



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Mateus Augusto Ferreira Almeida

**TOPOLOGIAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS
DE UMA MICRORREDE INTELIGENTE**

UBERLÂNDIA-MG
2024

Mateus Augusto Ferreira Almeida

TOPOLOGIAS, VANTAGENS E DESVANTAGENS DE UMA MICRORREDE INTELIGENTE

Monografia apresentada como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Thales Lima Oliveira

UBERLÂNDIA - MG
2024

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de expressar minha imensa gratidão a todas as pessoas que me apoiaram e contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço a Deus, aos meus pais e irmão, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e buscando me oferecer tudo que fosse necessário para o alcance só tão sonhado título de Engenheiro Eletricista.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Thales de Lima Oliveira, que dedicou seu tempo e conhecimento para me guiar durante a elaboração do TCC, fornecendo sugestões e críticas construtivas que foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço também aos professores da instituição, que me proporcionaram uma formação acadêmica de qualidade me incentivando a buscar sempre conhecimentos de forma crítica e epistemológica.

Agradeço aos amigos e familiares que estiveram ao meu lado durante toda essa jornada, me apoiando nos momentos de dificuldade e celebrando também as conquistas alcançadas.

A todos vocês, meu muito obrigado! Este trabalho não seria possível sem o apoio e colaboração de cada um de vocês. Estou grato por ter tido a oportunidade de contar com a ajuda e o carinho de tantas pessoas incríveis ao longo dessa jornada acadêmica.

RESUMO

As Microrredes representam um importante avanço tecnológico para o sistema energético, seja pela sua capacidade de se auto gerenciar, ou por representar uma opção sustentável, uma vez que, é possível utilizar diversas fontes de energias renováveis para seu funcionamento. Além disso, ainda há as vantagens técnicas, já que solucionaria os problemas relacionados às falhas no fornecimento de energia, trazendo mais confiança e segurança energética a população. Diante disso, esse trabalho tem por objetivo investigar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da implementação das microrredes, considerando as possibilidades de fontes de energia renovável, bem como os processos de gestão e regulatório para operação dessas. Então, visando o alcance do objetivo traçado, definiu-se como metodologia de trabalho a pesquisa bibliográfica, mediante a possibilidade de buscar por meio da literatura e de trabalhos já publicados conhecimentos teóricos e sólidos que garantirá uma melhor compreensão da temática abordada. Sendo assim, obras como a de Silveira (2013); Rosa et al (2022); Oliveira (2017) ; Bitencourt (2022), além de outros utilizados, foram essenciais para a construção desse trabalho. Contudo, concluiu-se que mesmo diante a importância das microrredes, bem como suas potencialidades, ainda faz-se necessário maior investimento técnico, bem como construção de um sistema regulatório que prevê e define estratégias e ações para sua implantação, viabilizando assim a expansão das Microrredes e consequentemente maior eficiência na produção e distribuição de energia elétrica.

Palavras – chave: Microrredes; Energia elétrica; Inovação; Sustentabilidade

ABSTRACT

Microgrids represent an important technological advance for the energy system, either due to their ability to manage themselves, or because they represent a sustainable option, since it is possible to use different renewable energy sources for their operation. Furthermore, there are still technical advantages, as it would solve problems related to failures in the energy supply, bringing more confidence and energy security to the population. Therefore, this work aims to investigate the technical, environmental, economic and social feasibility of implementing microgrids, considering the possibilities of renewable energy sources, as well as the management and regulatory processes for their operation. Therefore, aiming to achieve the outlined objective, bibliographical research was defined as a work methodology, through the possibility of searching through literature and already published works for theoretical and solid knowledge that will guarantee a better understanding of the topic addressed. Therefore, works such as that of Silveira (2013); Rosa et al (2022); Oliveira (2017); Bitencourt (2022), in addition to others used, were essential for the construction of this work. However, it was concluded that even given the importance of microgrids, as well as their potential, greater technical investment is still necessary, as well as the construction of a regulatory system that predicts and defines strategies and actions for their implementation, thus enabling the expansion of Microgrids and consequently greater efficiency in the production and distribution of electrical energy.

Keywords: Microgrids; Electricity; Innovation; Sustainability

SUMÁRIO

1. Introdução	7
1.1 - Contextualização	7
1.2 - Problematização	8
1.3 – Objetivo	8
1.3.1 - Objetivos específicos	9
1.4- Metodologia do trabalho	9
2. Microrrede e suas topologias	11
2.1-Topologias de uma Microrrede	11
2.2- Vantagens de uma MR	16
2.3- Desvantagens de uma MR	17
3. Sistema de armazenamento de energia (SAE)	19
3.1 - Tipos de SAE	19
3.2 - Vantagens na utilização de um SAE	25
3.3 - Custo de um SAE	26
4. Sistemas de gerenciamento de energia modernos	29
4.1- A MR e o sistema de energia moderno	29
4.2 - O controle de MR e o SGE de MR	30
5. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros	35
Referências bibliográficas	37

1. Introdução

1.1 - Contextualização

A produção de energia elétrica, bem como sua distribuição, vem se transformando ao longo da história, devido à necessidade de aumentar a eficiência energética de modo a contribuir com as demandas de uma sociedade em expansão e desenvolvimento. A evolução tecnológica tem favorecido o melhoramento das usinas de energia, bem como as linhas de transmissão e distribuição (Soares, 2022)

Com relação às fontes de energia elétrica pode-se dividi-las em fontes renováveis e não-renováveis sendo que a maioria das fontes atuais são não renováveis, o que traz grandes impactos ao meio ambiente por meio de liberação de gases poluentes e que atuam no aumento do efeito estufa (Abuabud; Barra, 2020).

O avanço das tecnologias, as mudanças climáticas, o aumento da expectativa de vida populacional alinhada à necessidade de construir atitudes e ações globais de maneira sustentável, acendeu uma alerta em prol do uso de recursos que trazem menor impacto e degradação ao ambiente. Sendo assim, a partir da promulgação do Protocolo de Kioto da década de 90, pode-se dizer que ocorreu um aumento considerável pela busca de fontes de energia limpas e renováveis, havendo maiores investimentos em diversos países para a construção de e expansão das Microrredes em diversos países (Soares; Oliveira, 2022).

No entanto, as possibilidades de produção de energia elétrica não estão reduzidas apenas um meio, uma vez que existem maneiras de construir produções sustentáveis, seguras, eficazes e econômicas por meio das fontes renováveis. Neste cenário, observa-se emergir as microrredes como meio de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

As microrredes são definidas como um sistema de pequena escala “[...] com uma junção de cargas e geradores distribuídos operando em conjunto com dispositivos de gerenciamento, controle, e proteção de energia e software agregado” (Barbosa, 2022, p.17).

Além disso, as microrredes não se limitam apenas a uma unidade geradora, podendo estar interligada a diferentes fontes, inclusive outras de energia renovável,

o que demonstra assim seu caráter sustentável. Por muito tempo as microrredes, tanto em alguns países do exterior, como aqui no Brasil, não possuía legislação específica e não se enquadrava em nenhuma das regulações vigentes.

No entanto, com promulgação da Lei n ° 14.300/2002, passou a ser possível pensar nas microrredes como alternativa de geração e distribuição de energia elétrica, uma vez que a lei trouxe regulação à microgeração e minigeração distribuída (Oliveira, 2017).

Portanto, com as microrredes reconhece-se uma melhor otimização dos recursos elétricos, descentralizando um sistema de geração e empregando uma alternativa de maneira distribuída. Além do mais, evidencia-se que por meio das microrredes, além da utilização das fontes renováveis, ainda há as vantagens técnicas e econômicas, já que solucionaria os problemas relacionados às falhas no fornecimento trazendo mais confiança e segurança energética (Soares, 2022).

1.2 - Problematização

Com o processo de globalização e amplo desenvolvimento social, tem sido necessário cada vez mais alternativas que andem ao lado do crescimento e desenvolvimento de um país em constante ascensão. Seguindo essa premissa, Santana (2022) fomenta que o desenvolvimento da energia proporcionou um crescimento populacional nas cidades, o que requer cada vez mais uma estrutura básica de fornecimento de recursos que viabilizam uma melhor qualidade de vida aos cidadãos.

Pensando ainda sobre o fornecimento energético, é visto que além da importância de suprir as demandas, é necessária uma margem para novos consumos, proporcionando acesso tanto para os grandes centros urbanos, como também para as áreas mais afastadas.

Para além disso, ressalta-se que a possibilidade de geração de energia por meio de diversas fontes renováveis, a priori, já demonstra uma grande vantagem em relação a produção por meio de fontes não renováveis.

Sendo assim, reconhecendo a possibilidade que as microrredes possuem enquanto alternativa autônoma, com a possibilidade de gerar energia elétrica em

momentos e situações que em uma rede convencional não é suficiente, busca-se compreender a viabilidade dessas microrredes, levando em consideração aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais.

1.3 - Objetivo

Investigar a viabilidade técnica, econômica e sustentável da implementação das microrredes, considerando as possibilidades de fontes de energia renovável.

1.3.1 - Objetivos específicos

- Apresentar as diversas topologias que uma MR pode ter, bem como as vantagens e desvantagens desta em relação a rede convencional;
- Discutir sobre o sistema de armazenamento de energia das MR;
- Analisar os sistemas de armazenamento de energia modernos.

1.4- Metodologia do trabalho

A metodologia utilizada para investigação da temática abordada será a pesquisa bibliográfica, pois por meio desta é possível levantar informações e conhecimentos necessários que nos conduzirá ao alcance dos resultados do tema investigado.

O objetivo é a finalidade da pesquisa bibliográfica é o aprimoramento e atualização do conhecimento, através de uma investigação científica de obras já publicadas (SOUZA; OLIVEIRA, ALVES, 2021, p.65). Os autores salientam ainda sobre a organização da presente pesquisa, informando que esta é o levantamento de dados já publicados que irão direcionar o pesquisador no processo de análise e conhecimento de um determinado tema.

A pesquisa bibliográfica é o levantamento ou revisão de obras publicadas sobre a teoria que irá direcionar o trabalho científico o que necessita uma dedicação, estudo e análise pelo pesquisador que irá executar o trabalho científico e tem como objetivo reunir e analisar textos publicados, para apoiar o trabalho científico (SOUZA; OLIVEIRA, ALVES, 2021, p.66)

Sendo assim, a pesquisa bibliográfica é o melhor caminho metodológico para desenvolvimento deste trabalho, já que por meio da revisão da literatura será possível compreender todos os pontos que compõem o tema investigado.

No mais, adianta-se que os a busca dos referenciais se dará por meio de um recorte de tempo, então apenas contará nesse trabalho obras publicadas no período de 2000 a 2024, se limitando a compreender as investigações desse século, por meio de publicações postadas no Scielo, Google Acadêmico, IEEExplore e demais repositórios.

2. Microrrede e suas topologias

2.1-Topologias de uma Microrrede

O Brasil possui um amplo sistema de geração e distribuição de energia elétrica, sistema esse que tem a capacidade de suprir as demandas dos grandes centros urbanos. No entanto, áreas mais isoladas, como regiões ribeirinhas e cidades localizadas na região norte, tem sofrido com a falta da distribuição de energia elétrica.

Além do mais, mesmo que exista uma expansão nas redes de geração e distribuição de energia elétrica, em virtude dos diversos problemas de operação que acontecem nas redes de distribuição de energia elétrica, ocasionado falhas no processo de distribuição, torna-se necessário pensar em novos projetos, como é o caso das microrredes, que viabilizem maior segurança, acesso e mais vantagens econômicas, técnicas e sustentáveis.

Diante dessa conjuntura, as microrredes (MR) surgem como alternativa promissora, por se tratar de uma configuração moderna, inteligente e capaz de operar tanto de maneira ilhada, como conectada a outras fontes e redes, o que a torna autossuficiente e confiável (Bitencourt, 2022).

Bitencourt (2022, p.15) fomenta que a principal característica das microrredes é a geração distribuída contendo geradores próximos a carga. “Sendo assim, quanto maior a demanda das unidades consumidoras de uma microrrede, maior a quantidade de geração necessária para suprir o consumo e permitir o modo de operação ilhado de sistema”.

Em relação à topologia das microrredes, ou seja, a estrutura física que se apresenta em geração concentrada e geração distribuída com corrente contínua ou corrente alternada, o modelo da fonte de energia, configuração e fonte de armazenamento se dará de acordo com as demandas do local. A partir disso, é válido destacar que sua configuração é determinante na eficiência e desempenho de todo sistema.

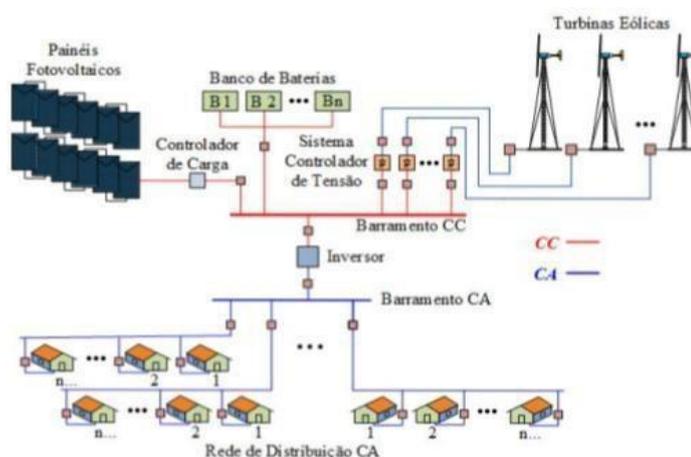
A topologia consiste em utilizar um sistema Tronco de distribuição de energia em CC e de subsistemas com distribuição CA. Conversores CC/CA são distribuídos estrategicamente ao longo da rede tronco CC, formando subsistemas CA, com a finalidade de atender determinado número de consumidores com carga em CA.

Apesar de existirem cargas que podem ser alimentadas em CC, essa não é uma realidade para as Cargas de uso doméstico, que basicamente são alimentadas em CA (Oliveira,2017,p.7).

Nesse sentido, Oliveira (2017) traz que as microrredes podem ter uma topologia de estrutura concentrada, ou seja, um modelo de “[...] sistema que as fontes de geração de energia se encontram conectadas a um mesmo barramento”.

O autor traz em sua obra uma exemplificação desse modelo, como pode verificar na Figura 1.

Figura 1: Modelo de Microrrede com geração concentrada.

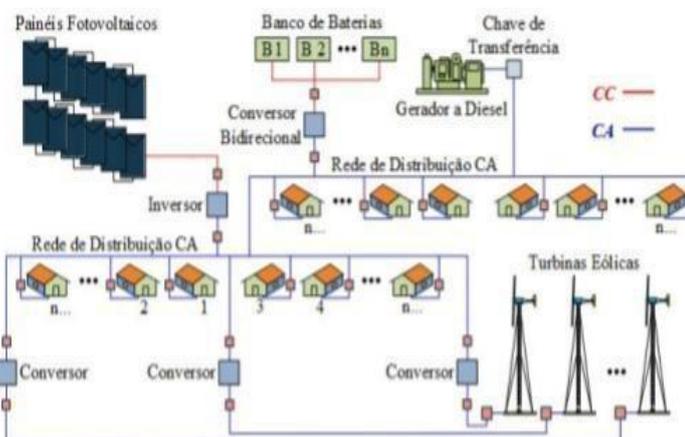


Fonte: Oliveira (2017)

Sobre o modelo de geração concentrada fomenta que há poucas unidades geradoras energia elétrica, onde extensos cabos de transmissão fazem a distribuição da energia elétrica. Neste modelo, o fluxo da potência e da tensão é unidirecional, “[...] , isto é, parte da Usina de geração e passa pelas linhas de transmissão geralmente em alta tensão e segue pelas Redes de distribuição até chegar ao consumidor final geralmente em baixa tensão” (Amaral; Büttendender; Thesing, 2022,p.8).

Além desse modelo, há também uma topologia de estrutura distribuída, onde já existem conexões em diferentes pontos de rede de distribuição, como pode-se verificar na Figura 2:

Figura 2: Modelo de Microrrede com geração distribuída



Fonte: Oliveira (2017)

Sobre o modelo com geração distribuída, é nítido que este é o oposto do modelo anterior, uma vez que, a potência e a tensão elétrica é bidirecional. “ A geração distribuída de eletricidade consiste na produção desta energia no local de seu consumo, ou próximo a ele. Eventuais excedentes desta geração podem ser vendidos a rede local ou em instalações vizinhas” (Bajay et al., 2006, p.1).

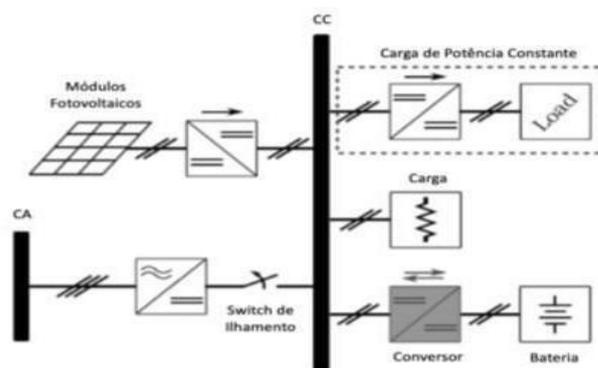
Em complemento, Oliveira (2017, p.27) traz destaques sobre as fontes de energia elétrica que podem ser conectados as microrredes, tanto em Corrente contínua (CC), como em corrente alternada (CA).

Existem, basicamente, dois grupos de fontes de geração de energia elétrica que podem ser conectados a uma microrrede em CA: 1) aqueles que podem ser conectados diretamente à Rede de distribuição de energia elétrica sem a necessidade de utilização de conversores eletrônicos de potência. Para esse primeiro grupo, podem ser citados, como exemplo, geradores Síncronos convencionais, com campo excitado em CC, que são tracionados por motores a diesel ou por pequenas turbinas (térmicas ou hidráulicas); 2) aqueles que envolvem fontes de geração de energia que precisam da utilização de conversores eletrônicos de potência para que gerem Energia compatível com os padrões elétricos do sistema a que serão conectados. Nesse segundo Grupo, encontram-se, por exemplo, geradores que são tracionados por microturbinas a gás de Alta rotação ou por turbinas eólicas de velocidade variável. Outras fontes de geração de energia desse segundo grupo são células a combustíveis e painéis solares fotovoltaicos, cujas tensões de Saída são em CC, necessitando de conversores eletrônicos de potência para que possam ser conectados a uma rede de distribuição de energia elétrica em CA [47]. De maneira análoga, existem os grupos de geradores que podem ser interligados a uma microrrede CC diretamente (aqueles com tensões em CC) ou através de conversores eletrônicos de potência.

Também há definições em relação aos tipos de correntes que alimentarão a rede, levando em consideração o tipo, o tamanho e a forma de conectividade, assim nos deparamos com 3 tipos de tensões e correntes: A corrente contínua reconhecida pelo símbolo (CC); A corrente alternada (CA) e a Corrente Híbrida.

Destaca-se agora os modelos de topologia apresentado por Bitencourt (2022), em que a Figura 3 demonstra um modelo de corrente contínua (CC) operando de modo ilhado.

Figura 3: Modelo de Microrrede CC com operação de modo ilhado.

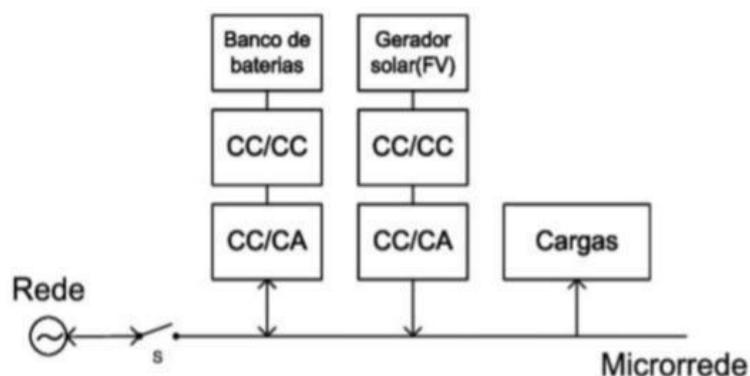


Fonte: Bitencourt (2022)

Bitencourt (2022,p.23) afirma que neste modelo, [...] é possível utilizar energia gerada tanto em CC quanto em CA, com as conversões necessárias, distribui-se essa energia pelo barramento CC até as cargas..." Sendo assim, após uma segunda conversão poderão ser abastecidas.

Em contrapartida, a Figura 4 apresenta um modelo de Microrrede CA operando em modo ilhado.

Figura 4: Modelo de Microrrede CA com operação de modo ilhado.

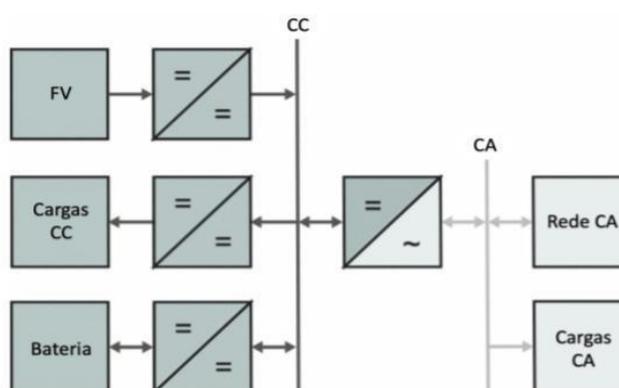


Fonte: Bitencourt (2022)

Nesse modelo apresentado, vemos que a chave que conecta a rede se encontra interrompida, ou aberta. “No modelo, é representada a geração de energia e fornecimento pelo banco de baterias em CC e, com as Conversões necessárias, essa energia é distribuída pelo barramento CA até as cargas” (Bitencourt, 2022, p. 24).

O outro modelo de topologia apresentado é de uma microrrede híbrida operando em modo conectado, destacado pela Figura 5

Figura 5: Modelo de Microrrede híbrida operando em modo conectado.



Fonte: Bitencourt (2022)

O modelo apresentado na Figura 5 possui um conversor intermediário no barramento CC e CA, necessário para melhor adequar e distribuir a energia que a carga demanda (Bitencourt,2022).

Em relação ao modo de operação das microrredes, Bitencourt (2022, p.15), frisa sobre as estruturas físicas e suas frequências, apontando que a operação é semelhante a rede convencional, porém em menor frequência.

Distribuição em CC: menos comuns, com pesquisas se tornando mais relevantes; Distribuição em CA: com frequência de 60/50 Hz, é o sistema convencional de distribuição; Distribuição em CA de alta frequência (HFAC): essa configuração possui REDs acoplados a um barramento, em que a energia gerada é convertida a uma frequência de 500/1000 Hz em CA por dispositivos eletrônicos de potência, transmitida à carga, é convertida novamente por um conversor CA/CA para uma frequência de 60 Hz em que a energia será consumida. É um tipo não comum, ainda em fase de desenvolvimento. Outras características da estrutura física de distribuição de microrredes (Bellido 2018): Podem ser aéreas ou subterrâneas; quando integrada a uma rede elétrica, a microrrede é conectada ao PAC junto a essa rede. Neste ponto, elas são sincronizadas; podem ser radiais, em malha ou reticuladas (na prática, uma aplicação comum é combinar essas três configurações)

Com base no exposto, observa-se que cada topologia é recomendada a uma demanda e uma especificidade local, sendo estas escolhidas de maneira a melhor oferecer qualidade e eficiência nos serviços de geração e distribuição de energia elétrica.

2.2- Vantagens de uma MR

As microrredes apresentam diversas vantagens em relação seu uso, sejam elas tanto pelo meio de geração, como também de distribuição. Trazendo diversos benefícios técnicos, econômicos, sociais e biológicos.

Ademais, considerando que as microrredes tendem a ser plantas de menor porte, elas são consideradas adequadas para a geração distribuída e menos dependentes de fatores geográficos para a implantação. há, também, o aumento da confiabilidade no fornecimento de energia, já que as microrredes são projetadas para operar mesmo na ausência do sistema elétrico da rede elétrica convencional, não dependendo, portanto, do pleno funcionamento desta rede (Rosa et al.,2022, p.2).

Além disso, é possível frisar que as microrredes atuam de maneira sustentável ao meio ambiente, visto que por meio da utilização de fontes renováveis ocorre uma diminuição na emissão de gases CO₂ que colaboram com o processo de efeito estufa.

Corroborando com essa afirmação, Bitencourt (2022) traz os benefícios e as vantagens das microrredes em relação a rede convencional, sendo estes apresentados na Figura 6.

Figura 6: Quadro comparativo dos benefícios das Microrredes x Redes convencionais.

Benefício	Microrredes	Redes convencionais
Menor custo de energia para consumidor	X	
Venda do excedente gerado	X	
Impacto socioeconômico positivo	X	
Maior confiabilidade	X	
Implantação sustentável	X	
Fontes menos poluentes predominantes	X	
Gerenciamento inteligente de energia	X	
Gerenciamento inteligente de informações	X	
Regulamentação bem definida		X
Modelos de negócios bem definidos		X
Maior penetração de mercado		X

Fonte: Bitencourt (2022)

Pode-se observar por meio desse quadro que as vantagens das microrredes são diversas, apresentando essas vantagens em todos os cenários. No entanto, quanto se trata de questões técnicas e regulatórias observa-se que as redes convencionais estão a frente, o que demonstra sobre a importância de maiores direcionamento, regulamentação e até mesmo investimento para a implementação das microrredes em grande escala.

2.3- Desvantagens de uma MR

Com base no tópico anterior, observa-se que as vantagens das microrredes são inúmeras, o que mostra o quanto essas podem otimizar a geração e distribuição de energia elétrica no Brasil, em virtude dos seus benefícios. No entanto, mesmo diante dos potenciais e inúmeros benefícios, há pontos desvantajosos e desafios que devem ser superados para que os investimentos nas microrredes sejam mais atrativos (Silveira, 2013).

Dentre esses pontos, podemos citar de acordo com Silveira (2013), o alto investimento em redes distribuídas e fontes renováveis de energia elétrica; as dificuldades técnicas; as ausências de normas e legislações que norteiam; e até mesmo o monopólio do mercado.

Corroborando com essa ideia, Carneiro (2017,p.23) também salienta sobre os desafios a serem enfrentados para a implementação das Microrredes.

Há algumas desvantagens associadas ao aumento da Quantidade de pequenos geradores espalhados na rede de distribuição, tais como: • O aumento da complexidade de operação da rede; • A dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico; • A eventual incidência de tributos; • A necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger as redes.

Deste modo, é nítido que há inúmeros desafios tanto técnicos como burocráticos que precisam ser alinhados e reparados para que de fato as Redes Inteligentes venham a fazer parte, em grande escala, da realidade brasileira.

3. Sistema de armazenamento de energia (SAE)

3.1 - Tipos de SAE

Com as constantes mudanças que vêm ocorrendo na sociedade global, novos desafios têm surgido ao setor energético, que tem buscado caminhos efetivos para atender as exigências e demandas dessa sociedade em crescente ascensão.

Mendonça (2022) salienta que a geração de energia elétrica esteve ao longo da história sendo produzida por muito tempo, apenas por fontes hidrelétricas ou termoelétricas, no entanto, com o processo de evolução da cadeia global, novas formas de geração de energia, bem como formatos distintos de sistema de armazenamento tem permitido uma geração e distribuição de maneira descentralizada.

Em relação aos Sistemas de Armazenamento de Energia elétrica (SAE), Filho (2020, p.21), fomenta que estes “[...] São responsáveis por armazenar energia em uma forma alternativa, e transformá-la em energia elétrica sempre que necessário”.

Esse modelo descentralizado, ou seja, que não requer a intermediação ou ligação a uma rede convencional possibilita que lugares remotos e de acesso limitado tenham acesso à energia elétrica, como também “[...] Possibilitam que o usuário possa gerar energia localmente, quando for possível, pertinente, e consumir tal energia quando necessário” (Mendonça, 2022, p.1).

Sendo assim, os Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica (SAEs) possuem diversas configurações tecnológicas, não restringindo-se apenas a um único modelo diante a diversidade de situações que podem emergir no processo de geração e distribuição de energia elétrica.

Pode-se dividir as tecnologias de armazenamento em seis principais categorias (ESA, 2015): baterias de estado sólido; baterias de fluxo; volantes de inércia; ar comprimido; térmico; e bombeamento hidráulico. Contudo, existem também outras tecnologias ainda não convencionais, que se encontram em fase de pesquisa e desenvolvimento, como por exemplo: a Advanced Rail Energy Storage (ARES), que garante o armazenamento de energia renovável por via de locomotivas elétricas; o armazenamento híbrido, que consiste em utilizar dispositivos de armazenamento diferentes, por exemplo para carros elétricos; variações das tecnologias já convencionais, etc. (Costa e Silva; Bortoni, 2026, p.50)

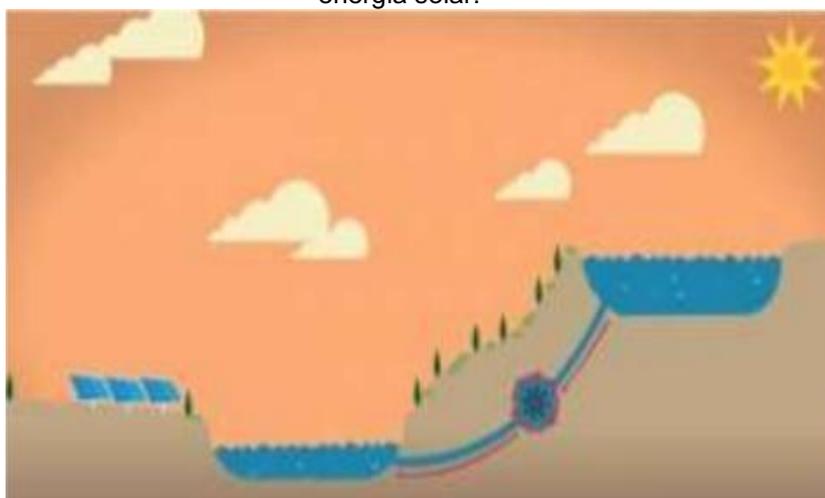
Complementando essa abordagem Mendonça (2022) e Filho (2020), destacam-se os modelos tecnológicos mais comuns e utilizados, sendo estes: Bombeamento hidráulico; Ar comprimido; Volantes de Inércia ou flyweels; Supercapacitores, Armazenamento térmico, Baterias e Pilhas de Combustível.

Quanto ao bombeamento hidráulico, utiliza-se da diferença de energia potencial de dois reservatórios de água alocados em alturas distintas. Assim, para impulsionar a água de um reservatório para o outro é utilizado uma máquina elétrica, “[...] Que movida pela energia potencial cinética do fluido passa a gerar energia elétrica”. (Filho, 2020, p.21).

Mendonça (2022) fomenta que essa tecnologia é uma das mais usáveis e vem crescendo constantemente, e com base nos estudos da IEA (Internacional Energy Agency) a Agência Internacional de energia, até o final de 2019 contávamos e escala mundial com 127 GW de usinas, representando assim 99% de toda potência global de abastecimento.

Para melhor compreensão, observa-se agora na figura 7, o modelo de um bombeamento hidráulico combinando com energia solar proposto por Mendonça (2022).

Figura 7: Esquema de um Bombeamento hidráulico/hidrelétrico combinando com energia solar.



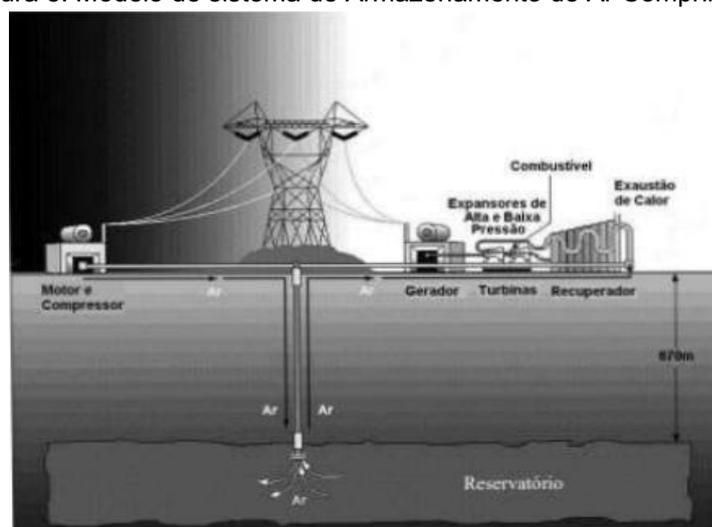
Fonte: Mendonça (2022).

Em relação ao ar comprimido, pondera-se que a energia é armazenada num reservatório de ar comprimido, e quando é necessário que ocorra a geração de energia, “[...] o reservatório é esvaziado fazendo com que o ar comprimido acione a

mesma turbina usada como compressor que agora atuará como gerador de energia elétrica” (Filho, 2020, p.22).

Mendonça (2022) afirma que esse sistema pode ser utilizado em grande escala, com pressões de até 70 atm, e com capacidade variando entre 25 a 350MW. Além disso, o período de armazenamento pode ultrapassar 1 ano. na figura 8 é observado o modelo de sistema de armazenamento de ar comprimido apresentado por Mendonça (2022).

Figura 8: Modelo de sistema de Armazenamento de Ar Comprimido.



Fonte: Mendonça (2022)

Em relação ao sistema de volantes de inércia, ou *flyweels*, eles possuem como princípio o armazenamento de energia por massa giratória. Filho (2020) fomenta que é acoplado uma grande roda em uma máquina elétrica e assim que a máquina é ligada há a produção e armazenamento de energia inércia, após isso a máquina se transforma num gerador, na qual a energia inércia produzida se transforma em energia elétrica.

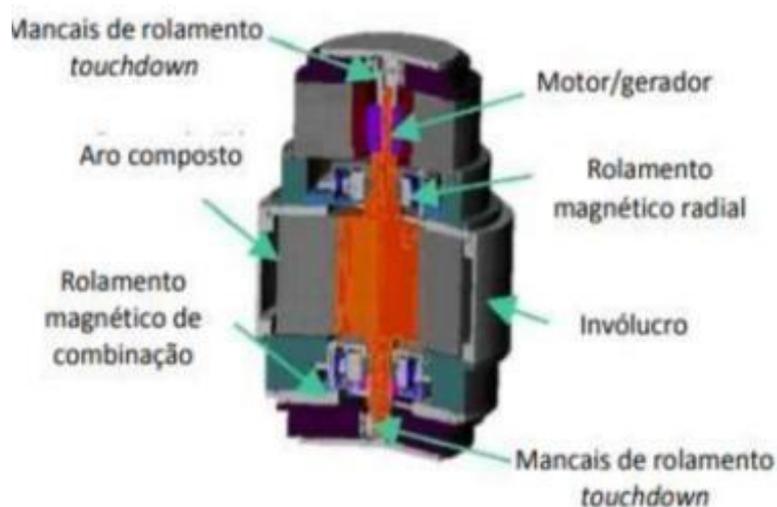
Mendonça (2022, p.3) traz uma explicação bem detalhada sobre o sistema de *flyweels*, como pode ser verificado na sequência:

Os valores de inércia, ou *flywheel* como são mais conhecidos, armazenam energia com base no princípio de massa giratória. É um dispositivo de armazenamento mecânico que emula o armazenamento de energia elétrica, convertendo-a em energia mecânica. A energia em um *flywheel* é armazenada na forma de energia cinética rotacional. A energia de entrada para o FESS é normalmente retirada de uma fonte elétrica proveniente da rede ou de qualquer outra fonte de energia elétrica. O *flywheel* acelera à

medida que armazena energia e desacelera quando está descarregando, para fornecer a energia acumulada. O volante giratório é acionado por um motor-gerador elétrico realizando a troca de energia elétrica para energia mecânica e vice-versa. O volante e o motor estão coaxialmente conectados, indicando que o controle do motor permite o controle do *flywheel*.

Na figura 9 observa-se um modelo do sistema de Flyweels apresentado por Mendonça (2022).

Figura 9: Modelo do esquema de *flyweels*

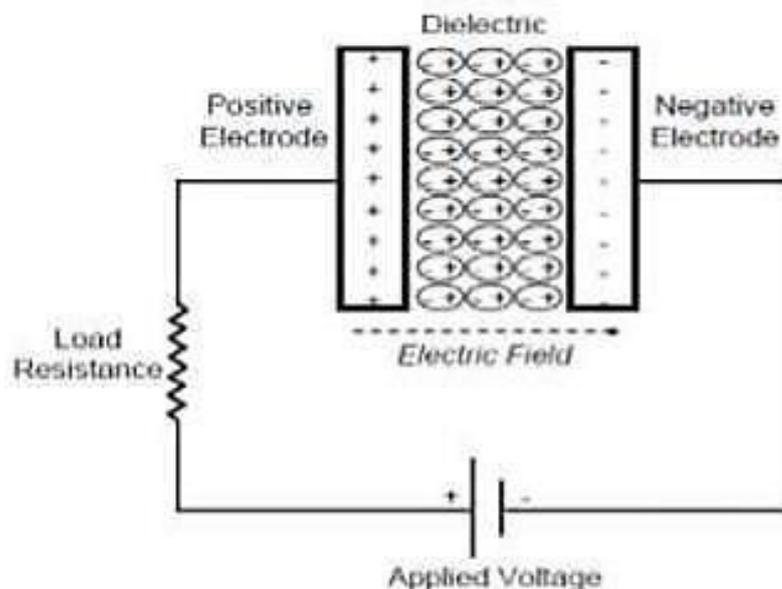


Fonte: Mendonça (2022)

Mesmo diante ao fato de ser um sistema bem desenvolvido, sua utilização não foi tão significativa, diminuindo assim com o seu surgimento nas redes elétricas, aponta Mendonça (2022).

Os supercapacitores / supercondensadores funcionam por meio de duas placas com cargas opostas. “Assim, com o tempo as placas se carregam, armazenando a eletricidade, porém não irão conduzir entre si” (Mendonça, 2022, p.3). A figura 10 ilustra o modelo apresentado por Mendonça (2022).

Figura 10: Modelo de um Supercondensador



Fonte: Mendonça (2022)

No mais, é válido ressaltar que tais modelos são mais utilizados por veículos de grande porte, como submarinos e tanques de guerra, podendo ainda serem substituídos por baterias.

Em relação à bateria, comumente conhecida, é um dispositivo de armazenamento de energia química que se transforma em energia elétrica quando acionada. Em conjunto possuem a capacidade de construir tensões e voltagens conforme o desejado. Filho (2020) aponta que esse SAE, em termos econômicos se mantém o mais viável, além disso, há uma variedade de tipos que definem sua capacidade e também potência.

Na figura 11 é exposto o quadro apresentado por Filho (2020) sobre a capacidade dos tipos de baterias e seus fabricantes.

Figura 11: Quadro demonstrativo de características de baterias

Tipo da bateria	Características	Exemplo de aplicação comercial	
		Capacidade	Localização
Chumbo ácido (tipo inundado)	$\eta = 70-75\%$ 50-150 (€/kWh) 1000-2000 ciclos 25 Wh/kg	10 MW / 40 MWh	Estados Unidos, Califórnia – China
Chumbo ácido (tipo regulado por válvula)	$\eta = 80-85\%$ 50-150 (€/kWh) 200-300 ciclos 30-50 Wh/kg	300 kW / 580 kWh	Estados Unidos, Wisconsin – Milwaukee
Níquel Cádmio	$\eta = 70-75\%$ 200-600 (€/kWh) 3000 ciclos 45-80 Wh/kg	27 MW / 6,75 MWh	Estados Unidos, Alaska
Sódio Enxofre	$\eta = 89\%$ (325 °C) 2500 ciclos 100 Wh/kg	9,6 MW / 64 MWh	Japão – Tóquio
Íon Lítio	$\eta = 90-95\%$ 700-1000 (€/kWh) 3000 ciclos 90-190 Wh/kg	Aplicações apresentadas na seção Apêndice.	
Vanádio Redox	$\eta = 85\%$ 360-1000 (€/kWh) 10.000 ciclos 30-50 Wh/kg	1,5 MW / 1,5 MWh	Japão
Zinco Bromo	$\eta = 75\%$ 360-1000 (€/kWh) 70 Wh/kg	1 MW / 4 MWh	Japão – Kyushu EPC
Metal ar	$\eta = 50\%$ 50-200 (€/kWh) 450-650 Wh/kg	250 kW / 1 MWh	Estados Unidos, Nova Jersey – Caldwell

Fonte: Mendonça (2022)

Com base no apresentado, observa-se que as baterias de íons de lítio possuem amplas vantagens em relação às demais. Verifica-se também que os fabricantes das baterias de íons de lítio são empresas de forte reconhecimento e alto potencial de investimento, o que traz confiabilidade ao mercado e a investidores.

Em relação ao armazenamento térmico, essa tecnologia atua por meio do acúmulo de energia, ocorrendo a sua liberação de forma controlada.

Um tipo importante de armazenamento térmico é o conhecido como criogênico, que consiste na implementação de nitrogênio líquido. Nele o ar liquefeito é armazenado em um tanque e quando necessário é convertido ao estado gasoso através da exposição ao ar ambiente ou do calor gerado em processos industriais e usado para girar uma turbina, gerando eletricidade (Mendonça, 2022, p.3).

Nesse processo, observa-se a transformação de uma energia natural em energia elétrica. Para finalizar, é citado por Mendonça (2020) as pilhas de combustível, estas apesar de serem parecidas com as baterias, não necessitam serem recarregadas, sendo assim alimentadas por oxigênio e hidrogênio.

3.2 - Vantagens na utilização de um SAE

Os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE), têm sido cada vez mais necessários e essenciais ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), visto que estes atuam como suporte na perspectiva de tornar os sistemas de geração e distribuição de energia elétrica mais dinâmicos, flexíveis e eficazes mediante a disponibilidade e os benefícios destes (Campos et al., 2022).

Atualmente, em virtude das demandas, dispõe-se de diversos SAE, já citados anteriormente, sendo estes classificados como tecnologias químicas, mecânica e elétrica.

Por meio dos SAEs é possível a disseminação efetiva do uso das energias solar, eólica e outras renováveis de maneira sustentável, já que são aliviados congestionamento na rede, contornando os problemas da aleatoriedade de disponibilidade de energia, aumentando a eficiência do sistema como um todo, contribuindo para redução de impactos ambientais. Entende-se que as aplicações dos sistemas de armazenamento não são direcionadas somente ao setor elétrico, mas também ao setor de transportes, como é o caso dos carros elétricos (Costa e Silva; Bortoni, 2016, p. 49).

Por meio disso, compreende-se a importância que os SAEs possuem, visto que outros setores não relacionados a produção de energia elétrica buscam-no como fonte alternativa para otimização de serviços e produtos.

Os benefícios dos SAEs são diversos, e estes se acentuam particularmente por meio do sistema tecnológico utilizado levando em consideração as necessidades e demandas do local implementado.

Estes também, assim como ressalta Costa e Silva; Bortoni (2016, p. 60), podem ser utilizados de diversas maneiras, mesmo diante de algumas limitações, seja por questões operacionais ou de projeto.

Podem ser citados cinco usos principais do armazenamento para aplicações em frente à medição: - Em sistemas de transmissão: Melhorar o desempenho da rede de transmissão e apoiar a integração de geração renovável em grande escala; - Substituição de Plantas de Pico: Substituir uma instalação que funciona apenas quando a demanda por energia é muito alta, as quais são geralmente movidas a gás natural. O termo Planta de Pico vem do

termo em inglês Peaker Plants; - Regulação de frequência: Balancear a potência para manter a frequência dentro de um limite de tolerância especificada; - Serviços de distribuição: quando localizados em subestações, para flexibilizar a capacidade e atenuar problemas de estabilidade; - Integração de sistemas fotovoltaicos: Reduzir desafios potenciais da integração fotovoltaica ou melhorar o valor da geração de energia solar. Além disso, podem ser citados cinco usos principais do armazenamento para aplicações antes da medição: - Em micro redes: Aumentar a estabilidade e eficiência de uma micro rede, com objetivos locais específicos, tais como confiabilidade, a diversificação das fontes de energia e/ou redução de custos, especialmente no contexto de perfil de descarga relativamente curta; - Em sistemas isolados: Apoiar a estabilidade e eficiência do sistema elétrico isolado com objetivos locais específicos, tais como confiabilidade, a diversificação das fontes de energia e/ou redução de custos, especialmente no contexto da integração das energias renováveis (ou seja, perfil de descarga longa); - Em aplicações comerciais e industriais: Fornecer corte de pico de demanda e redução da tarifa de demanda para aplicações comerciais ou industriais; - Aplicação comercial: Proporcionar reduções na tarifa de demanda, numa escala menor e com uma duração inferior a casos de uso comercial e industrial; - Aplicação residencial: Projetado para fornecer energia de reserva e aumento da auto geração.

Observa-se que estes apresentam-se como soluções para os diferentes problemas, ou situações que possam surgir o processo de geração e distribuição de energia elétrica. E em relação as Redes Inteligentes, ou seja, as Microrredes, nota-se que as SAEs, contribuem com a sua eficiência e confiabilidade na prestação dos serviços oferecidos.

3.3 - Custo de um SAE

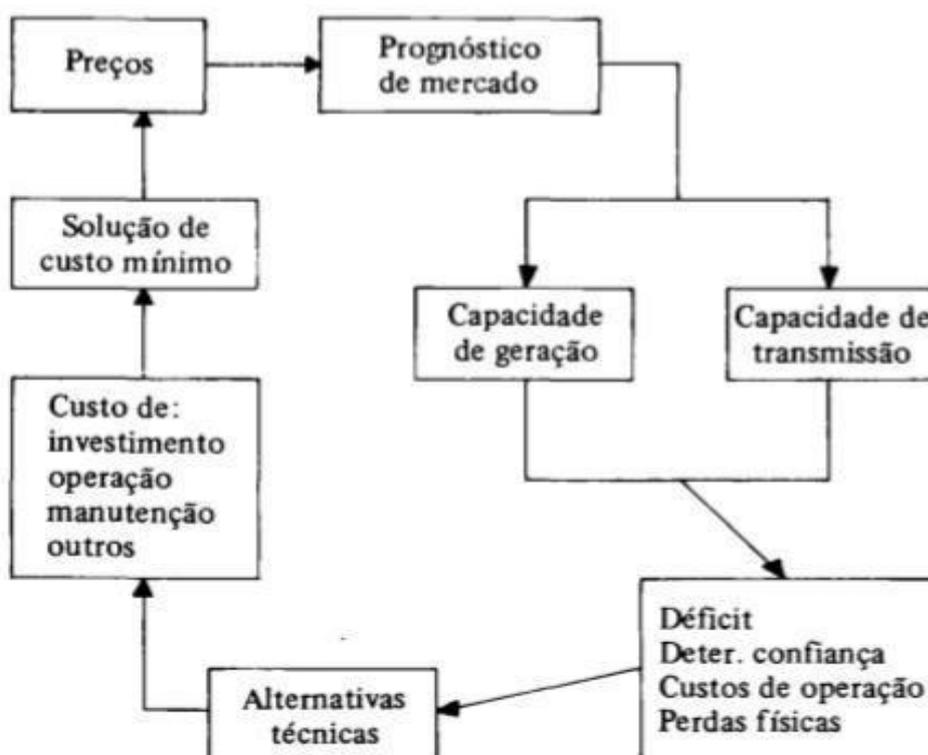
Com base nas diversas possibilidades dos Sistemas de Armazenamento de Energia elétrica (SAEs), verifica-se que os custos são diversos, podendo variar de acordo com o modelo escolhido e as demandas do espaço em que será implementado.

Embora a principal barreira para a implantação de recursos de armazenamento de energia, em muitos casos, possa ser os elevados custos de capital, existem barreiras adicionais incorporadas em regras e regulamentos que impedem a implantação dos recursos de armazenamento em situações em que estes são a alternativa economicamente preferida de mercado. (Costa e Silva; Bortonii, 2016, p.63)

Deste modo verificamos que existem diversos fatores que influenciam o custo de um sistema de abastecimento de energia, tais como a fonte de energia utilizada, a distância entre os pontos de geração e consumo, a tecnologia empregada, entre outros. Dessa forma, é fundamental realizar uma análise detalhada de todos esses aspectos para determinar o custo total do projeto.

Gutiérrez-santos (1989) discute sobre os custos-benefícios para os projetos de transmissão de energia elétrica, apontando que a análise benefício- custo (ABC) é um dos melhores para viabilizar e selecionar os melhores projetos para a economia. Para isso, apresenta um sistema que deve ser levado em consideração no momento das escolhas, como podemos verificar na figura 12 representada abaixo.

Figura 12: Metodologia para implantação de um sistema de abastecimento e distribuição de energia elétrica.



Fonte: Gutiérrez-santos (1989)

Um dos principais fatores que impactam no custo de um sistema de abastecimento de energia é a fonte de energia utilizada. Por exemplo, a energia elétrica gerada por fontes renováveis, como solar, eólica e hídrica, apresenta um custo inicial mais elevado devido aos investimentos em infraestrutura necessários para a instalação dos equipamentos. No entanto, essas fontes de energia possuem custos operacionais mais baixos a longo prazo, o que pode resultar em economias significativas ao longo da vida útil do sistema (Silva et al, 2023).

Além disso, a distância entre os pontos de geração e consumo também é um fator relevante a ser considerado no custo de um sistema de abastecimento de energia. Quanto maior a distância, maiores serão os custos de transmissão e distribuição de energia, o que pode impactar negativamente no custo total do projeto.

Outro aspecto importante a ser considerado na análise de custo de um sistema de abastecimento de energia é a tecnologia empregada. Atualmente, existem diversas tecnologias disponíveis no mercado que permitem aumentar a eficiência energética e reduzir os custos de operação. É fundamental avaliar as diferentes opções disponíveis e escolher a tecnologia mais adequada para o projeto, levando em conta não apenas o custo inicial de implantação, mas também os custos operacionais e de manutenção ao longo do tempo (Costa e Silva; Bortonii, 2016, p.63).

A análise do custo de um sistema de abastecimento de energia é um passo fundamental na elaboração de um projeto viável economicamente. É importante considerar todos os fatores que podem influenciar no custo total do empreendimento, desde a fonte de energia utilizada até a tecnologia empregada, para garantir uma avaliação precisa e uma tomada de decisão segura.

4. Sistemas de gerenciamento de energia modernos

4.1- A MR e o sistema de energia moderno

Assim como mencionado anteriormente, as Microrredes são uma alternativa inovadora e sustentável ao mundo moderno, seja pela capacidade de se adequar às

necessidades do espaço, como também em virtude da possibilidade de geração de energia por fontes renováveis.

Além do mais, num cenário marcado por constantes transformações e demandas emergentes, as Microrredes, representam na história da eletricidade um novo capítulo, reforçando sua relevância em caráter mundial com maior efervescência a partir dos anos de 1990 (Soares; Oliveira, 2022).

Diante disso, é válido frisar que a conceituação das MR tem sido diversa no setor elétrico, sendo incorporado termos como nanorredes, redes inteligentes, geração integrada, dentre outras. Gomes (2018) fomenta que essas são o caminho para a construção de um sistema energético inovador, sendo possível constatar isso por meio por meio da literatura em termos teóricos, uma vez que há uma imensa gama de trabalhos que discutem a temática em diferentes abordagens, porém sempre apontando a eficácia e eficiência das MR.

Corroborando com essa ideia, Rosa (2022) fomenta que as MR são significativas, principalmente em virtude do foco ecológico, uma vez que não proporcionam benefícios apenas ao consumidor, mas também as distribuidoras e o meio ambiente. No entanto, mesmo diante dos diversos benefícios que essas trazem a sociedade no geral, os marcos regulatórios, assistenciais e tecnológicos são um grande desafio a ser superado.

Apesar de em estágio inicial, pode-se notar uma crescente disseminação de microrredes no cenário internacional, com exemplos espalhados tanto na Europa quanto nos Estados Unidos (GAZETA DO POVO, 2017). Dentre estes, um caso novaiorquino se destaca, principalmente, pelo seu desenvolvimento frente ao panorama de digitalização, com o emprego da tecnologia blockchain (Rosa, 2022, p.5).

A partir disso, nota-se que mesmo diante das situações burocráticas e regulatórias que podem atrasar a implantação de um sistema de MRs, já temos diversos casos de implantações no cenário internacional com resultados satisfatórios e que retratam cada vez mais a relevância e a qualidade dos serviços das MR dentro de uma sociedade em constante transformação e que tem exigido cada vez mais do setor energético e também, atitudes e ações sustentáveis que colaboram com a diminuição do processo de degradação ambiental.

4.2 - O controle de MR e o SGE de MR.

Diferentemente das redes tradicionais de transmissão de energia, as microrredes possuem métodos capazes de contribuir significativamente com as variações das cargas e das demandas. Meurer (2023) aborda que o Controle da MR possui três objetivos principais, sendo eles: o controle dos geradores, o gerenciamento de energia e a proteção das MR.

Levando em consideração a capacidade de potência, otimização e as demais características que colocam as microrredes como instrumentos de inovação na atualidade, salienta-se que a forma de controle dessas necessita se adequar às especificidades, contribuindo assim com uma melhor capacidade de operação (Souza Jr; Melo, Coelho e Freitas, 2019).

Neste sentido, é válido apontar que as Microrredes possuem basicamente como forma de melhor operar sua função, duas formas de controle, a forma centralizada e a forma descentralizada. Barbosa (2019) fomenta que a partir do controle centralizado, o Sistema de Gestão de energia é capaz de obter todas as informações internas de uma Microrrede, e externas, se necessário.

Assim, por meio dessas informações é possível realizar os ajustes necessários no processo de geração de energia, podendo ainda realizar cortes de maneira parcial ou total.

A ação resultante baseada nas informações recebidas é enviada para os controladores locais, que podem ser os próprios REDs da MR e também dispositivos eletrônicos, como medidores inteligentes ou IEDs (Intelligent Electronic Device). Entre as ações relacionadas aos REDs é possível citar o ajuste dos níveis de geração e também o Unit Commitment (UC) dos REDs despacháveis. Do ponto de vista das cargas, seu controlador local poderá realizar o corte parcial ou total das cargas a ele conectadas e, em alguns casos, realizar um agendamento de utilização de energia com base nas restrições impostas pelo EMS (Barbosa, 2019, p. 20).

Corroborando com essa ideia, Souza Jr; Melo, Coelho e Freitas (2019,p.4) traz que uma única unidade é capaz de controlar toda rede, fazendo assim os ajustes necessários conforme as informações recebidas.

No controle centralizado [...] uma única unidade define as ações a serem tomadas por todos os elementos da microrrede, o que exige linhas de comunicação para envio das informações. Em um

controlador central, instalado em uma subestação, emite pontos de ajuste para controladores locais das fontes de GD e das cargas, comandando toda a operação da microrrede. Mais ainda, uma ou mais unidades de GD nesta configuração operam como mestre, transmitindo referências de tensão para as outras. Já em um controlador central é utilizado para otimizar e maximizar a produção da microrrede, definindo as trocas de energia quando conectada à rede elétrica com base na participação em mercados de energia (Souza Jr; Melo, Coelho e Freitas (2019,p.4).

No entanto, Barbosa (2019) aponta que por mais que o controle centralizado seja capaz de ter uma melhor otimização de todo processo energético, podem apresentar baixa flexibilidade e necessitam de uma rede de dados confiável para as trocas de informação realizada entre o Sistema de gestão de Energia e os demais dispositivos ligados a MR.

Já em relação ao Controle Descentralizado / Distribuído cada unidade de Microrrede possui a autonomia de operar conforme seus limites, assim frisa Barbosa (2019, p.21).

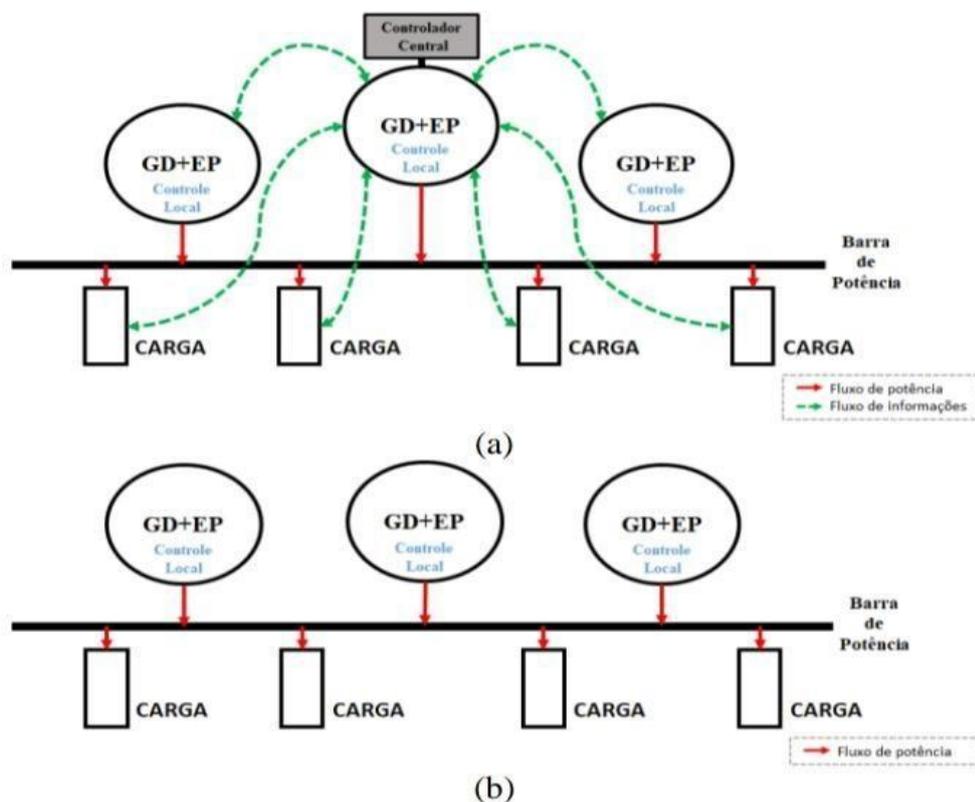
Os modelos distribuídos partem da premissa de que os REDs contidos na MR possuem autonomia para realizar o controle necessário para manutenção dos níveis operacionais dentro dos limites aceitáveis. Para isso, os REDs geralmente implementam algumas técnicas de controle de tensão e frequência, como o droop, que permitem realizar este controle somente com informações locais.

Concomitante a isso, Souza Jr; Melo, Coelho e Freitas (2019, p.4) corrobora com essa ideia e acrescenta que em virtude da unidade ser controlada apenas por informações locais, pode ocorrer falhas sistêmicas, ocasionando dificuldades no compartilhamento adequado de potência e no paralelismo dos conversores.

No controle descentralizado ou distribuído, ilustrado na Figura 1(b), por sua vez, cada unidade é controlada localmente, independentemente, na maioria das vezes, de informação dos outros dispositivos da microrrede. Trabalham, portanto, apenas com informações locais. Deste modo, há pouca ou nenhuma comunicação. O grande problema aqui reside no compartilhamento adequado de potências e no paralelismo dos conversores. A solução utilizada recentemente retoma o controle aplicado ao paralelismo de sistemas UPS (Uninterruptible Power Supply) .

Para melhor entendimento, Souza Jr; Melo, Coelho e Freitas (2019) apresentam na figura 13 o Modelo Centralizado e Modelo Descentralizado de MR.

Figura 13: Modelo centralizado e Modelo descentralizado de controle de Microrrede.



Fonte: Souza Jr; Melo, Coelho e Freitas (2019)

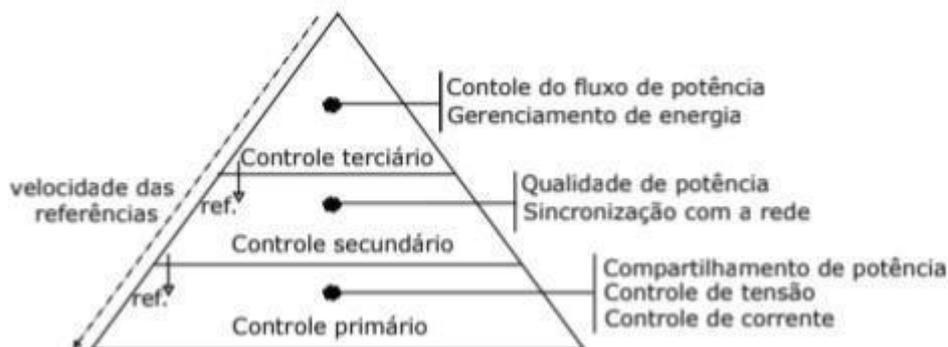
Souza Jr; Melo, Coelho e Freitas (2019), também apontam que uma maneira de padronizar o controle das MR, sendo este controle estabelecido pelo meio de Controle Hierárquico. A hierarquização de controle é estabelecida em três níveis, sendo classificado como controle primário, controle secundário e controle terciário.

Meurer (2023, p.33) define a função de cada um desses controles citados.

“Da perspectiva da hierarquia de controle, a MR é organizada em três níveis, os quais são classificados como controle primário, responsável pelas malhas internas e compartilhamento de potência. Controle secundário responsável pela qualidade de potência e sincronização com a rede. Controle terciário realizando o controle do fluxo de potência e gerenciamento de energia com a rede...”

Para melhor compreensão, o autor apresenta uma representação dos controles da MR e suas respectivas funções conforme mostra a figura 14.

Figura 14: Níveis de controle da Microrrede.



Fonte: Meurer (2023)

Para melhor entendimento, Meurer (2023) aborda que o controle primário afeta diretamente a qualidade e a estabilidade da energia da MR, já o controle secundário atua na mediação de uma comunicação quase em tempo real entre os mecanismos da MR, atuando de forma a melhorar a qualidade da energia e do compartilhamento de potência. Já o controle terciário, por meio do Energy Management System (EMS), tem por objetivo organizar o fluxo das potências e otimizar os recursos.

“Sendo a malha mais lenta, opera em um intervalo de tempo de alguns minutos até segundos e funciona quando a MR está conectada na rede de distribuição” (GUERRERO et al., 2011; BIDRAM; DAVOUDI, 2012 apud Meurer, 2023, p.3).

O Sistema de Gerenciamento de Energia é um importante mecanismo de gestão utilizado para controle, monitoramento e otimização no processo de geração e distribuição energética.

Nesse sentido, é válido frisar a importância que esse sistema tem em ser desenvolvido levando em consideração as particularidades das MRs, levando em consideração as suas diferenças em relação ao sistema de geração e distribuição de energia tradicional (Correia, 2020).

O sistema de gerenciamento das MRs, também conhecido como Energy Management System - EMS, é um sistema de serviços básicos que permite a melhor operacionalização das MRs, este é constituído em módulos que atua de modo a alcançar a melhor decisão a ser tomada.

Dentre as funções que um MGCC pode desempenhar, podem ser destacados o monitoramento, análise e previsão dos seguintes parâmetros (ZIA et al., 2018): x Geração de energia; x Consumo de energia; x Custo de energia; x Fatores meteorológicos; x Armazenamento de energia. Estas funções auxiliam na otimização da operação da microrrede, atendendo os requisitos técnicos desta (Correia, 2020, p.29)

Deste modo, é visto a relevância do sistema de gerenciamento de energia, uma vez que é possível prever o melhor caminho a ser tomado para que ocorra um bom funcionamento da rede.

5. Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

Com base nas pesquisas realizadas para melhor compreensão do tema abordado, verificou-se que há um vasto campo de pesquisas que buscam discutir a relevância das MRs enquanto alternativas inovadoras e sustentáveis.

Assim como citado no trabalho, com o aumento populacional e com o processo de globalização, a demanda energética bem como o uso de recursos não renováveis aumentou consideravelmente, junto a isso temos visto a saúde do planeta e o bem-estar populacional em relação ao ambiente se degradar, o que nos coloca a necessidade de buscar alternativas que sejam úteis, econômicas e sustentáveis ao meio ambiente e a população.

Diante disso, é nítido que as microrredes se apresentam como as melhores alternativas diante das opções de geração e distribuição de energia, em virtude da capacidade de operar conforme a demanda do espaço, atuando de modo a contribuir com as necessidades do cliente, apresentando ainda um baixo custo-benefício.

Sendo assim, apresentou-se no capítulo 2 as topologias de uma Microrrede, explicitando o princípio de funcionamento de uma geração concentrada e uma geração distribuída, sendo a escolha destas realizadas levando em consideração a especificidade local. Além disso, apresentou-se as diversas vantagens que as MRs possuem colocando-as em situação de vantagem quando comparadas aos sistemas de geração e distribuição de energia vigente.

Ao apresentar as desvantagens, observa-se que os processos burocráticos, bem como a complexidade de operação e os desafios técnicos se sobressaem, o que dificulta a implantação das MRs.

No capítulo 3, foram apresentados os tipos de SAE (Sistema de Armazenamento de Energia), muitos já conhecidos popularmente, como pilhas e baterias, e outros menos comuns e que já perderam o uso ao longo da história, como é o caso do sistema de Flyweels.

O uso do SAE possui diversas vantagens, seja pela sua confiabilidade, como também o bom desempenho e até mesmo a utilização de recursos renováveis que são de extrema necessidade para a construção de ações mais sustentáveis.

Finalmente, foi apresentado a forma de controle das MRs, bem como essas são promissoras alternativas para a sociedade moderna uma vez que seus benefícios são diversos e a possibilidade da utilização dos diversos tipos de recursos renováveis colaboram com sua eficácia e eficiência social, econômica e ambiental.

Dessa forma, esse trabalho apresentou de forma clara e objetiva o estado da arte das topologias de uma microrrede, assim como o seu controle, além de destacar as vantagens e desvantagens de sua implementação no setor elétrico. O produto dessa pesquisa servirá de material de consulta simples e confiável para estudantes de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica, auxiliando em pesquisas e demais tarefas futuras.

Como sugestão de trabalhos futuros, nota-se como válidas pesquisas que mostram na prática a implementação das MRs em diversos países, apresentando os resultados implementados no setor e os principais desafios que exigem ações imediatas para melhor funcionamento e desenvolvimento das MRs.

Referências bibliográficas

ABUABUD, J.P.M; BARRA, P.H.A. Estudo sistemático sobre microrredes e redes elétricas inteligentes. *Brazil Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 6571165727, setembro. 2020.

ALMEIDA, R. G. Gerenciamento e controle distribuído hierárquico primário e secundário aplicado a microrrede CA. 2019. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

AMARAL, V. R. do; BÜTTENBENDER, P. L.; THESING, N. J. NOVO MARCO LEGAL À GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: UMA ABORDAGEM DAS PRINCIPAIS MUDANÇAS / New legal framework for the distributed generation of electric energy in Brazil: an approach to the main changes. *Informe GEPEC*, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 440–461, 2024.

BAJAY, S.V; Et al. Perspectivas da geração distribuída de eletricidade nos estados de São Paulo, Bahia e Mato Grosso.. In: *ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 6., Campinas, 2006.

BARBOSA, A.D.S. GERENCIAMENTO CENTRALIZADO DE MICRORREDES DE ENERGIA ELÉTRICA COM OPERAÇÃO EM MODO ILHADO. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU, 2019.

BARBOSA, P.T.P. MICRORREDES: Uma análise dos aspectos regulatórios e políticas públicas do caso brasileiro. 83f. Rio de Janeiro, 2022.

BITENCOURT, Marcelo Barbosa. Estudo de viabilidade da implementação de microrredes no Brasil. 2022. 73 f., il. Trabalho de Conclusão Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

CAMPOS, F.N. Et al. TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA SUPORTE À INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL. *Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar – Florianópolis*, maio de 2022.

CARNEIRO, A.V. PROJETO, DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE MICRORREDE EM CAMPUS UNIVERSITÁRIO COM TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E DE ARMAZENAMENTO. 2017. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, 2017.

CORREIA, V.T. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA PARA MICRORREDES. 2021. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, 2021.

COSTA E SILVA, Y.F.F; BORTONI, E.C. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM REDES INTELIGENTES: CARACTERÍSTICAS, OPORTUNIDADES E BARREIRAS. *Revista Brasileira de energia*, v.22.n.16, 2016.

GOMES, A.C. Microrredes CC [recurso eletrônico]: distribuição de potência e modelo estático com base no controle por DROOP e MPPT. 2018. 127f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

GUTIÉRREZ- SANTOS. Análise de benefício-custo:O caso dos projetos de transmissão de energia elétrica. R. Bras. Econ. Rio de Janeiro v.43 p.31-63 jan.Irmar. 1989.

MENDONÇA, A H.D.F. Sistemas de Armazenamento de Energia. CONFEA,2022.

MEURER, A.P. CONTROLE HIERÁRQUICO PARA INVERSORES FORMADORES DE REDE EM MICRORREDES AC. 2023. 109f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2023.

OLIVEIRA, H.A. Rede híbrida de distribuição de energia em CC e CA como uma solução alternativa para microrredes isoladas. 2017. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de eletricidade automação e controle) - Universidade Federal do Maranhão, 2017.

ROSA, C. Et al., Microrredes: benefícios e desafios para o setor elétrico brasileiro. Grupo de estudos do setor elétrico. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022. Disponível em:
https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/10_Rosa_2022_02_02.pdf

SILVA, A.C.D.Et al., ESTUDO COMPARATIVO TÉCNICO, ECONÔMICO E AMBIENTAL DAS FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, E DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA. Revista Engenharias, V. 28, Edição 128, Nov. de 2023. Disponível em <https://revistaft.com.br/estudo-comparativo-tecnico-economico-e-ambientaldas-fontes-de-energias-renovaveis-e-distribuicao-eletrica/>

SILVEIRA, P.A. Análise de microrredes: estudo de caso. 2013.65f. Trabalho de Conclusão Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SOUZA JUNIOR, M.E.T; MELO, F.C; COELHO, E.A.A; FREITAS, L.C.G.D. O QUE SÃO MICRORREDES? – CONCEITOS, COMPONENTES E CONTROLE. Pet Elétrica UFU, 2019. Disponível em:
https://peteletricaufu.com.br/static/ceel/artigos/artigo_488.pdf.

SOUSA, A. S.; OLIVEIRA, S. O.; ALVES, L H. A PESQUISA BIBLIOGRÁFICA: PRINCÍPIOS E FUNDAMENTOS. Cadernos da Fucamp, v.20, n.43, p.64-83, 2021.