

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**MATEUS FILIPE RIBEIRO**

**AVALIAÇÃO DE MICRORREDES ISOLADAS COM GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA POR FONTES INTERMITENTES**

**Ilha Solteira  
2023**

**MATEUS FILIPE RIBEIRO**

**AVALIAÇÃO DE MICRORREDES ISOLADAS COM GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA POR FONTES INTERMITENTES**

Trabalho de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador  
**Dionízio Paschoareli Júnior**

Ilha Solteira  
2023

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R484a Ribeiro, Mateus Filipe.  
Avaliação de microrredes isoladas com geração de energia elétrica por fontes intermitentes / Mateus Filipe Ribeiro. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023  
52 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Dionízio Paschoareli Júnior

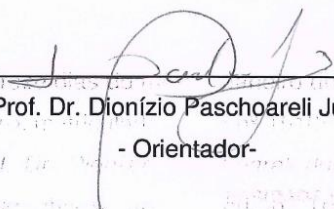
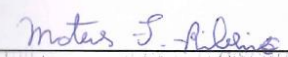
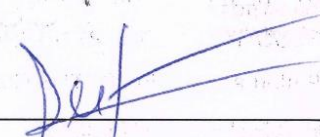

Inclui bibliografia

1. Geração distribuída. 2. Ilhamento. 3. Regulamentação.

  
Raiane da Silva Santos  
Assessora Técnica de Arquivo  
Serviço Técnico de Biblioteca, Arquivamento ao usuário e Documentação  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação  
CSB/D - 9999

**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

Aos Treze dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e três, o discente **Mateus Filipe Ribeiro**, matriculado sob o nº 151052468, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior, o Prof. Dr. Sérgio Kurokawa e o Prof. Dr. Carlos Antônio Alves, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "AVALIAÇÃO DE MICRORREDES ISOLADAS COM GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTES INTERMITENTES" obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito APROVADO.

 Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior - Orientador -	 Mateus Filipe Ribeiro - Discente -
 Prof. Dr. Sérgio Kurokawa - Membro da Banca -	 Prof. Dr. Carlos Antonio Alves - Membro da Banca -

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Silvana e Marcos, porque sem eles nada disso seria possível, pois, sempre estiveram ao meu lado e me deram todo apoio para chegar até aqui.

À minha namorada, Leila. Sou grato por ter alguém que sempre me apoiou e ajudou a superar as situações mais difíceis. Sua presença torna os dias muito melhores, obrigado por fazer parte da minha vida!

Por fim, agradeço ao corpo docente da faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira, em especial ao professor Dionízio Paschoareli que me acompanhou como orientador nas etapas de estágio e neste Trabalho de Graduação.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”. (Madre Teresa de Calcutá)

## RESUMO

Este trabalho discute a respeito das microrredes de forma geral e aborda os principais tópicos relacionados a estas, como, por exemplo, a geração distribuída. Descreve-se também as principais fontes de energia renováveis e o cenário atual brasileiro, quanto à produção de energia elétrica, seguido de uma retrospectiva regulatória a respeito da GD e que será utilizada como base para entendimento do contexto regulatório das microrredes. Além disso, discute-se a respeito da utilização das microrredes para um desenvolvimento mais eficaz relacionado ao uso da GD, uma vez que, deste modo, torna-se possível conectar este tipo de geração com a rede de distribuição convencional. É também apresentado o funcionamento das *smart grids*, que permitem um maior monitoramento, controle e proteção das redes de distribuição, trazendo grandes benefícios para as GDs, principalmente quando aliadas às microrredes. No que tange exclusivamente às microrredes, realizou-se uma análise a respeito da composição, possíveis arquiteturas, cenário atual no Brasil e no mundo e, por fim, uma avaliação principalmente do ponto de vista regulatório referente às microrredes e a operação de ilhamento no Brasil. Finalmente, faz-se algumas sugestões para futuras regulamentações relacionadas às microrredes e ao ilhamento com o propósito de apresentar melhores caminhos para distribuição de energia no país.

**Palavras-chave:** geração distribuída; ilhamento; regulamentação.

## ABSTRACT

This paper makes discussion about microgrids in general, bringing the main topics related to them, such as distributed generation. It also described the main renewable energy sources and the current Brazilian scenario, regarding the production of electricity, followed by a regulatory retrospective regarding DG that will be used as a basis for understanding the microgrids regulatory context. In addition, it is discussed the use of micro-grids for a more effective development related to the use of DG since, in this way, it becomes possible to connect this type of generation to the conventional distribution grid. It also presented the operation of smart grids, which allow greater monitoring, control, and protection of distribution networks, bringing great benefits for DGs, especially when allied to microgrids. Regarding microgrids, an analysis was performed of the composition, possible architectures, and current scenario in Brazil and the world, and, finally, an evaluation mainly from the regulatory point of view regarding microgrids and the operation of islanding in Brazil. Finally, some suggestions are made for future regulations related to microgrids and islanding, with the purpose of presenting better ways for energy distribution in the country.

**Keywords:** distributed generation; islanding; regulation.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	- Fornecimento total de eletricidade por tipo de fonte.....	16
<b>Figura 2</b>	- Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo.....	17
<b>Figura 3</b>	- Componentes de um aerogerador de eixo horizontal.....	19
<b>Figura 4</b>	- Microrrede elétrica em corrente alternada.....	27
<b>Figura 5</b>	- Microrrede elétrica em corrente contínua.....	28
<b>Figura 6</b>	- Microrrede elétrica em CA/CC.....	29
<b>Figura 7</b>	- Ponto de acoplamento comum em uma microrrede elétrica.....	30
<b>Figura 8</b>	- Estado da indústria no desenvolvimento das microrredes.....	31
<b>Figura 9</b>	- Investimento projetado para microrredes.....	32
<b>Figura 10</b>	- Componentes e funcionamento básico de uma microrrede.....	33
<b>Figura 11</b>	- Sistema baseado em um volante de inércia.....	37
<b>Figura 12</b>	- Armazenamento híbrido com supercapacitor e banco de baterias.	38
<b>Figura 13</b>	- Microrrede Isolada da Ilha Grande.....	40

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AO	Acordo Operativo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CHP	<i>Combined Heat and Power</i> – Calor e Energia Combinados
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
GD	Geração Distribuída
IEA	<i>International Energy Agency</i> – Agência Internacional de Energia
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
kWp	Quilowatt pico
MIGDI	Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCC	<i>Point of Common Couple</i> – Ponto de Acoplamento Comum
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PRODIST Nacional	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SIGFI	Sistemas Isolados e com Fontes Intermitentes
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
UE	União Europeia
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VCA	Tensão alternada
VCC	Tensão contínua

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1	OBJETIVO.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
<b>2</b>	<b>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</b> .....	14
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	16
2.2	BIOENERGIA.....	18
2.3	ENERGIA EÓLICA.....	18
2.4	RETROSPECTIVA REGULATÓRIA DA GD NO BRASIL.....	20
2.5	<i>SMART GRIDS</i> .....	22
<b>3</b>	<b>MICRORREDES</b> .....	25
3.1	DEFINIÇÃO DE MICRORREDES.....	25
3.2	CENÁRIO ATUAL DAS MICRORREDES INTELIGENTES.....	31
3.3	COMPOSIÇÃO PRINCIPAL DE UMA MICRORREDE ELÉTRICA....	33
<b>3.3.1</b>	<b>Geração</b> .....	34
<b>3.3.2</b>	<b>Armazenamento</b> .....	35
<b>3.3.2.1</b>	<b><i>Banco de baterias</i></b> .....	36
<b>3.3.2.2</b>	<b><i>Volante de Inércia</i></b> .....	37
<b>3.3.2.3</b>	<b><i>Supercapacitores</i></b> .....	38
<b>3.3.3</b>	<b>Cargas</b> .....	38
<b>3.3.4</b>	<b>Controlador</b> .....	39
3.4	MICRORREDES NO BRASIL.....	40
3.5	CENÁRIO REGULATÓRIO DO ILHAMENTO DE MICRORREDES..	42
3.6	PROPOSTA DE REGULAMENTAÇÃO PARA O ILHAMENTO INTENCIONAL DE MICRORREDES.....	44
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	47
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	48

## 1 INTRODUÇÃO

As microrredes sempre existiram na história da eletricidade como uma forma de levar energia aos locais em que o sistema elétrico tradicional de transmissão de energia não era capaz de atender, seja pela distância ou espaço disponível, ou ainda, áreas onde não compensaria financeiramente a existência de um sistema de distribuição.

Estas redes são normalmente de média ou baixa tensão e podem, ou não, estarem conectadas à rede de energia elétrica, configurando neste último caso microrredes isoladas (WARNERYD *et al.*, 2020).

Uma microrrede pode ser dividida em quatro partes principais:

- O controlador, garante um balanço preciso de energia e potência dentro da microrrede;
- O armazenamento da energia (baterias, ultracapacitores, entre outros), mantém a microrrede eletrificada quando houver mudança de operação para o modo ilhado ou falta de energia;
- A geração, que pode ser tanto controlável como as PCHs, por exemplo, ou ainda não controláveis, como é o caso da energia eólica, que depende da constância do vento;
- As cargas, que consomem a energia e podem ser priorizadas em cargas críticas ou comuns, garantindo um melhor balanceamento da oferta e demanda de energia.

### 1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo propor um estudo das microrredes, por meio de uma revisão bibliográfica de um compilado de novas informações a respeito desta tecnologia no Brasil, assim como, evidenciar um dos maiores desafios técnico e regulatório que é a operação de ilhamento de microrredes.

### 1.2 Justificativa

O Brasil possui um histórico de problemas relacionados ao abastecimento de energia elétrica no país, seja pela sua extensão, ou ainda pelos eventos naturais de

estiagem, que tendem a gerar crises hídricas e afetam diretamente a produção de energia, a qual é majoritariamente advinda das hidrelétricas. Esses problemas geram, ainda no século XXI, a dependência da queima de combustíveis fósseis para suprir a energia em situações de emergência. Observa-se que o uso de microrredes não somente auxiliam em crises como esta, equilibrando a demanda de energia, como ainda, a tornaria menos dependente de fontes de energia não sustentáveis, poluidoras do meio ambiente e de maior custo, impactando diretamente o consumidor, além do uso desta tecnologia beneficiar comunidades em que a linha de distribuição tradicional não alcança.

## 2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Estima-se, que cerca de 40% da capacidade instalada de geração de energia elétrica necessária para universalizar o acesso da energia elétrica até o ano de 2030, de forma a alcançar as metas traçadas pelas Nações Unidas, será entregue de modo mais viável estrutural e economicamente falando se forem utilizadas microrredes para tal feito (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011).

O sistema de energia convencional vem enfrentando grandes desafios em relação à geração de energia por parte de combustíveis fósseis, observa-se uma demanda crescente por energia, acompanhada por um decréscimo gradual das fontes de extração de carvão e petróleo, os quais são recursos limitados e são relacionados a diversos problemas ambientais da atualidade. A União Europeia e países como os Estados Unidos e a China adotaram metas de neutralidade em CO<sub>2</sub> para 2050 (UE e EUA) e 2060 (China) (CARBINATTO, 2021).

As questões apresentadas estão gerando uma forte adoção de fontes renováveis ou não convencionais de energia, denominadas como geração de energia distribuída, tais como: células solares fotovoltaicas, biogás, gás natural, energia eólica, células de combustível, microturbinas, calor combinado e sistemas de potência (CHP) e motores de Stirling (CHOWDHURY *et al.*, 2009).

Segundo os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, estabelecidos pela resolução normativa ANEEL n.º 956 (2021), define-se o conceito de geração distribuída como: “[...] centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou por meio de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo ONS [...]”.

Além disso, utilizando-se da geração distribuída, a rede elétrica de distribuição passiva ou unidirecional (convencional) pode ser convertida em uma rede elétrica de distribuição ativa ou bidirecional, uma vez que esta permite a bidirecionalidade dos fluxos de energia na rede. Para garantir o aproveitamento completo das fontes de energias renováveis, utiliza-se as *Smart Grids* ou as microrredes (CHOWDHURY *et al.*, 2009).

As microrredes podem ser utilizadas na integração da geração distribuída com a rede de distribuição convencional, uma vez que possibilita uma conexão segura e descentralizada com a rede. Desse modo, faz-se referência aos primórdios da

distribuição da energia, quando surgiram as primeiras microrredes criadas pela empresa de Thomas Edison em meados de 1882, época em que ainda não existia a tecnologia necessária para criação de uma rede descentralizada que atendesse a todos (BELIDO, 2019; MENDONÇA, 2014).

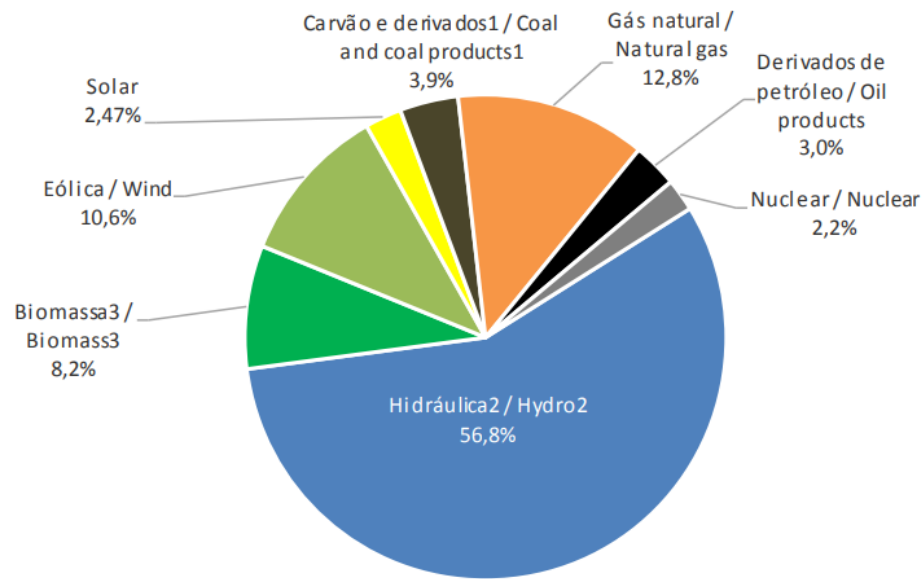
Apesar da rede de distribuição tradicional ser centralizada, observa-se que a ideia de Edison não foi totalmente descartada, pois, com o avanço tecnológico, tornou-se evidente que esta é uma das melhores formas de garantir que haja energia em locais que não são contemplados pela rede de distribuição tradicional, como, por exemplo, ilhas, regiões isoladas e propriedades rurais afastadas das cidades (BELIDO, 2019; MENDONÇA, 2014).

O fato é que com o desenvolvimento tecnológico atual, o uso da geração distribuída (GD) por meio das microrredes passou a fazer sentido não apenas para estas regiões citadas, como também para o sistema de distribuição em geral, seja ele desde regiões afastadas até os grandes centros. Isto se aplica, pois, dessa forma, possibilita-se um maior controle da rede de distribuição em geral, tanto do ponto de vista de monitoramento quando segurança, uma vez que quando ameaçada é possível realizar operações como a de ilhamento, a qual evita a desconexão total das cargas associadas à rede, em caso de falhas.

São inúmeros os benefícios da utilização da GD em junção às microrredes, observa-se que se utilizando destas tecnologias há um avanço de um modelo de distribuição centralizado para o que Belido (2019) chamou de modelo misto. Entretanto, para que esta transição ocorra de maneira orgânica e que as vantagens possam ser completamente exploradas, associam-se ainda as *Smart Grids*, pois, destas dependem as técnicas de controle, monitoramento e proteção da rede, que serão abordadas logo à frente no tópico 2.5.

No Brasil, dados recentes apontam que a autoprodução de energia, majoritariamente advinda da geração distribuída, corresponde atualmente a cerca de 17,40% da produção de energia elétrica no Brasil, sendo que aproximadamente 10,06% da energia produzida é consumida pelo próprio produtor, com destaque para as indústrias sucroalcooleiras e de papel e celulose, que produzem energia a partir da biomassa, que está representada na Figura 1. (EPE, 2022).

Figura 1 – Fornecimento total de eletricidade por tipo de fonte



Notas / Notes:

1. Inclui gás de coqueria / Includes coke oven gas

2. Inclui importação de eletricidade / Includes electricity imports

3. Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações / Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Fonte: EPE (2022).

Além disso, segundo a Figura 1, a geração distribuída já representa cerca de 21,27% da energia elétrica produzida por fontes de energia renováveis, tais como: eólica (10,6%), fotovoltaica (2,47%) e biomassa (8,2%) (EPE, 2022).

## 2.1 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é considerada uma das formas mais sustentáveis de geração de energia elétrica, isso se deve ao fato da luz solar ser inesgotável e por conta deste meio de geração causar um impacto muito pequeno ao meio ambiente, principalmente quando comparado a fontes de energia não sustentáveis.

No Brasil esta forma de geração de energia vem ganhando grande espaço no setor elétrico, principalmente no caso de autoprodutores, em que está se tornando uma das fontes de energia mais populares nas residências brasileiras, seja para redução do gasto com a energia advinda das distribuidoras, seja para criação de redes isoladas em que a distribuição de energia tradicional não alcança (VILLALVA; GAZZOLI, 2012).

Além disso, cresce constantemente o número de empresas que passaram a realocar parte do seu consumo de energia por meio da utilização de sistemas fotovoltaicos considerados microgeração ou minigeração distribuída, principalmente empresas que não têm possibilidade da utilização da geração por meio da biomassa.

O sistema fotovoltaico, apresentado na Figura 2, é composto por um ou mais módulos fotovoltaicos, o controlador de carga, inversor e as cargas (VILLALVA; GAZZOLI, 2012).

Figura 2 - Componentes de um sistema fotovoltaico autônomo



Fonte: Villalva; Gazzoli (2012).

O módulo fotovoltaico absorve os fótons advindos da incidência solar, que colidem com os átomos existentes nas placas, essas colisões geram energia por meio da movimentação dos elétrons, gerando assim uma corrente elétrica contínua e consequentemente produzindo energia (VILLALVA; GAZZOLI, 2012).

O controlador de carga assegura uma maior vida útil para as baterias, regulando-as de forma a evitar sobrecargas ou descargas totais do conjunto de baterias, além disso, em alguns sistemas, podem auxiliar o módulo fotovoltaico a encontrar a posição do ponto ótimo de geração de energia (VILLALVA; GAZZOLI, 2012).

O banco de baterias armazena a energia produzida de forma intermitente, assegurando um fornecimento constante de energia para as cargas. A energia vinda tanto do controlador quanto da bateria passam pelo inversor quando necessário converter a energia contínua em alternada, possibilitando que as cargas recebam energia de forma adequada para seu funcionamento (VILLALVA; GAZZOLI, 2012).

## **2.2 Bioenergia**

Como observado na Figura 1, a energia gerada a partir da biomassa compõe uma parte relevante da matriz energética brasileira (8,2%) um exemplo muito claro de utilização desta fonte de energia no Brasil é por meio da cogeração do bagaço da cana nas usinas sucroalcooleiras.

Enquanto o processo de uma usina termoelétrica convencional tem uma eficiência de cerca de 35% a 40%, no caso da energia gerada pela cogeração a eficiência pode chegar a cerca de 80%, sendo neste caso uma energia muito mais limpa e sustentável, visto que advém da biomassa que seria descartada em grandes quantidades no meio ambiente (MENDONÇA, 2011).

Os maiores níveis de eficiência se devem a dois fatores principais: o primeiro é a proximidade física entre a geração e o consumo da energia, pois, a maior parte da utilização da biomassa é por meio da autoprodução. O segundo fator é a possibilidade de reutilização do vapor da queima da biomassa em outros processos industriais, tais como: evaporação, secagem e aquecimento. Desse modo, observa-se um grande benefício na utilização da biomassa para produção de energia, podendo ser empregada também em microrredes (MARINHO, 2011).

## **2.3 Energia Eólica**

A produção de energia por meio da força do vento já contempla cerca de 10,6% da produção de energia elétrica brasileira, sendo que aproximadamente 90% desta geração vem da região nordeste do país, onde em meses em que há mais ventos, a energia produzida supre toda a região nordeste e ainda há excedentes de até 23% desse total produzido, tamanho é o crescimento deste tipo de geração no Brasil (GOV, 2022).

A partir destes números é notável que este modo de produção de energia tem grande relevância na matriz energética brasileira, principalmente nas regiões nordeste e sul, sendo que, com o auxílio de um banco de baterias ou outras formas de armazenamento, este tipo de geração de energia se demonstra promissora para formação de novas microrredes.

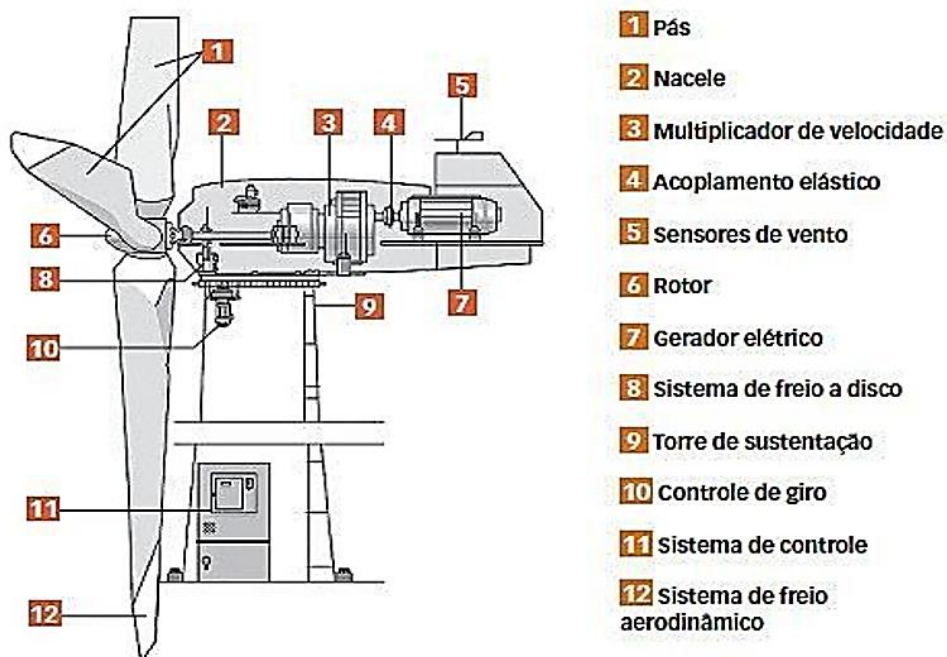
Uma das maiores vantagens da produção de energia por geradores eólicos é que utiliza a força do vento, uma fonte de energia inesgotável e que causa baixo

impacto ao meio ambiente, todavia por depender do vento existe uma intermitência na produção da energia (OLIVEIRA; PINHEIRO, 2020).

Os geradores eólicos podem ser divididos em dois tipos principais: eixo horizontal e eixo vertical. O primeiro é o mais eficiente, principalmente se for utilizado com um rotor de 3 pás, considerado o mais eficiente e de baixo custo, além disso, o aerogerador pode ser posicionado de frente ou oposto à orientação do vento a depender da categoria do gerador (OLIVEIRA; PINHEIRO, 2020).

Enquanto isso, os aerogeradores de eixo verticais são de baixo custo e mais utilizados em regiões urbanas devido à facilidade de manutenção e construção deste tipo de gerador. A Figura 3 ilustra os componentes que compõe um aerogerador de eixo horizontal com 3 pás (OLIVEIRA; PINHEIRO, 2020).

Figura 3 – Componentes de um aerogerador de eixo horizontal



Fonte: Oliveira; Pinheiro (2020).

- 1) Pás: recebem a energia cinética fornecida pelo vento;
- 2) Nacele: localizada acima da torre de sustentação, comporta os componentes 3, 4, 5, 7, e 8 da Figura 3;
- 3) Multiplicador de velocidade: possui diversas engrenagens e eixos para garantir que a velocidade reduzida do rotor seja ampliada para rotacionar o gerador elétrico;

- 4) Acoplamentos elásticos: reduzem os efeitos vibracionais advindos das turbinas;
- 5) Sensores de vento: possui um anemômetro que mede a velocidade do vento para que o sistema de controle possa iniciar ou parar a rotação para evitar danos físicos ao aerogerador quando atingir grandes velocidades;
- 6) Rotor: comporta as pás e regula a angulação destas quando necessário;
- 7) Gerador: transforma a energia mecânica em energia elétrica;
- 8) Sistemas de freio a disco: é um freio de segurança, usado em momentos em que o freio aerodinâmico das pás ou da partida não funcionem;
- 9) Torre de sustentação: estrutura que mantêm os componentes elevados e fixos, atualmente formada de metal ou concreto;
- 10) Controle de Giro: faz o controle da velocidade, carga e direção do rotor. Responsável por alterar o ângulo das pás, diminuindo a incidência do vento em situações de ventos muito fortes;
- 11) Sistemas de Controle: composto por um microprocessador que realiza o controle de temperatura, sobrecarga, condições elétricas e mecânicas, evitando mau funcionamento;
- 12) Sistema de freio aerodinâmico: realiza a frenagem por meio da angulação das pás para que a potência nominal do aerogerador não seja extrapolada.

## **2.4 Retrospectiva regulatória da GD no Brasil**

O primeiro passo que permitiu a expansão do uso da geração distribuída foi a criação de uma regulamentação que definisse os critérios de utilização dessa tecnologia no Brasil e este foi dado em 13 de fevereiro de 1995, em que foi promulgada a Lei n.º 8.987/1995, também conhecida como Lei das Concessões. Esta lei se refere à concessão às empresas do setor privado na prestação de serviços públicos mediante a aprovação de uma licitação. A partir desta, implicou-se a necessidade de alterações na regulamentação vigente no setor elétrico e permitiu um aumento significativo da geração distribuída no setor (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 1995).

Aliada à Lei das Concessões, surgiu a lei de n.º 9.074 de 1995, que regulamenta o produtor independente como pessoa jurídica ou consórcio de empresas e que possui o objetivo final de comercializar a energia gerada, enquanto a lei de n.º 9.427 de 1996 garante os direitos do autoprodutor de energia, seja ele pessoa física,

jurídica ou consórcio de empresas, cujo objetivo é o consumo de energia e a comercialização apenas do excedente (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 1995; CÂMARA DOS DEPUTADOS, 1996).

Por meio da resolução 112 da ANEEL, no ano de 1999, permitiu-se a repotenciação de fontes alternativas de energia e termelétricas, logo, como os requisitos mínimos de potência foram redefinidos, conseqüentemente se tornou possível o uso de fontes de energia em potências mais baixas (SOUSA, 2016).

Além disso, em 2004 o decreto 5.163 somado à Lei n.º 10.848 e a resolução 077/2004 permitiram que empreendimentos de potência inferior à 30 MW e que utilizem a GD como fonte de geração pudessem solicitar reduções de até 50% nas tarifas relacionadas às parcelas correspondentes ao uso da transmissão e distribuição de energia, deste modo, foram definidos conceitos imprescindíveis e incentivos do ponto de vista financeiro para o desenvolvimento da Geração Distribuída (ANEEL, 2004).

No ano de 2012 houveram dois marcos regulatórios importantes. O primeiro foi a Resolução Normativa n.º 481 que modificou a resolução 077/2004 incentivando os empreendimentos de GD por meio de um aumento significativo no desconto das tarifas relacionadas às parcelas correspondentes ao uso da transmissão (TUST) e distribuição (TUSD) de energia de 50% para 80% para as usinas que estivessem em funcionamento até o ano de 2017, sendo que esta redução de 80% durará até 10 anos após o início da operação da usina, depois deste período a tarifa retorna para a redução de 50% (ANEEL, 2012; ANEEL, 2004).

O segundo marco se refere à Resolução Normativa 482/2012, que estabelece as definições para GD de pequeno porte. Enquadra-se no conceito de microgeração distribuída, uma central geradora de energia elétrica, cuja potência instalada é menor ou igual a 100 kW. Enquanto isso, a minigeração distribuída é uma central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 1 MW, devendo ser maior que 100 kW. Nesta Normativa também foram estabelecidas regras de compensação de energia consumida pela energia gerada, tanto no caso das microgerações, quanto das minigerações distribuídas (ANEEL, 2012).

Por meio da Resolução 687, no ano de 2015 foram reajustados os limites de potência instalada tanto para microgeração distribuída, que teve o teto reduzido de 100 kW para 75 kW, quanto para minigeração distribuída, que teve seus intervalos ajustados para valores acima de 75 kW até 5 MW (ANEEL, 2015).

Por fim, fica evidente que atualmente no Brasil só existem regras relacionadas a interconexão entre a rede de distribuição convencional e a micro, e mini geração distribuída, as quais preveem apenas a compensação de energia a partir da produção excedente de energia (MARTINS, 2020).

## **2.5 Smart grids**

O nome *Smart grid*, pode ser traduzido como "rede de energia elétrica inteligente". Este conceito permite principalmente que seja integrada à rede a área de tecnologia de informação, de modo a otimizar principalmente as etapas de geração e de distribuição de energia elétrica. Tendo por objetivo principal solucionar um dos maiores problemas do sistema elétrico convencional, que é manter o equilíbrio entre a necessidade de demanda dos consumidores com a demanda da geração, basicamente equilibrando a relação entre oferta e demanda existente entre estas duas partes. Observa-se que nesta relação de ajuste entre oferta e demanda se faz necessário possuir uma reserva de armazenamento elétrico (CALLEJO, 2020).

Para que uma rede elétrica se enquadre no conceito de uma *Smart Grid* ela deve atender a alguns requisitos, tais como: flexibilidade, acessibilidade e confiabilidade. A flexibilidade nos diz respeito não somente a uma certa adaptabilidade às mudanças tecnológicas que ocorrerão no futuro, como também, se relaciona ao foco no atendimento às necessidades do consumidor (CALLEJO, 2020).

Outro ponto importante citado é a confiabilidade da rede, ou seja, deve-se garantir que a rede tenha um fornecimento de alta qualidade e contínuo de energia. Enquanto isso, o requisito de acessibilidade, refere-se a integração inevitável que vem ocorrendo entre a rede elétrica convencional e a energia gerada pelas fontes renováveis, incluindo a geração de energia em pequena escala, associando-se diretamente às microrredes elétricas (CALLEJO, 2020).

Segundo Hernández (2019) uma *Smart grid* deve proporcionar novos modelos de negócio ao redor da infraestrutura da rede. Estes requerimentos buscam atingir os seguintes objetivos:

- Soluções técnicas e tecnológicas que propiciam menores custos;
- Desenvolvimento de ferramentas tecnológicas de tecnologia da informação e comunicação que possibilitem novos modelos de negócio ou novos serviços

que beneficiem as etapas de transmissão, distribuição e o próprio cliente da rede;

- Unificar marcos regulatórios e comerciais e aproveitar a infraestrutura existente da rede, adaptando o que já existe para evitar alto custo de implementação.

No Quadro 1, observa-se um comparativo entre os principais recursos da infraestrutura de uma rede convencional e da infraestrutura futura de uma *Smart Grid*.

Quadro 1 - Diferenças de infraestrutura clássica e do futuro

<b>Rede Convencional (Século XX)</b>	<b>Smart Grid (Século XXI)</b>
Eletromecânica	Digital
Comunicação unidirecional	Comunicação bidirecional
Geração centralizada	Geração distribuída
Poucos sensores	Rede monitorada por sensores
Propensa a falhas e desconexões	Proteção ajustável
Decisões humanas suscetíveis a erro	Decisões baseadas em sistemas e dados
Controle limitado dos fluxos de potência	Total controle dos fluxos de potência
Informação de preço de energia impreciso	Informação de preço de energia em tempo real
Consumidores passivos	Consumidores ativos

Fonte: Adaptado de Hernández (2019).

Assim como a rede elétrica convencional, a estrutura da *smart grid* continua possuindo os componentes elétricos, eletrônicos e mecânicos tradicionalmente utilizados, porém, é uma rede muito mais digitalizada, integrada e orientada a dados.

Quanto ao conceito de bidirecionalidade, esta pode ser dividida em dois casos: a bidirecionalidade dos dados, com elementos de medição (*smart meters*) nos pontos de produção (geração) e de consumo de energia e que nos fornecem dados significativos para a rede. O outro caso se refere à bidirecionalidade dos fluxos de energia, uma vez que agora o consumidor está se tornando também um produtor de energia, originando, portanto, o termo "prosumer" (LEME, 2020).

A rede clássica possui uma certa centralização na geração de energia, sendo que as *smart grids* estão alterando esta tendência com o grande crescimento da geração distribuída. A rede clássica possui alguns sensores, porém, nas *smart grids* a rede possui muitos sensores para que possa ser totalmente monitorada. Isto aumenta a proteção da rede, tornando-a menos propensa a falhas e desconexão (HERNÁNDEZ, 2019).

Além disso, proporciona uma maior precisão quanto à precificação da energia total consumida nos pontos de consumidores, por exemplo. Na *smart grid*, ao contrário da rede clássica, esta é guiada por dados, sendo que estes auxiliam na tomada de decisão e mitigam o erro humano (HERNÁNDEZ, 2019).

### 3 MICRORREDES

Observa-se a partir dos conceitos explorados no capítulo anterior que as microrredes são uma associação entre a geração distribuída e as *smart grids* (MENDONÇA, 2014).

As características encontradas em uma *smart grid* são potencializadas quando utilizadas microrredes, uma vez que estas proporcionam um melhor gerenciamento das cargas e conseqüentemente uma maior confiabilidade da rede, sem contar uma melhora econômica com novos meios de monitoramento e ainda associado a geração distribuída que garante menor impacto do ponto de vista ambiental (MENDONÇA, 2014).

#### 3.1 Definição de microrredes

Uma microrrede pode ser descrita como um conjunto de cargas e fontes de geração distribuída que atuam para suprir o consumo de energia elétrica de clientes agrupados ou dispersos e que façam parte da microrrede, de modo que esta seja operada de forma coordenada (MARINHO, 2011).

Outra definição, segundo os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, estabelecida pela resolução normativa ANEEL n.º 956 (2021), define-se o conceito de microrrede como um: “[...] sistema elétrico de pequeno porte com cargas e Recursos Energéticos Distribuídos com capacidade de operar ilhado ou conectado à rede de distribuição [...]”.

Quando comparada a um sistema de geração de energia convencional, a microrrede possui uma capacidade de geração de energia muito menor. Em contrapartida, as microrredes tendem a ser instaladas próximas às regiões das cargas, ou seja, onde a energia será utilizada. Desta forma é possível evitar grandes perdas e menores custos que ocorrem devido à utilização das linhas de transmissões, além de garantir um nível de tensão e frequência satisfatórios e menores (CHOWDHURY *et al.*, 2009).

Cabe ainda ressaltar que uma microrrede normalmente é um sistema de baixa ou média tensão e possui algumas características específicas de uma rede inteligente com uma estrutura bem definida quando comparada ao sistema elétrico em geral. Além disso, a atuação chave de uma microrrede está na etapa de distribuição de

energia elétrica, uma vez que nesta etapa, o sistema convencional de energia apresenta muitas falhas. Deste modo, a microrrede aumenta a confiabilidade do sistema elétrico em geral, pois, possui geração e gerenciamento próprios dos recursos, ou seja, seus consumidores estão menos sujeitos às falhas ocorridas no sistema convencional de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (SOUZA; BONATTO; RIBEIRO, 2020).

Há diversas questões que envolvem a padronização dos conceitos de microrrede. Segundo Hernández (2019), as microrredes podem ser classificadas por sua capacidade, função e tipo de corrente, como detalhado no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação das microrredes elétricas

Tipo de Classificação	Nomenclatura da Microrrede Elétrica
Função	Simple Múltipla Empresa comercializadora de eletricidade
Capacidade (MW)	Simple (2MW) Corporativa (2-5MW) Área de alimentação (5-20MW) Área de subestação (20MW) Independente (Potência não definida)
Tipo de corrente	Corrente contínua Corrente alternada Híbrida em corrente alternada e contínua

Fonte: Hernández (2019).

Observa-se que estas nomenclaturas de Hernández (2019) trazem alguns conceitos importantes, tais quais:

- Microrrede elétrica simples: possui apenas um tipo de geração distribuída com funcionalidades e design simples, sendo empregadas para abastecer cargas críticas, ou seja, equipamentos em que não pode haver desconexão com a rede elétrica;
- Microrrede elétrica múltipla: o design e o modo de operação desta microrrede são mais complexos, sendo constituída por um conjunto de microrredes elétricas simples ou ainda vários tipos de gerações distribuídas, de modo que

em casos de ocorrência de algum problema com a rede principal, esta deve conseguir operar em modo ilhada e ainda deve ser capaz de distinguir as cargas não essenciais e desconectá-las temporariamente para assegurar a conectividade das cargas críticas, balanceando assim o fluxo de potência da rede;

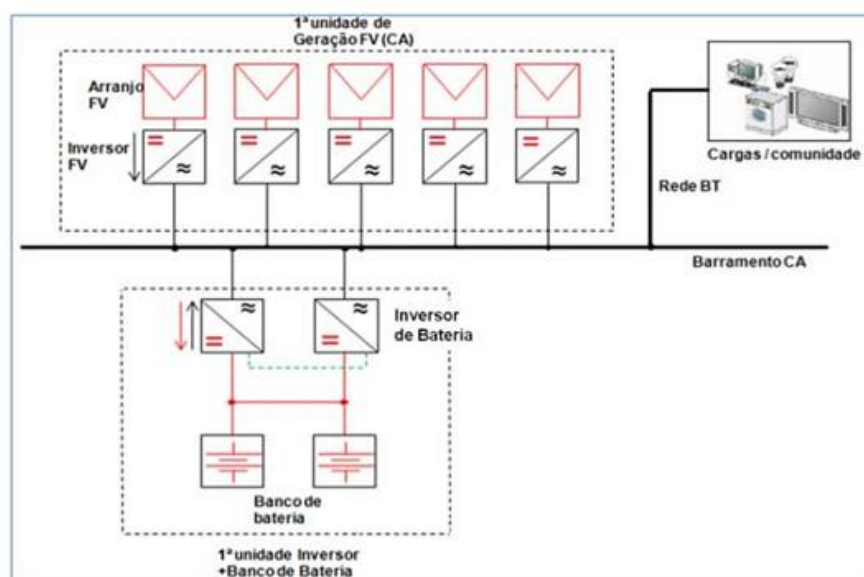
- Microrrede elétrica de empresas de bens e serviços: neste caso a geração distribuída e as microrredes devem seguir algumas características técnicas específicas de cada empresa, existe também uma priorização das cargas com base em critérios definidos pelo usuário e ainda uma prioridade maior para o caso de cargas críticas.

Um exemplo típico de empresa de bens e serviços que utilizam este tipo de microrrede elétrica no Brasil são as usinas sucroalcooleiras que geram energia a partir da biomassa, ou seja, pela queima do bagaço da cana-de-açúcar.

Observa-se, por meio das Figuras 4, 5 e 6 que existem diferentes configurações de microrredes elétricas de acordo com seu tipo de corrente.

Para o circuito ilustrado na Figura 4, tem-se a configuração de uma MIGDI - microssistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica, utilizando como fonte de energia renovável, painéis fotovoltaicos, caracterizados como fonte intermitente de energia. Este tipo de configuração está sendo utilizado ativamente no Brasil, principalmente pelo programa Luz para Todos.

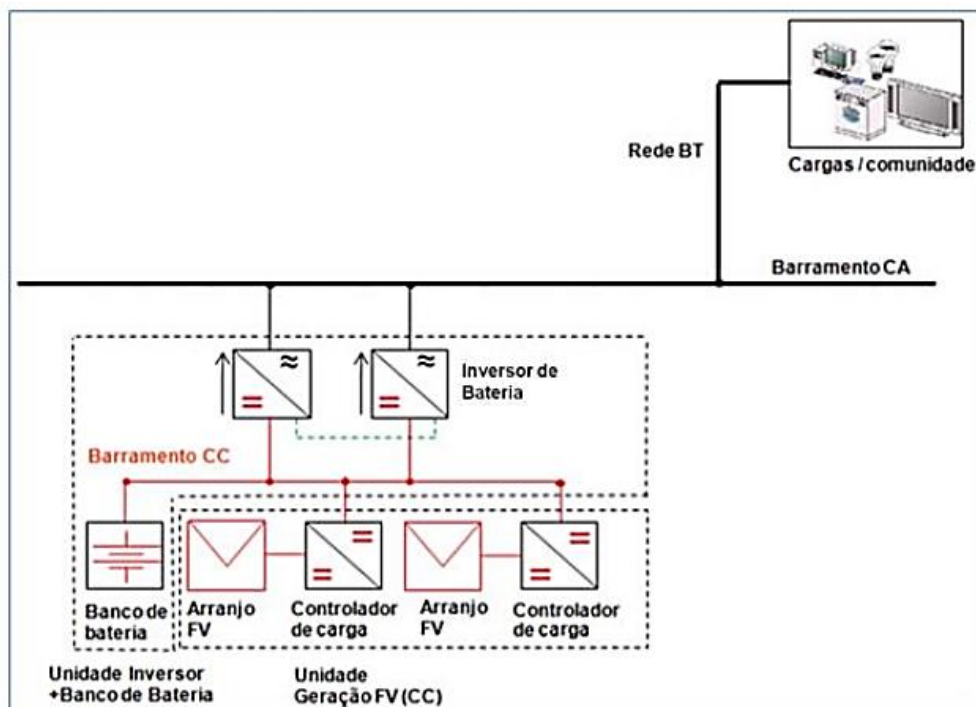
Figura 4 – Microrrede elétrica em corrente alternada



Neste exemplo, tem-se a utilização de um barramento de corrente alternada, ou seja, utiliza-se de inversores tanto nos pontos de saída de corrente dos sistemas fotovoltaicos que naturalmente geram energia em corrente contínua, quanto na saída do conjunto de baterias que armazena a energia deste último, garantindo que o consumidor final receba a energia em corrente alternada.

Para o circuito ilustrado na Figura 5, tem-se ainda a configuração de uma MIGDI, utilizando como fonte de energia renovável, painéis fotovoltaicos, porém, neste exemplo, tem-se a utilização de um barramento de corrente contínua, ou seja, utiliza-se de inversores apenas nos pontos comuns de saída de corrente contínua após o barramento CC, interligando e convertendo a corrente CC para CA, garantindo assim que o consumidor final receba a energia em corrente alternada.

Figura 5 – Microrrede elétrica em corrente contínua

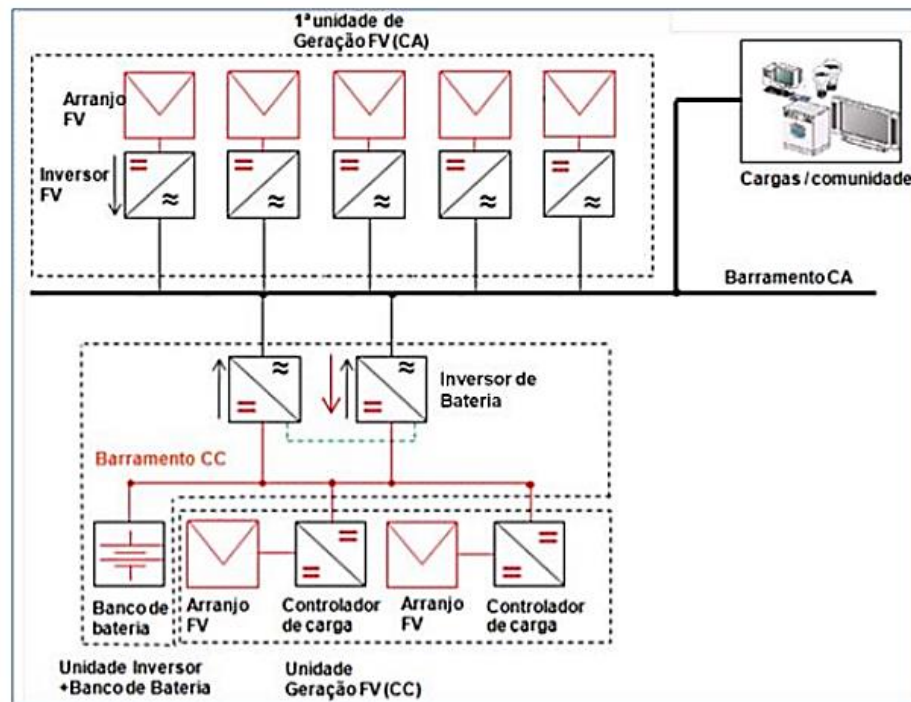


Fonte: Eletrobras (2017).

Por fim, no circuito ilustrado na Figura 6, tem-se ainda a configuração de uma MIGDI, utilizando como fonte de energia renovável, painéis fotovoltaicos em unidades de corrente contínua e em corrente alternada, neste caso, tem-se a utilização da junção das duas estruturas anteriores com um conjunto de inversores interligando diretamente o arranjo fotovoltaico ao barramento CA e um conjunto de inversores

convertendo a corrente advinda de um barramento CC em CA, mais uma vez garantindo assim que o consumidor final receba a energia em corrente alternada.

Figura 6 – Microrrede elétrica em CA/CC

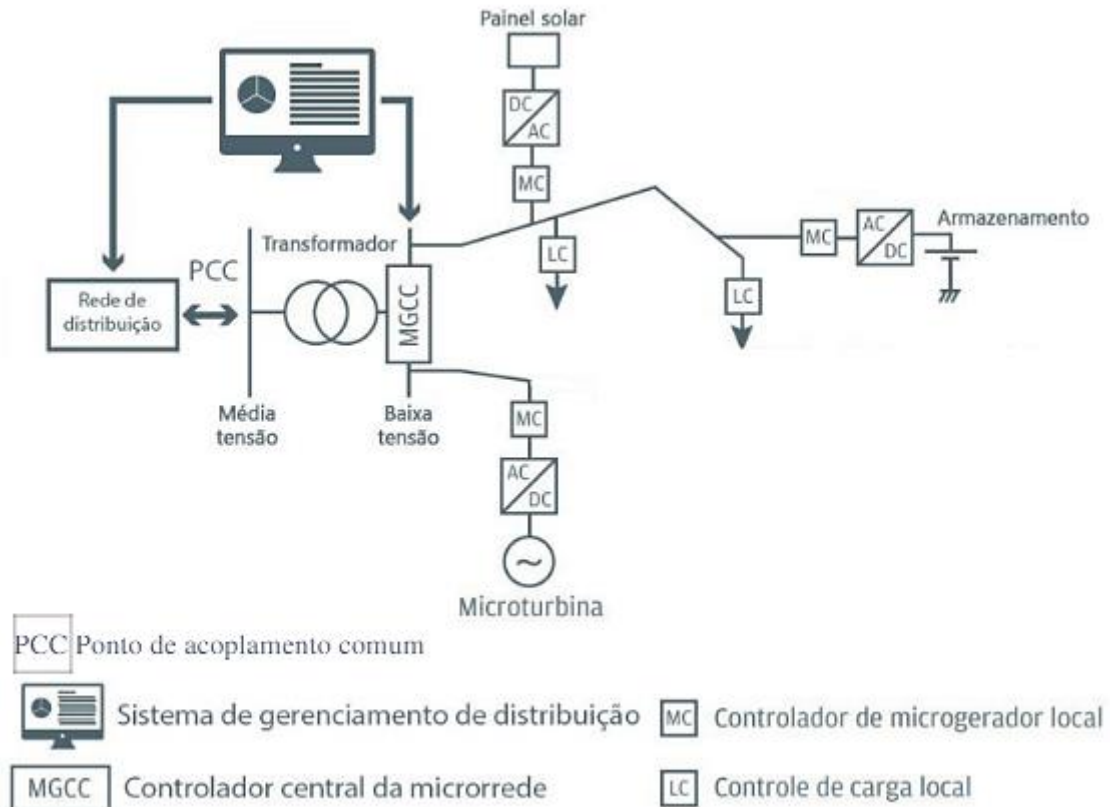


Fonte: Eletrobras (2017).

Observa-se ainda que a utilização de uma das três arquiteturas descritas anteriormente fica a critério do projetista da rede, uma vez que cada uma delas podem vir a ser mais interessantes a depender do custo, disponibilidade espacial e da natureza das cargas que serão abastecidas pela microrrede.

De acordo com as definições de microrredes de Callejo (2020) uma rede elétrica isolada, por si só não pode ser considerada uma microrrede elétrica, pois, o conceito de microrrede elétrica está justamente em sua capacidade de acoplar e desacoplar do sistema elétrico de potência, utilizando-se softwares (algoritmos) e hardwares para este controle. Logo, para que seja considerada microrrede, esta deve possuir um ponto de acoplamento comum, também conhecido de *point of common couple* (PCC), ou seja, um ponto do circuito elétrico em que a microrrede se conecte ou desconecte da rede de distribuição, podendo esta ser em baixa ou média tensão, como exemplificado na Figura 7.

Figura 7 – Ponto de acoplamento comum em uma microrrede elétrica



Fonte: Adaptado de Castro (2015).

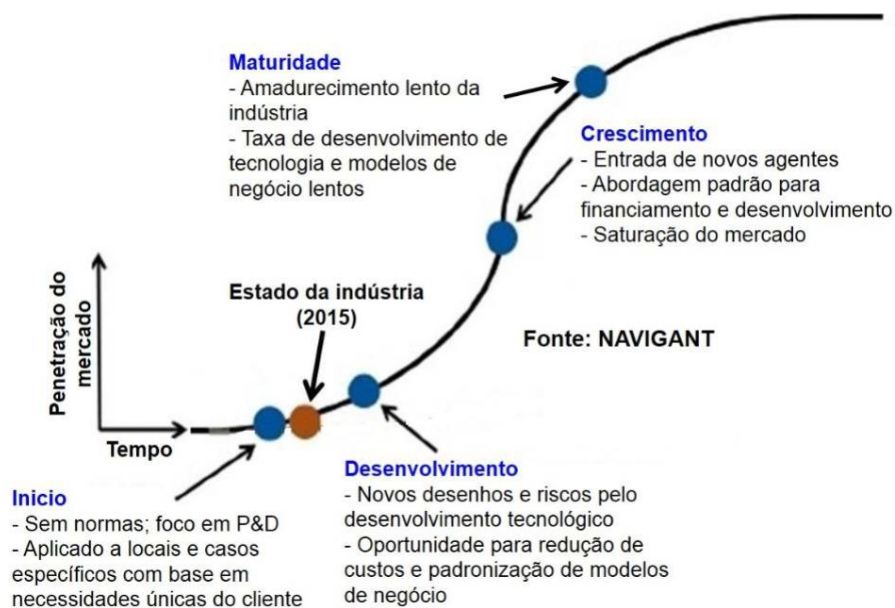
Vale ressaltar que esta operação de conexão ou desconexão com a rede de distribuição comandada pelo controlador ocorre por meio de um disjuntor, religador ou chave estática.

Bellido (2018), denomina que as redes isoladas são consideradas microrredes e as classifica como microrredes tradicionais ou convencionais, sendo este o posicionamento adotado neste trabalho em questão, uma vez que uma das características mais marcantes das microrredes é a de permitir que a eletricidade chegue aos pontos mais afastados, locais onde não há rede de distribuição e que não seria possível o desenvolvimento tecnológico sem a existência de fontes de eletricidade advindas da geração distribuída. Enquanto isso, as microrredes abordadas até então podem ser classificadas como microrredes inteligentes ou apenas microrredes.

### 3.2 Cenário atual das microrredes inteligentes

Apesar de ser um tema cada vez mais discutido no cenário atual, ainda são poucos os casos de microrredes inteligentes em pleno funcionamento. Muitos foram os avanços obtidos em laboratórios e estudos de caso para implantação deste tipo de rede, porém, como será exposto a seguir, são vários os fatores e agentes a serem considerados para a implantação deste modelo de arquitetura. Observa-se que as microrredes ainda estão em uma etapa inicial de implementação, como pode ser observado na Figura 8, que mostra o ponto em que esta tecnologia se encontrava mundialmente na indústria no ano de 2015, sendo que principalmente no Brasil não houveram grandes mudanças desde então (BELLIDO, 2018).

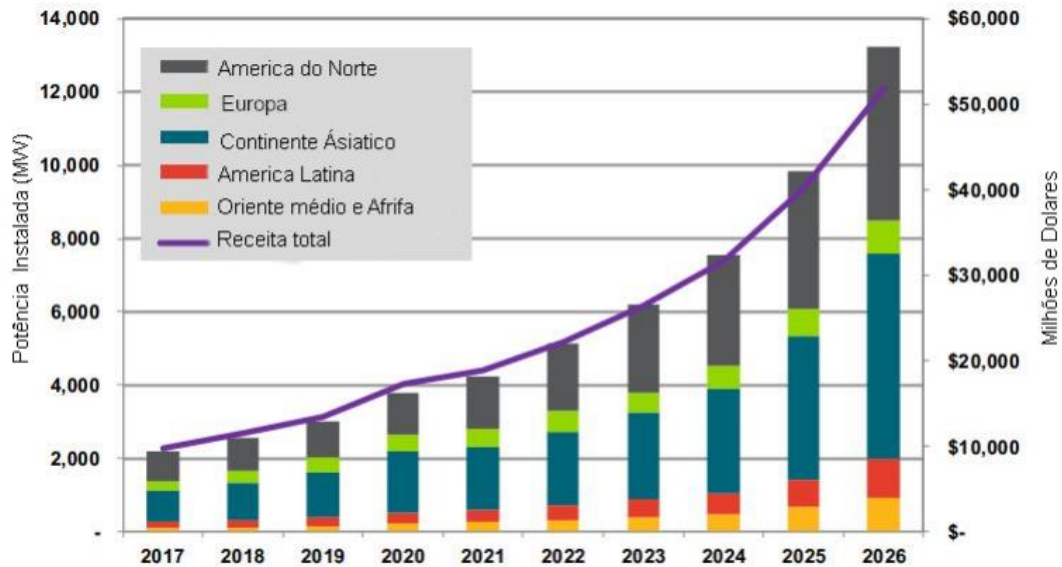
Figura 8 – Estado da indústria no desenvolvimento das microrredes



Fonte: Navigant (2015b).

Sobre este cenário, estima-se que a curva de crescimento do investimento realizado em tecnologia de microrredes nos próximos anos será acentuado. Este comportamento pode ser justificado por meio das informações obtidas pela Figura 9.

Figura 9 – Investimento projetado para microrredes



Fonte: Adaptado de Navigant (2017).

É notório no gráfico da Figura 9 que a maior parte dos investimentos projetados ocorrerão na América do Norte, principalmente nos Estados Unidos, que concentra grande parte dos projetos de microrredes elétricas, somando 36,3% dos 6.610 projetos existentes no mundo até o ano de 2020, aproximadamente 2.400 projetos (WOOD, 2020).

Observa-se, ainda, um interesse em microrredes por parte dos EUA não apenas econômico, uma vez que estas atuam muito bem na questão da confiabilidade e segurança quando associadas a rede de distribuição de energia convencional.

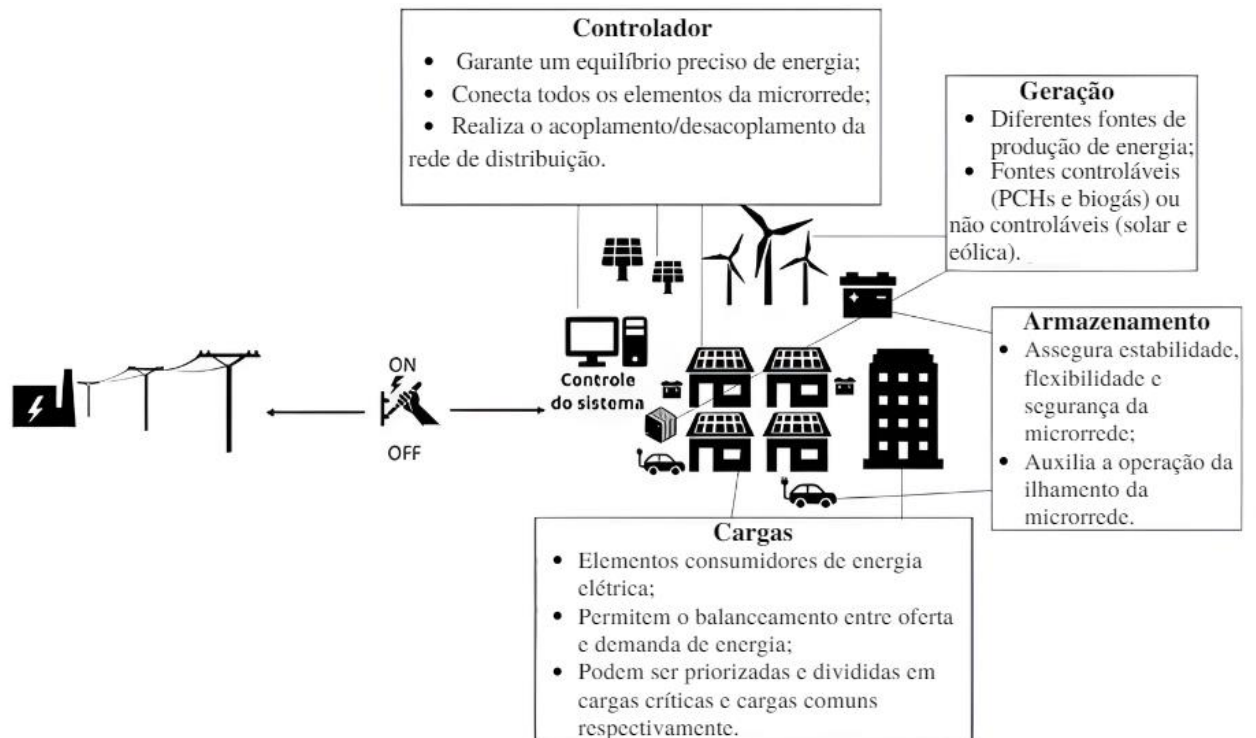
Estes fatores, tornam as microrredes estruturas de suma importância, tendo em vista que há diversos países que, assim como os EUA, sofrem com as mais diversas causalidades relacionadas a tornados, terremotos e outros desastres naturais, fatores estes que acentuam a importância da descentralização da rede de distribuição com o auxílio das microrredes.

Enquanto isso, no Brasil, tem-se um crescimento acentuado na utilização de microrredes e microgeração distribuída. Um exemplo evidente é a larga utilização de microrredes isoladas no programa conhecido como “Luz para todos”, o qual construiu diversas microrredes com a finalidade de garantir a acessibilidade ao fornecimento de energia elétrica no país, principalmente em regiões onde ainda existem áreas de difícil acesso e que não há transmissão e distribuição da energia elétrica, como é o caso principalmente das regiões norte e nordeste do país.

### 3.3 Composição principal de uma microrrede elétrica

A Figura 10 ilustra os principais componentes existentes em uma microrrede elétrica.

Figura 10 – Componentes e funcionamento básico de uma microrrede



Fonte: Warneryd *et al.* (2020).

Apesar de existirem diversos outros componentes que possam formar uma microrrede elétrica, podemos dividi-la em alguns elementos principais, tais como: geração, armazenamento, cargas e controle (CALLEJO, 2020; BELLIDO 2018). Cada um destes componentes serão melhor detalhados nos próximos tópicos apresentados.

### 3.3.1 Geração

A geração de uma microrrede utiliza basicamente como fonte(s) de energia a geração distribuída, podendo ser formada por apenas um ou variados tipos de fontes de GD, desde que estejam disponíveis localmente. Segundo Bellido (2018) estas podem ser divididas em fontes controláveis, como o caso das PCHs ou das plantas de biogás, e, em fontes não controláveis, ou seja, que dependem de fatores totalmente externos ao controle humano, como as fontes de energia solar e eólica.

Para desenvolvimento de um projeto de microrrede, principalmente em regiões isoladas, podem ser utilizados diversos sistemas de geração de energia elétrica. As mini ou microcentrais hidrelétricas, por exemplo, geram energia usando a vazão da água de rios, córregos e quedas d'água para rotação de microturbinas, enquanto, uma usina solar fotovoltaica, converte a incidência da luz solar em energia (SOUZA JR *et al.*, 2019).

Outra forma de geração é a eólica, que aproveita a força dos ventos e converte a energia gerada pela rotação das turbinas em energia elétrica. Enquanto isso, as células de combustíveis utilizam o gás hidrogênio e convertem a reação química em energia de forma muito eficiente e com baixo impacto ambiental (SOUZA JR *et al.*, 2019).

Por fim, tem-se a bioenergia e a utilização geradores térmicos em pequena escala. Como observado no Tópico 2.2, são mais interessantes quando utilizadas em conjunto, garantindo uma alta eficiência por meio da queima da biomassa, que aquece uma caldeira e produz vapor d'água, que gira uma turbina, gerando energia, podendo, ao final, condensar e reaproveitar a água para um novo processo (SOUZA JR *et al.*, 2019).

Finalmente, a escolha de uma geração ou outra depende muito da região em que ficará situada a microrrede. Em uma região em que há uma constante incidência solar, opta-se pela geração fotovoltaica, já na Região Nordeste do Brasil uma das melhores opções seria a energia eólica devido à grande ocorrência de ventos ou ainda a combinação das duas anteriores em conjunto com um gerador a diesel, para geração mesmo em situações que não há sol ou vento e que a reserva das baterias já foi utilizada, neste caso formando um sistema híbrido (ELETROBRAS, 2017).

Dessa forma, garante-se a confiabilidade da rede, cabendo ressaltar que as microrredes são flexíveis de tal forma que, possuindo um módulo fotovoltaico, nada

impede que seja acrescentado um módulo de bioenergia, se viável e necessário, podendo ser reconfigurada com uma certa facilidade (SOUZA JR *et al.*, 2019).

Da mesma forma que, em caso de falha de um dos módulos, o outro continua em funcionamento independente até que os outros sejam reestabelecidos. Outra característica importante da microrrede é o *plug-and-play*, que se refere a possibilidade de conectar a GD em qualquer ponto da rede de distribuição sem que haja qualquer prejuízo para ambas as redes do ponto de vista de controle (SOUZA JR *et al.*, 2019).

Por serem sistemas de baixa e média tensão, as microrredes normalmente não ultrapassam potências de 50 MW, entretanto as maiores microrredes do mundo chegam respectivamente a 100 MW de armazenamento solar e 135 MW em um sistema que envolve calor combinado e geração de energia por meio da microrrede, com pico de 62 MW (JÚNIOR; FREITAS, 2020; BURGER, 2018).

### 3.3.2 Armazenamento

O armazenamento permite que a microrrede reserve energia quando houver excesso de produção e se torne mais estável, servindo como um apoio à geração distribuída e permitindo uma certa flexibilidade no uso da energia por meio desse armazenamento. Dessa forma, a energia armazenada pode ser utilizada em momentos em que haja uma certa escassez de energia ou em falhas no sistema de distribuição, auxiliando também na operação de ilhamento da microrrede (BELLIDO, 2018).

Além disso, este elemento ainda atenua os problemas causados pela volatilidade das fontes de energia renováveis, protegendo a rede de distribuição principal e também auxiliando na segurança e confiabilidade da microrrede no que tange a situações extremas como um “*black out*”, possibilitando o que chamamos de “*black start*”, que basicamente seria uma rápida restauração da microrrede utilizando a energia armazenada (BELLIDO, 2018).

As recentes pesquisas de Fan *et al.* (2020) indicam que para o caso específico de armazenamento de energia gerada nas microrredes, devem ser considerados todos os fatores já citados, e ainda, a capacidade de regular tensão e frequência para garantir um equilíbrio em tempo real com cargas não uniformes na rede e a

manutenção do nivelamento da carga para equilibrar as lacunas que surgirem na demanda de energia.

Ainda do ponto de vista técnico, um armazenamento otimizado para operação de uma microrrede, deve possuir uma longa vida útil, ser altamente eficiente e com uma rápida capacidade de carga e ainda contar com uma descarga lenta de energia (LASSETER, 2002).

Para conexão dos sistemas de armazenamento à rede podem ser utilizados condicionadores de energia. Estes componentes nada mais são do que conversores estáticos de potência, responsáveis por realizar a transferência de potência entre dois pontos do sistema. Além disso, podem ser conversores do tipo fonte de corrente ou ainda do tipo fonte de tensão e estão geralmente associados a controladores que serão responsáveis por garantir a qualidade de energia e estabilidade do sistema de armazenamento (DANIEL, 2022).

Como exemplos de sistemas de armazenamento que estão sendo estudados e desenvolvidos especificamente para o uso em microrredes, podem ser citados: bancos de baterias, ultracapacitores, volantes de inércia e as bobinas supercondutoras, que ainda possuem grandes limitações técnicas (BELLIDO, 2018; CALLEJO, 2020; FAN *et al.*, 2020).

### **3.3.2.1 Banco de baterias**

Este tipo de armazenamento é o mais utilizado atualmente em microrredes, principalmente as baterias eletroquímicas, como é o caso das baterias de chumbo ácido e de íons de lítio. A primeira é uma das mais empregadas por conta do baixo custo, porém possui algumas limitações, como, por exemplo, o material que é extremamente prejudicial ao meio ambiente, além de possuir uma baixa eficiência e uma vida útil curta, o que a torna menos propícia para ser utilizada em uma microrrede (DANIEL, 2022).

Enquanto isso, a bateria de íons de lítio possui maior vida útil, eficiência e capacidade de armazenamento para um mesmo volume, quando comparada a bateria de chumbo ácido, por exemplo. A escolha da bateria pode variar segundo as necessidades do projeto, visto que cada tipo de bateria tem suas vantagens e desvantagens, outros exemplos de bateria são: zinco-bromo, íon híbrido aquoso, Tesla "Powerwall" e níquel-cádmio sódio (DANIEL, 2022).

Uma das principais limitações de uma bateria está relacionada ao descasamento de tensão dentro das células de um banco de baterias. Para resolução deste problema existem algumas técnicas para realizar um balanceamento de tensão de forma ativa ou passiva (GEORGIOUS *et al.*, 2021).

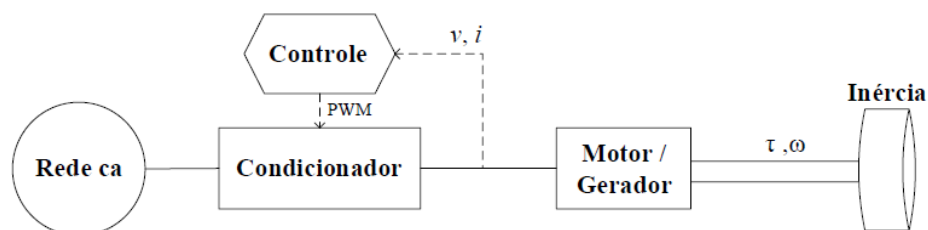
Outra questão a ser considerada é a carga e descarga de energia, que devem estar dentro dos níveis nominais para preservar a vida útil das baterias, além disso, deve-se observar também os transitórios de energia que em certos níveis podem danificar o banco de baterias. Por fim, um último fator a ser considerado é a temperatura, pois, quando expostas a altas temperaturas, é necessário que sejam refrigeradas para evitar danos ao banco de baterias (GEORGIOUS *et al.*, 2021).

Segundo Fan *et al.* (2020), as baterias atuais ainda não atendem a todos os requisitos necessários para uma atuação ótima nas microrredes e conclui que as pesquisas e desenvolvimento de baterias deveriam se concentrar nas baterias de íon de sódio, uma vez que são materiais de baixo custo e encontrados de maneira abundante.

### 3.3.2.2 Volante de Inércia

Na Figura 11 se observa um sistema básico baseado em um volante de inércia, composto por um motor ou gerador, a depender do fluxo de energia, conectado a rede CA por meio de um condicionador de energia e um volante de inércia na extremidade (DANIEL, 2022).

Figura 11 – Sistema baseado em um volante de inércia



Fonte: Daniel (2022).

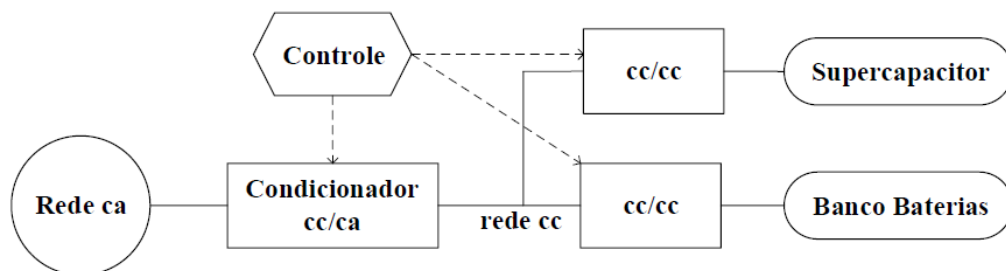
O volante de inércia possui a capacidade de armazenamento de energia cinética por meio de seu movimento rotacional e se conecta a um motor e gerador, pois, hora recebe energia da rede e hora pode transformar a energia cinética em

elétrica uma vez que está acoplada ao gerador. Possui alta densidade energética, uma alta vida útil e baixa emissão de elementos nocivos ao meio ambiente. Este tipo de armazenador é normalmente utilizado de forma híbrida com um banco de baterias, por exemplo, regulando a tensão e prolongando sua vida útil (DANIEL, 2022).

### 3.3.2.3 Supercapacitores

Os supercapacitores, são capacitores com uma maior capacidade, porém possuem baixos limites de tensão. Além disso, por meio da diferença de potencial entre seus eletrodos conseguem realizar uma rápida carga e descarga de energia, ou seja, possuem um rápido tempo de resposta e uma vida útil elevada quando comparada a outros armazenadores (GEORGIOUS *et al.*, 2021).

Figura 12 – Armazenamento híbrido com supercapacitor e banco de baterias.



Fonte: Daniel (2022).

Neste tipo de armazenamento a energia química é convertida em energia elétrica por meio da energia eletroquímica. Porém, a utilização deste armazenador é normalmente realizada de forma híbrida, ou seja, em conjunto com outros armazenadores, como o caso exemplificado na Figura 12, que utiliza um banco de baterias aliado ao supercapacitor. Desse modo, o banco de baterias tem sua vida útil prolongada devido ao uso do supercapacitor durante os transitórios de energia (DANIEL, 2022).

### 3.3.3 Cargas

As cargas de uma microrrede elétrica podem ser descritas como os elementos consumidores da energia elétrica, estas, ainda podem ser divididas em cargas críticas:

tipos de cargas que devem ser prioridade no abastecimento de energia, pois, é de suma importância que permaneçam ativas por meio da energia fornecida pela microrrede.

Pode-se destacar locais como hospitais, com diversos aparelhos ou cargas críticas, dos quais os pacientes dependem diretamente do modo a garantir sua sobrevivência. Já no caso das cargas comuns: estas devem ser abastecidas, desde que haja disponibilidade de energia elétrica suficiente para atendimento das cargas críticas, caso contrário elas podem ser desconectadas da microrrede temporariamente até que seja restaurada a força total de abastecimento da rede (CALLEJO, 2020; BELLIDO 2018).

Por fim, estas configurações possibilitam um melhor equilíbrio da rede no que tange ao modo de operação desta, uma vez que permitem uma relação de oferta e demanda mais flexíveis, otimizando a utilização dos recursos de energia distribuída.

Permitem também o aprimoramento da confiabilidade e qualidade de energia da rede em relação às cargas críticas, reduzindo as demandas máximas de energia e auxiliando na identificação da energia que entra e sai da rede principal. Além disso, possibilitam a estabilização da tensão e frequência, favorecendo as restrições necessárias para operação em modo ilhado, no que diz respeito à geração e as cargas da microrrede (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

### **3.3.4 Controlador**

O controlador de uma microrrede, em síntese, é o responsável por conectar todos os outros elementos de modo que estes operem em conjunto.

De acordo com Mendonça (2011), as principais funções do controlador de uma microrrede que está em modo de conexão com a rede de distribuição são:

- Garantir o sincronismo das trocas de energia entre a microrrede e a rede de distribuição;
- Assegurar a estabilidade do sistema;
- Monitorar a microrrede por meio dos dados coletados durante as operações;
- Realizar o desacoplamento da microrrede em relação à rede principal de distribuição, alternando para modo ilha.

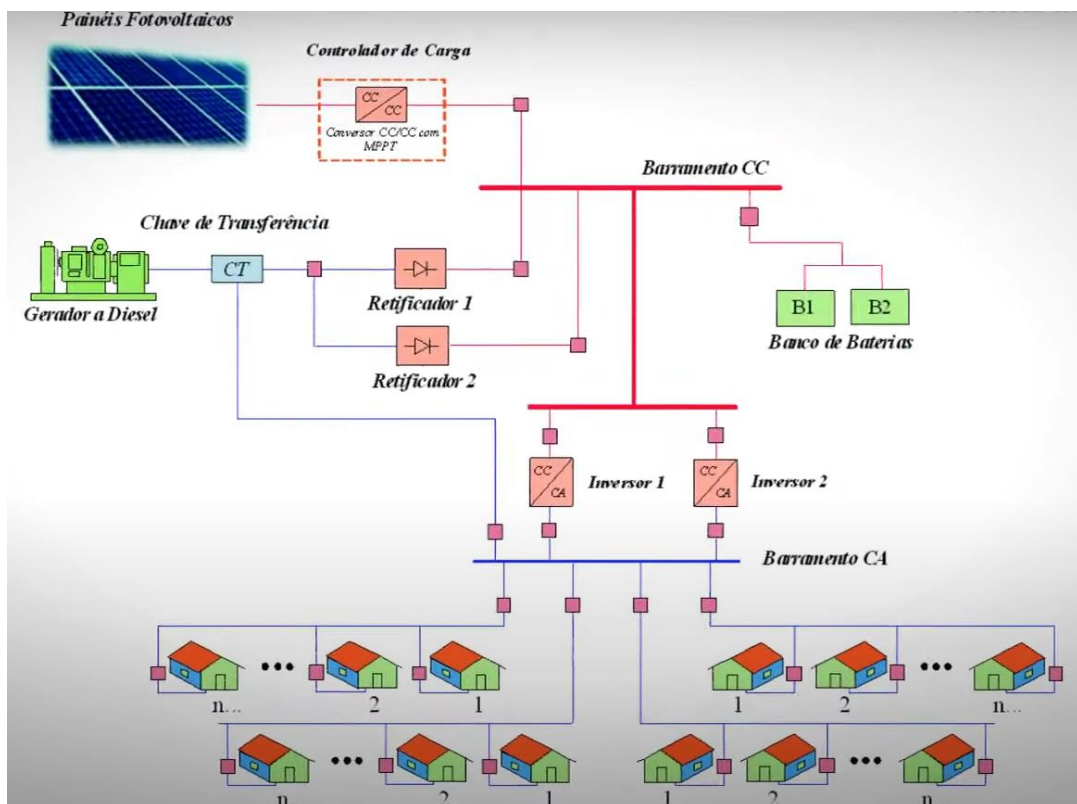
Quando em modo ilha, as principais funções do controlador de uma microrrede são:

- Manter a priorização de alimentação nas cargas mais críticas, medindo sempre a quantidade de energia disponível;
- Administrar os bancos de baterias ou outros sistemas de armazenamento de energia que estejam sendo utilizados na microrrede;
- Verificar a viabilidade de reconexão com a rede principal de distribuição.

### 3.4 Microrredes no Brasil

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética existem cerca de 250 microrredes isoladas no Brasil, sendo que grande parte está localizada nas regiões norte e nordeste do país (EPE, 2022). A Figura 13 esquematiza uma microrrede isolada existente em Ilha Grande, no Maranhão.

Figura 13 – Microrrede Isolada da Ilha Grande



Fonte: Instituto de Energia Elétrica (2022).

O sistema é composto por um gerador fotovoltaico, formado por 126 módulos de 245 Wp, totalizando 31 kWp, além de um gerador a diesel para *backup* com 53 kVA. Ambos os sistemas fornecem 380 VCA fase-fase e 240 VCA fase-neutro a 60 Hz de frequência (INSTITUTO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022).

Possui, também, dois inversores de 30 KVA, tendo sido criados especialmente para o projeto. O controlador foi desenvolvido para funcionamento sempre no ponto de máxima potência dos geradores, garantindo uma maior eficiência enquanto as baterias não estiverem com carga total. Composta por banco baterias estacionárias ventiladas e do tipo chumbo ácido com potência nominal de 120 VCC e 1200 Ah (INSTITUTO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022).

Outro exemplo é o Projeto Sistema Elétrico Modular que atende a região remota Ilha dos Lençóis por meio de fontes de energia renováveis. Desenvolvido pela CEMAR em parceria com a ANEEL, este é um sistema híbrido que gera energia por meio de 162 módulos fotovoltaicos de 130 Wp, formando um gerador fotovoltaico de 21 kWp, além de 3 turbinas eólicas de 7,5 kW e um gerador a diesel para *backup* de 53 kVA (INSTITUTO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022).

O sistema ainda possui um banco de baterias estacionárias ventiladas de chumbo-ácido composta por 240 elementos de 2 VCC e 600 Ah cada, cuja tensão nominal é de 240 VCC. Por fim, utiliza-se também, dois inversores, cada um com 30 kVA. A tensão fornecida para a comunidade é de 380 VCA fase-fase e de 220 VCA fase-neutro com frequência de 60 Hz (INSTITUTO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022).

Ambas microrredes atendem atualmente cerca de 540 pessoas, responsáveis pelo desenvolvimento das comunidades, possibilitando iluminação adequada, utilização de dispositivos eletrônicos e eletrodomésticos e até mesmo a refrigeração de alimentos, um dos principais meios de sustento e comércio nestas ilhas (INSTITUTO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022).

Além dos exemplos de microrredes citados, tem-se o projeto construído em um condomínio residencial na região metropolitana de Fortaleza – CE, pelo Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras (CERTI), UFSC e ENEL. O sistema é composto por fontes eólica e solar, sendo que seu diferencial está na capacidade de operar em ilhamento com o auxílio do sistema de armazenamento (GIFALLI, 2019).

### 3.5 Cenário regulatório do ilhamento de microrredes

É notório que um dos maiores benefícios de uma microrrede é a capacidade de operar ilhada em relação à rede de distribuição, sendo esta uma característica presente muitas vezes até mesmo na definição do que seria uma microrrede. Entretanto, a maioria dos estudos que envolvem esta prática está sempre relacionado ao anti-ilhamento, uma vez que esta operação é motivada para fins de proteção e confiabilidade da rede (MARTINS, 2020).

Observa-se ainda, que a legislação atual também foca totalmente na questão do anti-ilhamento, naturalmente de modo a garantir a proteção da rede de distribuição, principalmente no sistema de restauração do abastecimento de energia, assim como também das pessoas que realizam a manutenção da rede em caso de falha, evitando que esta esteja energizada por uma GD durante este processo (COHN, 2020).

Atualmente a norma IEEE 1547 (2018) estabelece que um ilhamento não intencional de uma GD deve ser detectado e o fornecimento da energia desta deve ser encerrado em no máximo 2 segundos, sendo que este tempo pode ser estendido até 5 segundos a depender do tempo pré-acordado com a distribuidora de energia. Esta falha tende a ocorrer principalmente em casos de defeito de equipamentos ou ainda em eventos de *black out* da rede de distribuição. Estas são as medidas de proteção adotadas pela maior parte das distribuidoras de energia e justificam a legislação anti-ilhamento existente.

Em contrapartida, é pouco abordado o assunto de ilhamento intencional, processo este que pode ser muito benéfico para os usuários da GD e se realizado de maneira correta ao contrário do que se acredita, não deve prejudicar o bom funcionamento da rede de distribuição, contanto que seja feito um estudo adequado da qualidade de energia e que esta operação esteja acordada com a distribuidora de energia. Segundo as alterações mais recentes na IEEE 1547, uma fonte de geração isolável deve ser projetada para que se possa operar tanto conectado quanto desconectado da rede, possibilitando assim o ilhamento (IEEE, 2018; MARTINS, 2020).

O ilhamento intencional, ocorre quando a microrrede é propositalmente ilhada, por exemplo, quando há previsões de falta de energia na concessionária, logo, uma vez ilhada a microrrede não se enquadra mais nos requisitos de anti-ilhamento, pois, esta já não está mais conectada à rede. No entanto, vale ressaltar que existem alguns

requisitos necessários para este ilhamento ocorrer e apesar de não haver legislação específica para o ilhamento de microrredes, existem algumas normas que se aplicam neste caso, como, por exemplo, o módulo 3 do PRODIST (2021).

No caso de operação em ilha do usuário, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a rede de distribuição e as instalações elétricas internas à unidade consumidora, incluindo a parcela de carga e de geração, sendo vedada a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento (ANEEL, 2021, p.3).

Em outras palavras, o sistema de proteção da GD deve assegurar que na situação em que a distribuidora não esteja em funcionamento a GD ou microrrede não forneça energia para a rede de distribuição, sendo que esta ainda pode operar ilhada, contanto que esteja totalmente desconectada da rede da distribuidora.

Segundo Mendonça (2011), para que o ilhamento seja realizado de forma segura, o controlador deve considerar a manutenção da qualidade de energia e ainda a real necessidade de desconexão da rede, uma vez que deve haver um sincronismo de tensão e frequência na reconexão, além dos transitórios que ocorrem durante a alteração do modo de operação de conectado à rede para ilhado e vice-versa.

Há duas formas de realizar a conversão de uma microrrede para o modo ilhado: a primeira é conhecida como partida autônoma ou *black start*, este modo de operação gera uma descontinuidade no transitório (período da desconexão até a restauração da energia em plena capacidade no modo ilhado), pois, a reconexão é feita em um curto período. O segundo modo produz um transitório uniforme, praticamente sem descontinuidade, porém, possui uma maior dificuldade de execução em um curto período (SOSHINSKAYA, et. al., 2014).

Evidencia-se que o segundo modo seria o mais adequado para uma melhor manutenção do sistema, entretanto, fazem-se necessários novos inversores de modo dual que possam realizar essa operação, ou seja, é imprescindível que haja pesquisa e desenvolvimento destes equipamentos. Outra forma de realizar esta operação é por meio de técnicas de controle que utilizam os inversores já existentes no mercado, sendo que estas já possuem validações experimentais (SOSHINSKAYA, et. al., 2014).

Vale ressaltar que a distribuidora de energia é responsável pela qualidade da energia que chega ao consumidor final, sendo esta ou não a controladora da microrrede, logo não é do interesse das distribuidoras que as microrredes operem em modo isolado. Para resolução deste impasse, Martins (2020) propõe que em um futuro marco regulatório as distribuidoras também se beneficiem das microrredes com a

formação de subsistemas isolados como parte complementar a sua própria rede, possibilitando a operação em modo ilhado, pois, o operador teria a ciência deste modo de operação.

Observa-se ainda no módulo 3 da PRODIST que para uma central geradora acima de 300 kW deve ser feito um estudo para avaliar a qualidade da energia e a viabilidade desta operar ilhada em relação à rede de distribuição. Destaca-se que, além deste estudo, a distribuidora deve aceitar que a microrrede opere em modo ilhado. Sem estes requisitos preestabelecidos pelos módulos 3 e 4 do PRODIST respectivamente, não é possível a operação em modo ilhado (ANEEL, 2021).

Segundo Mendonça (2014) é notório que respeitando o documento de acordo operativo (AO) entre a distribuidora e o cliente (o qual pode ser entendido como a microrrede), além das determinações dispostas no módulo 8 do PRODIST quanto a qualidade de energia e os demais módulos já citados, não haveriam mais problemas que impeçam, do ponto de vista regulatório a operação de microrredes em modo ilhado.

Por fim, é previsto com base na próxima agenda regulatória 2022/2023 da ANEEL (2021) temas extremamente relevantes e que se conectam diretamente às normas internacionais, como a IEEE 1547. Os temas em pauta estão relacionados principalmente com a modernização do setor de distribuição de energia por meio da expansão da geração distribuída, incluindo também uma preparação regulatória relacionada às microrredes, gerando uma perspectiva para o aumento do número de microrredes e de uma regulamentação alinhada às normas internacionais (ANEEL, 2021; MARTINS, 2020; IEEE, 2018).

### **3.6 Proposta de regulamentação para o ilhamento intencional de microrredes**

A criação de uma legislação própria para as microrredes no Brasil é essencial para que estas ganhem força e se popularizem no país. Neste cenário um dos principais fatores que devem ser levados em conta é o ilhamento intencional (MARIAM *et al.*, 2016).

Segundo Marnay *et al.* (2008) para que este ilhamento seja sustentável devem ser considerados alguns aspectos essenciais na construção regulatória, principalmente no que tange à estrutura de interconexão:

- Deve-se permitir a operação de ilhamento intencional de diferentes partes da microrrede, desde que seja realizada de forma que não impacte a geração local. Já o ilhamento não intencional deve ser punido, uma vez que pode causar grandes impactos à rede de distribuição. É importante destacar que a proteção normalmente utilizada na rede para sobrecorrente não seria mais suficiente, se fazendo necessária uma proteção especial contra as baixas correntes de falta que podem ocorrer;
- Durante a transição para o ilhamento, enquanto o controlador atua, os parâmetros da microrredes poderão sofrer variações extremas durante o processo de geração de energia;
- Os elementos de que compõem a rede de distribuição devem ser padronizados de forma a atender uma ou mais microrredes conectadas. Do ponto de vista técnico, isto quer dizer que seriam necessários disjuntores de interconexão controláveis e meios de paralelismo no PCC das microrredes, principalmente nos barramentos de baixa e média tensão em que normalmente as microrredes operam;
- Além disso, devem ser utilizados outros dispositivos de proteção internos relacionados a algumas partes em específico da microrrede, sempre associados a um aterramento adequado, pois, este será de extrema importância quando a microrrede se dissociar da rede principal e entrar em operação de ilhamento. Em síntese, as distribuidoras de energia devem se adequar para comportar microrredes associadas a sua rede para garantir a proteção da rede e a manutenção da qualidade de energia;
- Por fim, serão essenciais novas formas de medição de potência e energia, dado que os medidores atuais em consumidores individuais não seriam mais eficazes e que o PCC seria o local ideal para medição dos parâmetros de consumo de energia. Sem contar que medidores mais modernos seriam mais interessantes para sustentar a utilização das microrredes no mercado de energia, principalmente do ponto de vista de comunicação e posterior análise de dados da rede, se aproximando cada vez mais do conceito de redes inteligentes, utilizando-se dos *smart meters*.

Como observado no módulo 3 da PRODIST caso a distribuidora entre em acordo com a microrrede e sejam realizados os devidos testes de qualidade de energia a microrrede pode operar ilhada. Entretanto, para que o uso da microrrede seja efetivo a regulamentação deve prever que na ocorrência de qualquer falha técnica na rede de distribuição a microrrede deva ter a liberdade de entrar em ilhamento, contanto que assegure por meio de equipamentos de proteção que a rede de distribuição não seja energizada pela microrrede (MARTINS, 2020).

## 4 CONCLUSÃO

Conclui-se que este trabalho elaborou uma revisão bibliográfica que sintetiza os principais tópicos que se relacionam às microrredes e discute sobre um dos seus maiores desafios técnicos e regulatórios atuais: o ilhamento. Procurou-se, também, compilar informações relevantes e atualizadas, de forma que possam ser utilizadas como base para estudos, novas pesquisas e desenvolvimentos relacionados ao tema. Além disso, por meio de todo o conteúdo abordado, foi possível observar que as microrredes possibilitam uma conexão segura e descentralizada das fontes de geração distribuída com a rede de distribuição convencional, por meio do armazenamento e das tecnologias de controle. Porém, para que estas operem da melhor forma possível é imprescindível que estas possam realizar a operação de ilhamento da microrrede, garantindo que esta mantenha seu funcionamento mesmo em situações de falhas da rede de distribuição convencional. Mediante uma extensa pesquisa e interpretação a respeito da regulamentação atual, foi possível observar não haver impeditivos do ponto de vista regulatório para funcionamento de uma microrrede acoplada à linha de distribuição. No entanto, é preciso que a distribuidora de energia local concorde com o projeto e forneça o suporte necessário do ponto de vista de proteção e de qualidade de energia. Por fim, as sugestões regulatórias aqui apresentadas visam auxiliar no processo de regulamentação das microrredes, incluindo a operação de ilhamento, de forma a viabilizar maiores investimentos na tecnologia e conseqüentemente no desenvolvimento da distribuição de energia de modo geral.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 77/2004**. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004077.pdf>>. Acesso em: 23 julho 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 481/2012**. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012481.pdf>>. Acesso em: 23 julho 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 482/2012**. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 23 julho 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 687/2015**. Disponível em:

<[http://www.bioenergiaengenharia.com.br/RESOLUCAO%20NORMATIVA%20REN%20687\\_2015.pdf](http://www.bioenergiaengenharia.com.br/RESOLUCAO%20NORMATIVA%20REN%20687_2015.pdf)>. Acesso em: 23 julho 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**.

Anexo I da Resolução Normativa ANEEL n.º 956, de 7 de Dezembro de 2021.

Disponível em: <[https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_2.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2.pdf)> Acesso em: 14 março 2022.

ANEEL. **Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. 2021.

Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>> Acesso em: 28 junho 2022.

ANEEL. **Agenda Regulatória 2022/2023**. Disponível em:

<[https://antigo.aneel.gov.br/documents/660863/23331082/RPO+Item\\_9\\_48500\\_003873\\_2021+-+3+ATO+-+ANEXO+-+Agenda+Regulat%C3%B3ria+2022+2023.pdf/e1f3ddb9-7937-c4a3-d087-5a63e07711c0](https://antigo.aneel.gov.br/documents/660863/23331082/RPO+Item_9_48500_003873_2021+-+3+ATO+-+ANEXO+-+Agenda+Regulat%C3%B3ria+2022+2023.pdf/e1f3ddb9-7937-c4a3-d087-5a63e07711c0)> Acesso em: 18 junho 2022.

BELLIDO, M. M. H. **Microrredes elétricas: Uma proposta de implementação no Brasil**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

BURGER, A. **ENGIE EPS Creates Harmony, Billed as the World's Largest Microgrid**. Disponível em: <<https://www.microgridknowledge.com/google-news-feed/article/11430161/engie-eps-creates-harmony-billed-as-the-worlds-largest-microgrid>>.

Acesso em: 25 dezembro 2022

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n.º 8.987, 13 de fevereiro de 1995**. Disponível em:

<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l8987compilada.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8987compilada.htm)>. Acesso em: 21 julho 2022.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n.º 9.074, 07 de julho de 1995**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1995/lei-9074-7-julho-1995-347472-publicacaooriginal-1-pl.html>>. Acesso em: 21 julho 2022.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei n.º 9.427, 26 de dezembro de 1996**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9427cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9427cons.htm)>. Acesso em: 21 julho 2022.

CALLEJO, L. H. **Introducción a las microrredes eléctricas**. In: Curso online de Microrredes: Apresentações e Conferência Inaugural, 2020, *Curso...* MEIHAPER – CYTED, 2020. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=M0Ygd2VEtt8&list=PLVCI4so9FjMULNVghwforenDd7obn0y3B>> Acesso em: 09 abril 2022.

CARBINATTO, B. **O petróleo vai acabar um dia?**. VOCÊ S/A, 2021. Disponível em: <https://vocesa.abril.com.br/coluna/guru/o-petroleo-vai-acabar-um-dia/>. Acesso em: 12 março 2022.

CASTRO, N. J. **Visão 2030: Cenários, tendência e desafios e novos paradigmas do setor elétrico**. Rio de Janeiro: Babilônia Cultura Editorial, 2015.

COHN, L. **What Worked and What Didn't at Six School Microgrids in California**. Microgrid Knowledge, 2020. Disponível em: <<https://microgridknowledge.com/school-microgrids-california/>>. Acesso em: 27 junho 2020.

CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S.P.; CROSSLEY P. **Microgrids and Active Distribution Networks**. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2009.

Daniel, L. O. **Aplicação de Armazenadores de Energia em Microrredes**. XV Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica: Foz do Iguaçu, 2022. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/359392141\\_Aplicacao\\_de\\_Armazenadores\\_de\\_Energia\\_em\\_Microrredes](https://www.researchgate.net/publication/359392141_Aplicacao_de_Armazenadores_de_Energia_em_Microrredes)>. Acesso em 27 dezembro 2022

ELETROBRAS. **Especificações Técnicas dos Programas para Atendimento às Regiões Remotas dos Sistemas Isolados no âmbito do Programa Luz para Todos**. Edição Revisada, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional 2022**. Ministério de Minas e Energia: Brasília, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>> Acesso em: 12 outubro 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Sistemas Isolados**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/sistemas-isolados>> Acesso em: 11 novembro 2022.

FAN, X. et al. **Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage**. Transactions of Tianjin University, 2020. Disponível em: <<https://rdcu.be/cNMCr>> Acesso em: 17 maio 2022.

Georgious, R.; Refaat, R.; Garcia, J.; Daoud, A.A. **Review on Energy Storage Systems in Microgrids**. Electronics 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/electronics10172134>> Acesso em: 03 janeiro 2023.

GIFALLI, A. **Impacto de Microrredes sobre o Sistema de Proteção de Redes de Distribuição**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2019.

GOV. **Energia eólica registra primeiro recorde de geração instantânea de 2022**. Serviços e Informações do Brasil. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/noticias/energia/08/energia-eolica-registra-primeiro-recorde-de-geracao-instantanea-de-2022>>. Acesso em: 21 outubro 2022.

HERNÁNDEZ, L. **Microrredes eléctricas**. Espanha: Garceta Editores, 2019.

IEEE. 1547-2018 - **IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces**. Disponível em: <<https://standards.ieee.org/standard/1547-2018.html>> Acesso em: 18 junho 2022.

INSTITUTO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Microrrede Isolada da Ilha de Lençóis**. Universidade Federal do Maranhão. 2022. Disponível em: <<https://portalpadrao.ufma.br/iee/galeria-de-videos/microrrede-isolada-da-ilha-de-lencois>> Acesso em: 11 novembro 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World Energy Outlook**. Paris, France, 2011. Disponível em: <[https://www.flac.awsassets.panda.org/downloads/resumen\\_ejecutivo\\_espanol\\_world\\_energy\\_outlook.pdf](https://www.flac.awsassets.panda.org/downloads/resumen_ejecutivo_espanol_world_energy_outlook.pdf)> Acesso em: 09 abril 2022.

JÚNIOR, M. E. T. S.; FREITAS, L. C. G. **Microrredes: Estado da arte, desafios e tendências para geração, distribuição e uso sustentável de energia elétrica**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2020

LASSETER, R. H. “**Microgrids**” in Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, vol. 1. IEEE, 2002, pp. 305–308.

LEME, H. F. P. **Papel do Usuário Final na Transição para as Redes Inteligentes**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

LIDULA, N. W. A.; RAJAPAKSE, A. D. “**Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems**”, Renewable and Sustainable Energy Reviews v. 15, n. 1, pp. 186-202, Jan. 2011.

MARIAM, L.; BASU, M.; CONLON, M. F. **Microgrid: Architecture, policy and future trends**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016, 64, 477-489, ISSN 1364-0321, 2016.

MARINHO, G.S.P. **Apresentação de uma Indústria Sucoalcooleira sob os Conceitos de Microrrede de Energia Elétrica.** Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2011.

MARNAY, C., *et al.* **Policymaking for microgrids.** IEEE Power and Energy Magazine 2008, 6, 3, 66 – 77, 2008.

MARTINS M. A. I. **Implantação de Microrredes Inteligentes: Contribuição aos Aspectos Regulatórios.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

MARYLAND STATE GOVERNMENT. **Resiliency Through Microgrids Task Force Report.** Maryland State Government: Maryland, USA, 2014.

MENDONÇA, L. P. **Introdução às Microrredes e seus Desafios.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

MENDONÇA, L. P. **Proposta de Sistema de Automação para Ilhamento Intencional de Redes de Distribuição com Geração Distribuída.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

NAVIGANT. **Executive summary: Utility distribution microgrids 4Q 2014.** Navigant Research, Estados Unidos, 2014b.

NAVIGANT. **Public executive summary: Microgrid multi-client study 2015.** Navigant Research, Estados Unidos, 2015b.

OLIVEIRA, A. M. Q.; PINHEIRO, J. G. L. **ENERGIA RENOVÁVEL COM UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA:** Tecnologia Ambiental e Avaliação do Crescimento no Âmbito Global com Interface da Produção Brasileira de Energia. Rev. Episteme Transversalis, Volta Redonda-RJ, v.11, n.1, p.242-267, 2020.

SANTOS, R. S.; BARBOSA, J. J. **Template para produção de trabalhos acadêmicos na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp.** Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Biblioteca, 2021. 40 p.

SOUSA, B. R. **Aspectos Regulatórios da Geração Distribuída no Brasil e no estado do Piauí.** XXIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, p. Piauí: Universidade Federal do Piauí, 2016.

SOUZA, A.C.Z.D.; BONATTO, B.D; RIBEIRO, P.F. **Integração de Renováveis e Redes Elétricas Inteligentes.** Rio de Janeiro: Interciência, 2020.

SOUZA JR. M. E. T.; MELO F. C.; COELHO E. A. A.; DE FREITAS L. C. G. **O QUE SÃO MICRORREDES? – CONCEITOS, COMPONENTES E CONTROLE.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

SOSHINSKAYA, M., *et al.* **Microgrids: Experiences, barriers and success factors,** Renewable and Sustainable Energy Reviews v. 40, pp. 659-672, Ago. 2014.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

WARNERYD, M.; HÅAKANSSON, M.; KARLTORP, K. **Unpacking the complexity of community microgrids: A review of institutions' roles for development of microgrids**. 2020.

WOOD, L. **North America Now Top Microgrid Market due to Installations by Businesses**. Microgrid Knowledge. 2020. Disponível em: <<https://microgridknowledge.com/microgrid-market-guidehouse/>> Acesso em: 15 maio 2022.