entre todos os nós no processo de transmissão e distribuição da usina até o usuário final (OFGEM; DECC; SMART GRID FORUM, 2014).

Em (YOLDAŞ *et al.*, 2017), observa-se que as microrredes exercem um papel fundamental nesta tendência de modernização das redes elétricas com a implementação das redes inteligentes. O Departamento de Energia dos Estados Unidos conceitua as microrredes como um grupo de cargas interconectadas e recursos de energia distribuídos dentro de limites elétricos claramente definidos que atuam como uma única entidade controlável em relação à rede. Uma microrrede pode se conectar e desconectar da rede para permitir que ela opere no modo conectado à rede ou no modo ilhado (TON; SMITH, 2012).

O desenvolvimento de microrredes foi possível devido a evolução do papel dos consumidores, já que eles possuem capacidade de gerar energia e, conseqüentemente, exercer uma função mais relevante dentro da operação do sistema elétrico. A Figura 1 mostra o progresso da função do consumidor dentro da rede de distribuição até chegar a um papel ativo de prosumidor.

Figura 1 - Evolução do papel do consumidor



Fonte: The Energy of Change (2020)

Dessa forma, percebe-se que as microrredes, por meio de um papel ativo da parte interessada consumidora de energia dentro dos limites elétricos das microrredes com os operadores do sistema de distribuição, favorece a integração de geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia e gerenciamento pelo lado da demanda. A soma de todos esses benefícios alavanca o desempenho das redes de distribuição na busca pelo seu principal objetivo, que é fornecer ao consumidor a energia gerada de maneira segura e com qualidade.

1.1 CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As microrredes proporcionam inúmeras vantagens técnicas na integração de recursos de energia distribuídos à rede de energia, sobretudo renováveis, e na manutenção de cargas críticas, sendo também considerada essencial para o futuro desenvolvimento das redes inteligentes.

Entretanto, apesar de apresentar todos esses benefícios, as microrredes ainda possuem um custo inicial para implementação considerado muito alto para a maioria dos consumidores. Dessa forma, justifica-se o investimento em pesquisas na área, especialmente em sistemas de otimização, a fim de obter o melhor arranjo de recursos possíveis demandando o menor investimento possível (OLIVARES *et al.*, 2014). Conforme apresenta a Figura 2, as microrredes ainda estão num estágio inicial de pesquisa e desenvolvimento.

As microrredes podem ser super ou subdimensionadas. Um sistema superdimensionado resultará em alto custo do sistema e excesso de energia será produzido, tornando-a inviável economicamente para os clientes. Por outro lado, caso o sistema de microrrede seja subdimensionado, os resultados serão falhas no fornecimento de energia às cargas, comprometendo a viabilidade técnica e operacional dela (NADJEMI *et al.*, 2017).

Em (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018) se observa a implementação de microrredes em locais onde existe uma infraestrutura básica de redes de distribuição por três motivos: segurança energética, benefícios econômicos e integração de energia não-poluidora. Sendo assim, o planejamento e o dimensionamento ideal desse sistema, do ponto de vista econômico e técnico, são essenciais para uma

implementação de sucesso dessa tecnologia. Percebe-se, então, a significância do maior investimento no estudo e no desenvolvimento de técnicas de otimização e dimensionamento de uma microrrede.

Figura 2 - Estado de desenvolvimento de microrredes



Fonte: (BELLIDO, 2018)

Pelo que foi exposto, faz-se necessários o estudo e avaliação de uma metodologia que possa ser aplicada para obter o ótimo dimensionamento dos componentes de geração e armazenamento de uma microrrede. Dentro desse estudo, determinar um modelo de operação que busque suprir o autoconsumo dos consumidores dentro da microrrede é essencial. Para o desenvolvimento de um método de otimização confiável, é imprescindível o estudo dos componentes que irão compor a microrrede.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Visto que as microrredes são uma componente chave nos cenários envolvendo redes inteligentes, com objetivo de obter melhor integração de recursos de energia distribuída, melhorando a eficiência e confiabilidade do sistema, este trabalho tem

como objetivo realizar a otimização do dimensionamento de uma microrrede conectada ao sistema elétrico, contendo geração fotovoltaica e sistemas de armazenamento de energia.

1.2.2 Objetivos específicos

Desta forma, para atingir o objetivo geral apresentado acima, será necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

1. Analisar os parâmetros operacionais e construtivos de microrredes;
2. Desenvolver a estratégia de operação da microrrede;
3. Definir a função objetivo restrições de otimização;
4. Obter o ótimo dimensionamento do sistema de geração fotovoltaica e do sistema de armazenamento de energia;
5. Obter o custo anual da microrrede e tarifa média de operação;
6. Analisar a viabilidade econômica entre 2 casos de expansão da microrrede.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em 7 capítulos, da seguinte forma:

- Capítulo 1: neste capítulo, é apresentada a introdução, caracterização e justificativas, e também são apresentados os objetivos deste trabalho;
- Capítulo 2: nesta parte, é realizada a fundamentação do estudo através de uma revisão detalhada de microrredes, abordando seus componentes, modos de operação, arquiteturas, tipos de controle, vantagens, desafios e a situação atual no Brasil;
- Capítulo 3: o terceiro capítulo traz uma revisão bibliográfica de técnicas de otimização e critérios utilizados para dimensionar microrredes;
- Capítulo 4: aqui, apresenta-se a metodologia desenvolvida para se obter o dimensionamento ótimo da microrrede em questão, a técnica de otimização, a função objetivo e as restrições;
- Capítulo 5: o quinto capítulo traz as características da região na qual a microrrede será instalada, dentre elas a carga que a microrrede deve suprir, a tarifa horária vigente, o índice de irradiação solar, dentre outros;

- Capítulo 6: o sexto capítulo demonstra os resultados obtidos;
- Capítulo 7: neste último capítulo, é apresentada a conclusão do trabalho.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Com este trabalho, espera-se contribuir com um novo método para otimização do dimensionamento de microrredes híbridas de energia com fonte de geração fotovoltaica e sistemas de armazenamento de baterias. Além dele, espera-se apresentar a melhor estratégia para expansão da microrrede.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MICRORREDES

Primeiramente, o conceito de microrredes foi desenvolvido pela UWM – Universidade de Wisconsin-Madison, quando construíram um exemplar desse sistema no Centro Tecnológico Dolan. Assim, definiu-se as microrredes como um agrupamento de recursos de energia distribuídos e cargas, atuando como um sistema único (LASSETER, 2011).

Com a maior pesquisa sobre esta tecnologia de rede, a definição de microrredes evoluiu. Além da adoção de recursos de energia distribuídos, uma microrrede deve ser capaz de operar em modo ilhado e também conectada à rede principal em nível de baixa ou média tensão. Diferentemente da geração distribuída, a microrrede é vista pelo sistema como uma única unidade controlável, possuindo, assim, um único ponto de conexão com a rede, este chamado de *point of common coupling* (PCC) (HATZIARGYRIOU, 2014; LIDULA; RAJAPAKSE, 2011; MARNAY *et al.*, 2015).

As microrredes também possuem um papel ambiental, numa época em que a sociedade exige cada vez mais energia limpa e eficiente. A capacidade de cogeração faz com que as microrredes evitem o desperdício de energia e reduzam as emissões de gases. Como a geração dentro das microrredes situa-se próxima à carga, perdas técnicas nas linhas são reduzidas, essa característica também pode fornecer serviços muito valiosos para suportar redes locais ou mesmo regionais. Além disso, com uma taxa de penetração apropriada de outros recursos de energia distribuídos, como armazenamento de energia, as microrredes tem capacidade para estabilizar a geração intermitente de fontes renováveis, como solar e eólica (MARKETS, 2014). A Figura 3 mostra um exemplo de microrrede, seus componentes e funcionalidades.

A integração dos recursos distribuídos de energia e a capacidade de isolar-se da rede principal trazem inúmeros benefícios as microrredes. Estas funcionalidades dão capacidade a este tipo de rede para melhorar a confiabilidade local, necessitar menor custo de investimento, reduzir emissões, melhorar a qualidade da energia e reduzir as perdas de energia da rede de distribuição (YOLDAŞ *et al.*, 2017).

Figura 3 - Exemplo de microrrede e seus possíveis componentes



Fonte: (NASEO, 2021)

Vale ressaltar que uma microrrede pode ser configurada de diferentes maneiras. Este tipo de rede pode estar conectada a rede principal tanto de baixa quanto média tensão e possuir um barramento CC, CA ou híbrido para realizar a conexão com o sistema elétrico (BORDONS; GARCÍA-TORRES; VALVERDE, 2015). A organização de microrredes é baseada no controle da operação da rede ao lado de maior penetração de geração distribuída, junto com sistemas de armazenamento e cargas controláveis. Essa capacidade de controle é a maior diferença da microrrede em relação a rede de distribuição comum, pois ela possui maior flexibilidade operacional que a rede elétrica principal, promovendo o consumidor a um papel mais ativo dentro do sistema elétrico (HATZIARGYRIOU, 2014).

Assim, percebem-se 3 características principais:

- Controle: supervisiona os componentes elétricos, como potências, tensões e frequências sendo parte fundamental da microrrede, possibilitando as partes interessadas operarem em tempo real a microrrede conforme seus interesses;
- Integração de recursos distribuídos: a microrrede possui fontes de geração distribuída e sistemas de armazenamento, trazendo benefícios técnicos, econômicos e ambientais;

- Operação conectada à rede ou ilhada, seja por escolha do controlador da rede ou motivo forçado, apenas desconectando-se da rede principal por meio do ponto de acoplamento comum.

Além das características abordadas nas definições dos autores citados, também se ressalta as seguintes funcionalidades das microrredes (HOSSAIN *et al.*, 2019; RAJESH *et al.*, 2017):

- Facilita a continuidade de fornecimento de energia as cargas de maior prioridade durante uma falha na rede ou degradação da qualidade de energia;
- Controla a tensão e a frequência de referência necessárias em uma operação isolada;
- Ter capacidade *plug and play*;
- Possibilita a cogeração de energia.

É importante ressaltar que a classificação de uma microrrede não é relacionada à tecnologia envolvida, fonte utilizada, qualidade ou quantidade da energia. Assim, não existe capacidade máxima definida para microrredes e depende das cargas e autonomia requerida, as quais demarcam sua potência mínima, podendo variar dos quilowatts (kW) até os megawatts (MW) (MARKETS, 2014).

Em (NAVIGANT, 2013; PLANAS *et al.*, 2015; SCHWAEGERL (SIEMENS), 2009; SOSHINSKAYA *et al.*, 2014) as microrredes são classificadas segundo a/o:

- Nível de tensão: isoladas, baixa tensão e alimentadoras de média tensão.
- Segmento de aplicação: comunitária/distribuidora, comercial/industrial, institucional/campus universitário, isoladas e militares.
- Forma de alimentação: cargas alimentadas individualmente ou geração centralizada.
- Modo de controle: principal, principal virtual (remoto, via comunicação) ou distribuído.
- Tipo de arquitetura: CA ou CC.

2.2 MODOS DE OPERAÇÃO

Conforme já citado, uma microrrede deve ter a capacidade de operar em dois modos: conectada à rede principal ou ilhada em relação a esta, em modo permanente ou não.

As microrredes que atuam ilhadas em modo permanentes são chamadas de microrredes isoladas. Este tipo de microrrede é encontrado, usualmente, em regiões afastadas onde não há linhas físicas de distribuição ou transmissão (JESUS, 2018).

Para melhor operação da microrrede, é essencial que ela seja capaz de suportar a transição entre os dois modos. Podem decorrer dessa transição de operação grandes desbalanços entre geração e cargas, resultando em problemas de controle de frequência e tensão. A fim de extinguir estes efeitos, pode ser preciso o emprego do respectivo alívio de carga (HUAYLLAS, 2015).

2.2.1 Operação conectada à rede

Neste modo de operação, a microrrede tem a capacidade de realizar o fluxo bidirecional de potência, ou seja, importar ou injetar energia ativa e oferecer suporte de energia reativa à rede principal, podendo controlar a tensão local (HUAYLLAS, 2015).

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

Quando conectada à rede, a microrrede obedecerá as características do sistema principal, ou seja, ao nível de tensão e frequência da rede de distribuição (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

2.2.2 Operação ilhada

A microrrede pode se isolar da rede principal por motivo forçado ou motivo intencional. O isolamento forçado ocorre devido às faltas ou perturbações que

ocorrem na rede principal. Por outro lado, o isolamento intencional pode ser feito tanto por razões econômicas, devido a ser atrativo economicamente aos consumidores em horários de ponta, quando a tarifa vigente é mais cara que em outros horários, ou também por razões técnicas, como realização de manutenções programadas (HUAYLLAS, 2015).

Quando a microrrede opera em modo ilhado, ou seja, desconectada de rede de distribuição principal, a tensão de operação e frequência são gerenciadas pelo inversor do sistema (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

Vale ressaltar que em modo ilhado, as potências geradas pela microrrede, tanto ativa quanto reativa e transferência de potências de/para sistema de armazenamento, precisam estar em conformidade com a demanda das cargas locais (JESUS, 2018).

2.3 ARQUITETURA

A microrrede deve ser adequada às necessidades dos consumidores ligados a ela. Assim, sua arquitetura depende, então, da sua aplicação e da tecnologia disponível para implementá-la (HATZIARGYRIOU, 2014).

(YOLDAŞ *et al.*, 2017) classifica as microrredes referente a topologia delas, ou seja, o modo que cargas CC e CA estão conectadas. Essa classificação pode ser dividida em 3 tipos:

- Microrrede CC;
- Microrrede CA;
- Microrrede híbrida.

2.3.1 Microrrede CA

Este tipo de microrrede possui um barramento CA comum que, geralmente, tanto cargas CA ou CC se conectam a ela, conforme mostra a

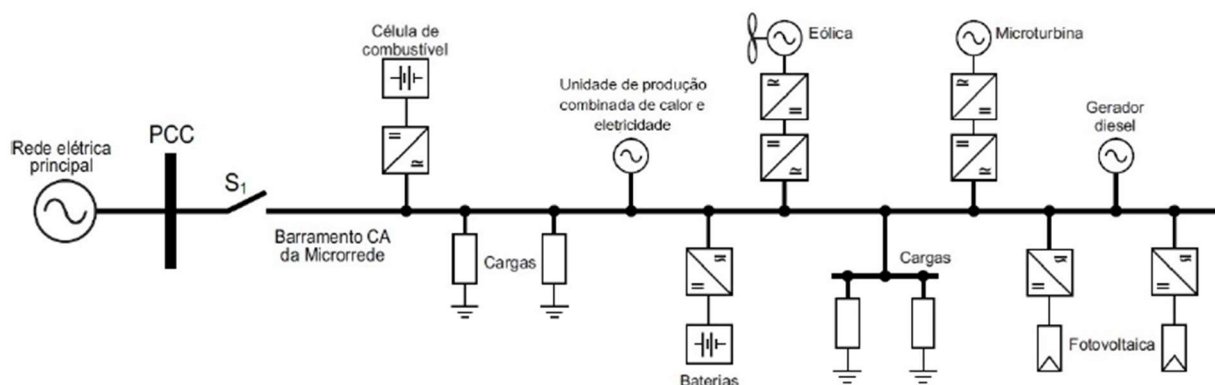
Figura 4. Além das cargas mista, fontes de geração distribuída, dispositivos de armazenamento também são ligado fisicamente à microrrede por meio desse barramento (YOLDAŞ *et al.*, 2017).

Já a conexão com a rede é feita através do ponto de acoplamento comum, não necessitando de nenhum dispositivo de conversão. Assim, a microrrede pode ser um fonte de energia, do ponto de vista da rede (PATRAO *et al.*, 2015).

Devido ao maior número de cargas CA e da própria rede principal operar em corrente alternada, ocorre uma maior integração da microrrede ao sistema de distribuição. Essa melhor integração resulta numa melhor capacidade de carga, controlabilidade e flexibilidade da microrrede (ZHU *et al.*, 2015).

Vale ressaltar que as redes elétricas existentes podem ser facilmente reconfiguradas para um esquema de microrrede CA. Além disso, o maior número de cargas CA oferece maior integração delas com a microrrede em questão. Porém, se faz necessário a presença de um inversor CC/CA para conectar as fontes e os dispositivos de armazenamento CC, causando uma perda considerável de eficiência. Assim, percebe-se uma desvantagem dessa arquitetura, que necessita de interfaces eletrônicas de potência complexas, resultando numa redução da eficiência e a confiabilidade da microrrede. (PATRAO *et al.*, 2015; YOLDAŞ *et al.*, 2017)

Figura 4 - Topologia de uma microrrede CA em baixa tensão



Fonte: (AZEVEDO, 2011)

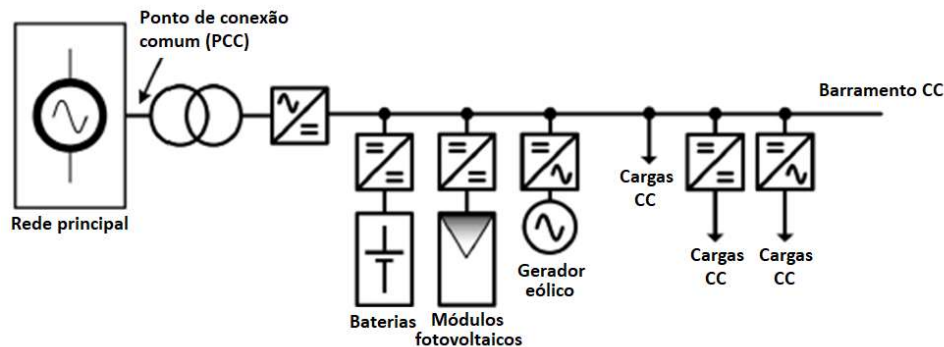
Para este tipo de arquitetura, podemos citar a microrrede implementada em Nanji, China. A microrrede possui diversas fontes de geração, tais como 500 kW instalados em sistemas fotovoltaica, 1000 kW em turbinas eólicas, 30 kW em energia oceânica e 1600 kW supridos por geradores a diesel, ligados a uma rede CA. O sistema de armazenamento e as cargas também estão conectados a este barramento comum de corrente alternada e a ligação com a rede principal é feita por um chave estática (ZHU *et al.*, 2015).

2.3.2 Microrrede CC

Similarmente à microrrede CA, na microrrede CC as cargas e dispositivos de energia distribuídos são conectados à microrrede por meio de um barramento comum. Entretanto, nesta topologia de microrrede, o barramento opera em corrente contínua. A operação, dessa forma, é similar a microrrede CA, entretanto, esta microrrede apresenta melhor resultados em questão de redução de perdas de conversão (YOLDAŞ *et al.*, 2017).

Mas diferente do modo como as microrredes CA conectam-se à rede principal, para esta arquitetura faz-se necessário a existência de um conversor CC-CA para realizar essa interconexão. A presença desse conversor promove uma energia de alta qualidade, mesmo em regiões onde a rede de distribuição principal é de qualidade precária. (PATRAO *et al.*, 2015). A Figura 5 mostra a topologia de uma microrrede CC.

Figura 5 - Topologia de uma microrrede CC em baixa tensão



Fonte: (YOLDAŞ *et al.*, 2017)

Assim, microrredes CC são mais eficientes, o que implica num menor custo de operação e implementação, já que o seu dimensionamento é menor se comparado a uma microrrede CA. Além dessas vantagens, a microrrede CC também apresenta uma melhor integração com as fontes de geração e dispositivos de armazenamento e uma melhor estabilidade devido a ausência de potência reativa (TAVAKKOLI; RADAN; HASSIBI, 2012).

A maior desvantagem do sistema refere-se à necessidade de conversores CA/CC bidirecionais conectados em série, gerenciando todo o fluxo de energia

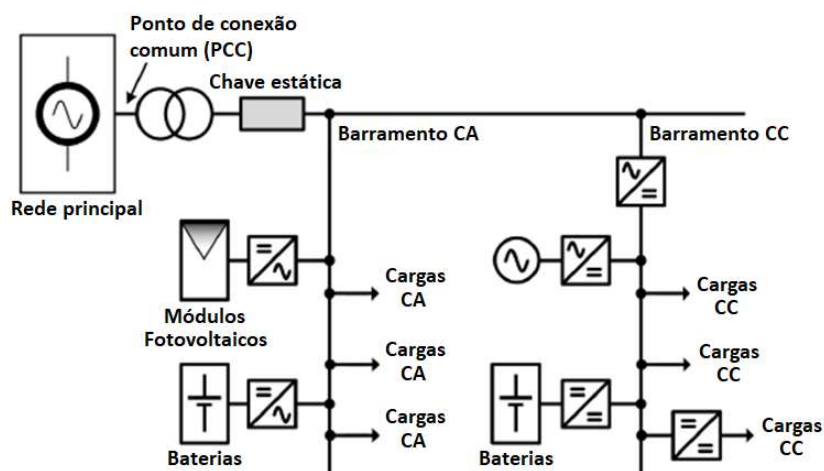
de/para a rede de distribuição, uma vez que esses dispositivos de conversão reduzem a confiabilidade da microrrede (PATRAO *et al.*, 2015).

Em (ZHU *et al.*, 2015), é citada a implementação de uma microrrede CC integrando sistemas fotovoltaicos. O sistema fotovoltaico tem capacidade de 150 kW e é conectado a um barramento CC de 380V.

2.3.3 Microrrede híbrida

Uma microrrede híbrida é a combinação de microrredes CC e CA numa mesma rede de distribuição, facilitando a integração de cargas, fontes e dispositivos de armazenamento CC e CA. Na Figura 6, podemos ver que essa combinação pode ser vista como uma sub-microrrede CC conectada a uma microrrede CA, já que a conexão com a rede principal é feita através do ponto de acoplamento comum, apresentando maior confiabilidade (KIM *et al.*, 2017).

Figura 6 - Topologia de uma microrrede híbrida



Fonte: (YOLDAŞ *et al.*, 2017)

Essa arquitetura possui as mesmas vantagens que as microrredes citadas anteriormente e, quando geradores distribuídos (GD), cargas e dispositivos de armazenamento (DS) são conectados diretamente às redes CA ou CC, não há necessidade de sincronização das unidades de geração e armazenamento, aumentando a confiabilidade da rede (UNAMUNO; BARRENA, 2015).

A Tabela 1 resume as características de cada estrutura abordada anteriormente. Percebe-se que, para redes existentes, a abordagem CA se mostra a melhor opção, devido a compatibilidade com a rede principal. Entretanto, para regiões onde não existe redes elétricas, a construção de uma rede CC é mais viável, de modo que os dispositivos de geração e armazenamento operam em corrente contínua e, como não existirá conexão com a rede principal, não é necessário dispositivo para converter a corrente contínua em alternada.

Tabela 1 - Comparação entre as topologias de uma microrrede

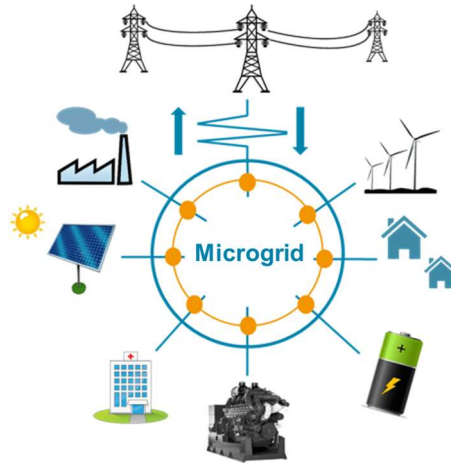
Microrrede	CA	CC	Híbrida
Dispositivos compatíveis com a rede	Sim	Não	Sim
Necessidade de dispositivos para interface eletrônica	Alta	Baixa	Média
Complexidade da interface eletrônica	Alta	Baixa	Média
Gerenciamento do sistema de armazenamento	Difícil	Fácil	Médio
Possibilidade reconfiguração da rede existente	Sim	Não	Sim

Fonte: Autor

2.4 COMPONENTES

Em (CHOWDHURY; CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009; SOSHINSKAYA *et al.*, 2014) é afirmado que, a fim de manter sua operação independente ou ligada a rede principal, atender a demanda do consumidor, gerenciar o fluxo de energia, possibilitar a funcionalidade *plug & play*, para adicionar um novo sistema sem prejuízo e operar mesmo com a perda de um equipamento, se faz necessário uma diversidade de dispositivos de geração, armazenamento, controle, proteção e linhas físicas. Todos esses elementos, exemplificados na Figura 7, são necessários para que a microrrede realize todas suas atividades de melhor maneira, garantindo a correta operação, controle e proteção do sistema.

Figura 7 – Componentes das microrredes

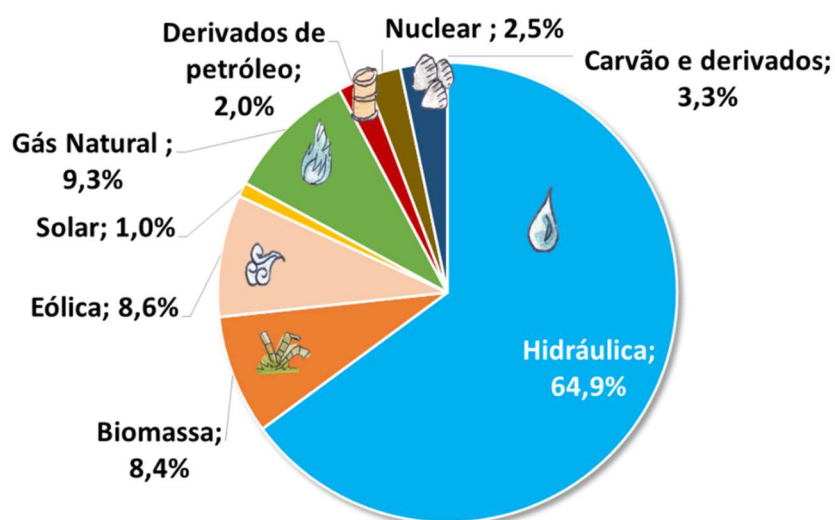


Fonte: Green Optimistic (2021)

2.4.1 Fontes de geração

Atualmente, a matriz energética brasileira tem predominância de geração de energia a partir de fontes hídricas, conforme mostra Figura 8. Esse meio de geração apresenta a desvantagem de necessitar grandes área para sua instalação e destruição da flora e fauna local. Assim, as microrredes possibilitam a diversificação da matriz energética, possibilitando a inserção e disseminação de fontes renováveis mais baratas e eficazes, com pouco impacto ambiental.

Figura 8 - Matriz energética brasileira em 2019



Fonte: (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020)

Apesar de estar ligada a rede principal de distribuição e poder consumir energia dela, a base das microrredes é a geração distribuída (SOSHINSKAYA *et al.*, 2014). Estas fontes de gerações podem ser classificadas como controláveis ou não controláveis (PLANAS *et al.*, 2015; SOSHINSKAYA *et al.*, 2014). As controláveis, também conhecidas como despacháveis, tem base em fontes convencionais e algumas renováveis, como PCHs e plantas de biogás. Já as não-controláveis, ou não-despacháveis, tem base em geração renovável, em maior escala fotovoltaica e eólica.

A geração distribuída dentro das microrredes oferecem inúmeras vantagens em relação as grandes usinas geradoras convencionais. (HOSSAIN *et al.*, 2019; PARHIZI *et al.*, 2015) citam os seguintes benefícios:

- Fornecimento de eletricidade confiável: uma unidade de geração distribuída, cuja classificação é tipicamente baixa, menos de 5 MW, produz eletricidade e serviços para um pequeno grupo de consumidores locais. Assim, as falhas de energia nas unidades de geração distribuída têm menos impacto no sistema e geralmente são gerenciáveis devido à geração de energia em pequena escala;
- Perdas nas linhas reduzidas: a instalação de fontes de geração distribuída perto das unidades consumidores minimiza as perdas técnicas, melhorando a eficiência da rede e qualidade da energia fornecida;
- Redução da capacidade do alimentador: a penetração de geração distribuída em uma rede de distribuição reduz o estresse nos equipamentos das redes de transmissão e nas linhas de distribuição nos momentos de maior demanda. Assim, o uso desse tipo de geração pode ser mais econômico do que atualizar os componentes de uma rede.
- Integração de recursos energéticos distribuídos: A maioria das tecnologias de geração distribuída usadas em uma rede é baseada em recursos energéticos distribuídos que possuem energia de entrada abundante e são ecologicamente corretos. A instalação dessas unidades em torno dos centros de carga fornece um perfil de tensão aprimorado e melhor qualidade de energia.

Entretanto, sabe-se que as fontes de energia não-controlável têm como características a intermitência na geração de energia que causam desequilíbrios no

sistema, principalmente quando a rede está operando em modo ilhado. Dessa forma, é necessário a integração de sistemas de armazenamento para mitigar os efeitos dessa intermitência (MARIAM; BASU; CONLON, 2016).

(SOSHINSKAYA *et al.*, 2014) afirma que uma microrrede deve ter, no mínimo, uma fonte de geração distribuída que seja controlável, a fim de melhorar a flexibilidade e confiabilidade da rede. Além disso, (LASSETER, 2011) conclui que múltiplas pequenas fontes de geração funcionam melhor no acompanhamento automático de carga, melhorando a segurança energética.

Serão detalhas nas seções seguintes as fontes de geração distribuídas mais encontradas em microrredes.

2.4.1.1 Sistemas fotovoltaicos

Energia solar é a energia radiada pelo sol, que é convertida em eletricidade pelos sistemas de geração fotovoltaicos. Dessa forma, esse sistema é inesgotável e sustentável (FATHIMA; PALANISAMY, 2015).

O desempenho geral de um sistema fotovoltaico depende de informações meteorológicas e técnicas. Das informações geográficas, tem mais importância a irradiação solar e temperatura ambiente, já as características técnicas mais significativas para tais sistemas são a eficiência dos módulos fotovoltaicos, dos conversores DC-DC e dos inversores CC-CA (MARIAM; BASU; CONLON, 2016).

Os conversores são usados para aumentar a amplitude da corrente contínua gerada pelo sistema, já os inversores a transformam em corrente alternada. O sistema fotovoltaico consiste em uma matriz fotovoltaica que converte os fótons de luz que incidem sobre ele em elétrons. Além disso, por vezes, emprega-se um MPPT (*Maximum Power Point Tracking System*) para permitir que o sistema extraia a energia máxima do sol alterando o ângulo de inclinação de seus raios durante todo o dia. Por fim, a energia é filtrada com um filtro passa-baixo para eliminar harmônicos indesejados antes de entrar na rede (FATHIMA; PALANISAMY, 2015)

2.4.1.2 Turbinas eólicas

A energia gerada por turbinas eólicas depende de características construtivas, como a área varrida pelo rotor, meteorológicas, tais como densidade do ar e

velocidade do vento, e técnicas, como o coeficiente de potência, que é uma relação entre velocidade da ponta e a velocidade mecânica do rotor (FATHIMA; PALANISAMY, 2015).

A estrutura básica desse sistema possui uma parte mecânica e outra elétrica. A parte mecânica transforma a energia cinética dos ventos em energia rotacional e no componente elétrico da estrutura é feita a conversão dessa energia rotacional em energia elétrica (MARIAM; BASU; CONLON, 2016).

2.4.1.3 Pequenas centrais hidrelétricas

Pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) são uma tecnologia de geração que produz eletricidade a partir do fluxo de água e depende da topografia e precipitação anual da área. É recomendado que exista uma reserva hídrica significativa, para poupar o sistema de sofrer grandes variações no fluxo de água e conseqüentemente na geração de energia.

Para serem enquadrados como PCHs, os empreendimentos hidrelétricos devem possuir potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, com área total de reservatório igual ou inferior a 3,0 km², conforme dispõe a Resolução da ANEEL 875 de 2020.

2.4.1.4 Biogás

A eletricidade da biomassa é produzida principalmente por combustão, com geração de energia por turbinas a vapor, em usinas termelétricas de grande escala. A eficiência geral de tais plantas depende da faixa de potência e do potencial de utilização do calor excedente (LOTVEIT *et al.*, 2014).

A biomassa está encontrando suas aplicações nas microrredes com o tempo, devido à capacidade de controle oferecida e participação nos métodos de controle. Assim, espera-se que a bioenergia produzida de maneira sustentável tenha um papel cada vez mais importante nas reduções de emissões de gases do setor de energia (SHRIVASTWA *et al.*, 2019).

2.4.1.5 Gerador a diesel

Um dos princípios da operação das microrredes é a estabilidade e continuidade de fornecimento de energia. Dessa forma, como a maioria das fontes usadas na geração é intermitente, se faz necessário a presença de dispositivos de armazenamento ou fontes de geração controláveis.

O sistema de geração controlável mais empregado nas microrredes é o gerador a diesel. Este tipo de gerador é empregado para garantir estabilidade da geração na microrredes, porém, o planejamento da operação ideal deve prever a mínima contribuição desta fonte de energia (SHRIVASTWA *et al.*, 2019).

A Tabela 2 resume as características, vantagens e desvantagens das fontes de geração abordadas anteriormente. Analisando a Tabela 2, percebe-se que para uma microrrede situada em área urbana, um sistema de geração composto por painéis fotovoltaicos é o mais indicado. Essa escolha fundamentada pelo motivo da energia fotovoltaica ser uma fonte de energia inesgotável e limpa, não necessitar de grandes áreas para instalação, comparada as turbinas eólicas. A desvantagem da intermitência pode ser facilmente compensada pela instalação de sistemas de armazenamento.

Tabela 2 - Comparativo entre as fontes de geração de uma microrrede

Tecnologia	Combustível	Saída	Vantagens	Desvantagens
Eólica	Vento	AC	1. Fonte de energia inesgotável 2. Zero emissão de poluentes	1. Intermitente 2. Alto custo 3. Grande área para instalação
Fotovoltaica	Radiação solar	DC	1. Fonte de energia inesgotável 2. Zero emissão de poluentes 3. Pode ser instalado em pequenas áreas	1. Custo inicial alto 2. Intermitente
PCH	Água	AC	1. Zero emissão de poluentes 2. Custo inicial relativamente baixo	1. Impacto ambiental 2. Dificuldade para expansão

Biogás	Biomassa	AC	1. Útil em diversas aplicações 2. Mínimo impacto ambiental 3. Largamente disponível	1. Alto custo 2. Grandes perdas em pequena escala
--------	----------	----	---	--

Fonte: Autor

2.4.2 Sistemas de armazenamento

Como citado no tópico anterior, os sistemas de armazenamento têm como responsabilidade auxiliar os sistemas de geração, mitigando os efeitos das intermitências causadas pelas fontes não-controláveis. Mas mais do que isso, os sistemas de armazenamento atuam como uma reserva de energia que equilibra a energia demandada pelo usuário com a energia fornecida pelas fontes de geração, quando a geração é insuficiente para suprir as necessidades dos consumidores. Dessa forma, os sistemas de armazenamento melhoram a estabilidade, qualidade e confiabilidade de energia, aumentando o desempenho da microrrede (Soshinskaya *et al.*, 2014).

Além das questões técnicas, os sistemas de armazenamento podem atuar injetando na rede, em horários onde a tarifa seja maior, a energia excedente armazenada. Assim, esses sistemas beneficiam as microrredes tanto técnica quando economicamente (BELLIDO *et al.*, 2018).

Os vários benefícios provenientes da utilização de sistemas de armazenamentos em microrredes são descritos abaixo (MORSTYN; HREDZAK; AGELIDIS, 2018):

- Fornecimento de energia a curto prazo: Quando uma microrrede é comutada para operar no modo ilhado, a queda de energia devido à desconexão da rede externa precisa ser compensada instantaneamente. O sistema de armazenamento de energia (SAE) pode fornecer essa energia para que a transferência de modo possa parecer uniforme e suave. Nos momentos em que qualquer um dos DGs falha devido a condições defeituosas, o SAE começa a operar, atuando como uma fonte para atender clientes críticos. Diferentes sistemas SAE podem ser combinados para atuar como uma única unidade de fonte capaz de

armazenar energia durante a geração em excesso e devolvê-la quando a geração é deficiente. Esses recursos do SAE ajudaram a penetração de fontes renováveis na microrrede;

- Modulação da curva de carga: o SAE é feito para armazenar a energia renovável gerada em horários de menor demanda, durante os quais a distribuidora fornece a carga, com custo menor. Então, nos horários de pico de demanda, quando o preço da energia da distribuidora é mais elevado, o SAE é descarregado para atender à carga ou até vender a energia armazenada de volta à distribuidora;
- Otimização da microfonte para o comissionamento (*unit commitment*): o SAE pode ser usado para resolver problemas relacionados aos serviços de *unit commitment*. O SAE capaz de armazenar energia por períodos mais longos, que podem durar alguns dias, pode ser considerado para esta aplicação;
- Melhoria da qualidade de energia: a energia gerada por fontes renováveis, como a energia eólica, é muito irregular e propensa a flutuações rápidas na produção, causando variação na frequência da rede, afetando sua qualidade de energia. Os sistemas de armazenamento também são necessários para mitigar as oscilações de potência do sistema absorvendo ou injetando energia ativa em frequências de 0,5–1 Hz.
- Serviços ancilares e armazenamento sazonal: os serviços ancilares incluem acompanhamento de carga, reserva operacional e aplicativos de regulação de frequência. Usinas de energia em grande escala ou PHS são usadas para fornecer serviços ancilares. Portanto, é usado o SAE que pode armazenar e descarregar energia por períodos mais longos.

Assim como ocorre com a geração, existem duas formas de configurações de conexões de sistemas de armazenamento em microrredes: distribuída ou centralizada. A primeira é conectada diretamente à geração distribuída e sofre mais perdas, dessa forma, para reduzir os custos e obter uma maior eficiência, o conjunto de geração e armazenamento devem ser otimizados. Já a configuração de

armazenamento centralizada é ligada diretamente ao barramento da microrrede e é apropriada para pequenas escalas (BELLIDO, 2018).

2.4.2.1 Central hidrelétrica reversível

Este sistema armazena água em dois reservatórios mantidos em diferentes alturas. Assim, a água à medida que flui de um reservatório mais alto para um mais baixo, pode gerar energia. Nos períodos em que a demanda é baixa, a água é bombeada de volta para o reservatório mais alto e armazenada lá para uso posterior (FATHIMA; PALANISAMY, 2015).

Nesse método de armazenamento, a água escoar do reservatório de armazenamento hidráulico para o reservatório de jusante. Durante esse escoamento, a água movimenta uma turbina que é responsável por gerar energia. O ciclo se completa quando a água é bombeada de volta ao primeiro reservatório. Assim, esse sistema de armazenamento é sustentável.

2.4.2.2 Baterias

As baterias são uma das mais populares de todos os sistemas de armazenamentos atualmente utilizados. Elas armazenam energia como carga em células eletroquímicas e a capacidade e a tensão desejadas podem ser alcançadas conectando-as em série ou paralelo ou ambos (FATHIMA; PALANISAMY, 2015).

Os cinco principais tipos de baterias são baterias de:

- Chumbo-ácido;
- Níquel-cádmio (Ni-Cd);
- Sódio-enxofre (NaS);
- Íon-lítio (Li-íon);
- Níquel hidreto metálico.

Cada tipo de bateria tem suas próprias vantagens e desvantagens. As baterias de chumbo-ácido são as mais baratas e adequadas para armazenar energia por longos períodos, porém apresentam baixo desempenho uma vida útil limitada, de 1200 a 1800 ciclos.

Comparadas as outras baterias as baterias de chumbo ácido, as baterias de níquel-cádmio proporcionam ciclo de vida útil maior, densidades de energia mais alta

e baixa manutenção, porém um ponto negativo é alto custo inicial para aquisição. As baterias de hidreto de níquel-metal são mais sustentáveis ambientalmente e possuem cerca de 25 a 30% mais densidade de carga se comparadas com as baterias de níquel-cádmio. Sua vida útil assemelha-se as baterias de chumbo ácido. As baterias de íon de lítio são as mais caras, mas oferecem as mais altas densidades de energia entre todos tipos de baterias. Entretanto, apresentam um ciclo de vida limitado. As baterias de sódio-enxofre têm a maior densidade de energia (NAIR; GARIMELLA, 2010; TAN; LI; WANG, 2013; YOLDAŞ *et al.*, 2017).

Portanto, a escolha do tipo de bateria depende do desejo das partes interessadas e do tipo de aplicação dependendo do tipo de aplicação, o tipo mais adequado é selecionado.

2.4.2.3 Ar comprimido

Esses sistemas armazenam o ar atmosférico em cavernas subterrâneas sob alta pressão. Quando esse ar comprimido passa por aquecedores especiais, eles são queimados com gás natural. Esse processo de combustão faz com que o gás se expanda e libere uma imensa quantidade de energia. Essa energia resultante aciona uma turbina que gera eletricidade (FATHIMA; PALANISAMY, 2015).

2.4.2.4 Baterias de fluxo

Essas baterias armazenam eletrólitos líquidos separadamente por uma membrana seletiva e são bombeados para a bateria sempre que necessário. São baterias recarregáveis, com longos ciclos de vida e custos de manutenção muito baixos.

Existem três tipos de baterias de fluxo:

- Bateria de vanádio redox (VRB);
- Bateria de zinco-bromo (ZBB)
- Bateria de polissulfeto de brometo (PSB).

Várias reações químicas como oxidação e redução ocorrem entre os eletrólitos dentro da bateria, dando assim o nome de baterias de fluxo *redox* (BANHAM-HALL *et al.*, 2012).

2.4.2.5 Baseadas em hidrogênio

Nesse tipo de sistema de armazenamento, a energia elétrica é armazenada por meio da eletrólise da água para produzir hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio passa por uma célula combustível que recombina o hidrogênio com oxigênio, produzindo uma corrente elétrica. Portanto, este sistema também é conhecido como célula de combustível regenerativa (FATHIMA; PALANISAMY, 2015).

Os principais componentes desse sistema de armazenamento envolvem um sistema de eletrólise de água, uma pilha de células de combustível, provisão para armazenar o hidrogênio gerado e uma interface eletrônica de potência para a qualidade da energia.

Este sistema é muito simples e vantajoso, pois é completamente isento de emissões e sua única desvantagem é a baixa eficiência (42%). Como uma única célula de combustível pode produzir tensões inferiores a 1V, é necessário precisamos de uma pilha de célula combustível para alcançar os valores desejados de tensão de saída, aumentando os custos de investimento (TRIFKOVIC *et al.*, 2014).

2.4.2.6 Volantes de inércia

Esse sistema de armazenamento utiliza a inércia mecânica de um volante rotativo para armazenar energia. Os volantes usam um conjunto de motor/gerador para acionar primeiro um volante, acelerando-o para altas velocidades e economizando energia elétrica na forma de energia cinética rotativa. Quando a energia armazenada precisa ser recuperada, o motor atua como um freio que extrai energia do volante do motor. Sua capacidade de carregar e descarregar rapidamente é adequada para aplicações na melhoria da qualidade de energia. Sua aplicação é principalmente para a melhoria da qualidade de energia. (FATHIMA; PALANISAMY, 2015; MARIAM; BASU; CONLON, 2016).

As maiores vantagens dos volantes de inércia são a longa vida útil e alta densidade de potência. Apesar disso, devido ao atrito, esse tipo de armazenamento tem grandes perdas (ARGHANDEH; PIPATTANASOMPORN; RAHMAN, 2012).

2.4.2.7 Supercondutor magnético

Estes sistemas de armazenamento geram fortes campos magnéticos com uma bobina supercondutora e armazenam energia na forma de campo eletromagnético. A energia armazenada, portanto, é expressa como LI^2 , onde L é a indutância da bobina e I representa a corrente. Como pode ser visto, esse valor não é afetado pela taxa de descarga, em oposição a outros sistemas de armazenamento, portanto, eles retêm energia por um longo período de tempo (FATHIMA; PALANISAMY, 2015).

Este sistema de armazenamento tem um ciclo de vida infinito, eficiência muito alta até 95%, tempo de resposta muito rápido, alta capacidade de armazenamento, porém alto custo de implementação. As aplicações possíveis são: melhoria da qualidade de energia, melhoria do fator de potência, regulação da frequência, estabilidade transitória, melhoria da qualidade da energia (MOLINA, 2012; YOLDAŞ *et al.*, 2017).

Em (NGUYEN; YOO; KIM, 2016), um sistema de armazenamento supermagnético integrado à energia eólica é usado para controlar a frequência e a tensão da microrrede no modo ilha. Quando a microrrede opera no modo conectado à rede, o sistema de armazenamento é utilizado para fornecer o fluxo de energia constante no ponto de conexão com a rede principal para superar as flutuações na energia decorrentes da energia eólica.

Além disso, os supercondutores magnéticos podem fornecer rapidamente energia ativa e reativa à microrrede, para que possam ser usadas para dar resposta aos transientes rápidos da microrrede. No entanto, a energia não pode ser armazenada por longos períodos de tempo.

2.4.2.8 Supercapacitores

Também conhecidos como ultracapacitores ou capacitores elétricos de camada dupla, esse tipo de armazenamento estoca energia na forma eletrostática entre as placas do capacitor. Eles são capazes de carregar e descarregar uma grande quantidade de carga em um tempo muito curto. Portanto, eles são muito úteis em aplicações de melhoria de frequência e qualidade de energia e são comumente usados em situações que requerem carregamento e descarregamento de grande

quantidade de potência em pouco tempo (FATHIMA; PALANISAMY, 2015; TANI; CAMARA; DAKYO, 2015).

A principal diferença entre um capacitor e um supercapacitor é a presença de uma membrana porosa que transfere íons entre dois eletrodos, fazendo com que a energia elétrica possa ser armazenada diretamente e encurtando o tempo de resposta. Além disso, seus valores de capacitância e densidade de energia podem ser de centenas a milhares de vezes maiores que os dos capacitores (TAN; LI; WANG, 2013).

As principais vantagens dos supercapacitores é a inexistência de partes móveis, não necessitam de aquecimento ou resfriamento, não ocorrência de mudanças químicas internas durante a operação e alta eficiência, chegando até 95%. Entretanto, as maiores deficiências na aplicação desse tipo de armazenamento são o alto custo de implementação e a limitada capacidade (MARIAM; BASU; CONLON, 2016).

Em (BRANDO *et al.*, 2016; MOLINA, 2014) supercapacitores são empregados e tem boa eficiência para mitigar as flutuações naturais inerentes a fontes renováveis intermitentes.

A Tabela 3 resume os tópicos apresentados anteriormente, demonstrando as principais características técnicas das tecnologias de armazenamento de energia mais empregadas em microrredes. É importante atentar-se não somente aos dados de eficiência, mas também ao nível de maturidade do desenvolvimento de tais tecnologias.

Tabela 3 - Comparativo entre as tecnologias de armazenamento

Tecnologia	Eficiência (%)	Capacidade (MW)	Custo (R\$/kWh)	Vida útil
Central hídrica reversa	75-85	100-5.000	400-1.500	40-60
Bateria de chumbo ácido	70-90	0-40	20	5-15
Bateria de íon lítio	85-95	0-1	3.000	5-15
Bateria de níquel cádmio	60-65	0-40	350-1.100	10-12

Bateria de sódio enxofre	80-90	0-8	700-2.100	10-15
Célula combustível	20-50	0-50	350-1.100	5-15
Ar comprimido	50-89	3-400	250-1500	20-60
Bateria de fluxo	75-85	0.3-15	400-1.100	5-15
Volante de inércia	93-95	0-25	250	15
Supercapacitor	90-95	0-0.3	200	>20
Supercondutor magnético	95-98	0.1-10	200	>20

Fonte: Autor

Para aplicação em microrredes, as baterias apresentam as melhores vantagens. Dentre as baterias, destacam-se as baterias de íon lítio. Com alta eficiência e alta capacidade de descarga, este tipo de bateria é ideal para sistemas onde o descarregamento é contínuo. Apesar do alto custo, estas baterias tem um vida útil longa e grandes números de ciclos de descarregamento, fazendo com que sejam mais viáveis economicamente.

2.4.3 Cargas

Outro componente das microrredes são as cargas. As cargas são os consumidores de energia e podem ser classificadas conforme a criticidade de continuidade de fornecimento (PATRAO *et al.*, 2015):

- Prioritárias, sensíveis ou críticas: fornecimento deve ser quase contínuo e com qualidade estabelecida;
- Não-prioritárias, não-críticas: eventualmente podem ter o fornecimento descontinuado.

(LIDULA; RAJAPAKSE, 2011) afirmam que é muito importante que as cargas sejam classificadas para se obter um ótimo planejamento de operação da microrrede. Assim, a partir da classificação das cargas, a estratégia de operação da microrrede:

- Oferece uma maior flexibilidade entre oferta e demanda;
- Reduz o pico de consumo;

- Otimiza a operação dos recursos energéticos;
- Melhora a qualidade e confiabilidade de energia às cargas sensíveis;
- Estabiliza a tensão e frequência.

2.4.4 Sistema de gerenciamento de energia

Independentemente do tamanho, aplicação ou modo de operação, a microrrede precisa, imprescindivelmente, suprir as demandas dos consumidores de forma segura e confiável. Assim sendo, se faz necessário um sistema de controle eficaz que deve supervisionar, proteger, operar e controlar a microrrede (BELLIDO *et al.*, 2018).

Conforme citam (BORDONS; GARCÍA-TORRES; VALVERDE, 2015) os sistemas de gerenciamento de energia são responsáveis por efetuar o controle nas microrredes e devem garantir o suprimento da energia demandada, seja por meio das fontes de geração ou armazenamento, tanto nas condições normais ou nas contingências e independente da conexão com a rede.

Além disso, estes sistemas controlam os fluxos de energia entre a rede principal, recursos de energia distribuídos e cargas, a fim de fornecer uma operação estável, confiável e sustentável da microrrede, e outros objetivos operacionais. Também é responsável pela resincronização do sistema durante a transição entre o modo de rede conectado e ilhado (LI; NEJABATKHAH, 2014).

A diferença entre uma microrrede e uma rede de distribuição passiva reside principalmente na capacidade de controle e gerenciamento. O operador da microrrede não é somente um agregador de pequenos geradores, controlador de carga ou regulador de emissões: ele deve realizar todas essas funcionalidades e atingir múltiplos objetivos econômicos, técnicos e ambientais (MICELI, 2013).

A arquitetura de controle muda conforme o tipo ou infraestrutura da microrrede, mas o objetivo final deve ser sempre atingido. Assim, a microrrede deve ser capaz de lidar com os conflitos de diferentes partes interessadas ligadas a ela, atingindo uma decisão de operação global ótima de todas as partes envolvidas (HATZIARGYRIOU, 2014).

2.4.5 Dispositivos eletrônicos

Os principais dispositivos eletrônicos presentes numa microrrede tem como função converter a energia gerada em uma forma compatível com a rede ou fazer a ligação da microrrede com a rede de distribuição.

2.4.5.1 Inversores

Um dos componentes das microrredes são as fontes de geração. Algumas dessas fontes, como a solar fotovoltaica (que gera energia CC) e microturbinas (energia CA de alta frequência), requerem interfaces eletrônicas de energia, como conversores CC/CA ou CC/CA/CC, para fazer interface com o sistema elétrico. Assim, percebe-se que os inversores exercem um papel importante no controle de frequência e tensão em microrrede isoladas (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018).

Um ponto para destacar em inversores operando dentro de uma microrrede, é que eles devem manter-se conectados quando ela se isola da rede principal de distribuição (ARBAB-ZAVAR *et al.*, 2019).

2.4.5.2 Ponto de acoplamento comum

As microrredes são conectadas e desconectadas da rede principal no ponto de conexão comum. Essa interconexão é feita através de dispositivos comutadores, que também pode ser combinado com dispositivos eletrônicos (PLANAS *et al.*, 2015).

Existem 2 principais tipos de comutadores: contadoras e chaves seccionadoras. Para microrredes, as seccionadoras são mais utilizadas, sendo majoritariamente estáticas com rápida resposta ou *digital signal processor* (DSP).

O interruptor de desconexão estático é um componente essencial da microrrede para ilhamento e sincronização; pode ser programado para disparar muito rapidamente em sobretensão, subtensão ou sobrecorrente direcional (ALEGRIA *et al.*, 2014).

A interface com a rede principal pode ser uma conexão CA síncrona ou uma conexão assíncrona usando um conversor de potência eletrônico acoplado a corrente contínua. A primeira abordagem apresenta a vantagem da simplicidade, enquanto a última isola a microrrede da distribuidora em relação à qualidade da energia

(frequência, tensão, harmônicas) e é uma combinação natural das estratégias de microrrede somente CC (HIRSCH; PARAG; GUERRERO, 2018).

2.5 BENEFÍCIOS DAS MICRORREDES

A utilização de unidades de geração distribuídas possibilita as microrredes uma série de vantagens e benefícios, tanto aos consumidores quanto as distribuidora de energia. Ademais, esses benefícios são potencializados com a integração de sistemas de armazenamento de energia e centrais de controle, capacitando a microrrede a extrair o máximo de energia e usufruí-la da maneira que melhor convier.

Os benefícios obtidos a partir da operação de uma microrrede podem ser sumarizados de acordo com cada parte interessada, abrangendo os consumidores, operador da rede e distribuidora (BELLIDO *et al.*, 2018; HATZIARGYRIOU, 2014; HUAYLLAS, 2015):

- Consumidor: a microrrede realça a confiabilidade local, reduz emissões, melhora a qualidade de energia reduzindo quedas de tensão, e, potencialmente, reduz custos de fornecimento de energia;
- Operador da rede: uma microrrede pode ser considerado como uma única entidade controlável dentro do sistema de potência. Dos benefícios, uma microrrede pode prover desde melhoras técnicas, até ambientais e sociais, e em comparação com semelhantes microfontes, uma microrrede oferece máxima flexibilidade em termos de constituição de propriedade, permite a otimização global da eficiência da rede e mostra-se como a melhor solução para motivar consumidores finais através de uma plataforma comum;
- Distribuidora: as microrredes, através de suas fontes de geração locais, podem reduzir a demanda pelas instalações da transmissão e distribuição. Dessa forma, encontram-se dois importantes efeitos: redução de perdas e habilidade para substituir os ativos da rede. Além disso, a presença da geração perto da demanda pode melhorar a qualidade do serviço visto pelos consumidores finais, ao passo que microrredes podem fornecer suporte a rede em tempos de estresse, auxiliando em restaurações pós-faltas.

Já outros autores categorizam as vantagens em categorias de benefícios econômicos, técnicos, ambientais e sociais. Assim, após essa breve introdução, os próximos tópicos abordarão estas categorias.

2.5.1 Econômicos

Como citado anteriormente, as microrredes possuem recursos elétricos distribuídos que trabalham de maneira coordenada para suprir a demanda dos consumidores dentro de seus limites. Assim, como maior parte da energia fornecida provém de tais recursos, percebe-se uma redução no custo de importação de potência da rede principal para suprir a demanda dos consumidores. Além da redução desse custo, as microrredes tem a possibilidade de gerar receita por meio da injeção de potência na rede principal em momentos onde a tarifa tem valor diferenciado (HATZIARGYRIOU, 2014; MARKETS, 2014)

Esse benefício de redução de consumo da rede principal também está atribuído aos sistemas de controles presentes nas microrredes. Tais sistemas tem capacidade de otimizar as decisões de despacho de potência em tempo real que minimizam os custos das microrredes (HATZIARGYRIOU, 2014; OLIVARES *et al.*, 2014).

Além da redução nos custos de geração e consumo, as microrredes também possibilitando uma economia nos custos de transmissão e distribuição de energia. Essa redução deve-se aos custos de expansão da geração e transmissão de energia cada vez maiores e as microrredes possuem fontes de geração perto do centro de consumo. A cogeração de energia também é uma vantagem econômica possibilitada por este tipo de rede, já que o calor antes desperdiçado começa a ser utilizado em outros serviços locais. Assim, até mesmo combustíveis primários tem, no geral, sua eficiência melhorada, contribuindo para a redução da emissão de carbono, sendo um importante benefício do ponto de vista global (CHOWDHURY; CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009).

As microrredes tem os benefícios advindo da capacidade de promover serviços ancilares e reduzir os custos com a infraestrutura da rede principal. Ademais, as microrredes podem também oferecer serviços ancilares (BELLIDO, 2018).

2.5.2 Técnicos

A capacidade que a microrrede tem de operar em modo ilhado permite a ela desconectar-se da rede principal quando esta apresenta níveis de tensão fora do permitido pela agência reguladora. Essa atitude aumenta a qualidade de energia consumida pelos integrantes da microrrede. Também, quando a rede principal não é capaz de fornecer energia por falhas técnicas, os consumidores são alimentados por meio dos sistemas de geração ou armazenamento da microrrede, aumentando a confiabilidade da microrrede. E caso ocorra faltas que afetem temporariamente a microrrede, esta recupera-se mais rapidamente em relação a rede principal, devido a capacidade *black start* que suas fontes de geração possuem (GHENAI; JANAJREH, 2016; HATZIARGYRIOU, 2014).

Da maneira que a alocação de unidades de energia distribuídos perto das unidades consumidores reduz os custos com transmissão e distribuição, também se percebe uma redução no congestionamento dessas linhas. Dessa forma, diminuindo o fluxo de potência por estas redes, diminui-se também as perdas nelas, aumenta a eficiência de todo sistema (CHOWDHURY; CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009; MARIAM; BASU; CONLON, 2016)

Além dos benefícios técnicos que as microrredes proporcionam a seus próprios consumidores, elas também contribuem para uma melhor operação da rede principal. A injeção de potência na rede de distribuição central em períodos de pico de consumo faz com que sejam reduzidas as perdas e evitadas sobrecargas no sistema (HUAYLLAS, 2015; MARKETS, 2014)

2.5.3 Ambientais

Os benefícios ambientais de uma microrrede podem ser abordados de dois aspectos: maior adesão de fontes geradoras de energia limpas e renováveis, que geram menos ou nenhum gás poluente, e adoção de soluções de fornecimento de energia mais eficientes em termos de energia, possibilitando o aproveitamento de recursos que seriam desperdiçados, como o calor usado proveniente da cogeração (HATZIARGYRIOU, 2014).

As microrredes mais avançadas podem ser programadas para atingirem metas específicas de sustentabilidade. Além disso, a proximidade e controle da geração dos consumidores faz com que eles tenham maior cuidado com o uso de energia, reduzindo ainda mais o impacto ambiental. (CHOWDHURY; CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009; GHENAI; JANAJREH, 2016)

2.5.4 Sociais

Os principais benefícios sociais das microrredes são a conscientização do público e incentivo à economia de energia e redução de emissões e a energização de áreas remotas ou subdesenvolvidas onde não existem linhas de distribuição (HATZIARGYRIOU, 2014).

Além desses benefícios, as microrredes agregam valor econômico a sociedade de várias maneiras. Primeiramente, por evitarem perdas de produção ou produtos durante quedas de energia. Segundo, por desenvolverem a região atraindo empregadores. E por último, como usinas locais e necessidades de operadores e manutenções, elas geram e mantêm empregos. Outro benefício claro proposto pelas microrredes é a melhora no bem-estar social. Devido a alta resiliência e confiabilidade, a região atendida pela microrrede se torna uma “ilha de poder”. Assim, em caso de problemas na rede principal, a região se torna um local de refúgio, onde membros da comunidade podem encontrar os serviços comerciais operado normalmente (CHOWDHURY; CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009; MARKETS, 2014).

2.6 DESAFIOS DAS MICRORREDES

Apesar de proporcionarem os inúmeros benefícios citados anteriormente, as microrredes tem sua implementação ainda dificultada. Essa dificuldade deve-se a algumas barreiras, que podem ser sumarizadas de acordo com sua natureza, sendo elas econômica, técnica, regulatória ou de mercado.

2.6.1 Econômicos

Dentro dos desafios econômicos, o principal motivo é o alto custo de aquisição dos recursos de energia distribuídos e dos sistemas de gerenciamento de energia (SOSHINSKAYA *et al.*, 2014).

É necessário que haja maiores incentivos por parte do governo, pelo menos para um período determinado, nas áreas comerciais e residenciais, até que essa tecnologia se torne mais barata e difundida.

2.6.2 Técnicos

Os desafios técnicos para operação das microrredes devem-se, principalmente, a existência dos recursos de energia distribuídos dentro das microrredes. Devido à configuração de múltiplos componentes do conceito de microrrede, podem surgir facilmente barreiras relacionadas a elementos específicos. As diversas fontes de geração, dispositivos de armazenamento, dispositivos eletrônicos, sistemas de comunicação e controle possuem diferentes características na capacidade de geração, tempo de inicialização, eficiência, limites de controle e comunicação. Dessa forma, se esses componentes não puderem ser implementados e operados com sucesso individualmente e agrupados, isso inevitavelmente prejudicará a operação da microrrede (BOWER *et al.*, 2014).

Uma das características mais marcantes das microrredes é a capacidade de transição entre os modos de operação, seja da operação conectada à rede principal para a operação isolada e vice-versa. Essa transição entre as operações pode ocasionar em sérios problemas de controle de frequência e tensão entre a geração e as cargas (SOSHINSKAYA *et al.*, 2014; YOLDAŞ *et al.*, 2017).

A transição ao modo ilhado pode ser feita de 2 maneiras: autoestabelecimento integral (*black start*) ou transição perfeita (*seamtransition*). A primeira maneira permite um pequeno período de interrupção do fornecimento antes das unidades geradoras começarem a operar, independente de fontes de alimentação externas, para reenergizar o sistema em modo ilhado, já a segunda maneira permite a microrrede operar em modo isolado em um tempo muito pequeno após se desconectar, porém é muito difícil de alcançar. Assim, uma melhora na transição entre esses modos é uma

barreira a ser enfrentada, pois afeta diretamente a confiabilidade das microrredes (GANJIAN-ABOUKHEILI *et al.*, 2020; TAO *et al.*, 2011).

Essa alternância em modos de operações acaba dificultando também a proteção das microrredes. Existe uma dificuldade em projetar a melhor proteção devido a variação nas magnitudes das correntes de curto circuito entre cada modo de operação, já que as redes de distriuições tradicionais foram projetadas e construídas com fluxo de corrente de falta unidirecional para sistemas de distribuição radial enquanto as microrredes, com a presença das fontes de geração distribuídas, operam com um fluxo bidirecional (STADLER *et al.*, 2016).

2.6.3 Regulatórios

Por serem consideradas uma tecnologia recente ainda, não há uma concordância em relação a alguns aspectos regulatórios das microrredes, como planejamento, operação e manutenção.

No Brasil, a ANEEL define microrrede como uma rede de distribuição que pode operar isolada do sistema de distribuição e é atendida diretamente por uma unidade de geração distribuída. Percebe-se que essa definição é simplória se comparada com os conceitos apresentados neste trabalho (ANEEL, 2021).

A resolução técnica 482/2012 da ANEEL dispõe a geração distribuída e a conexão com o sistema de distribuição de energia elétrica, além de citar o modo de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012). Porém, em relação as microrredes, a regulamentação é limitada, faltando orientação acerca da interconexão com a rede principal, fluxo bidirecional de energia e, principalmente, operação isolada dela em relação a rede principal.

Na maioria das distribuidoras brasileiras, três tipos de geradores são comumente reconhecidos: produtor independente (produção para comercialização no mercado livre), autoprodutor (produção para uso exclusivo) e micro/minigenerador. Existem regras de interconexão para esses geradores, mas as microrredes não são consideradas.

No Brasil, o módulo 3 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST estabelece que as distribuidoras podem estabelecer a operação ilhada de parte do sistema de distribuição (ANEEL, 2017).

Apesar dessa regulamentação, as distribuidoras visando a proteção, segurança e qualidade da energia, vetaram essa prática.

Embora não existam regras específicas para o tratamento de microrredes, a IEEE 1547 se destaca. O IEEE 1547.4 pode ser importante na conexão de microrrede com propósito de ilhamento (BELLIDO *et al.*, 2018).

2.6.4 Mercado

A principal questão relacionada ao mercado é em relação quem regulará o preço da energia quando a microrrede estiver injetando na rede principal. No momento em que a conexão com a rede principal é estabelecida, recomeça o fluxo bidirecional de energia. Como as microrredes estarão comandando o fornecimento de energia neste tipo de situação, existe um receio de que estas passarão a comercializar energia a um preço muito elevado, explorando o monopólio de mercado. Dessa forma, o operador do sistema de distribuição prefere não importar energia das microrredes enquanto não existirem regulamentos claros, implicando numa redução da capacidade da microrrede de comercializar com consumidores locais por meio da rede de distribuição (BELLIDO *et al.*, 2018; SOSHINSKAYA *et al.*, 2014). Essa redução na capacidade de comercialização retira a renda diária dos fornecedores de energia e reduz a utilização de tarifas de uso de sistema cobradas pelo operador do sistema de distribuição (PLANAS *et al.*, 2015; YOLDAŞ *et al.*, 2017).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentado o método desenvolvido para otimização do dimensionamento do sistema proposto, além da função objetivo e restrições. Na segunda parte do capítulo, é mostrado a análise realizada para se obter a viabilidade econômica da expansão da microrrede para o horizonte determinado.

3.1 OTIMIZAÇÃO DA MICRORREDE

O presente trabalho tem como objetivo propor um método de otimização do dimensionamento dos componentes de uma microrrede. Para isto, são usadas como variáveis de entrada dados de carga de um dia típico, de radiação solar, de temperatura e também a tarifa horária da região no qual a microrrede será instalada.

Como resultado, será obtido o número de painéis fotovoltaico que irão compor o sistema de geração e o número de baterias que formarão o sistema de armazenamento. Assim, como as variáveis de decisão são do tipo discreta, tem-se um problema de programação linear inteira.

Para solução deste problema, foi desenvolvido um método baseado numa técnica heurística iterativa de busca exaustiva. Um método heurístico iterativo é uma técnica matemática que calcula a sequência da solução aproximada, refinando os resultados para um problema de otimização até que os critérios sejam alcançados (DAWOUD; LIN; OKBA, 2018).

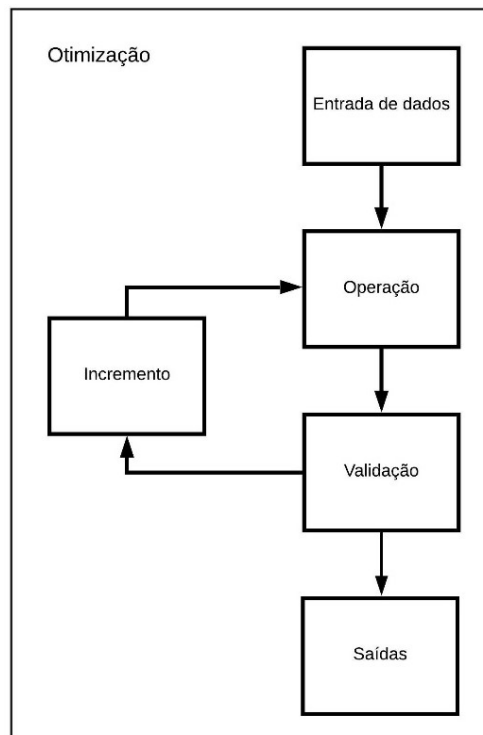
Assim, conforme o processo avança em suas iterações, espera-se que a otimização do dimensionamento dos componentes seja feita, respeitando as restrições propostas. Adiante, será explicado o modelo de operação definido para a rede. A Figura 9 apresenta a estrutura de blocos da otimização que foi empregada para dimensionar os componentes.

Na primeira etapa, é feita a entrada dos dados empregados na otimização do dimensionamento. Os dados referem-se a carga a ser suprida, índice de radiação solar, temperatura ambiente e tarifa horária. Além desses dados, que variam conforme o tempo, também são especificados os parâmetros dos painéis fotovoltaicos e das baterias.

Após a entrada dos dados, é realizada a operação da microrrede para o número de painéis e baterias. Essa etapa terá como resultados os valores de potência a cada intervalo de tempo para o sistema de geração, sistema de armazenamento e também da rede principal da distribuidora.

Por seguinte, é realizada a validação dos resultados através das restrições. Caso as restrições não sejam atendidas, é então feito um incremento do número de painéis ou baterias nos seus sistemas e, novamente, realizada a etapa de operação da microrrede. Quando as restrições forem satisfeitas, o resultado final de saída do processo de otimização será o número de painéis que integrarão o sistema de geração e o número de baterias que irão compor o sistema de armazenamento de energia.

Figura 9 – Diagrama de blocos da otimização

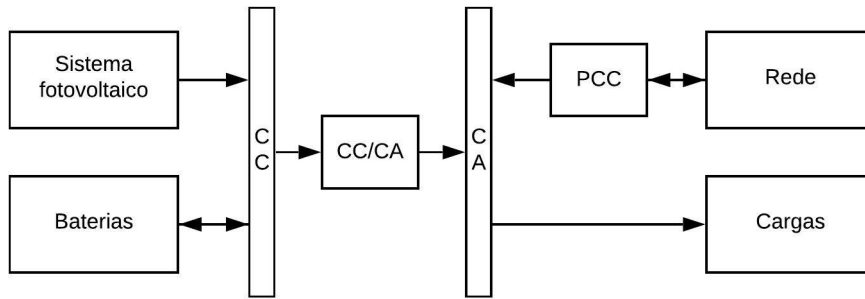


Fonte: Autor

3.1.1 Configuração da microrrede

O modelo da microrrede proposta é representado na Figura 10. Nele, percebe-se que existe um fluxo unidirecional de potência do sistema fotovoltaico até as cargas, enquanto no sistema de armazenamento e também na rede principal, este fluxo é bidirecional.

Figura 10 - Modelo de microrrede empregado na otimização



Fonte: Autor

O sistema de geração de energia da microrrede será baseado em painéis fotovoltaicos. A energia gerada pelo sistema fotovoltaico P_g no instante t é o produto da eficiência geral do sistema de geração η_{pf} , potência de saída de um único painel $P_{pf}(t)$ e o número de painéis que compõem o sistema N_{pf} . A equação (1) descreve a energia gerada pelo sistema fotovoltaico:

$$P_g(t) = P_{pf}(t) * N_{pf} * \eta_{pf} \quad (1)$$

A energia gerada por um único painel é obtida a partir da equação (2). Os valores de P_M , G_{stc} , k e T_{stc} são, respectivamente, a potência nominal, o índice de irradiação sob condições de teste, coeficiente de temperatura e a temperatura sob condições de teste. Estes valores são obtidos a partir do manual do painel. O $ISS(t)$ é o valor de irradiação solar no local de instalação do painel e $T_c(t)$ é o valor de temperatura corrigido (BOQTOB *et al.*, 2019).

$$P_{pf}(t) = P_M * \frac{ISS(t)}{G_{stc}} * [1 + k(T_c(t) - T_{stc})] \quad (2)$$

O valor de temperatura corrigido é calculado a partir da equação (3). $T_a(t)$ é a temperatura ambiente, enquanto T_{NOC} é a temperatura nominal de operação e é obtido no manual do componente (BOQTOB *et al.*, 2019).

$$T_c(t) = T_a(t) + \frac{T_{NOC} - 20}{0,8} * ISS(t) \quad (3)$$

Além do sistema de geração, também é definido como o sistema de armazenamento é dimensionado. A capacidade do sistema de armazenamento em Wh , equacionada em (4), é baseada na energia que ela deve suprir E_b , capacidade de autonomia do sistema N_d e profundidade de descarga do sistema DOD (LUU *et al.*, 2015).

$$C_b(Wh) = \frac{(E_b * N_d)}{DOD} \quad (4)$$

A fim de estimar o número de baterias a serem utilizadas, precisa-se converter a capacidade da bateria de Wh para Ah , dividindo pela tensão de operação das baterias V_{CC} , conforme mostra a equação (5):

$$C_b(Ah) = \frac{C_b(Wh)}{V_{CC}} \quad (5)$$

O carregamento e descarregamento do sistema de armazenamento depende da estratégia de operação da microrrede. O estado de carga SOC é a relação entre a energia armazenada no momento t pela capacidade máxima da bateria. A equação (6) mostra o cálculo do estado de carga:

$$SOC(\%) = \frac{C(t)}{C_b} \quad (6)$$

Ademais, pode-se relacionar o estado de carga atual do armazenamento com o estado anterior, demonstrando se houve fornecimento ou abastecimento de energia. A equação (7) mostra essa relação e, neste trabalho, a variação de tempo será de 1 hora (LI; WEI; XIANG, 2012).

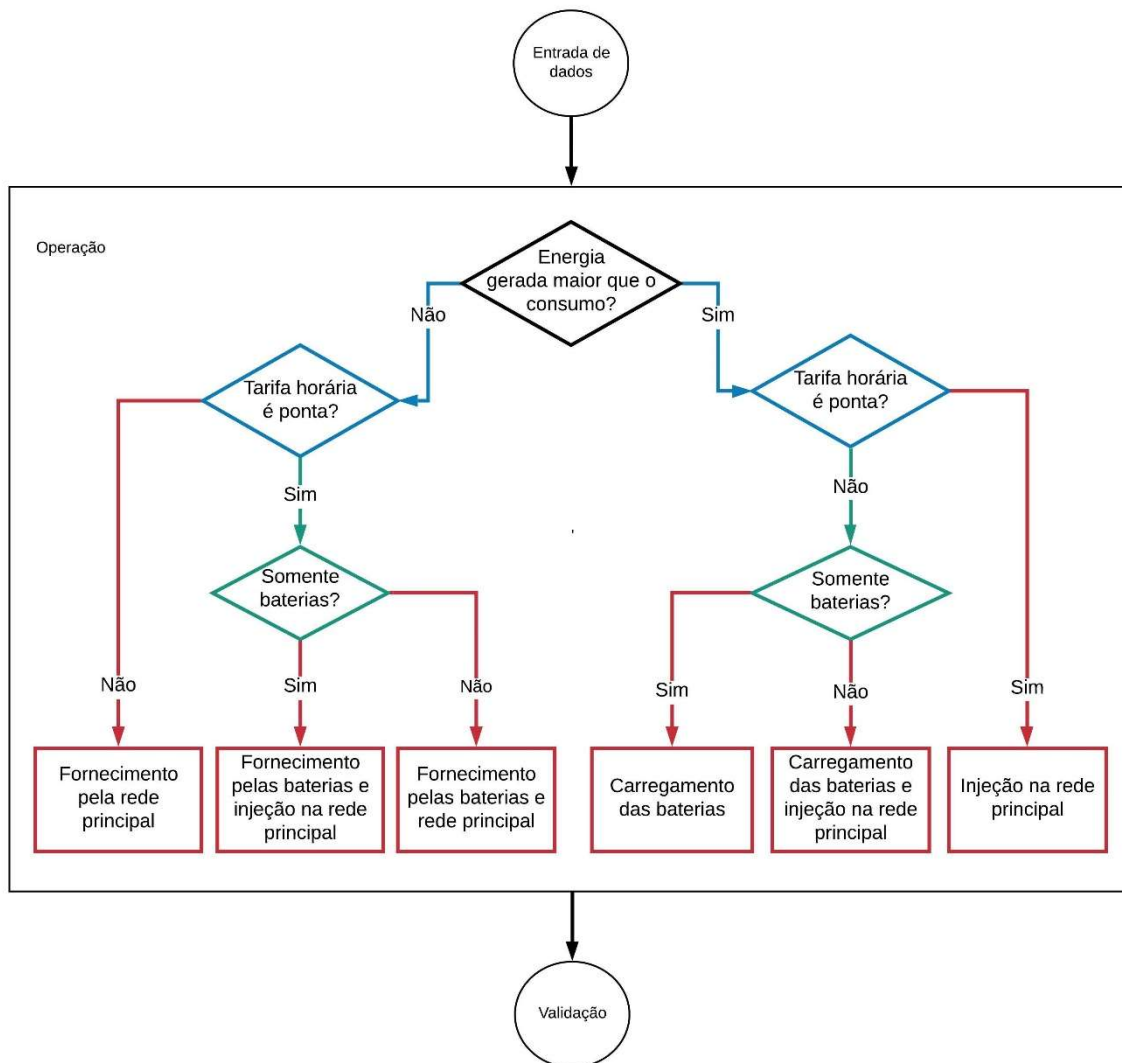
$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{\Delta P_b(t - 1) * \Delta t}{C_b} \quad (7)$$

3.1.2 Operação da microrrede

A estratégia de operação da microrrede composta por fontes fotovoltaicas de geração e sistemas de armazenamento é baseada numa integração de seus componentes, buscando maximizar o suprimento da demanda por meio da geração fotovoltaica e reduzir a importação de energia da rede principal. Dessa forma, a microrrede alcançará a máxima autonomia de operação possibilitando o autoconsumo

e os custos serão reduzidos. A Figura 11 mostra a estratégia de operação da microrrede.

Figura 11 - Fluxograma de operação da microrrede



Fonte: Autor

A primeira análise a ser feita é em relação a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e a energia total consumida no mesmo instante. Caso haja um excedente de energia gerada em relação a carga demandada, será feita uma análise da tarifa horária no momento em que há esse saldo positivo de energia. Esse comparativo indicará se a faixa horária é horário de ponta ou não. Esta análise acontece para indicar se o excedente de energia será utilizado, prioritariamente, para abastecer as baterias ou injetar na rede.

Sendo horário de ponta, a energia excedente será totalmente injetada na rede. Caso contrário, sendo um período fora-ponta, a prioridade da energia excedente é para ser usada para carregar as baterias. Porém, caso a diferença entre geração e carga seja maior que o necessário para carregar o sistema de armazenamento, essa parcela remanescente será injetada na rede.

Entretanto, caso exista um déficit de energia gerada para alimentar as cargas, essa parcela negativa será compensada através do sistema de armazenamento e/ou rede principal. Da mesma forma que será feito quando existir um excedente de energia, a primeira etapa de análise é para determinar qual a tarifa horária de energia no momento.

No horário fora de ponta ou intermediário, a potência necessária para suprir a demanda da microrrede é fornecida em sua totalidade pela rede e o sistema de armazenamento não contribuem nesse momento.

Já para horário de ponta, caso o déficit de energia entre geração e carga seja menor que a quantidade de energia necessária para descarregar o sistema de armazenamento, esse saldo negativo será coberto totalmente pelo sistema de armazenamento e o restante que está armazenado após suprir o déficit de geração é injetado na rede. De contrário, ou seja, o sistema de armazenamento não seja capaz de suprir a energia necessário sozinho, então, a rede fornecerá energia também.

3.1.3 Recursos distribuídos

A fim de mensurar a participação dos recursos distribuídos dentro da operação da microrrede, são calculadas a fração de energias renováveis e a taxa de excedente de energia.

A fração de energia renovável da microrrede é definida como a razão entre a parcela de energia renovável do sistema e a energia total produzida. A equação (8) demonstra a restrição.

$$FER = \frac{P_{re}}{P_{re} + P_r} = \frac{P_{sf}}{P_{sf} + P_r} \quad (8)$$

Percebe-se que o valor de FER estará entre 0 e 1, conforme mostra a equação (9). Caso o valor seja nulo, entende-se que não existe geração por meio de fontes

renováveis na microrrede e, ao contrário, se o valor for 1, toda a energia gerada é oriunda de tais fontes. Dessa forma, percebe-se que quanto maior o valor de FER, mais sustentável e independente é a microrrede, pois a maior parte da energia usada para suprir as demandas dos consumidores provém do sistema de geração.

$$0 \leq FER \leq 1 \quad (9)$$

Já a taxa de energia excedente é dada através da relação da energia gerada em excesso e a energia total gerada. A equação (10) mostra como é calculada.

$$TEE = \frac{E_{exc}}{E_{re} + E_r} = \frac{E_{exc}}{E_{pf} + E_r} \quad (10)$$

Assim, como ocorre com a equação (8), o TEE também terá um valor entre 0 e 1. Porém, neste caso, o melhor resultado é para um menor valor de TEE, pois como intenciona-se utilizar a energia injetada somente para abater a parcela consumida da rede. A equação (11) demonstra essa restrição:

$$0 \leq TEE \leq 1 \quad (11)$$

3.1.4 Função objetivo

O objetivo do trabalho é apresentar um dimensionamento ótimo da microrrede, tal qual os custos de operação e aquisição dos componentes sejam os menores possíveis. Assim, a função objetivo pode ser definida para obter o menor custo anual do sistema (CAS), conforme mostra a equação (12).

O custo anual do sistema, representado na equação (13) é definido como a soma dos gastos de aquisição de componentes (CAC), manutenção de componentes (COM), substituição de componentes (CSC), energia importada da rede principal (CEI) menos o lucro proveniente da injeção de energia na rede (LIE).

$$FOB = \min CAS \quad (12)$$

$$CAS = CAC + COM + CSC + CEI - LIE \quad (13)$$

O custo de capital anual da microrrede leva em conta o preço de aquisição e instalação de cada componente e não precisa ser substituído durante a vida útil do projeto, ou seja, é uma parcela única de entrada. Assim, esse custo é calculado conforme a equação (14):

$$CAC = C_{CAP} * CRF(i, y) \quad (14)$$

Em que C_{CAP} , y , CRF e i são, respectivamente, o custo de capital inicial de cada componente, vida útil de cada componente, fator de recuperação de capital, taxa de juros anual. O cálculo do fator de recuperação de capital é feito de acordo com a equação

$$CRF = \frac{i * (1 + i)^y}{(1 + i)^y - 1} \quad (15)$$

A taxa de juros anuais i é relacionada a taxa de juros nominal i' e a taxa de inflação anual f . A equação (16) mostra o cálculo da taxa de juros:

$$i = \frac{(i' - f)}{1 + f} \quad (16)$$

O custo de operação e manutenção anual considera a confiabilidade dos componentes σ e o tempo de vida útil deles, e é dado pela equação (17):

$$COM = C_{cap} * \frac{1 - \sigma}{y} \quad (17)$$

O custo de substituição anual é o valor de substituição de cada componente durante a vida útil da microrrede. Será considerar apenas a substituição das baterias periodicamente. A equação (18) demonstra esse custo:

$$CSC = C_{sub} * T_a(i, y_{rep}) \quad (18)$$

Onde C_{sub} , y_{rep} e T_a é o custo de substituição das baterias, a vida útil delas e a taxa de amortização é um índice usado para calcular o valor futuro de uma série de fluxos de caixa anuais iguais. A taxa de amortização é calculada através da equação (19).

$$T_a = \frac{i}{(1 + i)^y - 1} \quad (19)$$

A taxa de aquisição de energia da rede anual é o produto entre a energia consumida e tarifa vigente, sendo equacionada em (20):

$$CEI = \sum_1^t tarifa(t)(P_{consumida}) \quad (20)$$

O lucro proveniente da venda de energia à rede é similar a taxa de aquisição de energia. Esse valor é calculado a partir da equação (21):

$$LIE = \sum_1^t tarifa(t)(P_{injetada}) \quad (21)$$

É importante ressaltar que o cálculo do valor da equação (21) é utilizado na função objetivo para considerar a injeção de energia no balanço. No modelo real *net-metering*, não existe lucro agregado.

A configuração com o menor custo anual de sistema (ACS) é considerada a melhor das configurações que pode garantir o atendimento da carga total da microrrede.

3.1.5 Restrições

Abaixo são descritas as restrições que delimitam o dimensionamento dos componentes e operação da microrredes. As restrições equivalem ao processo de validação dos resultados obtidos a partir da operação e são divididas em restrições da configuração da microrrede, da operação e do gerenciamento energético.

3.1.5.1 Configuração

O número de painéis pode variar de 0 até o máximo que seja necessário para que o sistema fotovoltaico possa alimentar a rede em sua integridade. Assim, N_{pf} é dado pela equação (22):

$$0 \leq N_{pf} \leq \frac{E_d}{\eta_{pf} * P_{pf} * I_{ss_{min}}} \quad (22)$$

As variáveis E_d , η_{pf} , P_{pf} e $I_{ss_{min}}$ são, respectivamente, a energia consumida em um dia, a eficiência de um módulo fotovoltaico, a potência gerada por um único painel e o menor índice de radiação solar durante o período de tempo a ser analisado.

Já a capacidade do sistema de armazenamento, obtido através da equação (23), é delimitada entre 0 e a energia necessária para que a microrrede tenha autonomia de operação ilhada para um número de dias especificados. Para essa operação, a microrrede deve ser capaz de suprir a carga sem a geração fotovoltaica e rede.

$$0 \leq E_b \leq D_{aut} * cont * \frac{E_d}{DOD * \eta_b} \quad (23)$$

Onde D_{aut} é o número de dias que a microrrede deve ter capacidade para operar isolada à rede principal e $cont$ é o valor de contingência de cargas para qual essa rede fará o corte, a fim de fornecer energia somente as cargas mais prioritárias durante o isolamento.

Devido às cargas alimentadas pela microrrede serem controláveis, é possível realizar um corte de cargas em casos de isolamento forçado, preservando o fornecimento de energia apenas para as cargas essenciais. Esse gerenciamento de cargas torna a microrrede mais viável economicamente, evitando um superdimensionamento do sistema de armazenamento. Dessa forma, é possível que o valor de D_{aut} não seja um número inteiro.

3.1.5.2 Operação

As restrições para operação da microrrede estabelecem limites para o funcionamento dos componentes e também do fluxo de potência com a rede, tanto para consumo da rede principal ou injeção de potência nela. As restrições são descritas nas equações (24) e (25).

$$P_c(t) = P_g(t) + P_b(t) + P_r(t) \quad (24)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (25)$$

A primeira restrição serve para manter o balanço de potência da microrrede, enquanto a outra é uma restrição para manter a melhor operação física do sistema de armazenamento.

Também são definidos valores de potência mínimos e máximos para os sistemas de armazenamentos, conforme mostra a equação (26). A equação (26) tem como objetivo limitar a injeção ou importação de energia dos sistemas de armazenamento, respeitando os valores que o conjunto de baterias tem capacidade para fornecer.

$$P_{B \min} \leq P_B(t) \leq P_{B \max} \quad (26)$$

O valor de $P_{B \max}$ é calculado a partir da definição do número total de baterias que formarão o sistema de armazenamento. Uma unidade de bateria tem especificado em seu manual a quantidade de potência que ela pode fornecer em um determinado período de tempo. Assim, a restrição máxima para a equação (26) é encontrada através da equação (27).

$$P_{B \max} = I_{DESC \max} * V_{CC} * N_b \quad (27)$$

As variáveis $I_{DESC \max}$, V_{CC} e N_b são, respectivamente, a corrente máxima de descarregamento, ou seja, o máximo que a bateria pode fornecer em um determinado período de tempo, a tensão de operação e o número total de baterias que formam o sistema de armazenamento de energia.

De forma análoga a equação (27), o valor de $P_{B \min}$, utilizado na equação (26), é calculado pela produto entre a corrente máxima de carregamento, a tensão de operação e o número total de baterias. A equação (28) mostra a estimativa desse valor mínimo.

$$P_{B \min} = I_{CARR \max} * V_{CC} * N_b \quad (28)$$

Os parâmetros $I_{CARR \max}$, V_{CC} e N_b são, respectivamente, a corrente máxima que a bateria é capaz de fornecer, a tensão de operação da bateria e a quantidade total de unidades.

Já a equação (29) serve para restringir o consumo da rede principal maximizando o aproveitamento dos sistemas de geração e de armazenamento.

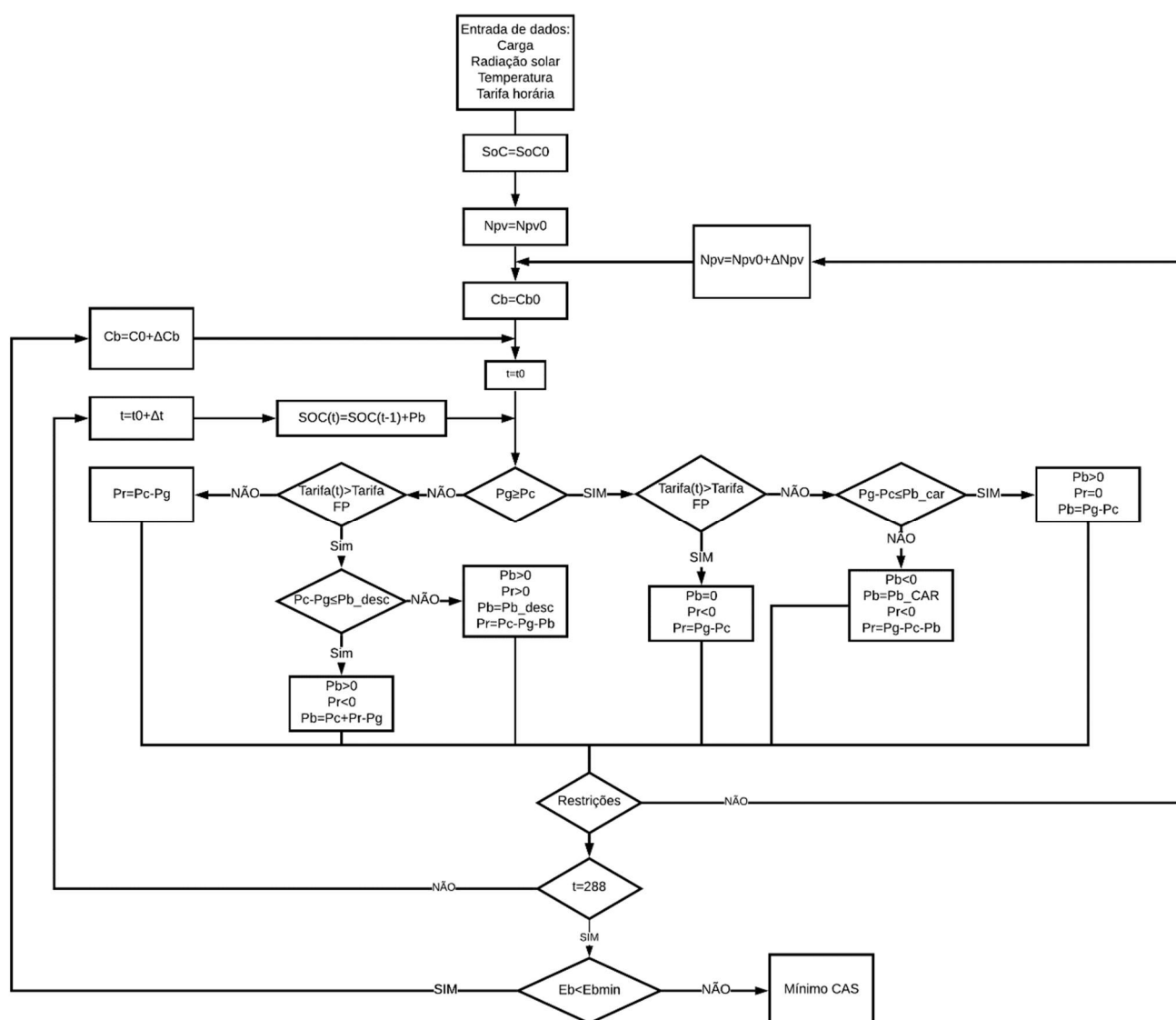
$$P_{R \min} \leq P_R(t) \leq P_{R \max} \quad (29)$$

Como a rede é uma barra infinita que permite a injeção e consumo excedentes, o limite máximo $P_{R\ max}$ é infinito. Dessa forma, a única limitação imposta pela equação (25) é quanto a potência consumida da rede.

Apresentadas as equações utilizadas, a Figura 12 mostra a estrutura completa do processo de otimização do dimensionamento empregado. Após a entrada de dados, é especificado o número inicial de painéis, baterias e estado de carregamento. Conforme o processo avança, o processo de busca exaustiva procura aprovar os resultados frente as restrições estabelecidas a fim de atender a função objetivo.

Caso a restrição não atendida seja relacionada a geração, é feito um incremento no número de painéis. Por outro lado, caso a não conformidade em relação a restrição seja no âmbito do sistema de armazenamento, é este sistema que tem sua capacidade aumentada por meio do acréscimo de uma unidade de bateria.

Figura 12 - Fluxograma do processo de otimização



Fonte: Autor

3.2 ANÁLISE DA EXPANSÃO DA MICRORREDE

Depois de realizado o processo de otimização do dimensionamento da microrrede, será feito também uma análise de sensibilidade para prever a expansão da microrrede ao longo de um horizonte estabelecido.

Para compensar o efeito do tempo nos componentes da microrrede, será proposto uma redução da eficiência dos painéis fotovoltaicos e baterias. Além disso, estima-se que com o decorrer do tempo, os usuários ampliarão o consumo de energia na carga consumida pelos clientes, ao passo que se terá, também, um aumento no

valor tarifário. A fim de mensurar que a melhor estratégia de manutenção da microrrede, será feita uma análise econômica baseada no valor presente líquido (VPL) da microrrede.

Assim, para um determinado horizonte, serão propostos 2 casos:

- Caso 1: se necessário, será feito um acréscimo de painéis e/ou baterias, com o intuito de compensar a mudança das variáveis e consumir menos da rede principal;
- Caso 2: número de componentes da microrrede permanece constante em relação ao dimensionamento do primeiro ano, ocasionando num maior consumo de energia da rede principal.

O valor presente líquido (VPL) é um método que consiste em trazer para a data zero todos os fluxos de caixa de um projeto de investimento e somá-los ao valor do investimento inicial, usando como taxa de desconto a taxa mínima de atratividade (TMA) do projeto. Dessa forma, utiliza-se o VPL para comparar a viabilidade de diferentes projetos.

O valor presente líquido de um fluxo de caixa é o valor monetário de todo o fluxo no tempo atual ou ao iniciar um investimento. Para ter este valor, é necessário somar as receitas líquidas futuras descontadas ao valor presente com uma taxa de desconto, conforme mostra a equação (30).

$$V_{PL} = \sum_{n=1}^N \frac{FC_t}{(1+i)^n} \quad (30)$$

Assim, serão somados todos os custos de cada um dos casos citados e calculados seus respectivos VPL. O resultado norteará o planejamento da expansão do sistema ao longo da sua vida útil, indicando se é melhor adquirir mais componentes ou consumir mais energia da rede principal para suprir o aumento da carga demandada pelos usuários.

4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, serão apresentados os dados da região que será utilizado de base para simulação da implementação da microrrede e dos componentes a serem utilizados nos sistemas de geração e armazenamento.

4.1 MODELO DE NEGÓCIO

A microrrede desenvolvida será aplicada em um condomínio residencial na cidade de Santa Maria-RS. Tanto o sistema de geração de energia quanto o sistema de armazenamento terão uma operação centralizada.

Assim, o modelo de negócio propõe que a administração do condomínio realize a implementação da microrrede, desde a aquisição dos componentes até a instalação e manutenção periódica.

Então, o custo seria repassado aos consumidores na forma de uma tarifa horária, ou seja, a relação entre o montante necessário para implementação e operação da microrrede e a energia total necessária para suprir a demanda do condomínio resultarão no valor da tarifa do sistema. Dessa forma, os usuários pagariam, indiretamente, pela microrrede. Vale ressaltar que esse modelo de negócio é benéfico a todas partes interessadas, pois possibilita benefícios econômicos aos usuários e técnicos à rede principal.

4.2 DADOS DE CARGA

Como já citado, pretende-se dimensionar uma microrrede urbana de baixa tensão. Dessa maneira, foi escolhido como base de dados de carga um transformador 13,8kV/380V com capacidade de 75 kVA.

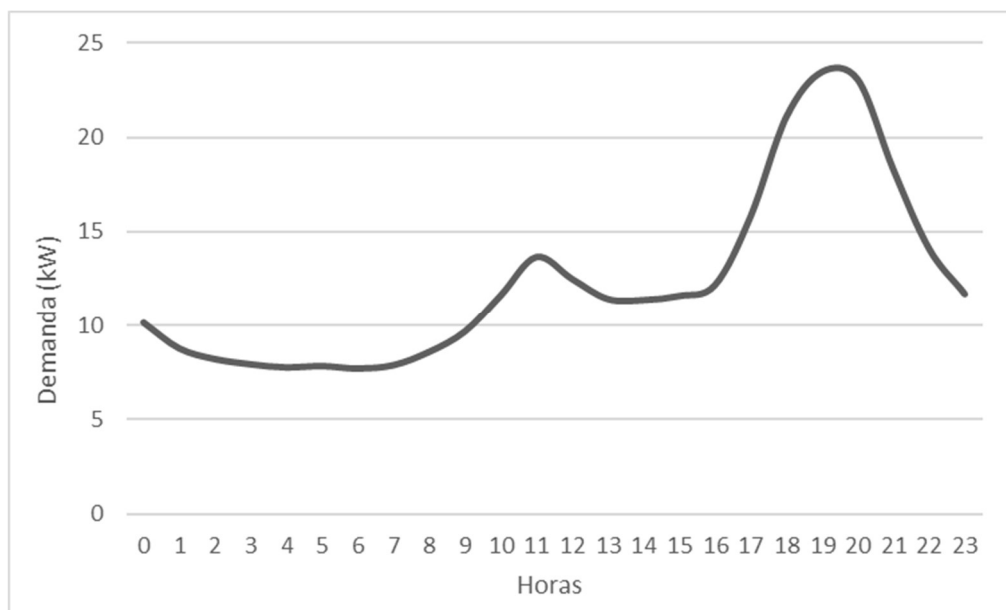
Na otimização do dimensionamento da microrrede, foram utilizados dados de um dia típico de consumo. Os dados de carga desse transformador para um período de 24 horas são mostrados na Tabela 4. A curva de carga diária desse transformador é mostrada na Figura 13. A tendência de consumo desse transformador é de uma curva residencial, com pico de carga dentro do horário de ponta.

Tabela 4 - Média anual do consumo de energia

Hora	Carga (kW)	Hora	Carga (kW)	Hora	Carga (kW)	Hora	Carga (kW)
0	10,154	6	7,706	12	12,505	18	21,097
1	8,775	7	7,888	13	11,441	19	23,496
2	8,208	8	8,596	14	11,385	20	22,088
3	7,931	9	9,680	15	11,602	21	17,300
4	7,766	10	11,622	16	12,180	22	14,109
5	7,838	11	13,673	17	15,827	23	11,701

Fonte: Autor

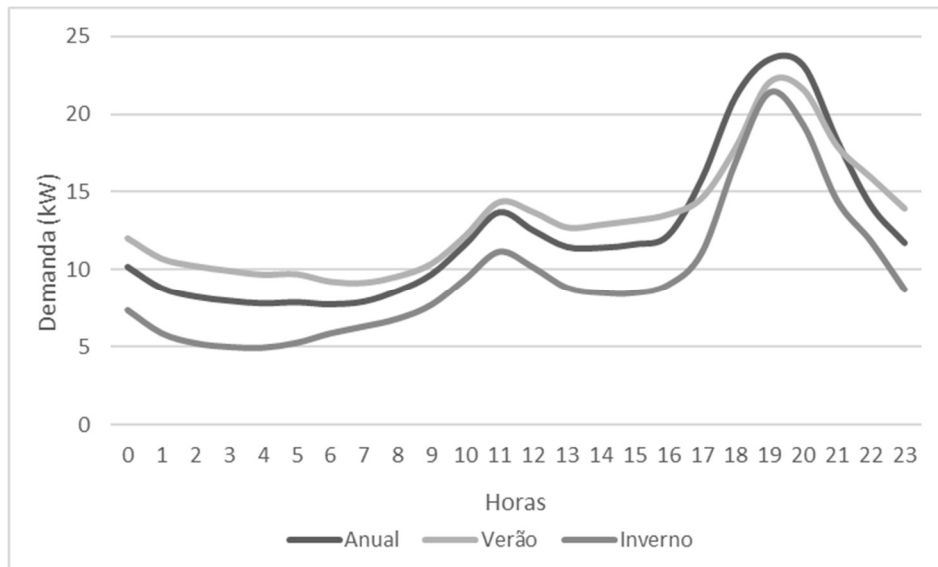
Figura 13 – Carga demandada típica para um dia



Fonte: Autor

O comportamento dos consumidores ligados a esse transformador em dias úteis e não úteis é mostrado na Figura 14. Percebe-se que, tanto nos dias úteis quanto nos dias não-úteis, o pico de consumo encontra-se dentro da faixa de horário de ponta, que inicia as 18h e ocorre até as 20:59h. Todavia, nos dias não-úteis, existe um maior consumo na faixa das 12 horas.

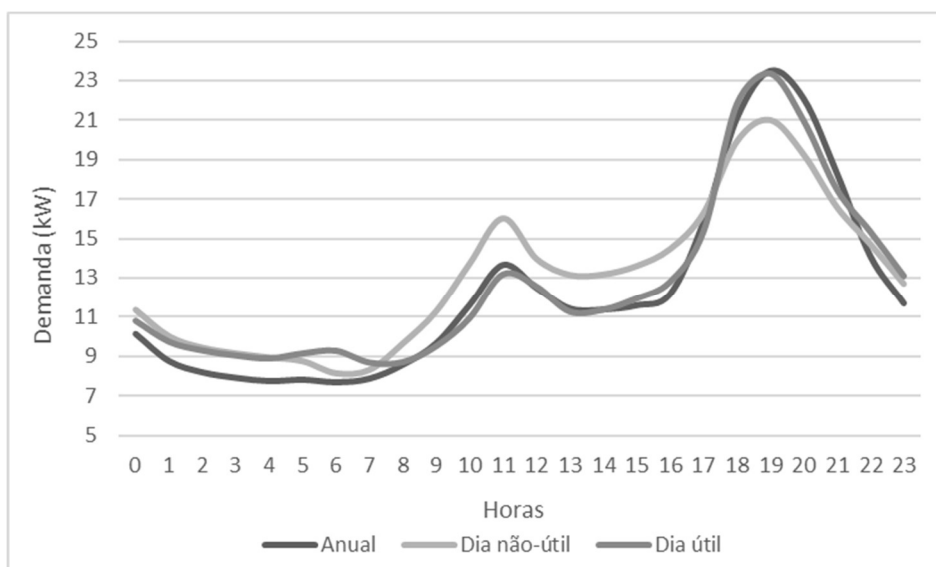
Figura 14 - Carga demanda segregada em estações climáticas



Fonte: Autor

Já as curvas segregadas para as estações do inverno e verão são mostradas na Figura 15. Nelas, pode-se perceber que a curva anual é similar a curva do verão. Dessa forma, dimensionando a microrrede para esta estação, o fornecimento de energia para todos períodos do ano será suficiente para suprir a demanda dos usuários.

Figura 15 – Carga demanda segregada em dias úteis e não-úteis



Fonte: Autor

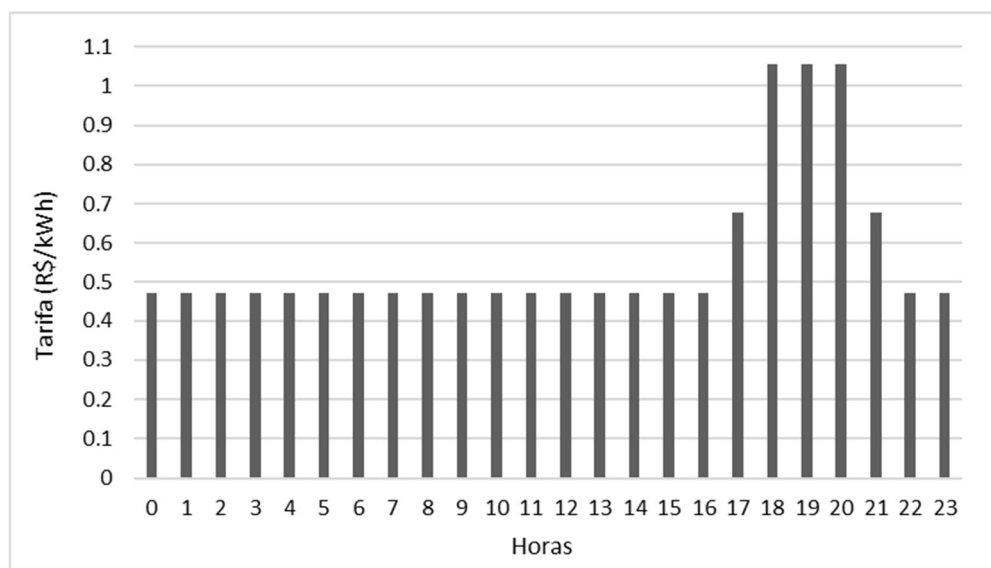
A fim de analisar a expansão da microrrede para um horizonte de 10 anos, será projetado um aumento de consumo anual de 3%. Esse aumento será considerado, juntamente com um aumento tarifário e redução da eficiência dos componentes, para analisar a necessidade ou não de adicionar mais painéis ou baterias na microrrede, a fim de ter uma operação mais econômica do ponto de vista do consumidor final.

4.3 TARIFA HORÁRIA

Para a microrrede, será implementada uma tarifa horária com valor variável durante o tempo. O valor utilizado para os cálculos foi coletado a partir do site da distribuidora da região na qual operará a microrrede. Dessa forma, percebe-se na Figura 16, que a vigência do horário de ponta se dá entre as 18 e 20 horas, enquanto o horário intermediário ocorre as 17 e 21 horas. Para dias não-úteis, durante todas horas do dia aplica-se o valor da tarifa em horário fora de ponta.

Analisando a Figura 16, entende-se que, de acordo com a tarifa vigente, a melhor forma de operação, com menores custos, não realiza consumo da rede no horário de ponta. Ao contrário, tende a injetar energia excedente da geração ou estocada nos sistemas de armazenamento.

Figura 16 - Tarifa horária de energia vigente na região



Fonte: Autor

Com o mesmo intuito da projeção do aumento de carga, será considerado um aumento tarifário de 5% anual. A partir da Tabela 5, percebe-se um crescimento acelerado do custo de energia, reforçando a opção de consumo de energia da rede prejudicial economicamente aos usuários.

Tabela 5 - Projeção da tarifa para um horizonte de 10 anos

Faixa horária	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
Fora de ponta	0,473	0,497	0,522	0,548	0,575
Intermediário	0,676	0,710	0,746	0,783	0,822
Ponta	1,055	1,108	1,163	1,221	1,282
Faixa horária	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
Fora de ponta	0,604	0,634	0,666	0,699	0,734
Intermediário	0,863	0,907	0,952	0,999	1,049
Ponta	1,346	1,414	1,484	1,559	1,637

Fonte: Autor

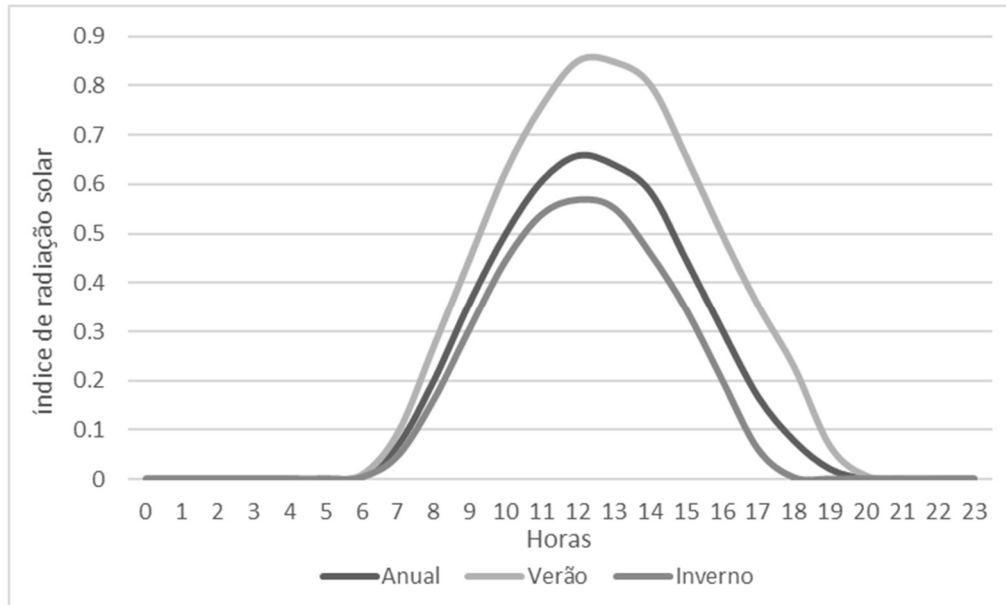
4.4 DADOS METEREOLÓGICOS

O índice de radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo sol. O valor horário de irradiação solar foi obtido a partir do banco de dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica – CRESESB (MME, 2020).

A variação desse valor durante um dia é mostrada na Figura 17. A região possui bons valores para o índice de radiação, tornando ainda mais viável a implementação de sistemas de geração fotovoltaicos. Além disso, nota-se que no verão esse valor é maior, período do ano em que os sistemas gerarão o máximo de potência.

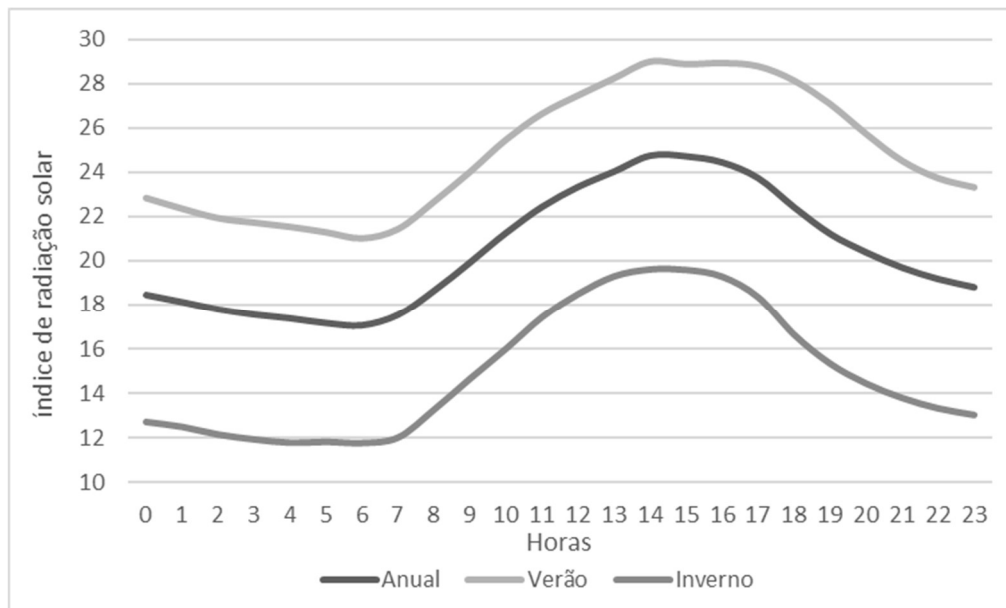
A temperatura média anual, no verão e no inverno podem ser observadas na Figura 18. Nota-se, então, que a região apresenta suas estações bem definidas. Em relação ao uso do sistema de armazenamento, ele terá sua utilização ampliada no inverno, devido as menores temperaturas, resultando numa menor geração de energia a partir do sistema fotovoltaico.

Figura 17 – Comportamento do índice de radiação solar anual, no verão e no inverno



Fonte: Autor

Figura 18 – Comportamento da temperatura anual, no verão e no inverno



Fonte: Autor

4.5 COMPONENTES

4.5.1 Painéis fotovoltaicos

O sistema de geração fotovoltaica será composto por painéis de 335 W. A Tabela 6 apresenta todas as especificações técnicas deste componente, que serão usadas no processo de dimensionamento do sistema de geração.

Tabela 6 - Especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos

Especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos	
Potência nominal (W)	335
Eficiência do painel (%)	17,23
Eficiência do sistema (%)	95
Coefficiente de temperatura (%/°C)	-0.38
Temperatura nominal de operação (°C)	43
Dimensões (mm)	1960 x 992 x 35
Vida útil (anos)	25
Custo unitário (R\$)	680,00

Fonte: Autor

4.5.2 Baterias

Para escolha dos componentes que integrarão o sistema de armazenamento, deve-se atentar a algumas importantes características deles. Os principais parâmetros considerados são capacidade, potência, profundidade de descarga, eficiência e vida útil da bateria.

A capacidade da bateria é a quantidade total de eletricidade que uma bateria pode armazenar, medida em quilowatts-hora (kWh). Porém, a capacidade da bateria não é relacionada a quanta eletricidade ela pode fornecer em um dado momento. Para obter a informação completa, é preciso considerar a potência ou taxa de energia da bateria, que diz a respeito à quantidade de eletricidade que uma bateria pode fornecer ao mesmo tempo, sendo medida em quilowatts (kW).

Entretanto, devido a sua composição química, as baterias precisam reter alguma carga em todos os momentos para não ter sua vida útil reduzida. Assim, a profundidade de descarga (PD) de uma bateria refere-se à quantidade de capacidade

de uma bateria que foi usada e é expressa em %. Já a eficiência de uma bateria é representada pela quantidade de energia que pode ser fornecida em relação a quantidade de energia necessária para armazená-la.

A capacidade da bateria de manter uma carga diminuirá gradualmente a medida que ela seja usada. A bateria solar terá uma garantia que garante determinado número de ciclos e/ou anos de vida útil. Como o desempenho da bateria naturalmente se degrada com o tempo, a maioria dos fabricantes também garante que a bateria mantenha certa quantidade de sua capacidade ao longo da vida útil.

O sistema de armazenamento será formado a partir de baterias estacionárias de íon-lítio. Entende-se por bateria estacionária aquelas que são tipicamente aplicadas a funções que demandam por longos períodos de corrente elétrica moderada, ao invés de sobrecargas por poucos segundos. Esse tipo de bateria foi projetado com o objetivo de oferecer uma quantidade constante de corrente por um longo período de tempo, além de poder ser descarregada completamente diversas vezes. As baterias estacionárias são projetadas para ciclos de descarga profundos.

Elas têm placas de chumbo mais espessas e suportam quantidades maiores de ciclos de carga e descarga, uma necessidade para atender à demanda por esse tipo de uso. Além disso, este tipo de bateria apresenta as vantagens de ter uma alta densidade energética, carregamento e descarregamento rápido e maior vida útil. As características da bateria empregada são denotadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações técnicas das baterias

Especificações técnicas das baterias	
Capacidade (Ah)	120
Tensão nominal (V)	24
Eficiência (%)	95
Confiabilidade	0,5%
Capacidade de descarregamento (A)	45
Capacidade de carregamento (A)	24
Capacidade de descarga (%)	70
Ciclos	1200
Vida útil (Anos)	10
Custo unitário (R\$)	2.700,00

Fonte: Autor

4.5.3 Inversores

Devido as baterias e as placas fotovoltaicas operarem em corrente contínua, será necessário a instalação de inversores para conectar estes componentes à rede principal, que opera em corrente alternada. A Tabela 8 mostra as características técnicas dos inversores que serão utilizados.

Tabela 8 - Especificações técnicas dos inversores

Especificações técnicas dos inversores	
Capacidade (kW)	25
Eficiência (%)	92
Vida útil (anos)	12
Custo unitário (R\$)	19.000,00

Fonte: Autor

4.6 DADOS ECONÔMICOS

Para calcular o custo anual da microrrede, deve-se levar em consideração alguns dados econômicos, como juros e inflação. A Tabela 9 apresenta os dados econômicos que serão utilizados para calcular o custo anual da microrrede.

Tabela 9 - Dados econômicos

Dados econômicos	
Inflação (%)	4,31
Taxa de juros (%)	1,9
Taxa de desconto (%)	1,9

Fonte: Autor

Neste trabalho, utilizou-se a taxa Selic como taxa de juros nominal para cálculo do custo anual do sistema e também para a taxa de desconto usada no cálculo do valor presente líquido. Durante o período analisado, a taxa Selic encontrava-se no valor de 1,9%. A taxa de inflação usada para os cálculos é referente ao valor entre os períodos de dezembro de 2019 e dezembro de 2020, acumulada em 4,31% (IBGE, 2020).

5 RESULTADOS

Neste capítulo, serão mostrados os resultados obtidos para otimização do dimensionamento da microrrede e da análise da expansão dela.

5.1 ÓTIMO DIMENSIONAMENTO DA MICRORREDE

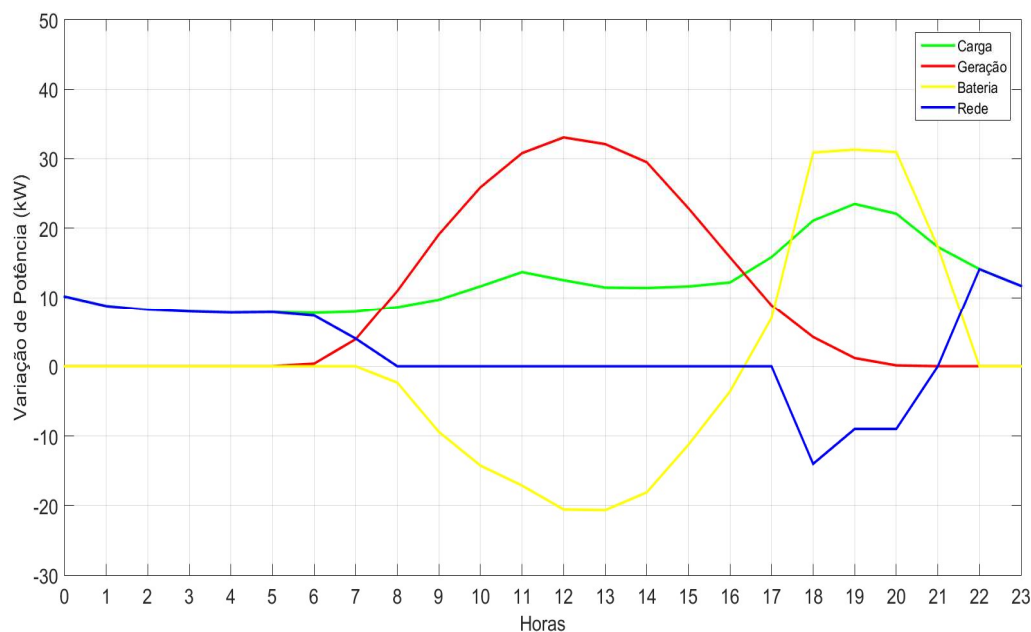
A partir dos dados demonstrados na seção anterior, foi realizado o processo de otimização dos sistemas de geração e armazenamento da microrrede considerando uma vida útil de 25 anos.

A otimização da microrrede foi processada a partir de um método iterativo baseado em busca exaustiva. No regime *net metering*, não existe monetização da energia injetada na rede, somente o aproveitamento dos créditos gerados. Assim, não é viável superdimensionar o sistema de geração para produzir mais energia e, conseqüentemente, injetá-la na rede. Dessa maneira, a minimização do custo anual do sistema ocorre quando a energia demandada pela microrrede é suprida pelo menor número de componentes possíveis. Portanto, o critério de parada da busca exaustiva é a primeira combinação de número de painéis fotovoltaicos e número de baterias, de modo que o processo de iteração inicia no valor mínimo de componentes.

Dessa forma, o sistema de geração será composto por 162 painéis fotovoltaicos de 335W, resultando num total de 54,27 kWp. Já o sistema de armazenamento terá 81 baterias de 2.88 kWh, totalizando uma capacidade 221.48 kWh, com uma taxa de potência de 83 kW. A Figura 19, mostra a variação de potência da carga, geração, armazenamento e da rede principal.

Conforme mostra a Figura 19, o sistema de geração é capaz de atender a carga demandada no período diurno. Conseqüentemente, a parcela excedente é utilizada para abastecer o sistema de armazenamento, que por sua vez, é descarregado no período de tarifa de ponta. Assim, além de suprir a carga neste período no qual a tarifa é mais elevada, o excedente é injetado na rede, gerando créditos para consumo em um período com tarifa mais elevado. Durante a madrugada, onde não há geração e a tarifa da distribuidora tem um valor mais reduzido, a rede principal abastece a carga dos usuários da microrrede.

Figura 19 - Variação de potência dos componentes da microrrede



Fonte: Autor

De tal modo, para este dimensionamento, foram calculados os valores que compõem o custo anual do sistema. Assim, a Tabela 10 apresenta os custos e lucros que compõem o custo anual da microrrede.

A partir da Tabela 10, percebe-se que o maior custo decorre da aquisição dos componentes, seguido pelo custo de substituição, representando 52,7% e 31,7% do custo total respectivamente. Em relação ao custo de balanço de energia, o total de importada é abatido em 56% com a injeção de energia excedente na rede. Já a operação e manutenção, representam a menor parcela, apenas 1,5% do custo anual total. Esse baixo valor deve-se a não necessidade de combustível para operação da microrrede.

Tabela 10 - Descrição dos custos da microrrede

Descrição	Valor
Aquisição (R\$)	25.011,01
Operação e manutenção (R\$)	726,64
Substituição (R\$)	15.039,1
Importação (R\$)	13.421,83
Injeção (R\$)	8.477,84

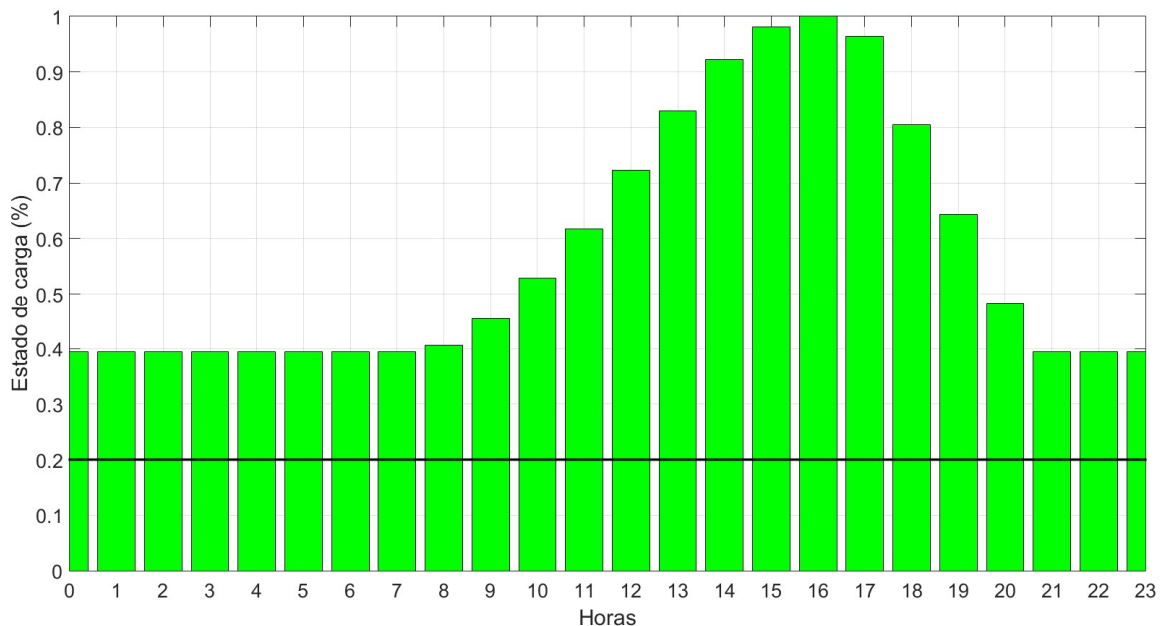
Custo anual (R\$)

45.720,73

Fonte: Autor

É importante perceber, a partir da Figura 20, que o estado de carga da bateria em nenhum momento fica abaixo do limite de descarregamento. Assim, como as baterias não operarão a seu limite de descarregamento, sua vida útil será prolongada. Estima-se que a bateria teria capacidade para suportar mais 200 ciclos.

Figura 20 - Estado de carga do sistema de armazenamento durante 24 horas



Fonte: Autor

A Tabela 11 apresenta a quantidade de painéis solares e baterias necessárias para suprir a carga demandada pelos consumidores da microrrede. Esta tabela também compara o custo anual para operar a microrrede em relação a um cenário no qual só exista a geração solar e a rede principal e outro caso onde a rede é a única responsável por suprir a carga demandada. A partir destes custos, foi calculado o valor tarifário para cada um dos casos. No caso onde existe somente fornecimento de energia por meio da rede principal, a tarifa obtida é uma tarifa equivalente.

Primeiramente, destaca-se que o valor tarifário para a microrrede e para o caso onde só há geração solar é equivalente a uma tarifa. Dessa forma, analisando a Tabela 11, percebe-se que o modelo proposto é validado pelo resultado, de modo que a tarifa equivalente obtida para a microrrede é menor que a tarifa equivalente da

distribuidora. O valor da tarifa da microrrede é 27% menor que a tarifa equivalente da distribuidora e 14% menor que a tarifa para um sistema sem sistema de armazenamento. Além disso, a microrrede garante aos usuários segurança para fornecimento sem interrupções.

Tabela 11 - Comparação entre os custos da microrrede, geração e rede e somente rede

	Microrrede	Geração e rede	Rede
Nº de painéis	162	200	-
Nº de baterias	77	-	-
Custo anual (R\$)	45.720,70	52.933,05	62.320,43
Carga anual (kWh)	107.518,5	107.518,5	107.518,5
Tarifa (R\$/kWh)	0,4254	0,492	0,579

Fonte: Autor

5.2 ANÁLISE DA EXPANSÃO DA MICRORREDE

Após a realização da otimização do dimensionamento dos componentes da microrrede, é então feito a análise da expansão do sistema de geração e armazenamento conforme os casos de expansão descritos na metodologia.

Para a carga foi considerado um aumento anual de 3% e para a tarifa horária o valor de acréscimo foi de 5%. Por fim, a redução da eficiência dos painéis e das baterias é conforme o estabelecido pelos fornecedores.

5.2.1 Ano 2

Para o segundo ano de operação da microrrede, a energia total diária é de 303,408 kWh, resultando num dimensionamento de 168 painéis e 81 baterias, ou seja, seria necessário o acréscimo de 6 painéis e 4 baterias. Esse acréscimo de componentes resultaria em R\$ 14760,00. O custo do balanço de energia para este caso é de R\$ 6671,70. Assim, o fluxo de caixa para o segundo ano é de R\$ 2201,80.

Entretanto, para o caso 2, no qual não há mais aquisição de componentes para compensar o aumento de carga e redução da eficiência do sistema, o aumento no consumo da rede seria de R\$ 9695,32. A Tabela 12 mostra os dados de expansão para cada um dos casos analisados.

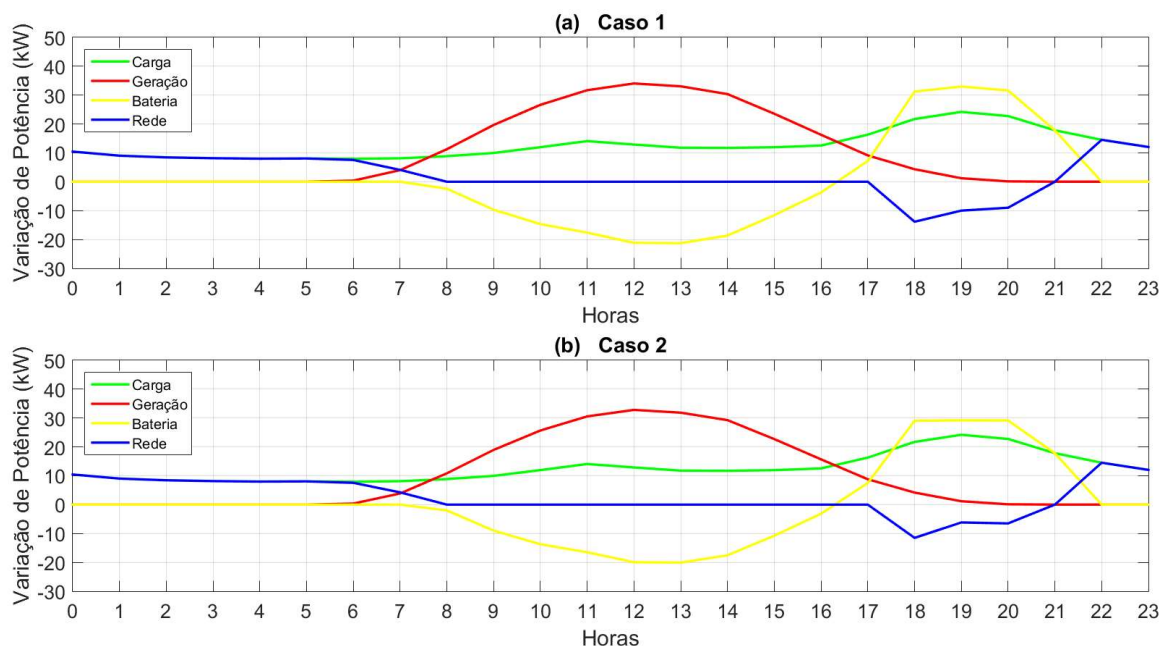
Tabela 12 - Análise da expansão da microrrede para o ano 2

	Caso 1	Caso 2
Painéis adicionados	6	-
Painéis totais	168	162
Baterias adicionadas	4	-
Baterias totais	81	77
Eficiência da geração (%)	96,8	96,8
Eficiência do armazenamento (%)	93,7	93,6
Custo de aquisição (R\$)	-7.250,80	-
Custo do balanço de energia (R\$)	-6.671,70	-9.695,32
Fluxo de caixa (R\$)	-22.010,80	-9.695,32

Fonte: Autor

A Figura 21 mostra a variação de potência de cada sistema da microrrede enquanto a Figura 22 demonstra a variação do estado de carga do sistema de armazenamento para cada um dos casos.

Figura 21 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 2

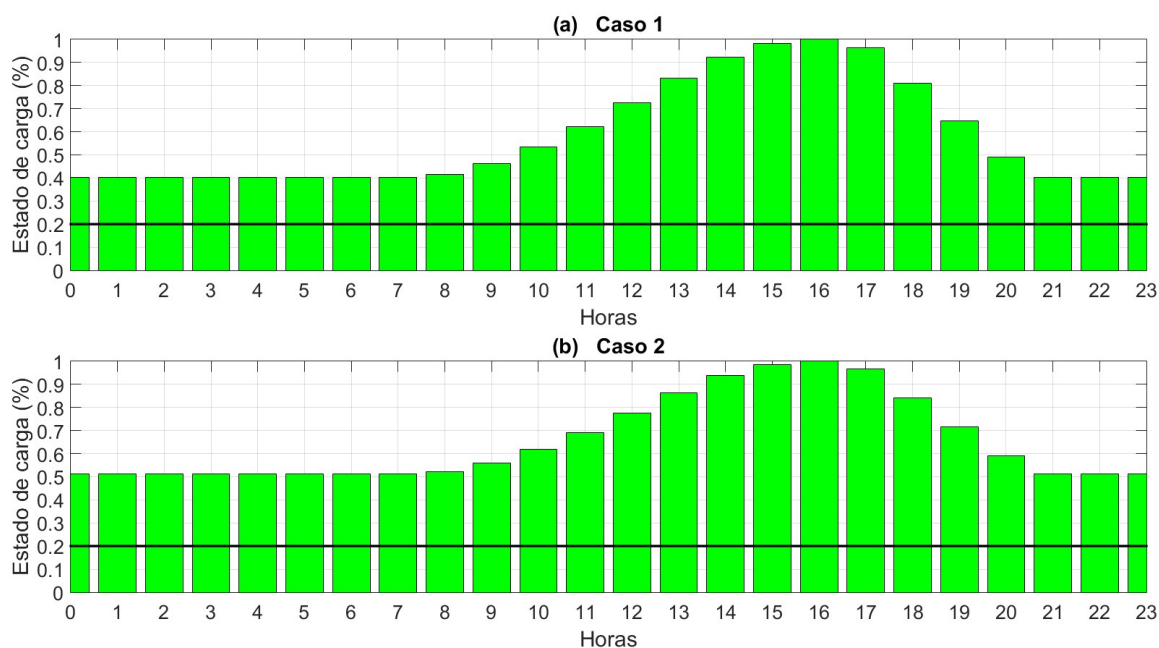


Fonte: Autor

Analisando a Figura 21, que mostra a variação de potência de cada sistema da microrrede, percebe-se que nos dois casos ainda existe um excedente armazenado

que é injetado na rede no horário de ponta. Entretanto, em relação ao estado de carga do sistema de armazenamento, na Figura 22 (b) nota-se que o uso desses sistemas é reduzido em relação ao primeiro caso. Isso ocorre devido ao menor excedente de energia gerada em relação a consumida, ocasionando numa menor parcela a ser injetada na rede.

Figura 22 – Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 2



Fonte: Autor

5.2.2 Ano 3

No terceiro ano de operação da microrrede, a carga total para um dia é de 312,510 kWh. Para essa demanda, o dimensionamento da microrrede seria de 174 painéis e 84 baterias, fazendo com que seja preciso adicionar mais 6 painéis e mais 3 baterias em relação ao segundo ano de operação da microrrede. Essa adição de painéis e baterias resultaria em R\$ 12060 e o custo do balanço de energia é de 7953,04, tendo como resultado um fluxo de caixa de R\$20013,04.

Por outro, para o caso 2, para compensar a redução da eficiência dos componentes e o aumento da carga demanda, será necessário arcar com um custo de balanço de energia de R\$ 13067,09. Assim, a Tabela 13 mostra os dados de expansão para cada um dos casos analisados.

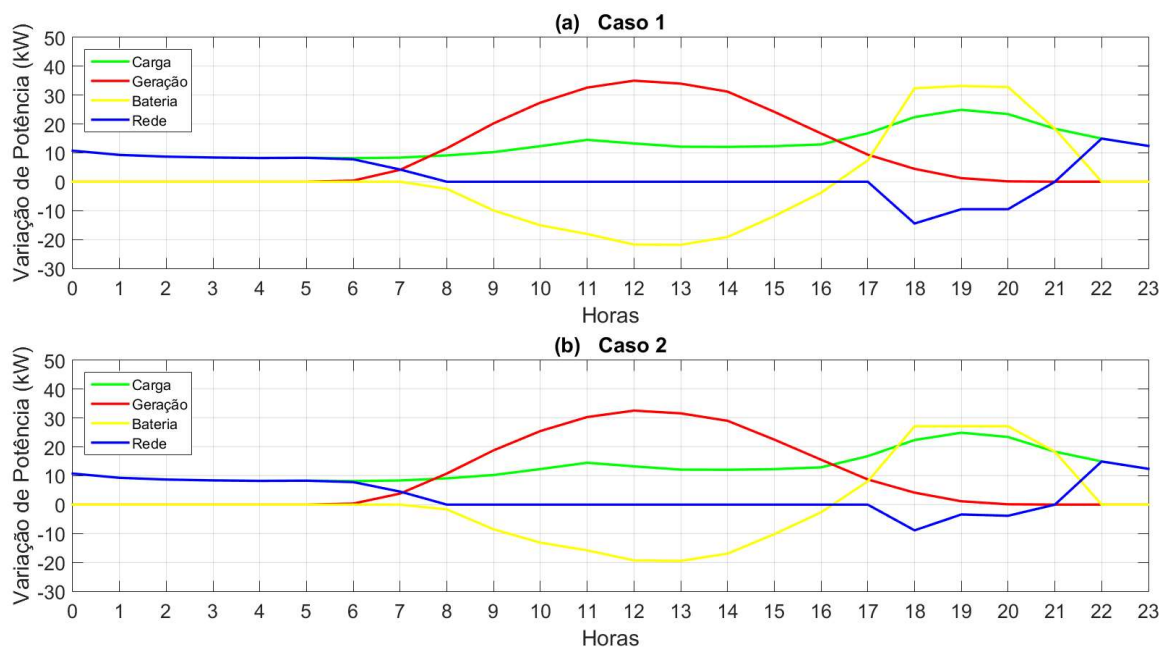
Tabela 13 - Análise da expansão da microrrede para o ano 3

	Caso 1	Caso 2
Painéis adicionados	6	-
Painéis totais	174	162
Baterias adicionadas	3	-
Baterias totais	84	77
Eficiência da geração (%)	96,1	96
Eficiência do armazenamento (%)	92,4	92,2
Custo de aquisição (R\$)	-12.060	-
Custo do balanço de energia (R\$)	-7.953,042	-13.067,09
Fluxo de caixa (R\$)	-20.013,042	-13.067,09

Fonte: Autor

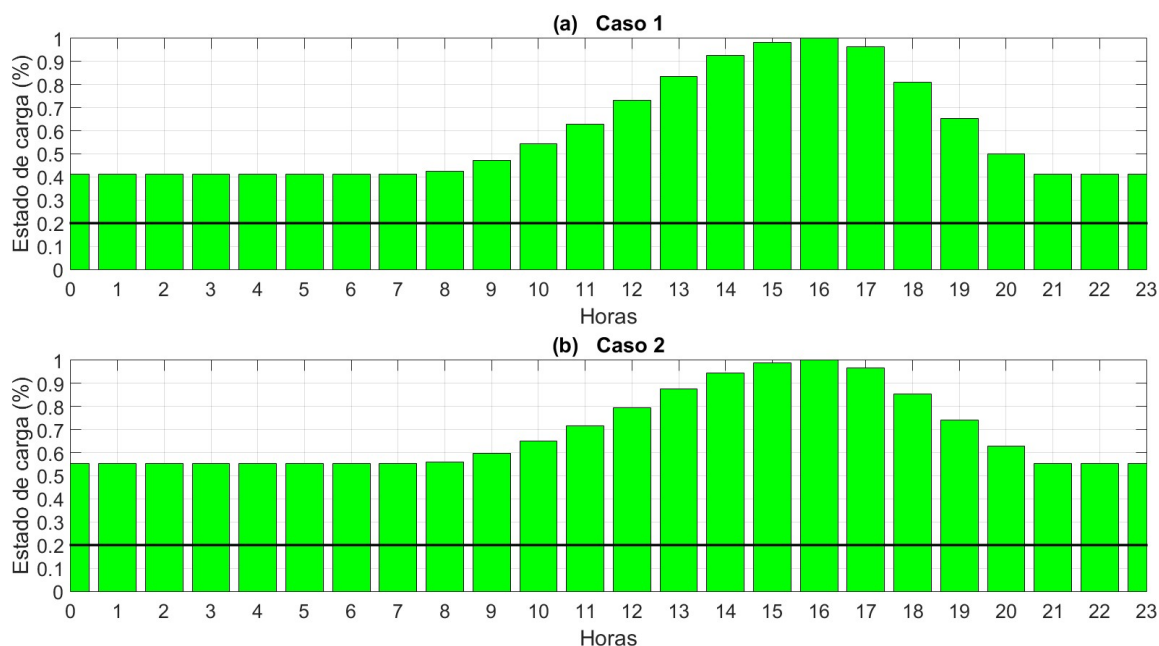
A Figura 23 mostra a variação de potência de cada sistema da microrrede enquanto a Figura 24 demonstra a variação do estado de carga do sistema de armazenamento para cada um dos casos.

Figura 23 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 3



Fonte: Autor

Figura 24 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 3



Fonte: Autor

Percebe-se, analisando a Figura 23, que os 2 casos ainda são capazes de fornecer energia aos usuários por meio do sistema de geração e armazenamento sem necessitar consumir da rede no período de ponta, assim como ocorre no segundo ano de operação da microrrede. Entretanto, para o segundo caso, a parcela injetada na rede é ainda menor, devido a redução do montante de energia armazenado durante o dia para ser injetado no período de ponta.

5.2.3 Ano 4

No quarto ano de operação da microrrede, deve-se suprir uma carga diária de 321,88 kWh. Dessa forma, o sistema de geração deve ser composto por 181 painéis, enquanto o sistema de armazenamento possui 88 baterias. Assim, devem-se adicionar nestes sistemas 7 painéis e 4 baterias, respectivamente.

O custo para aquisição dos novos painéis e baterias é de R\$ 15420. Já o custo do balanço de energia resulta em R\$ 8352,96, com um fluxo de caixa total para este ano de R\$ 23772,96.

Para o caso 2, o aumento no consumo da rede, para compensar as reduções de eficiência e aumento de carga, resulta num custo de R\$ 16826,42. A Tabela 14 mostra os custos da expansão da microrrede no quarto ano para cada um dos casos analisados.

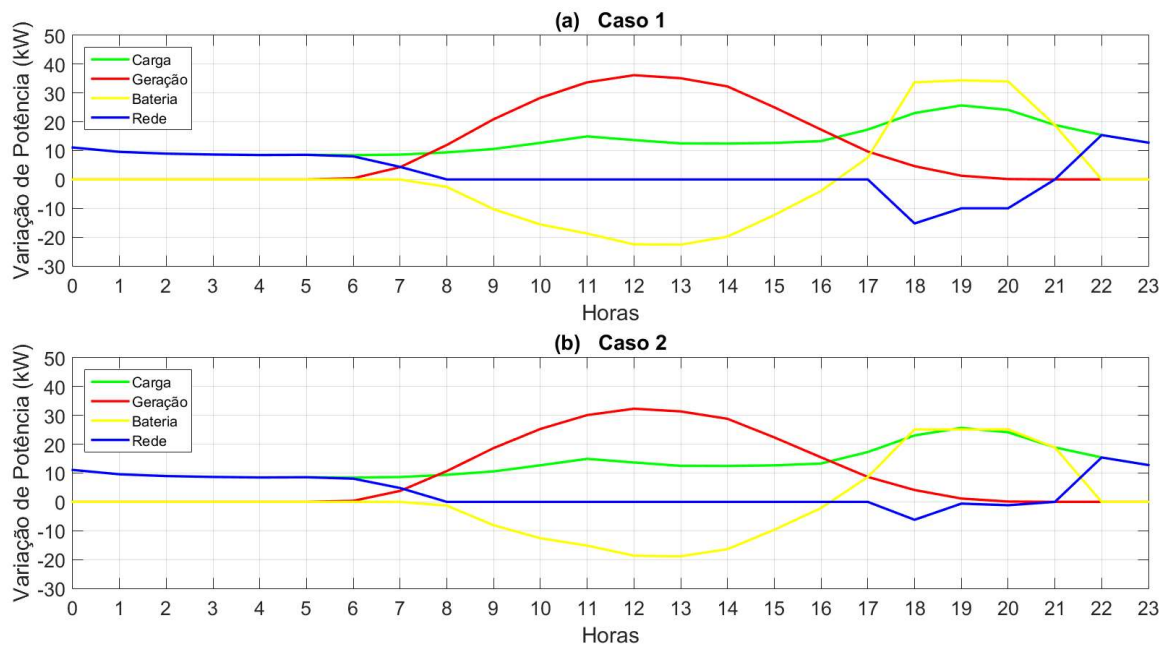
Tabela 14 - Análise da expansão da microrrede para o ano 4

	Caso 1	Caso 2
Painéis adicionados	7	-
Painéis totais	181	162
Baterias adicionadas	4	-
Baterias totais	88	77
Eficiência da geração (%)	95,5	95,3
Eficiência do armazenamento (%)	91,2	90,8
Custo de aquisição (R\$)	-15.420	-
Custo do balanço de energia (R\$)	-8.352,96	-16.826,428
Fluxo de caixa (R\$)	-23.772,96	-16.826,428

Fonte: Autor

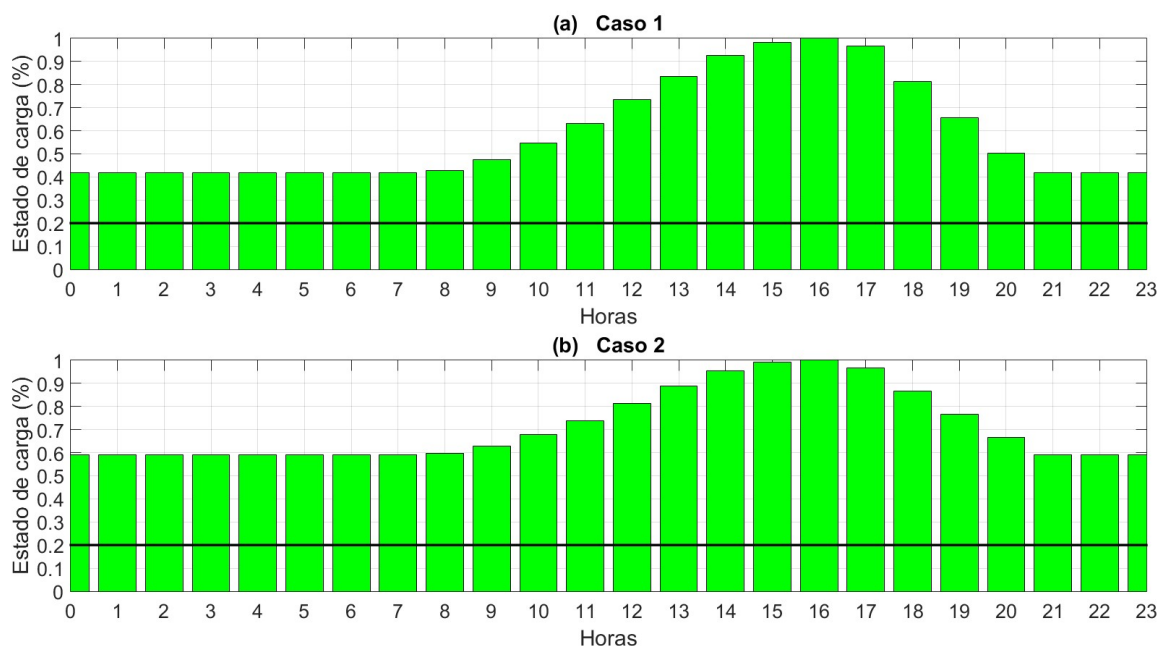
A Figura 25 mostra a variação de potência de cada sistema da microrrede enquanto a Figura 26 demonstra a variação do estado de carga do sistema de armazenamento para cada um dos casos.

Figura 25 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 4



Fonte: Autor

Figura 26 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 4



Fonte: Autor

Percebe-se, analisando a Figura 25, que para o caso 2 quase não há energia injetada na rede. Dessa forma, a geração de créditos a partir desta injeção é quase nula, fazendo com que não existe abatimento no valor de energia consumida da rede principal.

5.2.4 Ano 5

No ano 5 da operação da microrrede dimensionado, a carga demandada chega a 331,54 kWh para um período de 24 horas. Assim sendo, o dimensionamento do sistema de geração fotovoltaica resulta em 188 painéis, fazendo com que seja necessário adicionar mais 7 painéis em relação ao ano anterior. Já para o sistema de armazenamento de energia, deve-se integrar mais 4 baterias, totalizando 92 baterias no total desse sistema.

A adição destes componentes resultaria em R\$ 15.420,00 e o custo do balanço de energia seria de R\$ 8.878,43. O fluxo de caixa para o caso 1 do ano 5 da microrrede totalizaria em R\$ 24.298,43.

Entretanto, para o caso 2, no qual não há mais aquisição de componentes para compensar o aumento de carga e redução da eficiência do sistema, o aumento no consumo da rede seria de R\$ 21.009,71. A Tabela 15 mostra os dados de expansão para cada um dos casos analisados.

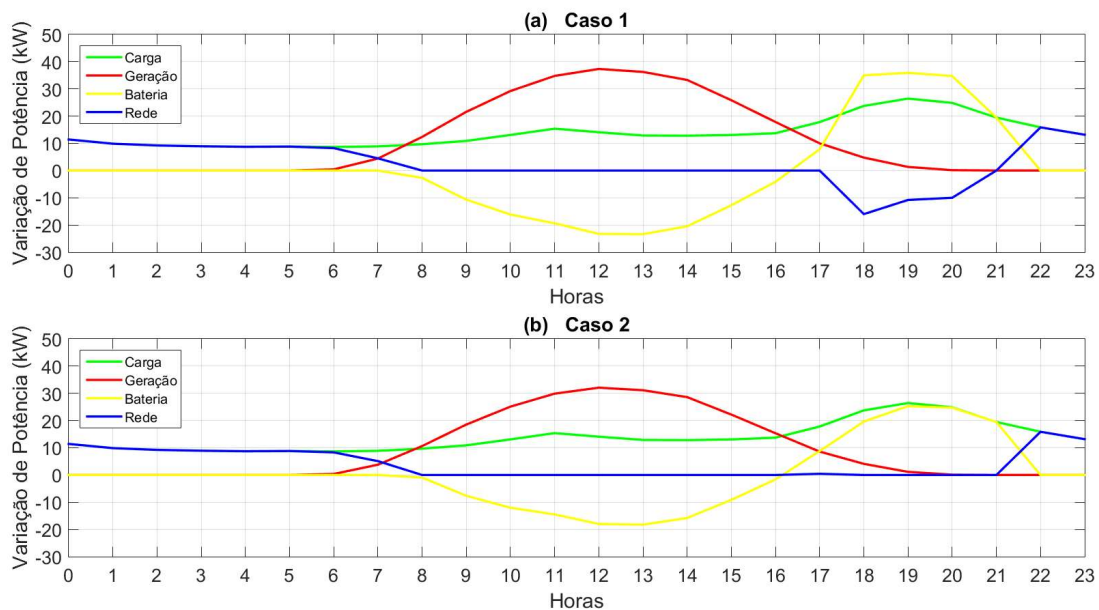
Tabela 15 - Análise da expansão da microrrede para o ano 5

	Caso 1	Caso 2
Painéis adicionados	7	-
Painéis totais	188	162
Baterias adicionadas	4	-
Baterias totais	92	77
Eficiência da geração (%)	94,8	94,6
Eficiência do armazenamento (%)	90	89,4
Custo de aquisição (R\$)	-15.420	-
Custo do balanço de energia (R\$)	-8.878,43	-21.009,71
Fluxo de caixa (R\$)	-24.298,43	-21.009,71

Fonte: Autor

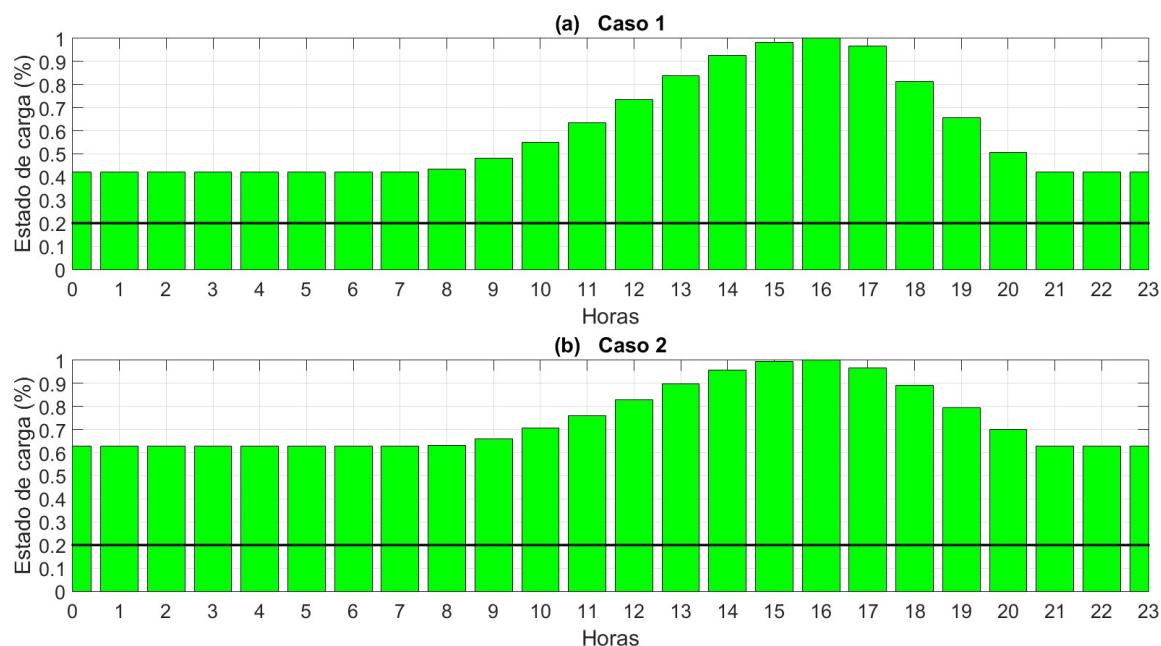
A Figura 27 mostra a variação de potência de cada componente para o quinto ano de operação. A Figura 28 mostra a variação do carregamento das baterias.

Figura 27 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 5



Fonte: Autor

Figura 28 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 5



Fonte: Autor

A partir da Figura 27 é perceptível a diferença entre os 2 casos analisados. Enquanto para o caso 1, a microrrede seria capaz de fornecer energia no horário de ponta para os consumidores e também injetar o excedente acumulado durante o dia na rede, no caso 2 não há nenhuma injeção.

Assim, considera-se o ano 5 como o marco da virada entre os 2 casos. Até então, o fluxo de caixa era maior para o caso 1. Entretanto, como não haverá injeção de energia na rede no caso 2 a partir deste ano, o fluxo de caixa anual será maior para o caso 2.

5.2.5 Ano 6

Em relação ao sexto ano após a implementação da microrrede, é estimada uma demanda diária de 341,48 kWh, resultando num dimensionamento de 195 painéis e 96 baterias, ou seja, seria necessário o acréscimo de 7 painéis e 4 baterias. Esse acréscimo de componentes resultaria em R\$ 15.420,00. Entretanto, para o caso 2, no qual não há mais aquisição de componentes para compensar o aumento de carga e redução da eficiência do sistema, o aumento no custo de balanço de energia seria de

R\$ 25.656,54. A Tabela 16 mostra os dados de expansão para cada um dos casos analisados.

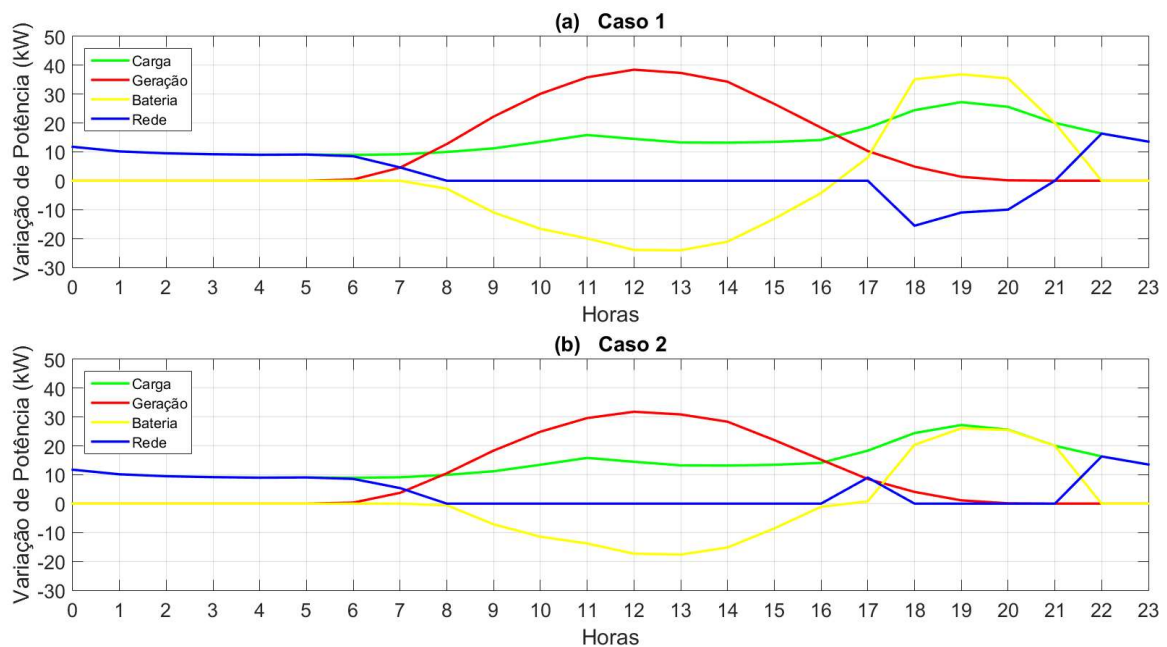
Tabela 16 - Análise da expansão da microrrede para o ano 6

	Caso 1	Caso 2
Painéis adicionados	7	-
Painéis totais	195	162
Baterias adicionadas	4	-
Baterias totais	96	77
Eficiência da geração (%)	94,2	93,8
Eficiência do armazenamento (%)	89	88
Custo de aquisição (R\$)	-15.420	-
Custo do balanço de energia (R\$)	-10.048,97	-25.656,54
Fluxo de caixa (R\$)	-25.468,97	-25.656,54

Fonte: Autor

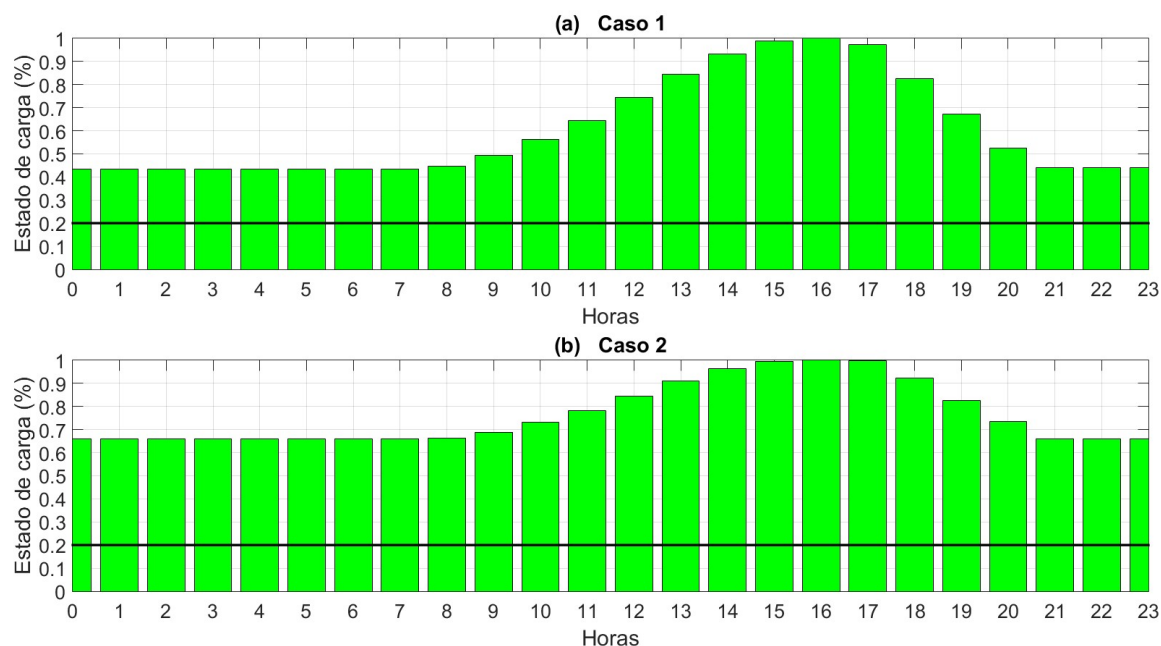
A variação de potência de cada sistema da microrrede é mostrada na Figura 29, enquanto a variação do estado de carga do sistema de armazenamento para cada um dos casos é mostrada na Figura 30.

Figura 29 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 6



Fonte: Autor

Figura 30 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 6



Fonte: Autor

Por meio da Figura 29, percebe-se que para o caso 2, o excedente de energia armazenado é totalmente utilizado durante o horário de ponta para suprir a carga demanda. Dessa forma, não é necessário a utilização da rede para suprir parcialmente a carga neste período. Porém, no horário intermediário, a rede principal é a responsável por suprir a carga dos usuários. Assim, apesar de ter o custo com a importação, este custo é reduzido pois a tarifa é intermediária. Em relação ao caso 1, a microrrede segue o padrão dos anos anteriores, tendo um sistema de geração dimensionado para suprir a carga durante o dia e fornecer um excedente suficiente para suprir, através dos sistemas de armazenamento, a energia demandada também nos horários intermediária e de ponta.

5.2.6 Ano 7

Ao analisar o sétimo ano de operação da microrrede, para uma carga total de 351,73 kWh por dia, seria necessário um sistema de geração fotovoltaico composto por 202 painéis e um sistema de armazenamento composto por 100 baterias. Dessa forma, teriam que ser adquiridos mais 7 painéis e 4 baterias, resultando num custo de

aquisição de R\$15.420,00. O custo do balanço de energia seria de R\$ 10.385,53, totalizando num fluxo de caixa de R\$ 25.805,53.

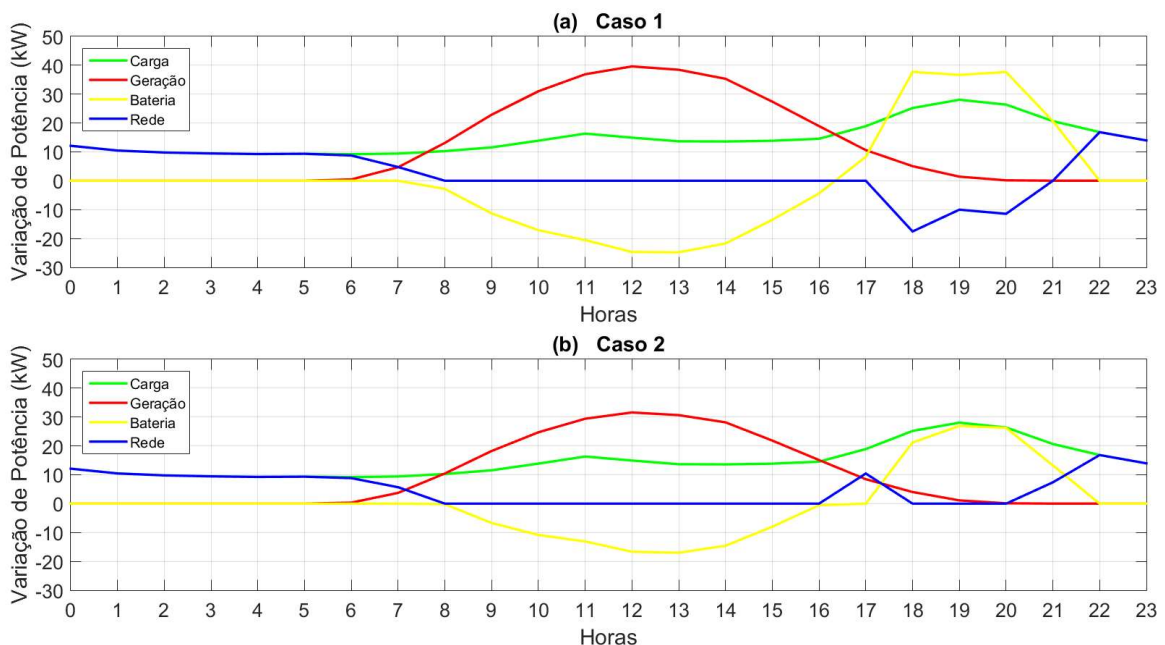
Por outro lado, para o caso 2, a compensação desse aumento de carga através do consumo da rede principal resultaria num gasto de R\$30.809,91. A tabela 17 mostra os dados de expansão para cada um dos casos analisados.

Tabela 17 - Análise da expansão da microrrede para o ano 7

	Caso 1	Caso 2
Painéis adicionados	7	-
Painéis totais	202	162
Baterias adicionadas	4	-
Baterias totais	100	71
Eficiência da geração (%)	93,6	93,1
Eficiência do armazenamento (%)	87,7	86,6
Custo de aquisição (R\$)	-15.420	-
Custo do balanço de energia (R\$)	-10.385,53	-30.809,91
Fluxo de caixa (R\$)	-25.805,53	-30.809,91

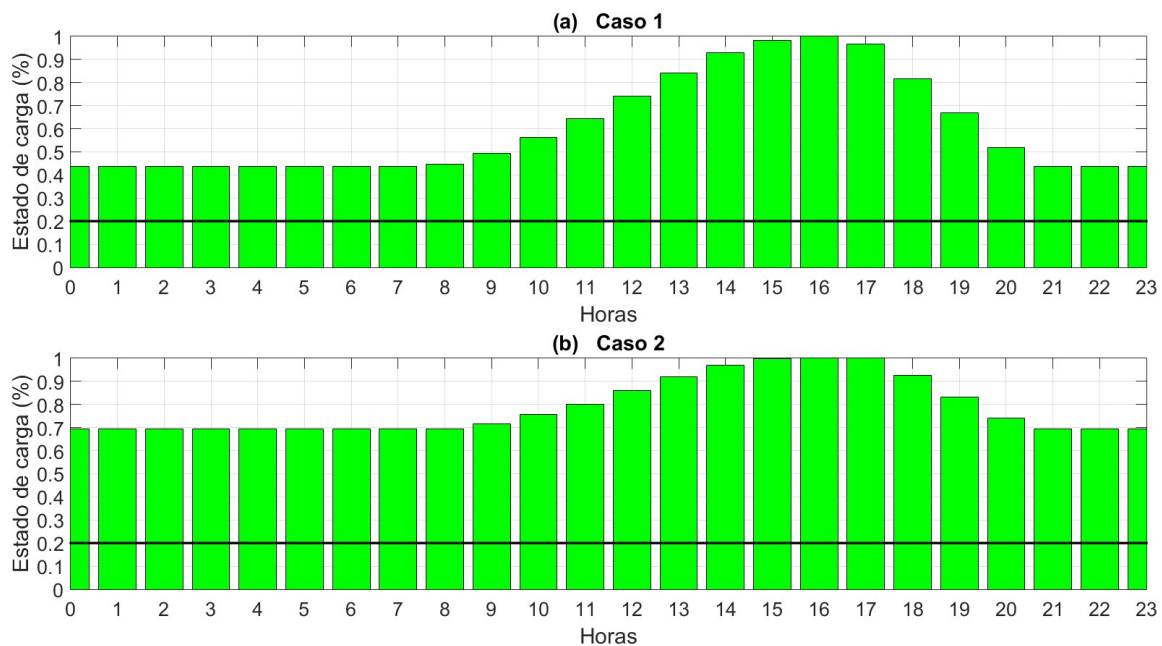
Fonte: Autor

Figura 31 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 7



Fonte: Autor

Figura 32 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 7



Fonte: Autor

Através da Figura 31, percebe que o caso 1 replica a forma da curva de carga dos anos anteriores, já que a microrrede tem o dimensionamento necessário para atender a carga. Porém, para o caso 2, percebe-se que não há injeção de energia acumulada na rede, pois esse excedente é utilizado para atender o consumo no horário de ponta. No horário intermediário, a rede auxilia a microrrede ao fornecer energia.

A Figura 32 mostra a variação do estado de carga do sistema de carregamento para cada um dos casos analisados. Ressalta-se que para o segundo caso, como não há grande montante de excedente de energia, conseqüentemente, não há muita energia para ser injetada na rede. Dessa forma, a variação do estado de carga é mínima, com um descarregamento de 30%.

5.2.7 Ano 8

No oitavo ano de operação, a microrrede deve atender uma carga total diária de 362,28 kWh, necessitando de um sistema de geração de 209 painéis e de um sistema de armazenamento composto por 105 baterias. Para alcançar esse dimensionamento, deverá ser adicionado mais 7 painéis e 5 baterias.

Devido a essa adição de componentes, o custo de aquisição resulta em R\$ 18.120,00 e o custo de balanço de energia em R\$ 11.412,77. Por fim, o fluxo de caixa para o oitavo ano de operação para o caso 1 é R\$ 29.532,77.

Já para o segundo caso a ser analisado, para compensar o aumento de carga e redução da eficiência dos componentes, o custo de balanço de energia é de R\$36.516,55. A Tabela 18 mostra os dados de expansão para cada um dos casos analisados.

Tabela 18 - Análise da expansão da microrrede para o ano 8

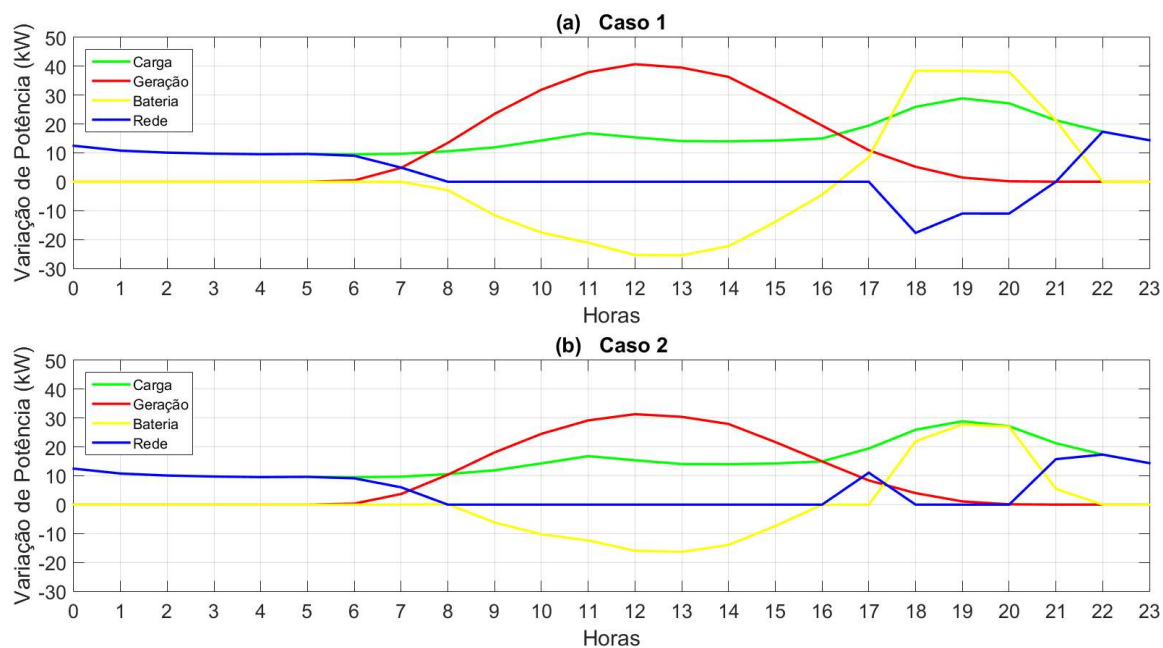
	Caso 1	Caso 2
Painéis adicionados	7	-
Painéis totais	209	162
Baterias adicionadas	5	-
Baterias totais	105	77
Eficiência da geração (%)	93,1	92,4
Eficiência do armazenamento (%)	86,8	85,2
Custo de aquisição (R\$)	-18.120	-
Custo do balanço de energia (R\$)	-11.412,77	-36.516,55
Fluxo de caixa (R\$)	-29.532,77	-36.516,55

Fonte: Autor

A Figura 33 mostra a variação de potência de cada sistema da microrrede enquanto a Figura 34 demonstra a variação do estado de carga do sistema de armazenamento para cada um dos casos.

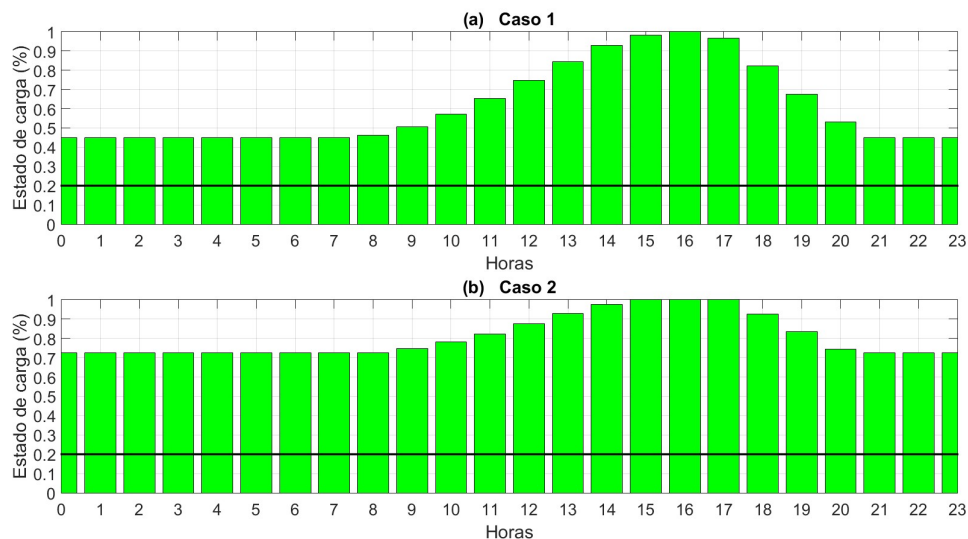
De acordo com a Figura 33, é possível perceber que no caso 1, a microrrede continua a demonstrar o mesmo padrão de curva em relação aos anos anteriores. No caso 2, o padrão segue sendo repetido, havendo ainda um aumento na energia consumida da rede principal.

Figura 33 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 8



Fonte: Autor

Figura 34 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 8



Fonte: Autor

5.2.8 Ano 9

O aumento do consumo dos usuários par ao nono ano resulta em uma carga demandada 373,15 kWh. Para suprir essa demanda, o sistema de geração deve possuir 216 painéis enquanto o sistema de armazenamento deve possuir 110 baterias, ou seja, seria necessário anexar mais 7 painéis e 5 baterias. Essa aquisição custaria R\$ 18.120,00 e o custo do balanço de energia seria de R\$ 12.657,17.

Para o segundo caso de análise no ano 9 de operação, o custo do balanço de energia seria de R\$ 42.827,23. A tabela 19 mostra os dados de expansão para cada um dos casos analisados.

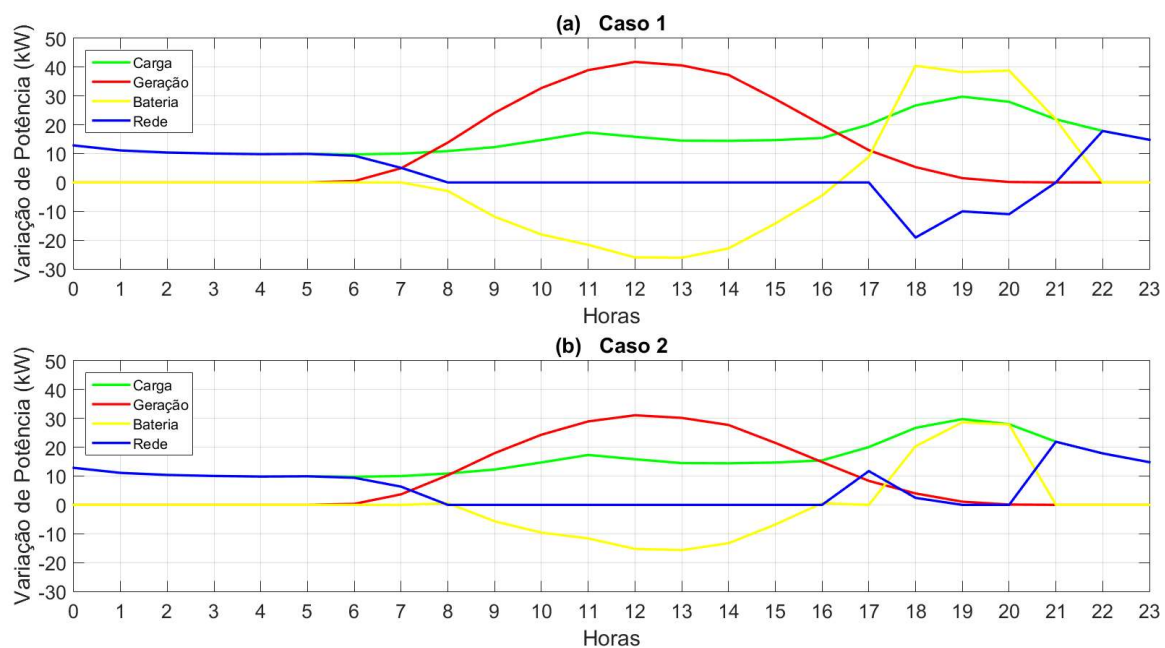
Tabela 19 - Análise da expansão da microrrede para o ano 9

	Caso 1	Caso 2
Painéis adicionados	7	-
Painéis totais	216	162
Baterias adicionadas	5	-
Baterias totais	110	77
Eficiência da geração (%)	92,5	91,7
Eficiência do armazenamento (%)	85,8	83,8
Custo de aquisição	-18.120,00	-
Custo do balanço de energia	-12.657,17	-42.827,23
Fluxo de caixa	-30.777,17	-42.827,23

Fonte: Autor

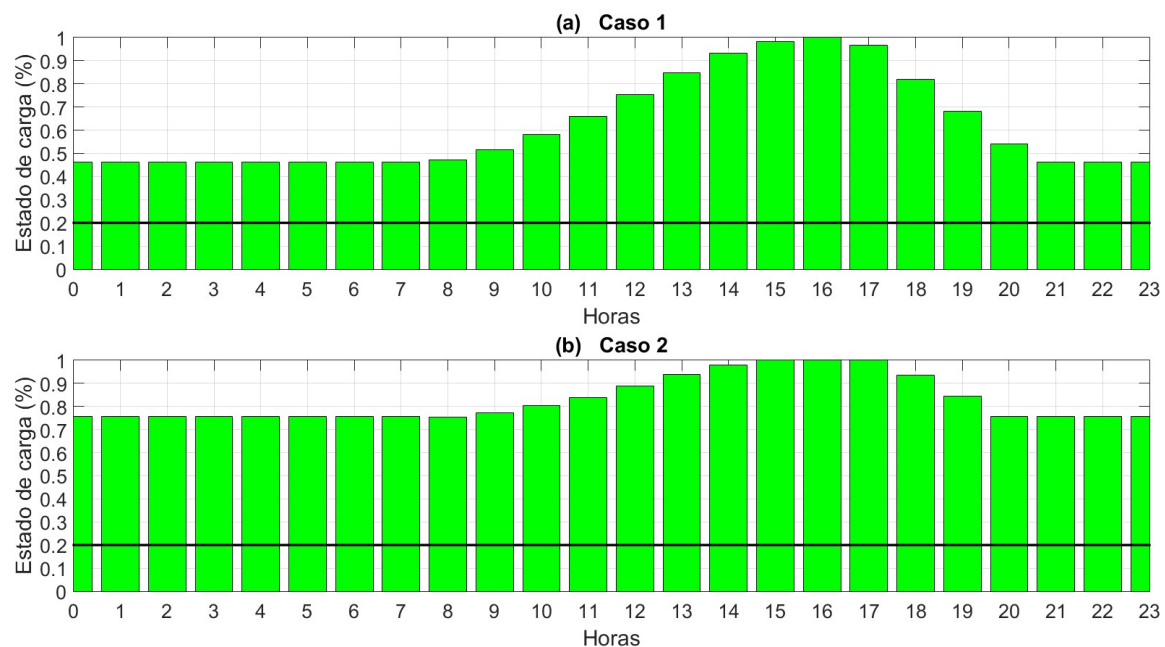
A Figura 35 mostra a variação de potência de cada sistema da microrrede enquanto a Figura 36 demonstra a variação do estado de carga do sistema de armazenamento para cada um dos casos.

Figura 35 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 9



Fonte: Autor

Figura 36 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 9



Fonte: Autor

Analisando a Figura 35, percebe-se que, para o caso 2, diferente dos anos anteriores, existe consumo de energia da rede principal no horário de ponta. Isto deve-

se a insuficiência do sistema de geração e abastecer as baterias para que elas sejam capazes de fornecer a energia demandada pelos consumidores em sua totalidade. Dessa forma, o custo do balanço de energia para este ano tende a crescer ainda mais em relação aos anos anteriores, já que para o horário de ponta a tarifa tem um valor maior.

Para o caso 1, a forma da curva de carga replica os anos anteriores, tendo energia armazenada suficiente para prover aos consumidores e também injetar na rede principal.

5.2.9 Ano 10

Por fim, no décimo ano de operação da microrrede, estima-se que os usuários demandarão uma carga total de 384,34 kWh para um período de 24 horas. Para suprir essa carga, a microrrede deve ter um sistema de geração fotovoltaico com 224 painéis solares e um sistema de armazenamento com 115 baterias, fazendo com que seja necessário adquirir mais 8 painéis e 5 baterias.

Esse processo de aquisição custará R\$ 18.780,00 e o custo do balanço de energia será de R\$ 13.546,45. Assim, o fluxo de caixa para o ano 10 totalizará em R\$ 32.326,45.

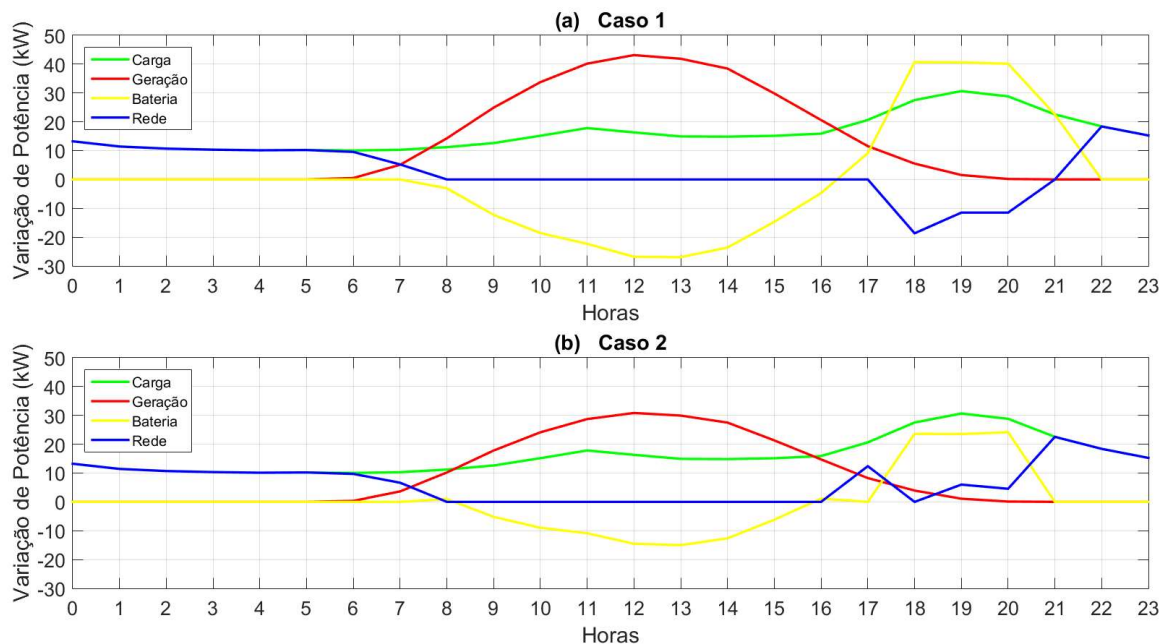
Por outra via, para o caso 2, o maior consumo da rede para compensar os efeitos da redução da eficiência e aumento do consumo resultará num custo de balanço de energia de R\$ 49.797,08. A Tabela 20 mostra os dados de expansão para cada um dos casos analisados.

Tabela 20 - Análise da expansão da microrrede para o ano 10

	Caso 1	Caso 2
Painéis adicionados	8	-
Painéis totais	224	162
Baterias adicionadas	5	-
Baterias totais	115	77
Eficiência da geração (%)	92	90,9
Eficiência do armazenamento (%)	85	82,4
Custo de aquisição	-18.780	-
Custo do balanço de energia	-13.546,45	-49.797,08
Fluxo de caixa	-32.326,45	-49.797,08

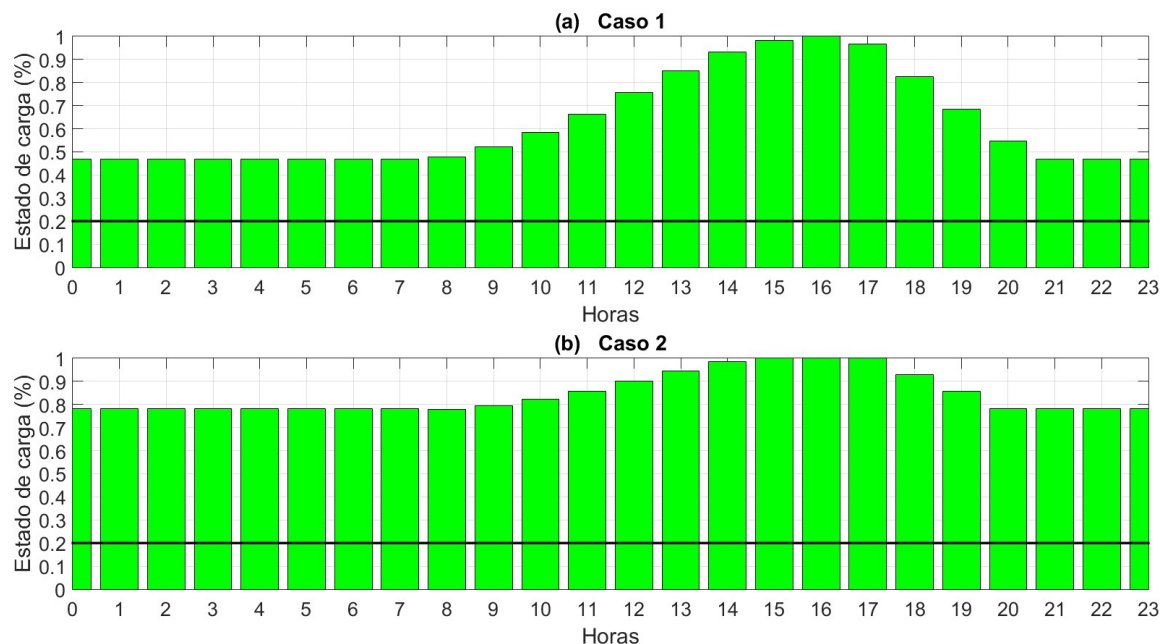
Fonte: Autor

Figura 37 - Variação de potência dos componentes da microrrede para o ano 10



Fonte: Autor

Figura 38 - Variação do estado de carga do armazenamento para o ano 10



Fonte: Autor

A partir da Figura 37 para o caso 1, percebe-se que a microrrede mantém sua curva de carga como os anos anteriores, com uma operação normal, ou seja, armazenando o excedente durante o dia para suprir a carga e injetar na rede no horário de ponta. Porém, para o caso 2, a microrrede opera de maneira inviável, pois consome da rede no horário de ponta, pois o excedente armazenado é insuficiente para suprir a carga nesta faixa horária.

A Figura 38 mostra a variação do estado de carga do sistema de armazenamento para os casos 1 e 2. No caso 1, a taxa de descarregamento se dá em torno de 52%. Assim, além de armazenar energia suficiente e suprir a demanda no horário de ponta, a vida útil do sistema de armazenamento é prolongada. Por outro lado, para o caso 2, a taxa de descarregamento máxima é de 22%, pois o excedente gerado nas horas em que há geração é baixo.

5.2.10 Valor Presente Líquido

Após obtenção dos custos e fluxos de caixa para cada um dos anos analisado, a próxima etapa se dá pela análise deles e cálculo do valor presente líquido, conforme descreve a equação (30).

Assim sendo, a Tabela 21 demonstra para cada um dos casos os valores de fluxo de caixa e valor presente líquido obtidos.

Tabela 21 - Fluxo de caixa e Valor Presente Líquido para o horizonte analisado

	Fluxo de caixa (R\$)		VPL (R\$)	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
Ano 2	- R\$22.010,8	- R\$9.695,32	-R\$21.197,64	- R\$9.337,14
Ano 3	- R\$20.013	- R\$13.067,1	- R\$18.914,31	- R\$12.349,70
Ano 4	- R\$23.773	- R\$16.826,4	- R\$22.048,88	- R\$15.606,12
Ano 5	- R\$24.298,4	- R\$21.009,7	- R\$22.116,04	- R\$19.122,71
Ano 6	- R\$25.469	- R\$25.656,5	- R\$22.749,21	- R\$22.916,75
Ano 7	- R\$25.805,5	- R\$30.809,9	- R\$22.620,05	- R\$27.006,68
Ano 8	- R\$29.532,8	- R\$36.516,6	- R\$25.404,50	- R\$31.412,06
Ano 9	- R\$30.777,2	- R\$42.827,2	- R\$25.981,31	- R\$36.153,67
Ano 10	- R\$32.326,5	- R\$49.797,1	- R\$26.780,34	- R\$41.253,62
Total	- R\$234.006	- R\$246.206	- R\$207.812,31	- R\$215.158,46

Fonte: Autor

Analisando a Tabela 21, percebe-se que o melhor caso proposto é o caso 1, no qual há a aquisição de novos componentes para compensar os efeitos do tempo, como queda da eficiência dos componentes, aumento da carga demanda e aumento da tarifa horária. Vale ressaltar que a aquisição e incorporação de novos componentes dentro da microrrede já instalada é possível devido a funcionalidade *plug and play*.

Os 2 valores finais dos VPL são negativos pois ambos representam custos ao longo do tempo. Entretanto, isso não os torna inviáveis, pois é esperado que a microrrede possua mais custos ao longo de sua operação, já que o regime *net metering* não permite a monetização da energia injetada na rede principal.

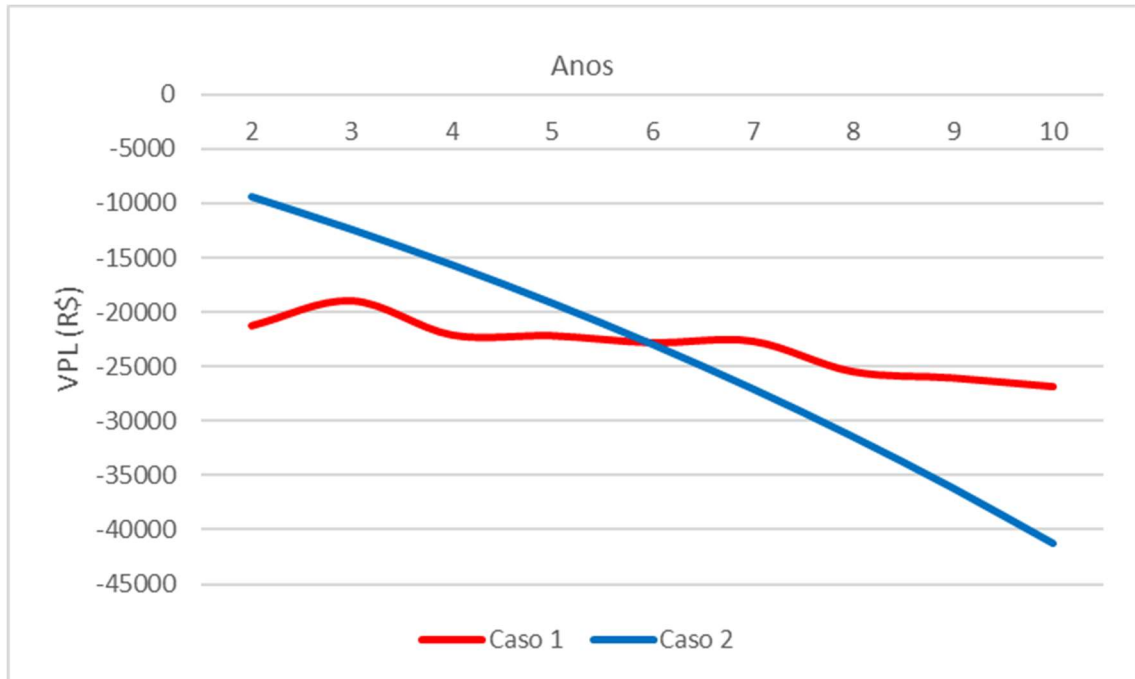
A Figura 39 e a Figura 40 mostram a evolução do fluxo de caixa e do valor presente líquido de cada um dos casos analisados. É possível perceber que as curvas mantêm o mesmo padrão em cada análise. É visível, a partir da análise das figuras abaixo, que o ano 5 é o momento em que a adoção do caso 1 é mais vantajoso para expansão da microrrede.

Figura 39 - Fluxo de caixa dos casos de expansão analisados



Fonte: Autor

Figura 40 - Valor presente líquidos dos casos de expansão analisados



Fonte: Autor

A seguir, a Tabela 22 mostra as taxas de FER e TEE para cada um dos casos. Para o caso 1, no qual é feita a aquisição de mais componentes para suprir o aumento da demanda, o FER é praticamente constante e o TEE fica perto de 10%. Porém, para o caso 2, como a compensação do aumento da carga é feito através do consumo da rede principal, percebe-se que o FER diminui ao longo dos anos e o TEE é nulo a partir do ano 5, pois não há excedente a ser injetado nesses anos.

Ademais, a análise da Tabela 22 mostra que, para o caso 1, a microrrede é capaz de promover o autoconsumo, já que a grande parte da energia consumida provém dos recursos distribuídos de energia. Assim, além da maior viabilidade econômica, o primeiro caso de análise se mostra uma melhor opção também dentro da esfera energética.

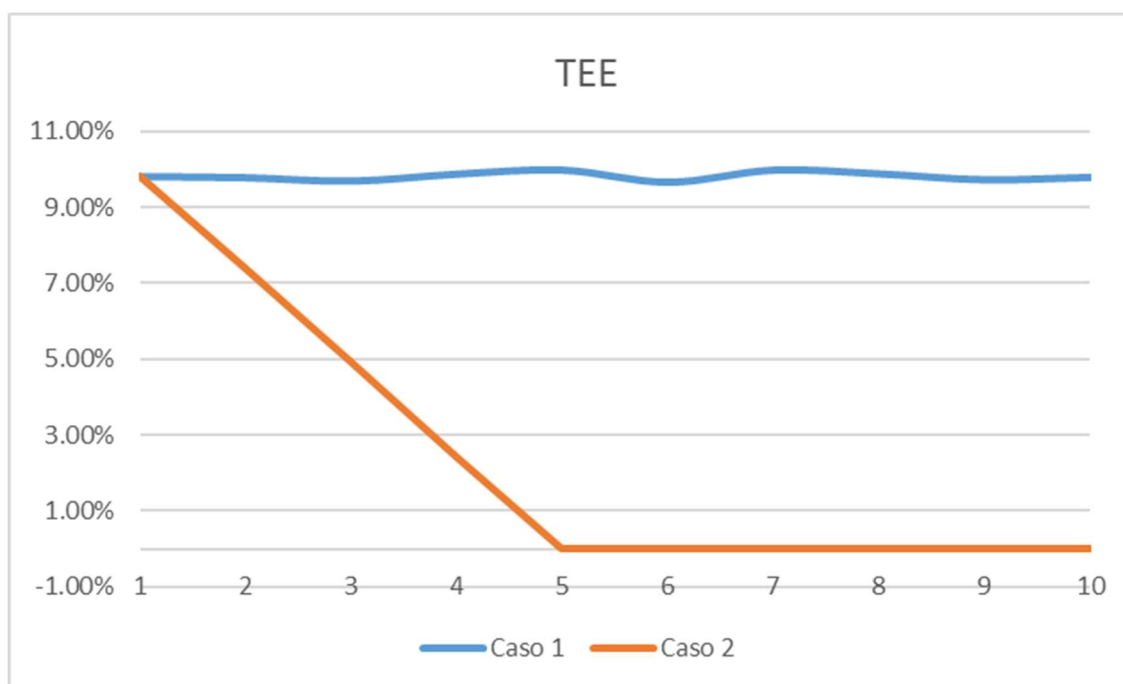
Tabela 22 - Valores de FER e TEE para os dois casos analisados

Ano	Caso 1		Caso 2	
	FER	TEE	FER	TEE
1	73.15%	9.80%	73.15%	9.80%
2	73.14%	9.76%	72.38%	7.38%
3	73.11%	9.66%	71.60%	4.92%
4	73.17%	9.87%	70.80%	2.41%
5	73.21%	9.98%	69.90%	0.00%
6	73.22%	9.64%	67.34%	0.00%
7	73.32%	9.84%	64.87%	0.00%
8	73.28%	9.67%	62.49%	0.00%
9	73.22%	9.74%	60.19%	0.00%
10	73.24%	9.74%	57.97%	0.00%

Fonte: Autor

A Figura 41 apresenta os valores da taxa de excedente de energia para o caso 1 e para o caso 2.

Figura 41 - Taxa de excedente de energia para os casos analisados



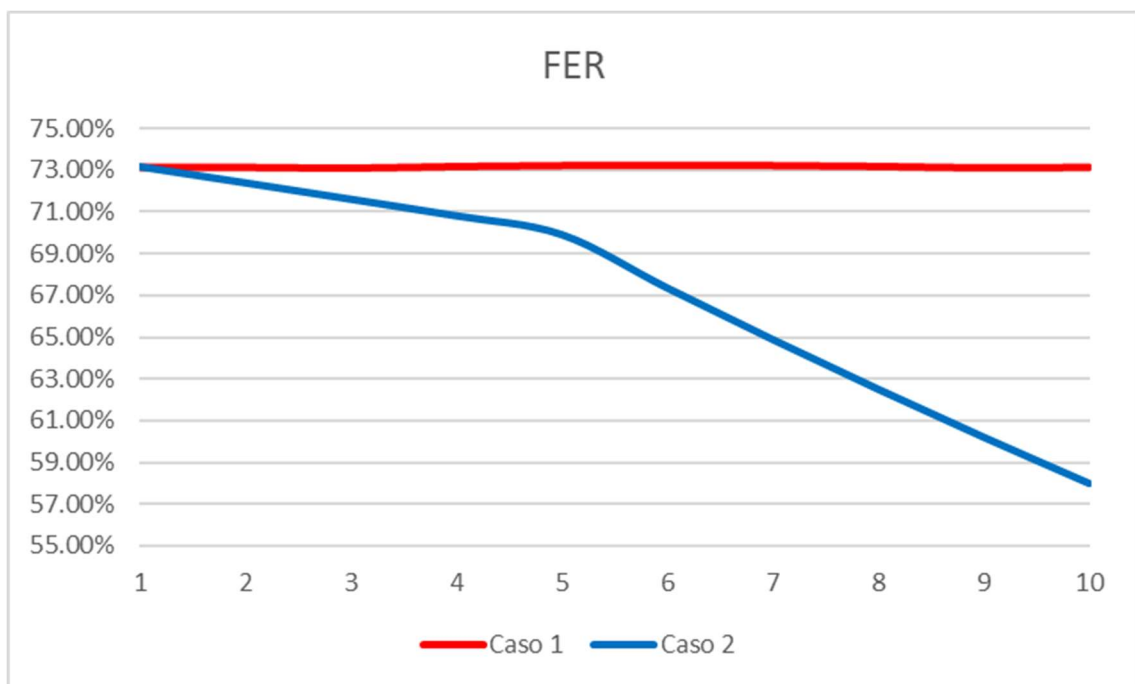
Fonte: Autor

O valor de excedente de energia permanece praticamente constante no caso 1, devido ao recorrente redimensionamento dos sistemas integrantes da microrrede. Já para o caso 2, o valor de excedente de energia diminui até ser nulo a partir do ano 5. Dessa forma, percebe-se que devido a não haver energia sendo injetada na

microrrede a partir do ano 5 para o caso 2, esse modelo de expansão acaba deixando de ser vantajoso economicamente.

A Figura 42 mostra a evolução da fração de energia renovável para o caso 1 e o caso 2 de expansão. Para o caso 1, assim como o TEE, este valor mantém-se constante devido ao recorrente processo de redimensionamento para suprir o aumento de carga e redução da eficiência dos componentes. Para o caso 2, entretanto, este valor tem uma queda exponencial, já que a cada ano a parcela de energia importada da rede principal é cada vez maior.

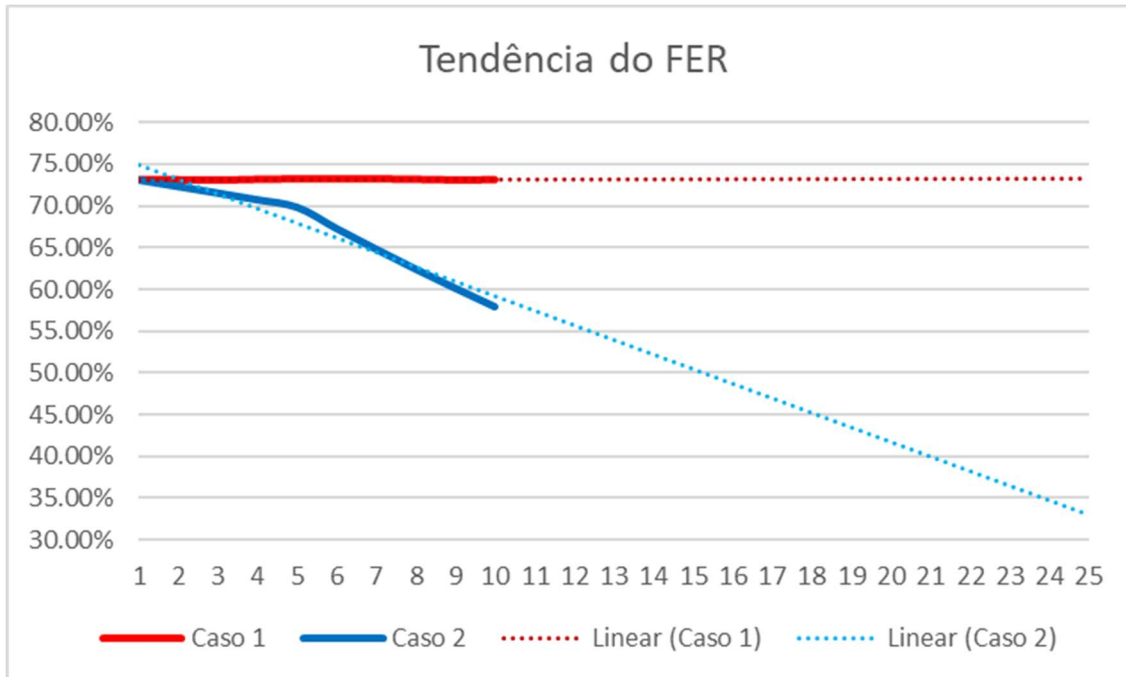
Figura 42 - Fração de energia renovável para cada caso de expansão analisado



Fonte: Autor

A Figura 43 apresenta a tendência dos valores da fração de energia renovável para cada caso até o final da vida projetada para a microrrede. Assim como já ocorre, no primeiro caso, esse valor se manterá constante ao longo dos 25 anos. Já para o segundo caso, esse valor segue decrescendo e, no final da vida útil da microrrede, o valor projeta-se em menos de 35%. Dessa forma, caso se escolha o segundo caso para expansão, mais da metade da energia consumida seria proveniente da rede principal, inviabilizando cada vez mais a adoção desse caso de expansão.

Figura 43 - Tendência da fração de energia renovável para cada caso de expansão



Fonte: Autor

5.3 TRABALHOS PUBLICADOS

Em relação a este tema, foi publicado o trabalho intitulado *Optimal Sizing of a PV-BESS Grid-Connected Microgrid in the Southern Region of Brazil* no evento *6th International Conference on Electric Power and Energy Conversation System* em 2020.

6 CONCLUSÃO

Uma microrrede energia pode ser definida como uma porção do sistema de distribuição principal que integra recursos de energia distribuídos. Devido à presença destes recursos, a microrrede pode operar tanto conectada à rede principal quanto isolada a ela.

Assim, para uma correta implementação e operação de uma microrrede, é necessário que a capacidade de seus recursos seja calculada corretamente. Dessa maneira, faz-se necessário a utilização de métodos de otimização para efetuar esse dimensionamento.

No presente trabalho, o objetivo da otimização foi obter o menor valor para o custo anual do sistema. Este custo engloba todos os valores dispendidos na aquisição, operação, manutenção e substituição de componentes, além do montante gasto para consumir energia da rede principal. Desses custos totais, é subtraído o valor obtido na injeção de energia na rede principal.

O processo de otimização da microrrede visou obter o número de painéis fotovoltaicos e o número de baterias. Como esses valores são inteiros, o modelo de otimização é de programação linear inteira.

Assim, um método iterativo de otimização, baseado na busca exaustiva, foi empregado para obter o ótimo dimensionamento dos componentes dos sistemas de geração e armazenamento de uma microrrede. Assim, o sistema de geração será composto por 162 painéis e o sistema de armazenamento será composto por 77 baterias. Dessa forma, após obtenção e análise dos resultados, observa-se a validação do modelo proposto através da obtenção de uma tarifa horária, relativa a microrrede dimensionada, menor que a tarifa horária equivalente da distribuidora.

Em relação a análise da expansão da microrrede, percebeu-se que a melhor estratégia se dá pela aquisição de novos componentes, possibilitados pela funcionalidade *plug and play*. Tanto as análises do fluxo de caixa quanto do VPL corroboraram esta opção.

Por fim, como sugestão futura para este trabalho, intenciona-se aplicar o método *branch and bound* para a resolução de programação linear inteira. Este método permite pré-selecionar as melhores opções a serem utilizadas dentro do processo iterativo.

REFERÊNCIAS

- ALEGRIA, E. *et al.* CERTS microgrid demonstration with large-scale energy storage and renewable generation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 937–943, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2286575>
- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**. [S. l.: s. n.].
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 3**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-3>.
- ANEEL. **Microrrede**. [s. l.], 2021.
- ARBAB-ZAVAR, B. *et al.* Smart inverters for microgrid applications: A review. **Energies**, [S. l.], v. 12, n. 5, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12050840>
- ARGHANDEH, R.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. Flywheel energy storage systems for ride-through applications in a facility microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 1955–1962, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2212468>
- AZEVEDO, G. M. S. **Controle e Operação de Conversores em Microrredes**. 2011. - Universidade Federal de Pernambuco, [s. l.], 2011.
- BANHAM-HALL, D. D. *et al.* Flow batteries for enhancing wind power integration. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 1690–1697, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2185256>
- BELLIDO, M. H. **MICRORREDES ELÉTRICAS: UMA PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO NO BRASIL**. 2018. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- BELLIDO, M. H. *et al.* Barriers, challenges and opportunities for microgrid implementation: The case of Federal University of Rio de Janeiro. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 188, p. 203–216, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.012>
- BERALDO, H. de C. **Contribuições à análise dinâmica de torres de turbinas eólicas São Paulo**. 2019. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2019.tde-17102019-150859>
- BOQTOB, O. *et al.* Optimal sizing of grid connected microgrid in Morocco using Homer Pro. **2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems, WITS 2019**, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723790>
- BORDONS, C.; GARCÍA-TORRES, F.; VALVERDE, L. Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. **RIAI - Revista Iberoamericana de**

Automatica e Informatica Industrial, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 117–132, 2015.
Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.001>

BOWER, W. *et al.* The Advanced Microgrid Integration and Interoperability. **Sandia Report**, [S. l.], n. March, p. 1–56, 2014.

BRANDO, G. *et al.* Grid connection of wave energy converter in heaving mode operation by supercapacitor storage technology. **IET Renewable Power Generation**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 88–97, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0093>

CANALES, F. A.; BELUCO, A.; MENDES, C. A. B. Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 1230–1249, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236117016002>

CHEN, S. X.; GOOI, H. B.; WANG, M. Q. Sizing of energy storage for microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 142–151, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2160745>

CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P. **Microgrids and active distribution networks**. [S. l.: s. n.]. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/pbrn006e>

DAWOUD, S. M.; LIN, X.; OKBA, M. I. Hybrid renewable microgrid optimization techniques: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 82, n. August 2017, p. 2039–2052, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.007>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional. **Rio de Janeiro : EPE**, [S. l.], p. 264, 2020.

FATHIMA, A. H.; PALANISAMY, K. Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 45, p. 431–446, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.059>

GANJIAN-ABOUKHEILI, M. *et al.* Seamless Transition of Microgrids Operation from Grid-Connected to Islanded Mode. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 2106–2114, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2947651>

GHENAI, C.; JANAJREH, I. Design of Solar-Biomass Hybrid Microgrid System in Sharjah. **Energy Procedia**, [S. l.], v. 103, n. April, p. 357–362, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.299>

GIFALLI, A. **IMPACTO DE MICRORREDES SOBRE O SISTEMA DE PROTEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO**. 2019. - Universidade Estadual Paulista, [s. l.], 2019.

HATZIARGYRIOU, N. **Microgrids architectures and control**. [S. l.: s. n.]. v. 1 *E-book*.

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: A review of technologies, key

drivers, and outstanding issues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 90, n. September 2017, p. 402–411, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>

HOSSAIN, M. A. *et al.* Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [S. l.], v. 109, n. January, p. 160–186, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.038>

HUAYLLAS, T. E. D. C. Micro-Redes Elétricas: Estado da Arte e Contribuição para o Dimensionamento, Aplicação e Comercialização da Energia Produzida. [S. l.], p. 161, 2015.

IBGE, I. B. de G. e E. **INFLAÇÃO.pdf**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>.

JESUS, K. **Estimação de estado para microrredes no modo de operação ilhada**. 2018. - Universidade Federal do Maranhão, [s. l.], 2018.

KIM, H. J. *et al.* Demonstration of the LVDC distribution system in an island. **CIREDD - Open Access Proceedings Journal**, [S. l.], v. 2017, n. 1, p. 2215–2218, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0732>

LASSETER, R. H. Smart distribution: Coupled microgrids. **Proceedings of the IEEE**, [S. l.], v. 99, n. 6, p. 1074–1082, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2114630>

LI, J.; WEI, W.; XIANG, J. A simple sizing algorithm for stand-alone PV/Wind/Battery hybrid microgrids. **Energies**, [S. l.], v. 5, n. 12, p. 5307–5323, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en5125307>

LI, Y.; NEJABATKHAH, F. Overview of control, integration and energy management of microgrids. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 212–222, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40565-014-0063-1>

LIDULA, N. W. A.; RAJAPAKSE, A. D. Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 186–202, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.041>

LOTVEIT, M. *et al.* A study of biomass in a hybrid stand-alone Micro-Grid for the rural village of Wawashang, Nicaragua. **2014 9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2014**, [S. l.], 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/EVER.2014.6844057>

LUU, N. A. *et al.* Optimal sizing of a grid-connected microgrid. **Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology**, [S. l.], v. 2015-June, n. June, p. 2869–2874, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125521>

MACEDO, C. **Saense: Bateria de fluxo**. [s. l.], 2015. Disponível em: <http://www.saense.com.br/2015/10/bateria-de-fluxo/>.

MARIAM, L.; BASU, M.; CONLON, M. F. Microgrid: Architecture, policy and future trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 64, p. 477–489, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.037>

MARKETS, E. E. **Think microgrid: A discussion guide for policymakers, regulators and end users**. [S. l.: s. n.].

MARNAY, C. *et al.* Microgrid evolution roadmap. **Proceedings - 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies, EDST 2015**, [S. l.], p. 139–144, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SEDST.2015.7315197>

MICELI, R. Energy management and smart grids. **Energies**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 2262–2290, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en6042262>

MME, M. de M. e E. **CRESESB.pdf**. [s. l.], 2020. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. Acesso em: 5 maio. 2020.

MOLINA, M. G. Distributed energy storage systems for applications in future smart grids. **Proceedings of the 2012 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, T and D-LA 2012**, [S. l.], n. 0162, p. 1–7, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319051>

MOLINA, M. G. Control design and simulation of supercapacitor energy storage for microgrid applications. **2014 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, PES T and D-LA 2014 - Conference Proceedings**, [S. l.], v. 2014-October, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2014.6955257>

MORSTYN, T.; HREDZAK, B.; AGELIDIS, V. G. Control Strategies for Microgrids with Distributed Energy Storage Systems: An Overview. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 3652–3666, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2637958>

NADJEMI, O. *et al.* Optimal hybrid PV/wind energy system sizing: Application of cuckoo search algorithm for Algerian dairy farms. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 70, n. December, p. 1352–1365, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.038>

NAIR, N. K. C.; GARIMELLA, N. Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration. **Energy and Buildings**, [S. l.], v. 42, n. 11, p. 2124–2130, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.002>

NASEO. **Microgrid State Working Group**. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.naseo.org/issues/electricity/microgrids>

NAVIGANT. **Executive Summary : Microgrids Analysis and Forecasts**. [S. l.: s. n.].

NGUYEN, T. T.; YOO, H. J.; KIM, H. M. Applying Model Predictive Control to SMES System in Microgrids for Eddy Current Losses Reduction. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, [S. l.], v. 26, n. 4, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2524511>

NIELSEN, J. J.; SØRENSEN, J. D. On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components. **Reliability Engineering and System Safety**, [S. l.], v. 96, n. 1, p. 218–229, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.07.007>

OFGEM; DECC; SMART GRID FORUM. Smart Grid Vision and Routemap Smart Grid Forum. **Report Number: URN 14D / 056**, [S. l.], n. February, 2014. Disponível em: <https://doi.org/URN 14D / 056>

OLIVARES, D. E. *et al.* Trends in microgrid control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 1905–1919, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>

PARHIZI, S. *et al.* State of the art in research on microgrids: A review. **IEEE Access**, [S. l.], v. 3, p. 890–925, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2443119>

PATRAO, I. *et al.* Microgrid architectures for low voltage distributed generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 43, p. 415–424, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.054>

PLANAS, E. *et al.* AC and DC technology in microgrids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 43, p. 726–749, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.067>

RAJESH, K. S. *et al.* A review on control of ac microgrid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 71, n. December, p. 814–819, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.106>

SCHWAEGERL (SIEMENS), C. Technical , Economic and Environmental Benefits of Microgrids Operation. [S. l.], n. January, p. 1–69, 2009.

SHRIVASTWA, R. R. *et al.* Understanding microgrids and their future trends. **Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology**, [S. l.], v. 2019- Febru, p. 1723–1728, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2019.8754952>

SOSHINSKAYA, M. *et al.* Microgrids: Experiences, barriers and success factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 40, p. 659–672, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.198>

STADLER, M. *et al.* Value streams in microgrids: A literature review. **Applied Energy**, [S. l.], v. 162, p. 980–989, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.081>

TAN, X.; LI, Q.; WANG, H. Advances and trends of energy storage technology in Microgrid. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [S. l.], v. 44, n. 1, p. 179–191, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.07.015>

TANI, A.; CAMARA, M. B.; DAKYO, B. Energy Management in the Decentralized Generation Systems Based on Renewable Energy - Ultracapacitors and Battery to

Compensate the Wind/Load Power Fluctuations. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [S. l.], v. 51, n. 2, p. 1817–1827, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2354737>

TAO, L. *et al.* From Laboratory Microgrids to Real Markets-Challenges & Opportunities. **Power Electronics and ...**, [S. l.], 2011. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5944600/>

TAVAKKOLI, M. A.; RADAN, A.; HASSIBI, H. Simulation and Analysis of a Compact Electronic Infrastructure for DC Micro-Grid: Necessity and Challenges. **Smart Grid and Renewable Energy**, [S. l.], v. 03, n. 02, p. 73–82, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/sgre.2012.32011>

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

TRIFKOVIC, M. *et al.* Modeling and control of a renewable hybrid energy system with hydrogen storage. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 169–179, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2248156>

UNAMUNO, E.; BARRENA, J. A. Hybrid ac/dc microgrids - Part I: Review and classification of topologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 52, p. 1251–1259, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.194>

YOLDAŞ, Y. *et al.* Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 72, n. January, p. 205–214, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.064>

ZHU, X. *et al.* Past, today and future development of micro-grids in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 42, p. 1453–1463, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.032>