



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FRANCISCO ALDAIR ALVES

**UMA ANÁLISE DAS SMART GRIDS APLICADAS ÀS MICRORREDES
INTELIGENTES**

SOBRAL

2023

FRANCISCO ALDAIR ALVES

UMA ANÁLISE DAS SMART GRIDS APLICADAS ÀS MICRORREDES
INTELIGENTES.

Trabalho Final de Curso submetido à
Universidade Federal do Ceará como parte
dos requisitos para obtenção do título de
graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André dos Santos
Lima

SOBRAL
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A479a Alves, Francisco Aldair.

Uma análise das smart grids aplicadas às microrredes inteligentes / Francisco Aldair
Alves. – 2023.

74 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus
de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2023.

Orientação: Prof. Dr. André dos Santos Lima.

1. Smart grid. 2. Microrredes. 3. Ilhamento. I. Título.

CDD 621.3

FRANCISCO ALDAIR ALVES

UMA ANÁLISE DAS SMART GRIDS APLICADAS ÀS MICRORREDES
INTELIGENTES.

Trabalho Final de Curso submetido à
Universidade Federal do Ceará como parte
dos requisitos para obtenção do título de
graduação em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 06/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André dos Santos Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Ma. Cibelly Azevedo de Araújo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Marques Simões de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pois sem Ele nada seria possível. Às pessoas designadas por Deus, meus familiares, amigos que me apoiaram para que realizasse este projeto.

Dedico de todo o coração aos meus pais, Antônia Inácio da Silva Alves e Francisco Vanaldo Alves fizeram de tudo para que pudesse realizar este sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me permitiu concretizar essa etapa em minha vida.

A meus pais, que sempre me apoiaram e me ajudaram a persistir e nunca desistir dos meus sonhos, e sempre me incentivaram a aprender mais.

A minha mãe, mulher guerreira, que sempre luta por mim e me ajuda, mesmo nas dificuldades.

A meus irmãos, Valdeir Alves e Evair Alves e meu primo Samelius, que sempre estiveram do meu lado, me ajudando e dando todo o amor necessário.

Ao meu orientador, André dos Santos Lima, por todo seu apoio e ensinamentos prestados, pela paciência, orientação e incentivo durante este período.

A todos que direta e indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

*O temor do Senhor é a instrução da sabedoria,
e precedendo a honra vai a humildade.*

Provérbios 15:33

RESUMO

O presente trabalho aborda as microrredes em sua aplicação nas Smart Grids (redes inteligentes). Essas últimas transformam o atual sistema elétrico em um sistema mais dinâmico, seguro e sustentável, gerenciando os recursos energéticos de geração distribuída e armazenamento. As microrredes operam, a princípio, em locais onde a rede convencional não oferece um serviço com qualidade e confiabilidade, ou em situações em que instabilidades prejudiquem as cargas. Os principais tipos de operação da microrrede, conectadas ou desconectadas, são apresentados, assim como alguns projetos que estão sendo desenvolvidos em muitos países em resposta aos problemas locais.

Palavras-chave: Smart Grid. Microrredes. Ilhamento.

ABSTRACT

This work addresses microgrids in their application to Smart Grids. The latter transforms the current electrical system into a more dynamic, secure, and sustainable system by managing the energy resources of distributed generation and storage. Microgrids operate primarily in locations where the conventional grid does not provide a service with quality and reliability, or in situations where instabilities may harm loads. The main types of microgrid operation, connected or disconnected, are presented, as well as some projects that are being developed in many countries in response to local challenges.

Keywords: Smart Grid. Microgrids. Islanding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais domínios da Smart Grid.....	18
Figura 2 - Principais estados geradores de energia.....	20
Figura 3 - Razões para implementar Smart Grids no Brasil.....	22
Figura 4 - Modelos de medidores inteligentes (Smart Meters).....	29
Figura 5 - Infraestrutura de comunicação do AMI: Arranjo.....	30
Figura 6 - Gerenciamento da Smart Grid.....	32
Figura 7 - Arquitetura de um sistema SCADA.....	35
Figura 8 - Modelo de microrrede.....	36
Figura 9 - Barramento CC.....	42
Figura 10 - Barramento CA.....	43
Figura 11 - Barramento híbrido.....	44
Figura 12 - Controle hierárquico em barramento CC.....	48
Figura 13 - Controle hierárquico em barramento CA.....	49
Figura 14 - Controle hierárquico em barramento híbrido.....	50
Figura 15 - Operação conectada à rede elétrica.....	52
Figura 16 - Ilhamento local.....	56
Figura 17 - Ilhamento secundário.....	57
Figura 18 - Ilhamento lateral.....	58
Figura 19 - Ilhamento de circuito.....	59
Figura 20 - Ilhamento de barramento.....	60
Figura 21 - Ilhamento de subestação.....	61
Figura 22 - Ilhamento com circuitos adjacentes.....	62
Figura 23 - Projeto de microrrede de sucesso.....	63
Figura 24 - Alcatraz Island Microgrid.....	65

LISTA DE TABELA

Tabela 1- Consumo de energia elétrica no Brasil.....	21
Tabela 2 - Métodos de controle.....	45
Tabela 3 - Projetos e iniciativas com microrredes em 2022.	65

LISTA DE ABREVIACÕES e SIGLAS

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica
GD – Geração Distribuída
SG – Smart Grid
SIN – Sistema Interligado Nacional
MMGD – Micro ou Minigeração Distribuída
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
ONS – Operador Nacional do Sistema
NIPP - *National Infrastructure Protection Plan*
EMS – *Energy Management System*
SCADA – *Supervisory Control And Data Acquisition*
NIST – *National Institute Standard and Technology*
IEA – *International Energy Agency*
WAMPAC – *Wide Area Monitoring, Protection and Control*
AMM - *Advanced Meter Management*
AMR - *Automatic Meter Reading*
AMI - *Advanced Meter Infra*
IEC - *International Electrotechnical Commission*
DSM - *Demand Side Management*
DMS - *Distribution Management System*
PMU – *Phasor Measurement Units*
IDS - *Intrusion Detection System*
IED - *Intelligent Electronic Devices*
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
MDM - *Metering Data Menegment*
PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia
GIS - *Georeference Information System*
GPS – *Global Position System*
VPN – Virtual Personal Net
RED – Recursos Energéticos Distribuídos

PLC - Power Line Communication

MME - Ministério de Minas e Energia

BEM - Banco Energético Nacional

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

OMS – *Outage Management System*

IoT- *Internet of Things*

IHM – Interface Homem Máquina

MTU – *Master Terminal Unit*

RTU – *Remote Terminal Unit*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivações	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Estrutura do Trabalho	16
2	SMART GRID	17
2.1	Implementabilidade	19
2.2	Comunicação	24
2.2.1	<i>Qualidade do serviço</i>	24
2.2.2	<i>Interoperabilidade</i>	24
2.2.3	<i>Escalabilidade</i>	25
2.2.4	<i>Segurança</i>	25
2.2.5	<i>Padronização</i>	25
2.3	Aplicações	25
2.3.1	<i>Automação de transmissão</i>	26
2.3.2	<i>Automação de subestação</i>	26
2.3.3	<i>Automação de distribuição</i>	26
2.4	Tecnologias empregadas	27
2.4.1	<i>Geração Distribuída (GD)</i>	27
2.4.2	<i>Sistema de Armazenamento</i>	28
2.4.3	<i>Medição inteligente</i>	29
2.4.4	<i>MDM (Metering Data Management)</i>	31
2.4.5	<i>Precificação dinâmica</i>	33
2.4.6	<i>IEDs (Intelligent Electronic Devices)</i>	33
2.4.7	<i>Equipamentos inteligentes</i>	33
2.4.8	<i>PMUs (Phasor Measurement Units)</i>	34
2.4.9	<i>SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)</i>	34
3	MICRORREDES	36
3.1	Flexibilidade de operação das microrredes	37
3.2	Componetes importantes	37
3.2.1	<i>Recursos energéticos distribuídos - RED</i>	38
3.2.2	<i>Eletrônica de potência</i>	38
3.2.3	<i>Proteção</i>	39

3.2.4	Cargas	39
4	CARACTERÍSTICAS DAS MICRORREDES	41
4.1.1	Barramento CC	42
4.1.2	Barramento CA	43
4.1.3	Barramento Híbrido	44
4.2	Tipos de controle	45
4.2.1	Comunicação	45
4.2.2	Estratégia de controle	46
4.3	Tipos de operação de microrredes	51
4.3.1	Operação conectado	51
4.3.2	Operação de Ilhamento	52
4.3.2.1	<i>Ilhamento local</i>	55
4.3.2.2	<i>Ilhamento secundária</i>	56
4.3.2.3	<i>Ilhamento lateral</i>	57
4.3.2.4	<i>Ilhamento de circuito</i>	58
4.3.2.5	<i>Ilhamento de barramento</i>	59
4.3.2.6	<i>Ilhamento de subestação</i>	60
4.3.2.7	<i>Ilhamento com circuitos adjacentes</i>	61
5	EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE MICRORREDES	63
5.1	LO3 Energy- Brookly Microgrid	63
5.2	Alcatraz Island Microgrid	64
5.3	Outros exemplos	65
6	CONCLUSÃO	67
	REFERENCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência é o fruto da evolução tecnológica natural e das constantes regulações sofridas desde a criação da primeira usina de geração de energia. Em resposta às demandas da sociedade por mais energia de qualidade, a rede de geração, transmissão e distribuição foi sendo desenvolvida e as boas práticas foram substituindo as menos eficientes.

Após a guerra das correntes, entre Thomas Edison e Nikola Tesla/George Westinghouse, em que era disputada qual o melhor método de fornecimento de energia, a história aponta uma estagnação do desenvolvimento do setor de energia. Desde então, o foco das pesquisas no setor estava direcionado à busca de fontes de energia mais eficientes e não necessariamente mais ecológicas.

A busca pela geração energética eficiente e sustentável surgiu a partir da conscientização da sociedade das consequências que o uso indiscriminado dos recursos naturais causa ao planeta.

Neste contexto, surgiram ideias para melhorar a qualidade de energia, não só no consumidor final, mas em toda a cadeia produtiva da energia com Sustentabilidade; transmitir energia com menos perdas e distribuir energia de forma eficiente respeitando a demanda dos consumidores.

As *Smart Grids* surgem como uma das respostas a esses questionamentos. Elas são um conceito de uma rede inteligente limpa, segura, autônoma e autorregulada.

Portanto, as redes inteligentes se apresentam como uma quebra de paradigma na forma como se vê o funcionamento do setor elétrico para cada região conforme a exigência para cada sociedade. Tudo isso é possível através da incorporação de geração distribuída com energia limpa onde novos consumidores são agregados também com novas funções e responsabilidades dentro do sistema de energia. Devido a essa mudança de paradigma o conceito de *Smart Grid* sofre alterações ao redor do mundo e de acordo como a visão de mundo vigente na região.

As *Smart Grids* apresentam elementos que são observados a partir da perspectiva tecnológica, política-regulatória, socioeconômica, ambiental, aspectos de digitalização, monitoramento, controles dos ativos da rede como transformadores,

religadores, relés e outros equipamentos para buscar melhora da qualidade de energia.

Nesse progresso das redes inteligentes surgem as microrredes inteligentes. A microrrede é um bom exemplo de como funciona uma *Smart Grid*. Elas desempenham um papel importante quando se fala de redes inteligentes pois elas agregam várias soluções para problemas estudados pelas *Smart Grids* e trazem tecnologias de caráter permanente como eletrônica de potências, recursos energéticos distribuídos, armazenamento de energia. Para que as microrredes possam ser aplicadas de maneira intensiva, soluções de ilhamento são propostas e gerenciadas proporcionando que as microrredes possam ser implementadas em larga escala no futuro próximo.

1.1 Motivações

A humanidade vêm tomando consciência da importância da preservação ambiental para sustentabilidade da vida no planeta. Nesse contexto existe demandas pela geração de energia limpa e redução da poluição.

É consenso que as energias mais poluentes e menos comprometidas com as pautas ambientais futuramente serão sobretaxadas.

As companhias e os órgãos reguladores já buscam modelos de matriz energética em que o consumidor seja parte dessa nova maneira de consumo e até mesmo contribua para melhora de suas contas. A transparência do sistema, a redução das perdas, a difusão do autoconsumo e segurança energética independente da rede elétrica convencional contribuem para o aumento das pesquisas por métodos como as microrredes. Buscar uma saída eficiente para esses problemas por meio do emprego de tecnologias sustentáveis aliados a um gerenciamento em tempo real para evitar perdas e melhorar a qualidade de energia pode ser obtido com a aplicação de microrredes.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é abordar as microrredes em seu conceito, arquitetura e aplicabilidade como uma tecnologia de *Smart Grid*.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Mostrar as microrredes como um sistema de gerenciamento dos recursos energéticos distribuídos.
- Entender quais os pontos essenciais das microrredes.
- Mostrar os modelos de operação da microrrede com relação ao sistema elétrico de potência tanto conectado quanto de forma isolada.

1.3 Estrutura do Trabalho

Primeiramente no capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre *Smart Grids*.

O capítulo 3 é definido microrredes e mostra o papel das microrredes e seus componentes como os recursos energéticos distribuídos, cargas, sistema de armazenamento de energia, eletrônica de potência usada.

No capítulo 4 é apresentada as principais características das microrredes, como: arquitetura (barramentos CC, CA, híbrido), tipos de controle e operações possíveis.

No capítulo 5 é mostrado os exemplos de microrredes implementados no mundo e projetos pilotos em andamento.

O último capítulo é voltado a conclusão e considerações finais.

2 SMART GRID

O termo *Smart Grid* (rede inteligente) refere-se a um conjunto de tecnologias de distintas áreas de pesquisa que se desenvolveram em cenários diferentes e que se entregaram na construção de uma rede elétrica mais robusta, segura, organizada, e ágil na resolução de problemas elétricos corriqueiros em larga escala (AMIN; WOLLENBERG, 2005).

Assim, um novo modelo de gerenciamento e consumo de energia é proposto para satisfazer, as necessidades de usuários do sistema, com transparência, eficiência e controle de seus recursos energéticos. Além disso, os produtores de energia, a partir da geração em larga escala por fontes renováveis, farão com que a *Smart Grid* seja um importante passo para uma transição energética.

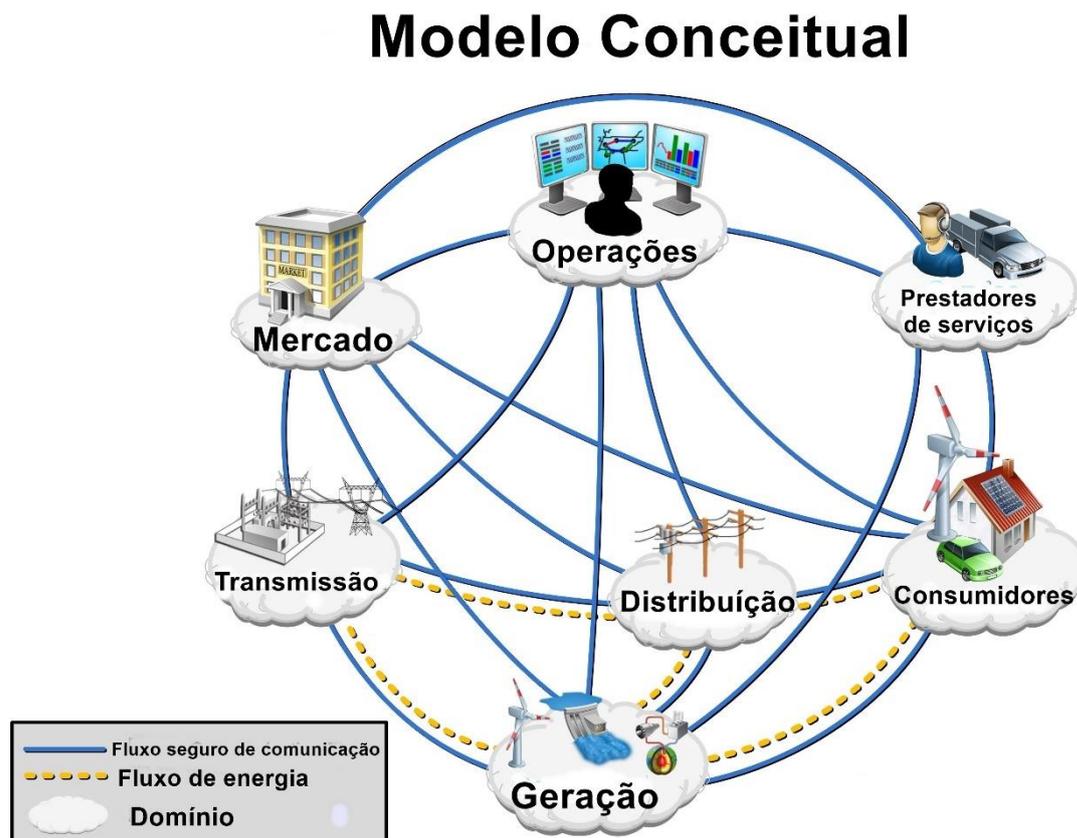
A *Smart Grid* é um sistema integrado e disperso, diferente de uma rede centralizada onde a geração e o consumo estão afastados. A *Smart Grid* está em uma configuração chamada de geração distribuída (GD) em que as cargas ficam localizadas próximo as fontes de geração, diminuindo as perdas entre geração e consumo.

Ao longo dos anos várias definições têm sido propostas de quando uma rede passa a ser inteligente como é o caso da definição do NIST (National Institute Standard and Technology - Instituto Nacional de Tecnologia e Padrões) que define *Smart Grid* como um sistema elétrico que se utiliza de informações, tecnologias de comunicação bidirecional, cibernética e inteligência computacional integrada em todo o espectro do sistema de energia desde a geração até o consumidor final (NIST, 2022). Outra definição formal aplicada a concepção de *Smart Grids* é trazida pela a IEA (International Energy Agency - Agência Internacional de Energia):

Uma rede inteligente é uma rede de eletricidade que usa tecnologias digitais e outras tecnologias avançadas para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade de todas as fontes de geração para atender às diversas demandas de eletricidade dos usuários finais. As redes inteligentes coordenam as necessidades e capacidades de todos os geradores, operadores de rede, usuários finais e partes interessadas do mercado de eletricidade para operar todas as partes do sistema da forma mais eficiente possível, minimizando custos e impactos ambientais, maximizando a confiabilidade, resiliência, flexibilidade e estabilidade do sistema. (IEA, 2011)

A figura 1 mostra os principais domínios de uma *Smart Grid*. É possível perceber que o mercado de energia, o gerenciamento das operações, e o setor de serviços ganham destaque junto aos arranjos já conhecidos e a comunicação entre os elos da rede passam a ser mais descentralizados.

Figura 1 - Principais domínios da Smart Grid.



Fonte: Adaptado de NIST

Falcão (2009,2010), define redes inteligentes não como uma tecnologia em si, mas um conceito de uso intensivo e amplo de uma inteligência aplicada ao sistema de energia com a implementação de processamento, controle, monitoramento da rede e uso de ciência de dados por todas as áreas sensíveis da rede.

Portanto, as *Smart Grids* integram dinamicamente todas as ações que estão ocorrendo na rede elétrica melhorando a relação de produção e consumo além de incorporar várias técnicas e tecnologias de informação e digitalização que facilitemo fluxo de energia e comunicação dentro da cadeia elétrica.

Redes de energia do tipo *Smart Grids* tem como características (MME, 2021; FALCÃO, 2009; FALCÃO, 2010):

- a) autorrecuperação;
- b) motivar consumidores a serem mais participativos;
- c) resistir a ataques físicos e cibernéticos;
- d) fornecer uma energia de melhor qualidade;
- e) permitir vários tipos de geração e armazenagem de energia;
- f) maior envolvimento do mercado;
- g) permitir uma maior utilização de geração intermitente de energia.

2.1 Implementabilidade

O Brasil apresenta um sistema de energia centralizado, a trajetória da energia inicia-se nos geradores, onde é inicialmente armazenada. Posteriormente, atravessa redes de transmissão, utilizando cabos aéreos fixados em torres metálicas. Ao longo desse percurso, passa por subestações, onde transformadores desempenham a crucial função de regular a tensão elétrica de acordo com necessidades específicas.

Nas subestações, as tensões elétricas são ajustadas pelos transformadores à medida que a eletricidade se aproxima dos centros consumidores, sendo reguladas para abastecer residências, empresas e indústrias. Nessa etapa, a energia percorre cabos por vias aéreas ou subterrâneas, constituindo as redes de distribuição. Essa cadeia de processos assegura que a energia elétrica seja eficientemente conduzida do ponto de geração até o consumidor final(MME, 2023).

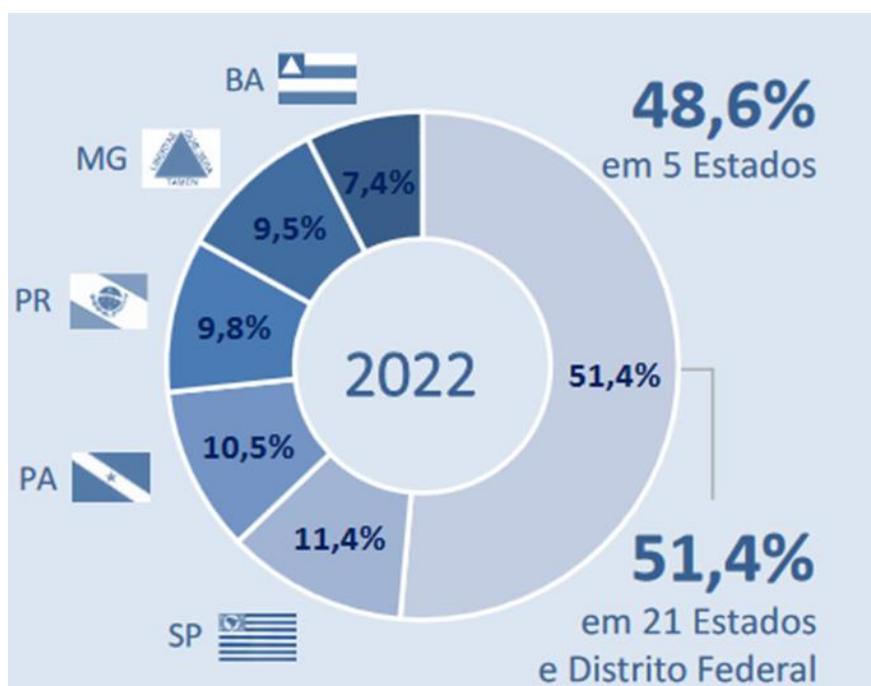
O atual cenário do setor elétrico brasileiro aponta para uma notável expansão em 2023, projetando a adição de 10,3 GW de capacidade instalada, o maior aumento desde o início do acompanhamento pela ANEEL em 1997. A entrada em operação de 298 projetos, principalmente usinas solares e eólicas, destaca os estados da Bahia, Rio Grande do Norte e Minas Gerais como líderes nesse crescimento (ANEEL, 2023).

A geração distribuída, impulsionada pela energia solar fotovoltaica, continua a evoluir, evidenciada pelo acréscimo de 8.243,26 MW em 2022, a segunda maior expansão registrada pela ANEEL. O Brasil já totaliza 189.126,6 MW de potência

fiscalizada, com expectativa de novos acréscimos em 2023. Esses indicadores refletem a diversificação da matriz energética, consolidando o país como protagonista na transição para fontes mais sustentáveis (ANEEL, 2023).

A geração de energia no Brasil tem como principais atuantes as usinas hidroelétricas e termoelétricas correspondendo a aproximadamente 84% da produção e 5 estados detém quase metade da produção segundo dados do Balanço Energético Nacional apresentado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética). (EPE, 2022). A figura 2 mostra os estados que produzem mais energia no Brasil.

Figura 2 – Principais estados geradores de energia.



Fonte: Balanço Energético Nacional – BEN (2022)

A consideração do consumo de energia no Brasil é de suma importância para assegurar o fornecimento contínuo de energia de qualidade aos consumidores. O cenário energético do país demanda uma abordagem abrangente que leve em conta as particularidades de cada região. A tabela apresentada reflete o consumo por região em 2023, destaca a necessidade de compreender e atender às demandas específicas de cada localidade.

Tabela 1- Consumo de energia elétrica no Brasil.

CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA REDE (MWH) EM 2023	
TOTAL BRASIL	437.435.777
Norte	33.868.344
Nordeste	77.867.180
Sudeste	209.533.603
Sul	81.468.552
Centro-Oeste	34.698.098

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE(2023)

A distribuição de energia elétrica no Brasil ocorre por meio da integração da produção, transmissão e distribuição até o consumidor final, impulsionada pela industrialização, urbanização, aumento da demanda e pela predominância de hidrelétricas(MME, 2023).

O Brasil apresenta um complexo sistema para escoar essa energia até os consumidores, o Sistema Interligado Nacional (SIN). Conforme a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), O SIN representa um extenso sistema hidrotérmico dedicado à produção e transmissão de energia elétrica. Sua operação é gerida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e regulada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), envolvendo complexos modelos de simulação. A operação hidráulica dos reservatórios integrantes do SIN é uma atividade em tempo real, implementando diretrizes hidráulicas para gerenciar o armazenamento de água nos reservatórios, otimizando a energia, controlando cheias e atendendo aos usos múltiplos da água (BRASIL, 2023).

Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a extensão da rede de transmissão está prevista para aumentar de 145.600 km em 2020 para 184.054 km em 2025.

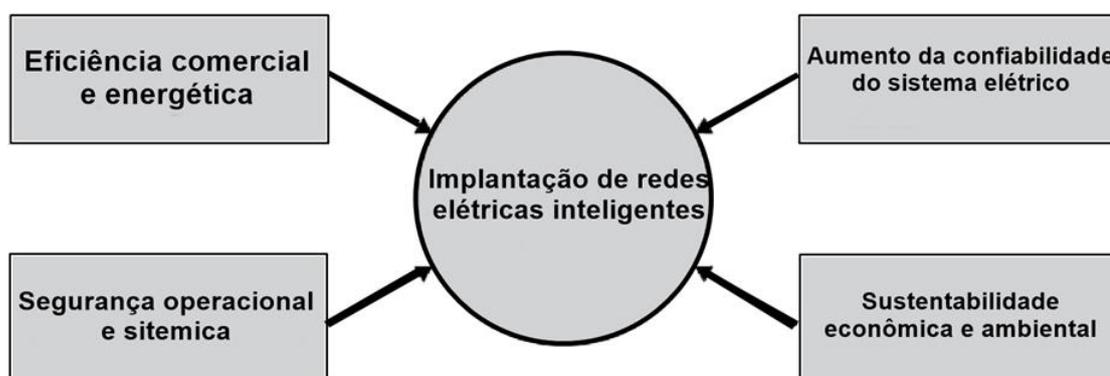
No Brasil ganha destaque a expansão do Mercado Livre de Energia, representando 72% do parque gerador em construção. Prevê-se que, até 2025, a

capacidade instalada alcance 34,5 GWh, segundo a Abraceel (Associação Brasileira de Comercializadores de Energia). Essa ascensão é impulsionada por fatores como mudanças no consumo, competitividade do ambiente de contratação livre (ACL) e aumento da migração (ABRACEEL, 2023).

No contexto das Smart Grids, essa transformação se traduziria em um sistema mais dinâmico, permitindo o gerenciamento eficiente da oferta e demanda, integração de fontes renováveis predominantes (principalmente solar e eólica) e uma governança mais ágil, alinhada com a modernização do setor elétrico. A implementação de tecnologias inteligentes contribuiria para a formação de preços, equidade no acesso à conexão, monitoramento em tempo real e otimização do consumo, resultando em um mercado mais eficiente e sustentável.

O BNDES (2013) em um estudo sobre as *Smart Grids* elenca algumas motivações para sua utilização pelo mundo. A figura 3 mostra algumas razões para implementar *Smart Grids* no Brasil segundo esse estudo.

Figura 3- Razões para implementar Smart Grids no Brasil.



Fonte: Adaptada de BNDES, 2013

Na conjuntura brasileira, uma *Smart Grid* deve focar em eficiência comercial e energética, por exemplo, no combate aos furtos de energia que prejudicam o setor elétrico e proporcionam tarifas caras.

As perdas de energia elétrica são parte de qualquer sistema elétrico - desde a geração até a distribuição - ainda que seja desejável sua redução para os menores níveis. Todavia, quando se trata das perdas não técnicas ou comerciais (os 'gatos' como são chamados os furtos de energia na rede de distribuição), que são obtidas

pela diferença das perdas técnicas e perdas totais, afetam financeiramente os consumidores que utilizam a rede de maneira legal são penalizados, pois a tarifa pode ser encarecida para cobrir essas perdas ainda que bem inferior (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2017).

Outro aspecto que se busca no Brasil é a confiabilidade no sistema elétrico. Quando o Sistema Interligado Nacional (SIN) apresenta alguma falha, o impacto atinge de pequenas a grandes áreas de fornecimento, gerando transtornos e prejuízos aos consumidores em todos os setores de forma direta e indireta, interrompendo outros serviços adjacentes. O operador nacional do sistema (ONS), que é o órgão responsável pelo controle do sistema elétrico de potência, se beneficia com as *Smart Grid* através do *self-healing* (autorrecuperação), por exemplo, que permite isolamento do local da falha e redirecionamento do fluxo de energia para atender as cargas que não estão atingidas diretamente pela falha, até que o problema seja solucionado.

A segurança operacional do sistema é outra preocupação do Brasil, sendo composta por duas variantes: ocupacional e de processo. A primeira trata de proteger o trabalhador no seu local de trabalho que no caso de energia é insalubre e a outra é a segurança no manuseio e na integridade do sistema como um todo.

Na questão da sustentabilidade temos que entender que a matriz energética do Brasil é bem diferente da matriz energética mundial, possuindo cerca de 44% de seus recursos provenientes de fontes renováveis, enquanto no mundo as fontes renováveis chegam apenas cerca de 15% (BEN, 2021).

Já quando observamos a matriz elétrica (recursos energéticos utilizados exclusivamente para geração de energia elétrica) do Brasil com relação ao mundo podemos notar que o Brasil também apresenta uma matriz elétrica com cerca de 82,9% da energia elétrica gerada proveniente de recursos renováveis contra 28,6% no mundo (BEN, 2022).

O hidrogênio verde também desperta interesse em diversas áreas no Brasil, especialmente nas engenharias, sendo um vetor energético obtido por meio da eletrólise da água, utilizando fontes renováveis como energia solar e eólica. Em um cenário onde a matriz energética é predominantemente renovável, o hidrogênio verde apresenta um potencial significativo, com sua produção em larga escala prometendo impulsionar a economia e contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa (MME, 2023).

2.2 Comunicação

A comunicação é um ponto sensível na implementação da *Smart Grid*. Yan et. al. (2013) caracterizam a comunicação e a infraestrutura da *Smart Grid* em cinco aspectos: qualidade de serviço, interoperabilidade, escalabilidade, segurança e padronização.

2.2.1 Qualidade do serviço

Em termos de qualidade de serviço, dois obstáculos devem ser superados:

- a) Latência: atraso no envio e recebimento de informação pela rede. Na medida que a rede elétrica transmite dados em tempo real e com bidirecionalidade, ocorrerá colisão de informações acarretando em atrasos.
- b) Largura de banda: a largura de banda (medida da capacidade de transmissão de dados em determinado meio) também deverá sofrer modificação (aumento da largura de banda) devido ao aumento do fluxo de dados transportado na rede de comunicação. Esse aumento ocorre pela a entrada dos medidores inteligentes que passarão a enviar e receber informações sobre a precificação dinâmica e pela coleta de dados no sistema da concessionária com posterior processamento e atuação remota dos dispositivos na rede (HAUSER *et al.*, 2008).

2.2.2 Interoperabilidade

Interoperabilidade é a capacidade dos sistemas e tecnologias se conectarem sem problemas ou interrupções dentro da rede. Essa questão é importante porque centenas de dispositivos, empresas e atuadores do mercado compartilharão a mesma estrutura, o que significa que deverão ser criados protocolos mais abrangentes e principalmente padrões e dispositivos deverão estar constantemente atualizados e verificados para proteção de dados, mas sem perder a qualidade do serviço.

2.2.3 Escalabilidade

A rede deve estar pronta para adesão de novas tecnologias viabilizando esta integração. Incorporar de maneira fácil é interessante, mas permitir que elas possam se desenvolver sem custos abusivos ou mudança geral da rede é um importante ponto, sendo a tecnologia baseada em rede IP (internet protocol) uma saída por já estar bastante difundida e ser capaz de conectar essas tecnologias sem elevar os custos.

2.2.4 Segurança

A segurança é um tema relevante, visto que a digitalização e o constante uso de automação, redes neurais e inteligência artificial estão sendo amplamente difundidas.

Portanto, a proteção contra ataques criminosos externos e internos por questões de falhas críticas e vulnerabilidades no código base ou algoritmo da rede de dados são potenciais problemas caso possam afetar toda extensão da rede elétrica.

Por isso, muitas empresas e grupos de pesquisa trabalham intensamente para resolver esses problemas, entre eles: a NIST (National Institute of Standards and Technology), NIPP (National Infrastructure Protection Plan), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e outras.

2.2.5 Padronização

A padronização é um trabalho que será regido por uma entidade internacional que no caso das *Smart Grids* é a IEC (International Electrotechnical Commission - Comissão Eletrotécnica Internacional).

2.3 Aplicações

Há alguns principais segmentos de aplicação das *Smart Grids* (Falcão, 2010). Nessa seção serão abordadas três aplicações: Automações na transmissão, subestação e distribuição.

2.3.1 Automação de transmissão

Transmissão de energia é um ponto sensível nos sistemas elétricos. As *Smart Grids* podem ser implantadas na automação da transmissão de energia através de esquemas de monitoramento, controle e proteção sistêmica. Sistemas como o Wide Area Monitoring, Protection and Control (WAMPAC) retira as informações essenciais do sistema de dados locais, consumidores e demanda local e através desses dados realiza a operação do sistema. Já na operação convencional as informações do consumidor local são desprezadas e o sistema trabalha com dados mais generalistas.

2.3.2 Automação de subestação

Subestações são pontos de interconexões da rede elétrica no qual ocorrem controle e proteção. Nelas podem ser coletadas informações e medidas sobre o funcionamento dos equipamentos da rede. O trabalho nas subestações estava ligado ao uso de medidores, relés e SCADA, porém, atualmente a ideia de automação de subestação ganhou força com o advento das *Smart Grids*, integrando os equipamentos através do sistema elétrico. Nesse ponto entram os IED (Intelligent Electronic Devices - Dispositivos Eletrônicos Inteligentes) que podem transmitir seus dados operacionais através de múltiplos canais de comunicação e protocolos (FALCÃO, 2010).

Vários protocolos estão envolvidos na automação de subestação tais como: IEC 61850, CIM, XML, etc. Também na área da comunicação várias formas são possíveis e o protocolo de transmissão de dados estão baseados em IP (Internet Protocol).

2.3.3 Automação de distribuição

Essa é a aplicação em que se percebe a melhoria trazida pela *Smart Grid* principalmente com o uso de AMM (Advanced Meter Management - Gerenciamento de Medição Avançada) os famosos *Smart Meters* que trazem a primeira integração entre os clientes e as concessionárias, no qual antes tratava-se apenas com coleta de dados. (FALCÃO, 2010).

A transmissão das informações pode ser realizada por várias redes de comunicação já aplicáveis no uso dos AMI (Advanced Meter Infraestrutura) e AMM que possibilitam analisar e aplicar resposta a demanda (o sistema ajusta a sua produção em função de como a carga demanda por energia), promovendo avanço com relação ao AMR (Automatic Meter Reading) que faziam coleta de informação, porém, com comunicação unilateral e, portanto, impraticável para *Smart Grid*.

A automação de distribuição busca promover a detecção e isolamento automático de faltas, reconfiguração e restauração de serviço, além de fazer o controle coordenado de tensão e fluxo de reativos possibilitando a integração da geração distribuída seja em micro ou minigeração.

2.4 Tecnologias empregadas

Nas *Smart Grids* muitas tecnologias de empresas de diferentes áreas se combinam para formar uma rede inteligente. Serão tratadas algumas dessas tecnologias nessa seção (BUDKA *et al.*, 2010; ARNOLD, 2011; YAN *et al.*, 2013).

2.4.1 Geração Distribuída (GD)

No sistema elétrico brasileiro a geração é classificada como convencional. Isso significa que o processo de geração de energia é distante e isolado do consumidor, em locais onde o acesso é restrito apenas a pessoas autorizadas. De modo geral, não há comunicação direta entre a geração e o consumidor devido a complexidade da relação demanda-oferta. Apesar da robustez do Sistema Interligado Nacional (SIN), há uma hierarquia bem definida de funções, no qual a geração acontece em determinado lugar mantendo o nível de produção, independentemente de como está o processo de demanda por essa energia.

Porém, com a norma 482/2012 da ANEEL o consumidor brasileiro foi autorizado a gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2012).

A definição de geração distribuída depende da locação, dos recursos aplicados ou da potência do sistema. A geração que é próxima às cargas e torna sua aplicação instantânea, diferente de uma geração centralizada em que há o custo de

instalação associado aos recursos disponíveis para implantar uma rede de transmissão que demandará tempo para ligação.

Com a possibilidade de gerar sua própria energia, o consumidor evolui de uma posição passiva para uma posição ativa no setor elétrico (EPE, 2017). Mesmo depois dessa regulamentação, a adoção de sistemas de geração própria levou um tempo para se popularizar. Em 2016 houve um incremento de quatro vezes no número de instalações, terminando o ano com 81 MW instalados, distribuídos em 7,7 mil unidades (ANEEL, 2017).

A ANEEL define a geração distribuída em duas categorias segundo a Lei 14.300/2022:

- a) Microgeração: central geradora de energia elétrica, com potência instalada, em corrente alternada, menor ou igual a 75 kW (setenta e cinco quilowatts) e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras (BRASIL, 2022).
- b) Minigeração: central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW (setenta e cinco quilowatts), menor ou igual a 5 MW (cinco megawatts) para as fontes despachados e menor ou igual a 3 MW (três megawatts) para as fontes não despachados, conforme regulamentação da Aneel, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras (BRASIL, 2022). As fontes fotovoltaicas pela lei só podem operar com até 3 MW, anteriormente com a norma da Aneel elas poderiam ter até 5 MW, todas as outras tem limite de 5 MW.

2.4.2 Sistema de Armazenamento

Numa unidade que aplica fontes alternativas de energia como painéis fotovoltaicos, a maior parte de sua geração estará focada no período do dia, porém, o período da noite é quando o consumo é mais significativo. Nesse contexto, as *Smart*

Grids prevêem a implementação de armazenamento de energia através de bancos de baterias, *flywheels*, supercapacitores, tornando o sistema capaz de operar também de forma autônoma em casos de desligamento ou funcionando como regulador de tensão nas cargas.

Na modalidade convencional a energia produzida é despachada para o consumo automaticamente sem uma análise prévia de como a região está demandando mais energia porque não há como armazenar essa energia para um outro momento e seu uso é ocasionado pelo custo elevado envolvido no armazenamento de energia atual. Dessa forma a rede está focada na taxa máxima de demanda, ao invés da taxa média, tornando o sistema subaproveitado e caro. Caso o armazenamento seja possível com técnicas e equipamentos mais acessíveis, a confiabilidade e eficiência do sistema de geração de energia aumenta e possibilitando o máximo aproveitamento das energias solar e eólica.

2.4.3 Medição inteligente

No sistema tradicional as medições são realizadas manualmente por um funcionário da concessionária. Nesse contexto os medidores são eletromecânicos ou eletrônicos, não apresentando comunicação direta com a concessionária, restringindo-se a leitura do consumo. A figura 4 mostra um modelo teórico de *Smart meter* (medidor inteligente).

Figura 4 - Modelos de medidores inteligentes (Smart Meters)



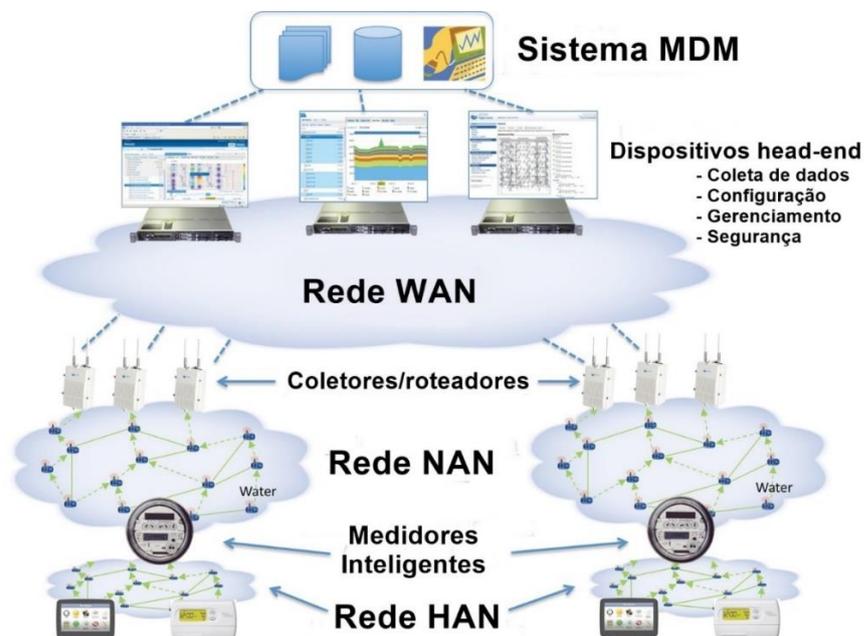
A medição inteligente transpassa a estrutura de medição junto às unidades consumidoras e tem seu processo iniciado na geração e encerrando no consumidor final. Os medidores inteligentes tornam o consumidor ativo e participante em relação ao modelo atual de medição.

Os medidores inteligentes da primeira geração, AMR (Automatic Meter Reading - leitura de medição automática), têm comunicação unidirecional que os torna, apenas, coletores de dados.

Neste contexto, se apresenta o AMI (Advanced Meter Infrastructure-estrutura avançada de medição), sistema que engloba não só medidores, mas toda a infraestrutura necessária para um sistema *Smart Grid*:

A AMI (em português, estrutura avançada de medição) é uma infraestrutura de medição automatizada com a aquisição de comunicação bidirecional e gerenciamento de dados através de MDM (Gerenciador de Dados de Medição) (YAN *et al.*, 2013). A figura 5 mostra o arranjo de comunicação para cada camada da rede.

Figura 5 - Infraestrutura de comunicação do AMI: Arranjo.



Fonte: Adaptado de Electric Energy.

Os medidores inteligentes fazem a função que era realizada por colaboradores manualmente nas residências, ele coleta de forma digital e envia para concessionária os dados. Porém, o AMI consiste numa estrutura bem mais complexa,

se relacionando com toda a rede e centro de controle em uma *Smart Grid*, através da troca de informações bidirecionais (FALCÃO, 2010).

Esses aspectos tornam os consumidores agentes ativos na rede, cuja atuação será cada vez mais constante e deve apresentar condições de interagir com a concessionária.

Um aspecto importante sobre o AMI é a versatilidade para transmitir a informação ao longo da rede. Há várias maneiras conhecidas e aplicadas mundialmente para transmitir informação e cabe ao gerenciador ou as concessionárias fazerem uso dos meios que melhor lhes atenda nas questões mais básicas como custos até as questões mais complexas como padronização, escalabilidade e interoperabilidade além dos congestionamentos.

HAN (home area network) é a rede de comunicação na qual o medidor inteligente residencial está ligado, além de possíveis microrredes. Nessa rede, os dispositivos residenciais com capacidade de controle via internet poderão ser gerenciados também diretamente pela concessionária em uma situação mais futura.

Na NAN (neighbourhood area network) estão conectados todos os medidores vizinhos de onde dados serão aglutinados para serem repassados a uma unidade central. Logo, a robustez deve ser maior, assim como o nível de segurança e eficiência (YU *et al.*, 2011).

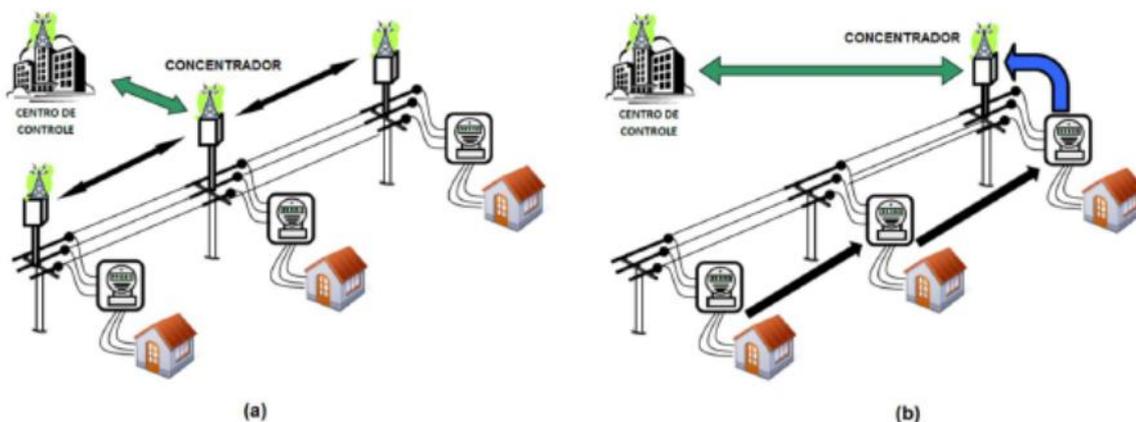
WAN (wide area network) é a parte da rede que está incluída a MDM (Metering Data Management - Gerenciador de Dados de Medição), ou seja, a parte que gerencia os dados dos consumidores e de onde se processa esses dados para uso eficiente da rede. Os dados de determinadas áreas são transmitidos do MDMs ao sistema responsável pelo processamento e gerenciamento da concessionária. Essa rede pode ser fibra óptica, telefonia, PLC e etc (YU *et al.*, 2011).

2.4.4 MDM (Metering Data Management)

OS MDMs (em português, Gerenciador de Dados de Medição) são unidades de coleta dos dados dos medidores eletrônicos, das unidades consumidoras, numa infraestrutura de aglutinação e filtragem desses dados para posterior transmissão para o sistema de gerenciamento de dados (MME, 2020). Essa coleta de dados de consumo e perfis de consumo possibilita o processo de informação para retorno de benefícios para os clientes e para a concessionária.

O MDM utiliza outras estruturas intermediárias que são os concentradores (dispositivos responsáveis por receber dados dos *Smartmeters* de uma determinada área onde é feito um pré-processamento para organizar os dados e enviá-los aos MDMs). Na figura 6 é mostrado o mecanismo de operação de um MDM.

Figura 6 - Gerenciamento da Smart Grid



Fonte: ABOBEIRA; CRUZ, 2016

Os MDMs não trabalham isolados e outros recursos estão juntos como o Sistema de Gerenciamento da Distribuição (DMS – *Distribution Management System*), Sistema de informações Georreferenciadas – GIS (*Georeference Information System*), Sistema de Gestão de Falhas de Energia (OMS – *Outage Management System*), etc (MME, 2020).

Segundo o relatório levantado pelo Ministério de Minas e Energia em parceria com outras instituições, os MDMs devem apresentar as seguintes funções (MME, 2020):

- a) Armazenamento dos dados de medição;
- b) Mapeamento de ativos e do estado dos equipamentos monitorados;
- c) Escalabilidade;
- d) Integração com sistemas legados;
- e) Monitoração de processos;
- f) Capacidade de previsão de falhas em equipamentos (transformadores, medidores, interfaces de comunicação, etc);
- g) Capacidade para processar, analisar e padronizar as informações recebidas;

h) Parametrização de sistemas e equipamentos de medição.

2.4.5 Precificação dinâmica

Segundo Falcão (2010) a condição de precificação dinâmica é feita através de comunicação bidirecional promovida pela *Smart Grid*. A operação bidirecional de uma *Smart Grid* implica que a rede pode tanto fazer o envio de energia até determinado estabelecimento quanto distribuir a energia proveniente da rede produtora para suas cargas internas e para a rede da concessionária.

Então em uma unidade *prossumidora* (produz e consome energia) onde há excesso de produção, esse excesso de energia deve ser injetado na rede elétrica e retornando em benefícios aos proprietários da unidade de acordo com a regulação.

2.4.6 IEDs (Intelligent Electronic Devices)

Esse dispositivo é definido pela inGRID T & D (empresa destacada no setor) como um equipamento microprocessado com relés, disjuntores, transformadores e bancos capacitores, para controle e automação. Eles processam dados de sensores e outros equipamentos para regular a posição dos TAPs dos transformadores e ajustar outras áreas da rede que estão no seu domínio. A modelagem de um IED está regulamentada pela IEC 61850 e seus principais usos estão vinculados à automatização da subestação.

Os IEDs estão associados ao processamento de dados e a infraestrutura de comunicação (FALCÃO, 2010).

2.4.7 Equipamentos inteligentes

Engloba os dispositivos residenciais e comerciais como eletrodomésticos e outros. Esses equipamentos conectam-se à rede a fim de identificar o melhor momento de utilizar a energia.

Geladeiras, microondas, TVs, máquinas de lavar e qualquer equipamento que consuma futuramente serão *Smarts* por questão de eficiência. A ideia de equipamentos inteligentes é bem ampla e fará com que as perdas sejam muito pequenas além de poderem se autoadministrar para obterem melhores preços através

de horários de funcionamento que sejam economicamente viáveis. Tudo será mais dinâmico e as IoTs desempenharão grande papel nessa área. (FALCÃO, 2010).

2.4.8 PMUs (*Phasor Measurement Units*)

A Medição Fasorial Sincronizada (PMU na sigla inglesa) é um dispositivo que mede o fasor que será usado na determinação de frequência útil para identificar e analisar as condições do sistema. O PMU faz 60 medições por segundo, sendo muito utilizada pelo sistema SCADA pela vantagem de coletar os dados usando GPS (Sistema de Posicionamento Global) para obter amostras sincronizados na rede. Esse método é utilizado atualmente no monitoramento do sistema elétrico (FALCÃO, 2010).

2.4.9 SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*)

O sistema SCADA provê controle e monitoramento em tempo real da rede de distribuição elétrica. É utilizado em larga escala para gerenciamento de automação descentralizada e controle remoto em subestações de média tensão, ajudando a garantir a confiabilidade do suprimento de energia e reduzindo os custos de manutenção e operação da rede. O DMS (Distribution Management System) e o EMS (Energy Management System) são sistemas associados ao SCADA.

O SCADA também trabalha na interceptação de arquivos perigosos da rede. O controle do processo pode ser feito remota e automaticamente com RTUs e CLPs. Várias tecnologias como VPN, firewall, autenticação de usuários e dispositivos, sistema de detecção de intrusos (IDS- Intrusion Detection System) são usados para tornar a rede segura.

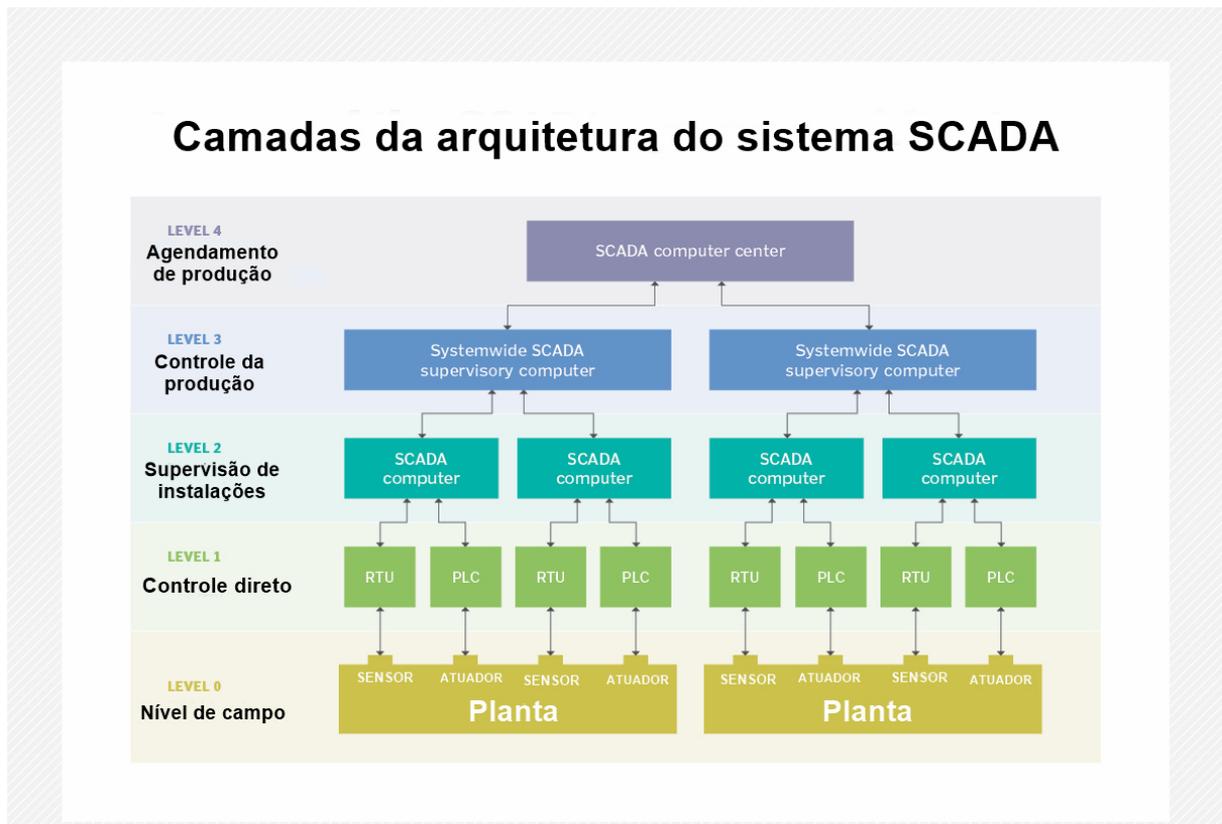
Os arquivos que chegam à rede devem ser devidamente sincronizados para que garantam a confiabilidade e segurança do sistema SCADA.

Um sistema SCADA consiste em quatro partes.

- a) Dispositivos de interface de dados como RTU (Unidade Terminal Remota) e CLP (Controlador Lógico Programável)
- b) Rede de comunicação como Rádio, cabos, telefonia ou satélite;
- c) Centro de Unidade Terminal Mestre (MTU- Master Terminal Unit);
- d) Sistema ou softwares de interface homem-máquina (IHM).

A figura 7 apresenta uma arquitetura SCADA (CHIKUNI; DONDO, 2007).

Figura 7 - Arquitetura de um sistema SCADA.



Fonte: Tech Target Network

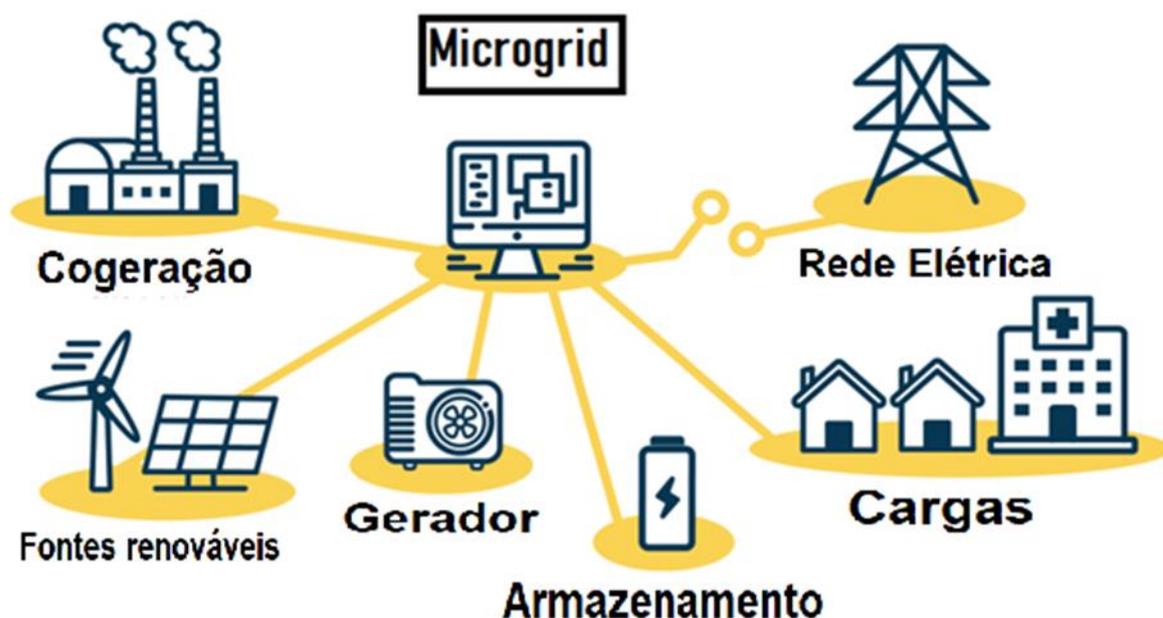
Por isso, os consumidores precisam estar de acordo com a rede que gerencia o sistema sobre a referência de tempo no uso do sistema. Isso pode ser feito com o uso de GPS que faz essa sincronização e também garante registros de acesso e outros mecanismos de segurança e precisão (CHIKUNI; DONDO, 2007).

3 MICRORREDES

As microrredes são sistemas de energia elétrica que se organizam pela combinação de recursos energéticos distribuídos (REDs) que podem atuar conectadas diretamente na rede principal ou em modo ilhado se contrapondo a uma utilização isolada dessas fontes que poderia trazer prejuízo e custos elevados (AL-SHERHRI; GUO; LEI, 2021).

Envolvem toda uma organização entre microfuentes, cargas, armazenadores, gerenciadores, controladores e sistema de comunicação, excluindo a ideia de uma geração distribuída que apenas gera e distribui energia sem qualquer cuidado adicional. O desenvolvimento de microrredes deu-se a partir dos sistemas de energia renováveis, que são capazes de gerar e gerenciar o consumo e fornecimento do excedente de energia à rede (GUERRERO *et al.*, 2010). A figura 8 mostra uma representação ilustrativa de microrredes.

Figura 8 - Modelo de microrrede



Fonte: Naseo, modificado pelo autor.

Essa microrrede pode ser considerada uma parte da rede geral, onde há pequenos REDs que atuam conectadas a rede principal ou estar em modo ilhado

devido a sua possibilidade de atuar na qualidade de potência, tensão, energia, perdas no sistema e diminuição da poluição devido a natureza sustentável da tecnologia (AL-SHERHRI; GUO; LEI, 2021). Microrredes são projetadas para atuarem isoladamente e, portanto, desconectarem-se da rede a qualquer momento passando a operar em paralelo com o sistema elétrico de potência. (IEEE 1547-4, 2011).

3.1 Flexibilidade de operação das microrredes

As microrredes são úteis no atendimento de pequenas quantidades residenciais em locais de difícil acesso ou onde o investimento é proibitivo. Sua principal característica é o consumidor gerar sua energia tão próximo à carga com possibilidade de transferência do excedente para o sistema elétrico de potência (KATIRAEI et al, 2008). Sua principal forma de geração vem de fontes limpas como eólicas, solares, pequenas turbinas a fio d'água, biomassa e outras.

A adoção das microrredes busca a qualidade de energia, principalmente, em ambientes de acesso limitado e estruturas de transmissão precárias. Elas não se limitam ao uso residencial, estando presentes em hospitais, comércios, escolas. Outra vantagem está na redução dos custos de transmissão de energia aliados ao controle remoto do sistema (ABBAY *et al.*, 2014).

Numa microrrede, dois componentes devem ser observados com cuidado, as chaves estáticas que farão a abertura do circuito e tornarão o sistema ilhado e as microfontes que serão implantadas. Os pontos mais críticos são observados devido ao uso de fontes de alimentação intermitentes em seu sistema. A energia fotovoltaica, por exemplo, é instável ao longo do dia fazendo necessária a utilização de baterias em locais onde não há conexão com a rede. As instabilidades também são percebidas em fontes eólicas que dependem dos ventos que não são constantes (STRBAC *et al.*, 2015).

3.2 Componentes importantes

As microrredes tem por papel fundamental a produção de energia elétrica para suas próprias cargas através do uso de conversores e posteriormente gerenciamento e proteção desses recursos (JUNIOR; FREITAS, 2020). Há

componentes que são importantes para a existência de uma microrrede prática e nesta sessão serão abordados alguns deles.

3.2.1 Recursos energéticos distribuídos - RED

Os recursos energéticos distribuídos são núcleos das microrredes. Esses têm como principal objetivo aproveitar os recursos que estão dispersos pela rede como geração distribuída (GD) e armazenamento de energia que não seriam alcançados pelo arranjo centralizado da rede.

A geração distribuída possibilita a produção contínua e constante de energia. Elas podem vir de fontes geradoras variáveis como são as fotovoltaicas, eólicas e intermitentes como as pequenas centrais hidrelétricas, ainda podem ser classificadas como renováveis ou não renováveis (JUNIOR; FREITAS, 2020).

As fontes de GD não são apenas produtoras de energia ativa, podendo ser também reguladoras da qualidade do serviço de energia corrigindo fator de potência, diminuindo a distorção harmônica, realizando regulação de tensão além de reduzir as perdas na rede de energia.

A capacidade de armazenamento de energia pelo uso das baterias é uma característica promissora nas microrredes, pois a autonomia é alcançada mesmo com falhas na rede de distribuição (KROPOSKI *et al.*, 2008).

3.2.2 Eletrônica de potência

Os dispositivos de eletrônica de potência utilizam chaveamento de elementos semicondutores para alterar as características elétricas das fontes de energia. A variedade de conversores eletrônicos é tão diversa quanto a possibilidade de fontes, apresentando tanto entradas quanto saídas CC e CA, além da mudança de frequência (HART, 2012).

A eletrônica de potência é o modelo mais comum de tratamento de recursos energéticos distribuídos, fazendo com que dada uma entrada se obtenha na saída níveis de corrente, tensão e frequência em condições aptas para microrrede na perspectiva de distribuição. Os conversores podem atuar em sistemas fotovoltaicos no rastreamento do ponto de máxima potência, em geradores eólicos podem melhorar o controle de velocidade, em pequenas hidrelétricas garantindo que se mantenham

estáveis, regulando tensão em células a combustível e controlando a carga no armazenamento (CARRASCO *et al.*, 2006).

Os conversores estáticos são usados entre outras funções na transição entre a operação ilhada e conexão com a rede sincronizando as microrredes e o sistema principal. Em sistemas de microrredes que operam de forma ilhada os distúrbios ocorridos pelo desequilíbrio entre oferta e demanda causados pela flutuação na energia gerada também podem ser estabilizados utilizando dispositivos de armazenamento de energia. Nesses casos os inversores precisam estar capacitados a agir rapidamente e com precisão (ROCABERT *et al.*, 2012).

3.2.3 Proteção

As microrredes devem estar preparadas para situações adversas como fluxos bidirecionais de energia e conseguir resolver essa situação de forma precisa. Então, caso não haja segurança no gerenciamento de energia na microrrede, ela deve estar apta a interromper o fluxo de energia imediatamente, impedindo que a instabilidade afete a rede de energia.

Os pontos de proteção não devem ser colocados de forma arbitrária sendo cuidadosamente escolhidos os locais sensíveis como nas saídas dos REDs, entre a microrrede e o sistema elétrico externo e em alguns casos nas cargas (MENON; KAUHANIEMI, 2015).

3.2.4 Cargas

Lasseter *et al.* (2002) e Hatziargyriou *et al.* (2007) entendem as cargas são os equipamentos que consomem energia elétrica. O consumo eficiente das cargas é um objetivo das *Smart Grids*. Quando uma falha na rede elétrica acontece, a microrrede se isola da rede convencional e passa a gerenciar e monitorar todas as cargas seguindo uma ordem de prioridade dividindo as cargas em sensíveis, não-sensíveis e controláveis.

Cargas sensíveis são cargas que devem ser alimentadas em qualquer momento e de qualquer forma e que tem prioridade quando o sistema está operando na microrrede de forma ilhada. Os hospitais são considerados cargas sensíveis assim como alguns aparelhos de emergência e processos industriais.

Cargas não-sensíveis são cargas que podem ser desligadas em situação de ilhamento sem qualquer perda ou perda reduzida, elas não são consideradas críticas e, portanto, não tem qualquer prioridade.

Cargas controláveis são cargas que nem são críticas e, portanto, não tem prioridade, mas também não são indispensáveis, guardando um certo nível de relevância, elas podem estar ligadas ou desligadas dependendo do nível de autonomia da rede em que está conectada.

O termo gerenciamento pelo lado da demanda (DSM - Demand Side Management) é bastante popular e se refere ao uso eficiente das cargas pelo consumidor, para tanto, muito se fala sobre precificação de energia de forma dinâmica com variação de preços em função da demanda do sistema e oferta já que as cargas podem ser monitoradas na *Smart Grid* (PARHIZI *et al.*, 2015).

4 CARACTERÍSTICAS DAS MICRORREDES

As microrredes são projetadas buscando melhorar a qualidade de energia dos consumidores nos momentos de faltas e instabilidades do sistema de energia.

Elas apresentam vantagens nos custos de instalação e gerenciamento. Podendo ser projetadas em diversos tipos de arranjo limitados apenas por questão financeira ou desafios técnicos. Muitas microrredes podem ter uma arquitetura trivial apresentando controles nas cargas, e sua forma de ligação com a rede pode ser bem simples ou nem ocorrer.

Seu projeto depende de qual a localização da microrrede, que tipo de gerenciamento será implementado, como irá se relacionar com o resto da rede e quais controles serão aplicados. Numa escala maior é necessária uma regulamentação para padronizar e melhorar a eficiência (TON; SMITH, 2012).

A arquitetura de uma microrrede deve garantir que haja uma conexão eficiente entre as cargas e as fontes produtoras que farão que essa unidade seja capaz de operar de forma completa ou parcial sem o auxílio da concessionária. Para isso é importante que a microrrede projete seus barramentos de forma a garantir que as fontes possam escoar sua produção para as cargas instaladas automaticamente e sem mudanças prévias. Já que as fontes podem gerar em corrente CC (corrente contínua) ou CA (corrente alternada) em níveis de tensões variados, além de problemas com frequência, portanto, é necessário verificar os conversores que estarão envolvidos no projeto para afastar possíveis problemas. Da mesma forma, os controles utilizados devem ser previstos pelo projetista a fim de promover uma geração e distribuição de energia dentro dos padrões desejados.

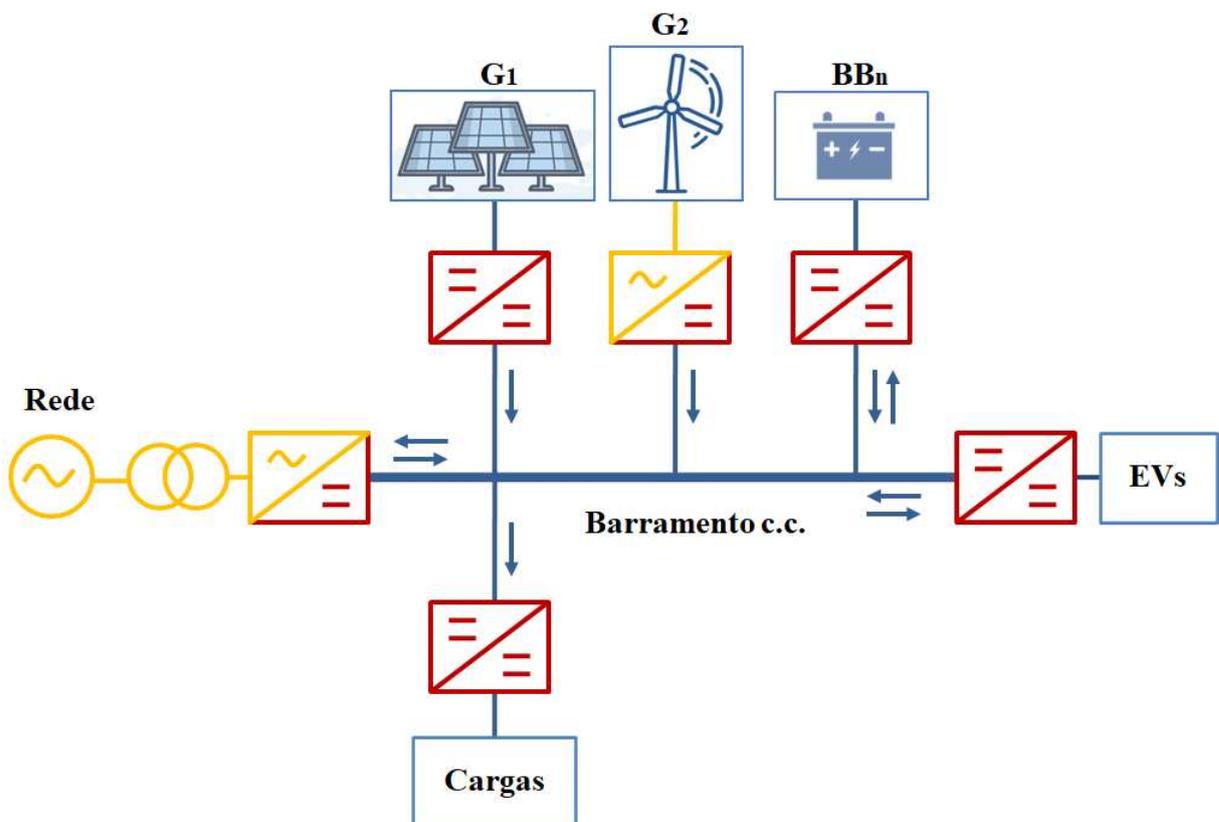
Por fim, a maneira como a microrrede irá operar varia de projeto para projeto. Muitas unidades consumidoras desejam apenas transformar sua pequena produção em uma microrrede para evitar eventuais falhas na rede de energia, enquanto outras ligadas a complexos industriais ou comerciais desejam manter sua autonomia perante ao sistema.

Veremos a seguir os barramentos utilizados pelas microrredes para gerenciamento interno e externo.

4.1.1 Barramento CC

Usado para conexão da microrrede em corrente contínua. Emprega conversores CC-CC (conversor boost ou buck) para conectar as fontes fotovoltaicas, os veículos elétricos, as baterias e as cargas corrente contínua do sistema ao barramento. Em situações em que há geração e consumo corrente alternada serão necessários os usos de conversores CC-CA (inversores) e CA-CC (retificadores). A figura 9 mostra uma ilustração de um barramento CC.

Figura 9 - Barramento CC



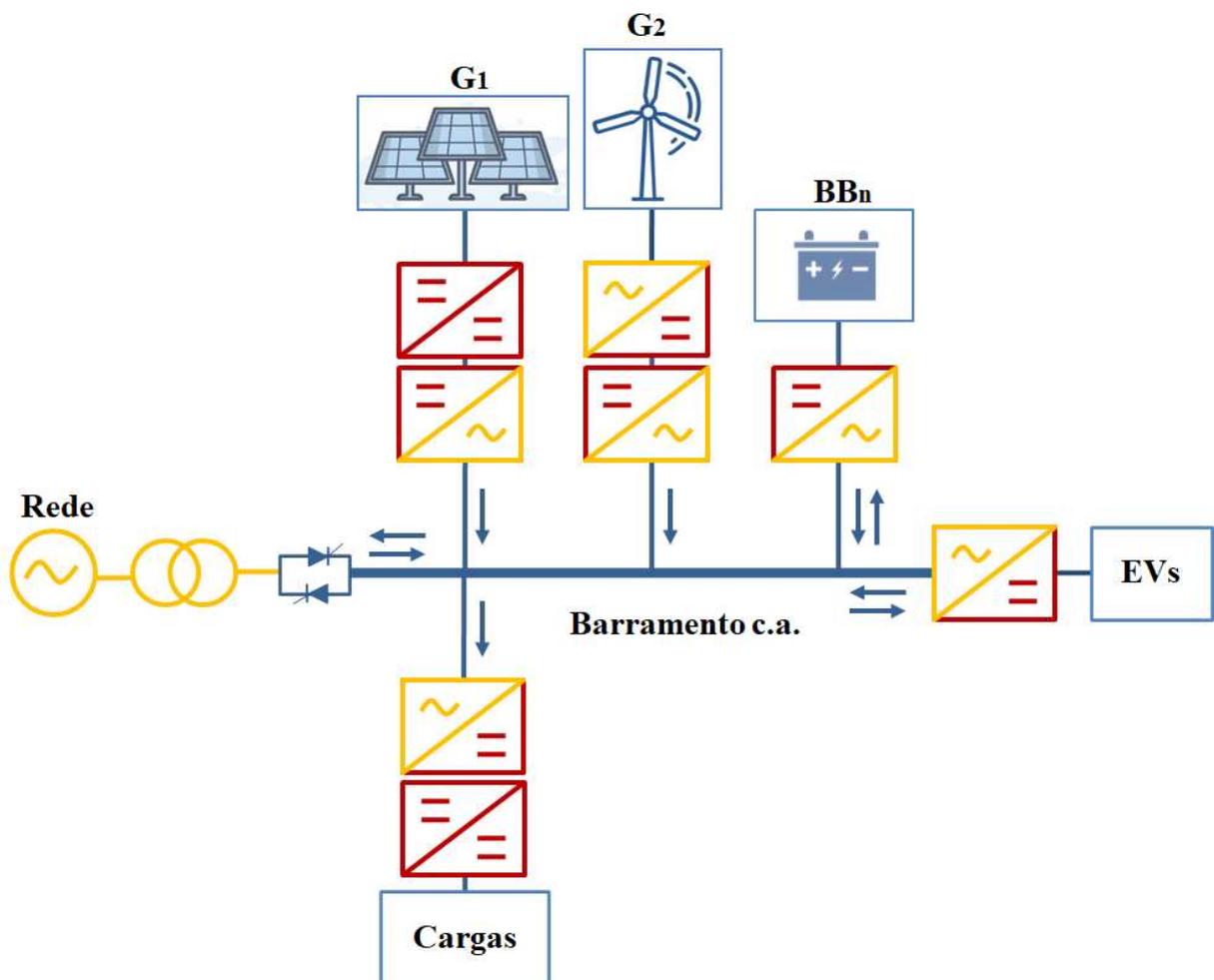
Fonte: KUMAR; ZARE; GHOSH; 2017.

Esse tipo barramento não é interessante em casos de grande quantidade de fontes e cargas de corrente alternada(KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017).

4.1.2 Barramento CA

A escolha desse barramento se deve pela possibilidade de conexão direta com a rede externa, pela maior quantidade de elementos de geração alternada como geradores rotativos e conseqüentemente fontes eólicas e cargas que se utilizam de corrente alternada. Apesar de as cargas poderem ser acopladas diretamente, na prática, para que as fontes sejam conectadas ao barramento são utilizados conversores CA-CA (AL-SHERHRI; GUO; LEI, 2021). A figura 10 mostra uma ilustração de um barramento CA.

Figura 10 - Barramento CA



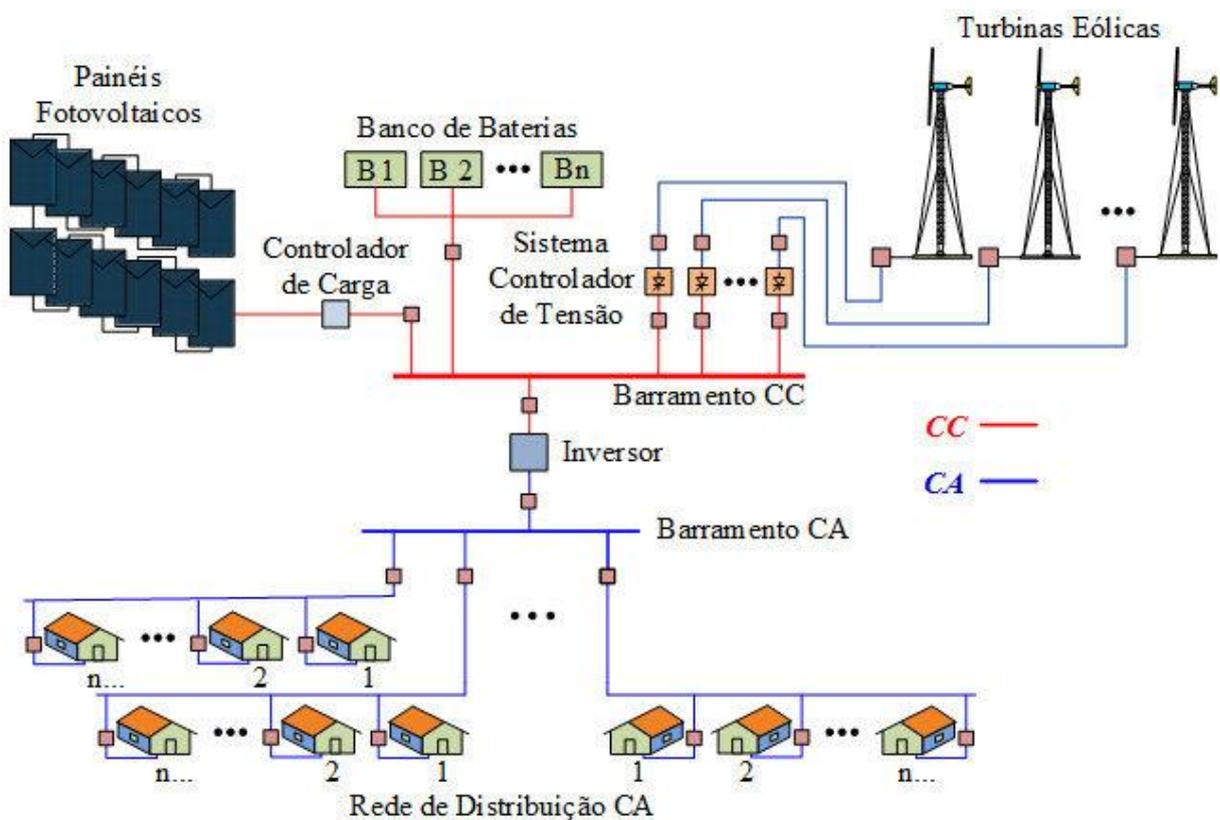
Fonte: KUMAR; ZARE; GHOSH; 2017.

O fluxo de potência irá de fontes CC para o barramento CA através do uso de inversores CC-CA quando a microrrede estiver sobrecarregada.

4.1.3 Barramento Híbrido

Esse arranjo combina as qualidades dos barramentos CC e CA, de modo que a microrrede passa a executar separadamente cada tipo de situação fazendo com que haja operação conjunta. Em caso de sobrecarga em um barramento o outro é demandado através de um inversor bidirecional (AL-SHERHRI; GUO; LEI, 2021). A figura 11 mostra um tipo de barramento híbrido.

Figura 11 - Barramento híbrido



Fonte: OLIVEIRA, 2017.

No barramento híbrido, a rede da concessionária juntamente com as cargas, fontes eólicas e rotacionais são conectadas ao barramento CA enquanto que fontes contínuas como fotovoltaicas, cargas e baterias estarão conectadas no barramento CC (KUMAR; ZARE; GHOSH, 2017).

4.2 Tipos de controle

O controle da microrrede precisa garantir que na medida que o sistema cresce pelo incremento de novas micro ou minifontes não seja necessário modificações no sistema existente.

Ter controle e gerenciamento é um requisito nas *Smart Grids* (AMIN; WOLLENBERG, 2006) e nas microrredes (PIAGI; LASSETER, 2006).

O gerenciamento e otimização das fontes e cargas é essencial para que as microrredes possam operar com segurança e qualidade (EID *et al.*, 2016).

4.2.1 Comunicação

Quanto a forma de comunicação, o controle aplicado nas microrredes podem ser de 3 maneiras principais (VASILAKIS; LAGOS; HATZIARGYRIOU, 2020).

O controle centralizado apresenta um único controlador que gerencia e se comunica com todos os outros componentes de decisão inferiores através da coleta de dados de entrada de controles menores em um único processo de otimização (TSIKALAKIS; HATZIARGYRIOU, 2011).

No controle descentralizado, vários sistemas de controle, com controladores individuais não compartilham informações mesmo que haja uma grande quantidade de interações no sistema (TSIKALAKIS; HATZIARGYRIOU, 2011).

No controle distribuído há compartilhamento entre controladores para que cada um tenham conhecimento do estado de operação dos demais controladores para melhorar a performance do sistema (TSIKALAKIS; HATZIARGYRIOU, 2011).

Tabela 2 - Métodos de controle

Tabela: Comparando métodos de controle		
Método	Vantagens	Desvantagens
Centralizado	-Solução de otimização de todo sistema	-Complexidade computacional significativa -Necessidade de infraestrutura de comunicação -Estabilidade afetada pela rede de comunicação

		-Escalabilidade reduzida
Descentralizado	-Alto confiabilidade -Aparato computacional reduzido -Sem necessidade de comunicação -Aumento da escalabilidade	-Sem solução de otimização de todo sistema
Distribuído	-Melhor Confiabilidade -Aparato computacional reduzido -Aumento da escalabilidade	-Necessidade de infraestrutura de comunicação -Estabilidade afetada pela rede de comunicação -Soluções sub-otimizadas

Fonte: Autor, adaptado de (VASILAKIS; LAGOS; HATZIARGYRIOU, 2020).

4.2.2 Estratégia de controle

Quanto as estratégias de controle, as microrredes podem apresentar os métodos de controle mestre-escravo, peer-to-peer, hierárquico. (PRAGYA; THAKUR, 2022).

No controle mestre-escravo, para cada microfonte são utilizados controle V/f, onde V representa a tensão e f a frequência e P/Q, sendo P a potência ativa e Q a potência reativa para trabalharem separadamente. Há também o controle principal que atua na microfonte ajustando o controle V/f para que a tensão e a frequência mantenham-se estáveis. Esse controle é responsável por maximizar a saída de potência através do controle P/Q.

Essa estratégia é interessante quando a microrrede está operando de forma isolada sendo suprida pelas fontes de energia distribuídas (PRAGYA; THAKUR, 2022).

O controle peer-to-peer se destaca pela falta de subordinação entre os elementos controláveis (LINGYUN *et al.*, 2017). Nele, uma unidade da rede opera isolada das outras e não há complexidade porque cada controle faz sua parte localmente independente uns dos outros tornando o sistema mais confiável (THOMBARE; DESHMUKH; MORE, 2016).

O controle *peer to peer* se mostra eficaz quando a microrrede está conectada ao sistema de energia, sendo o controle de inclinação ou droop, o principal

método aplicado. No entanto, o *peer-to-peer* apresenta dificuldade quando o sistema está ilhado, podendo inclusive ser trocado pelo controle mestre-escravo ou uma mescla dos dois.

A estratégia de controle mais estudada para uso em microrredes é a que utiliza um nível de hierarquia ou controle hierárquico. A hierarquia de microrredes segue uma arquitetura convencional do sistema de potência e compõe três camadas principais que são primária (nível de campo), secundária (nível de microrredes) e terciário (nível de rede) (QIN *et al.*, 2014).

As camadas são divididas de acordo com suas funcionalidades e sua dependência hierárquica. (VASILAKIS; LAGOS; HATZIARGYRIOU, 2020)

O controle hierárquico pode ser implementado tanto em redes CC quanto CA e híbridas apresentando características diferenciadas.

O interesse por sistemas com saída CC tais como módulos fotovoltaicos ou células combustíveis exigem barramentos para corrente contínua que necessitarão de controle especializado, sendo o controle hierárquico empregado nessas microrredes em três níveis (GUERRERO *et al.*, 2011).

O primeiro nível tem como função garantir o ajuste das referências de tensão que foram fornecidas aos circuitos de corrente e tensão. Este controle fornece a impedância de saída para conversores de energia para compensar as diferenças nas tensões de referência (GUERRERO *et al.*, 2011). Ele também permite que haja operação paralela entre os conversores e aumenta a performance dinâmica na saída de tensão. Sua desvantagem é que tem desvio de tensão que depende de carga inerente (VASILAKIS; LAGOS; HATZIARGYRIOU, 2020).

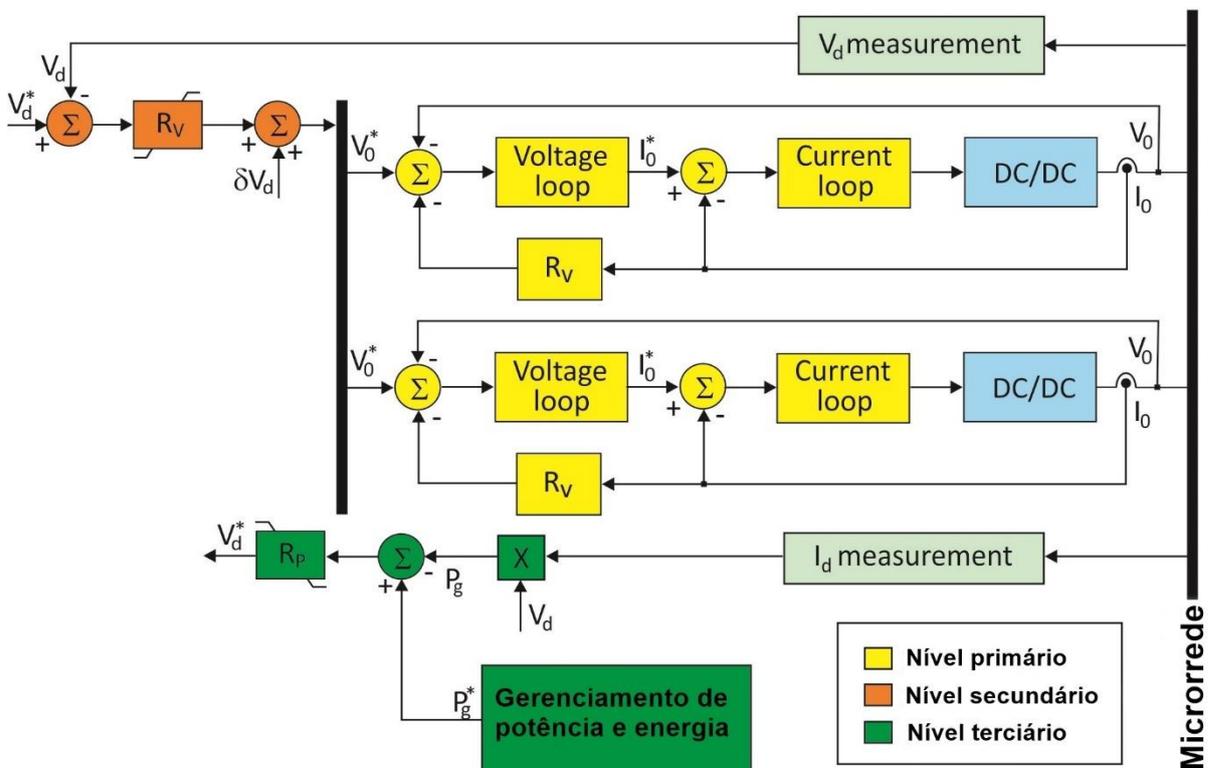
O controle secundário é proposto para resolver o desvio de tensão de controle primário. O nível de tensão na microrrede passa a ser verificado e comparado com uma tensão de referência. A partir daí, o erro processado através de um compensador é enviado para todas as unidades que restaurarão a tensão de saída para conectar a microrrede com uma fonte CC rígida. No momento em que essas atividades ocorrem a microrrede não tem nenhuma troca de energia com a rede externa (VASILAKIS; LAGOS; HATZIARGYRIOU, 2020).

O controle no nível terciário está atuando muito próximo a rede principal e suas funções estão relacionadas ao despacho econômico e agendamento de operação além de verificação e ajuste do fluxo de potência trocado da microrrede com

a rede principal em tempo real se utilizando de sistemas de armazenamento de energia para garantir uma transição suave entre os modos ilhado e conectado. A partir do momento que a rede está conectada na fonte CC, o fluxo de potência pode ser controlado por mudança de tensão dentro da microrrede (VASILAKIS; LAGOS; HATZIARGYRIOU, 2020).

A figura 12 ilustra a estratégia de controle hierárquico aplicada em barramento CC.

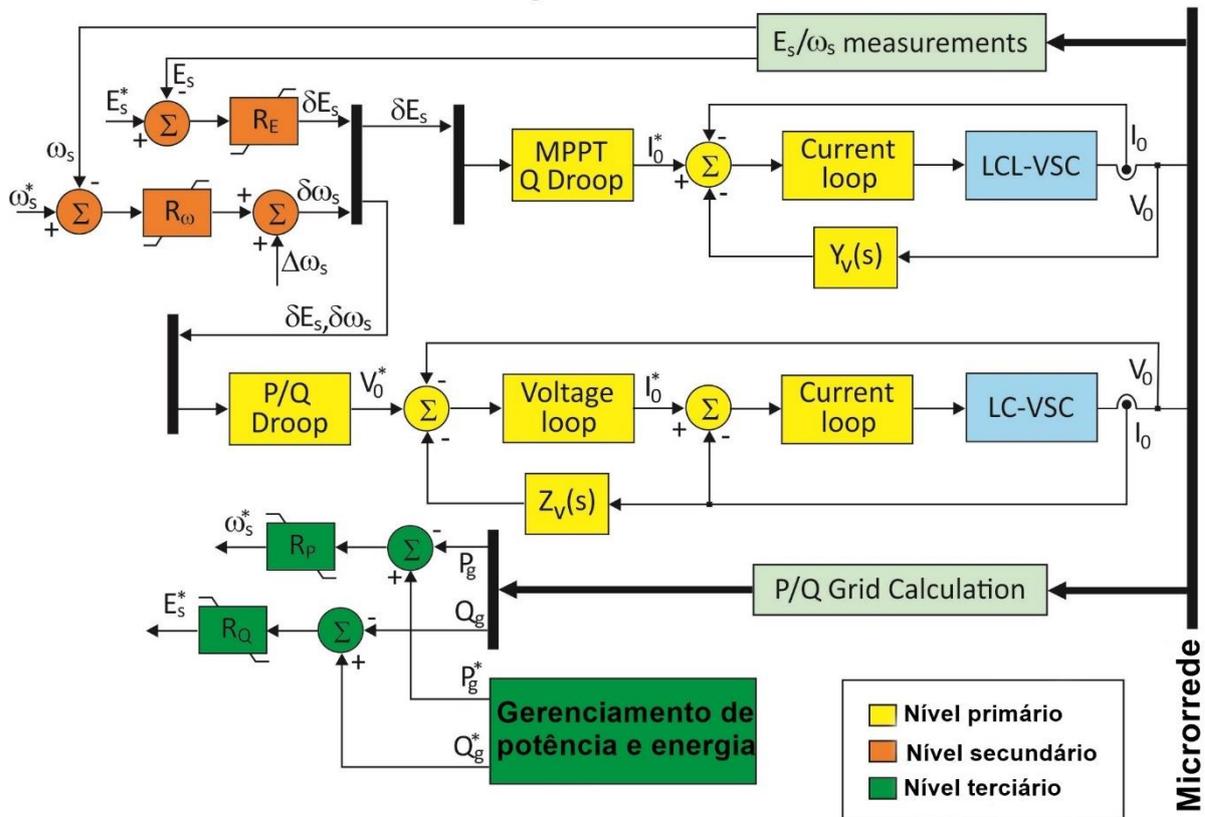
Figura 12 - Controle hierárquico em barramento CC



Fonte: Adaptado de LEIER- Laboratório de Eletrônica Industrial e Energias Renováveis

O controle hierárquico em microrredes CA apresentam os mesmo três níveis de CC. A figura 13 ilustra a estratégia de controle hierárquico em barramento CA (VASILAKIS; LAGOS; HATZIARGYRIOU, 2020).

Figura 13 - Controle hierárquico em barramento CA



Fonte: Adaptado de LEIER- Laboratório de Eletrônica Industrial e Energias Renováveis

A função do controle primário é ajustar a frequência e a amplitude da tensão de referência fornecida para o circuito de corrente de entrada e tensão (HOU *et al.*, 2018).

Para isso se utiliza do método de inclinação P/Q. Seu uso é interessante no modo de conexão com a rede para ter uma boa precisão de potência ativa e reativa injetada. Esses circuitos de controle permitem a conexão em paralelo de inversores, sua implementação é fácil, se baseando em geradores síncronos, e não necessita de comunicação entre as unidades geradoras (VASILAKIS; LAGOS; HATZIARGYRIOU, 2020).

O controle secundário é proposto a fim de compensar os desvios de frequência e amplitude de tensão. Os níveis de frequência e amplitude de tensão na microrrede são analisados e comparados com a frequência e amplitude de tensão de referência. Deste modo, os erros processados através de compensadores são

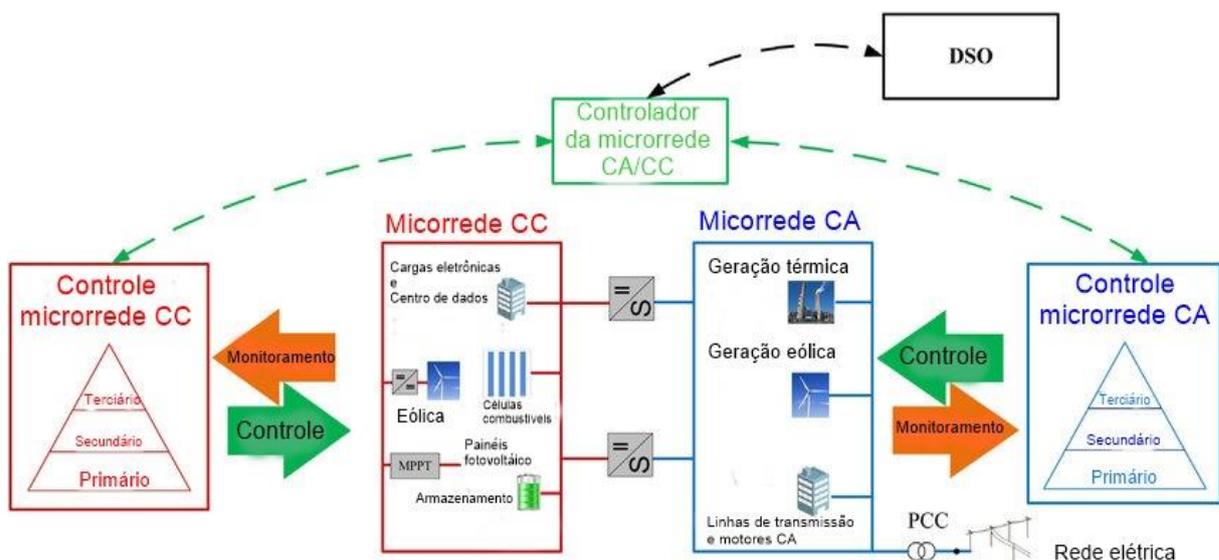
enviados para todas as unidades para restaurar a saída de tensão (VASILAKIS; LAGOS; HATZIARGYRIOU, 2020).

No momento da conexão da microrrede com a rede externa, a tensão e a frequência da rede são medidas e usadas como referências por circuito de controle secundário. A fase entre rede e microrrede são medidas e enviadas para todos os módulos para sincronizar a fase da microrrede. Depois de sincronizar a microrrede pode voltar a conexão com a rede da concessionária através de uma chave estática by-pass (HOU *et al.*, 2018).

Quando a microrrede opera conectado à rede, o fluxo de potência é controlado através do ajuste de frequência e da amplitude da tensão dentro da microrrede. (HOU *et al.*, 2018).

Por fim, o método de controle hierárquico aplicado na microrrede híbrida é diferente do estudado nas redes CC e CA. O controlador central é quem faz o gerenciamento do conversor interconectado e os controles dos sistemas CA e CC em seus barramentos independentes. Há outros métodos de controle em níveis mais abaixo como o método mestres-escravo (PRAGYA; THAKUR, 2022). A figura 14 mostra uma ilustração de controle hierárquico em barramento híbrido.

Figura 14 - Controle hierárquico em barramento híbrido



Fonte: Adaptado de VAFAMEHR, 2016.

4.3 Tipos de operação de microrredes

As microrredes operam de duas formas com relação a rede elétrica: conectada à rede ou ilhada (a IEEE 1547.4 (2011) define como uma alternativa de fornecimento de energia em que os usuários tem autonomia e estão totalmente dependentes dos recursos controlados por eles). É importante entender que uma microrrede pode estar conectada/desconectada na rede elétrica temporariamente ou permanentemente.

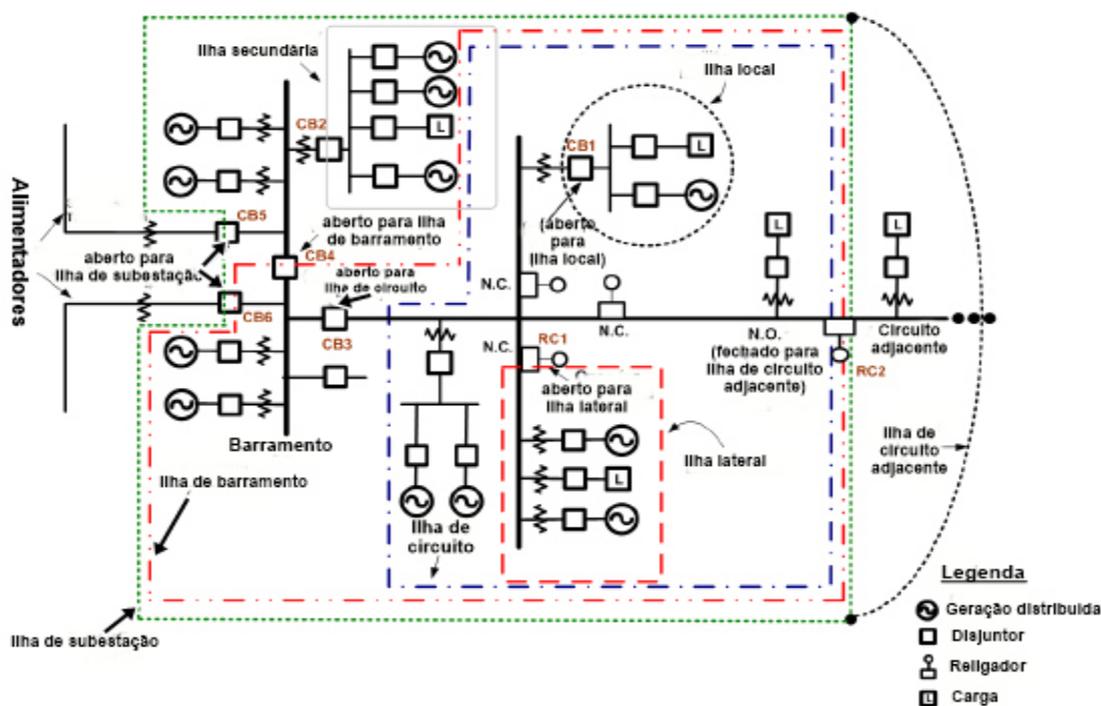
Assim, a conexão ou desconexão de uma microrredes deve seguir um planejamento prévio que dependerá do usuário da rede para atender as necessidades como uma falta na rede elétrica ou instabilidades danosas aos equipamentos (VANDOORN, 2011).

4.3.1 Operação conectado

A operação conectada (On Grid) possibilita ao consumidor fornecer energia e descontar no sistema de crédito ou se for fornecedor do sistema conforme está regulamentado e aprovado nas mais atuais legislações do país (BRASIL, 2022; ANEEL, 2023).

Na situação apresentada a microrrede opera em sincronia com a rede externa que fornece e recebe energia da microrrede através das fontes renováveis. Para isso são usados inversores (conversores CC/CA) captando a energia de fontes fotovoltaicas pelo barramento CC e caso haja fontes eólicas ou outra modalidade alternada, é possível adicionar conversores CA/CA que farão a devida conversão dos valores de tensão e frequência variável da fonte eólica através do barramento CA da microrrede para o barramento CA do sistema elétrico de potência (IEEE 1547.4, 2011). A figura 15 apresenta um arranjo de microrredes conectada ao sistema elétrico de potência.

Figura 15 - Operação conectada à rede elétrica



Fonte: Adaptado de IEEE 1547.4, 2011

Uma microrrede ligada no sistema elétrico de potência é uma situação de transmissão comum de energia na qual a *Smart Grid* pode ser aplicada (IEEE 1547.4, 2011).

4.3.2 Operação de Ilhamento

Essa modalidade de operação, chamada de ilhada ou Off Grid é aplicada com a intenção de fornecer, por exemplo, energia para cargas sensíveis ou quando a produção de certa indústria não pode parar por causa dos custos. A microrrede não precisa suprir todas as cargas nela ligadas quando está ilhada e, por isso, é importante que o cliente continue ligado à rede principal de energia.

A utilização de microrredes ilhada deve ser pontual na maioria dos casos, priorizando a alimentação de cargas essenciais. Outras áreas devem permanecer sem cobertura, ainda assim, é necessário que haja comunicação entre os componentes da microrrede internamente e com a concessionária (IEEE 1547.4, 2011).

Para prover controle autônomo é necessário que a microrrede tenha operação *peer-to-peer* e *plug-and-play* em cada componente. Quando falamos de

peer-to-peer significa que não há componentes, como controle mestre ou unidade de armazenamento central. Dessa forma, a rede poderá continuar em operação mesmo com baixas de componentes ou geradores.

A característica *plug-and-play* significa que a uma unidade nova pode ser implantada em qualquer local do sistema elétrico sem qualquer tipo de reorganização de controles e planejamento diferenciado. Essa situação é ótima para a instalação de geradores próximo às cargas, principalmente cargas térmicas (PIAGI; LASSETER, 2006).

Nessas configurações há a presença de um disjuntor operando essas redes, que caso precise ser acionado, devido a problemas no sistema de potência, ele desconecta a microrrede do sistema elétrico convencional e passa a trabalhar apenas como microrrede local, alimentando as cargas com as fontes instaladas.

Operar em modo ilhado leva a algumas considerações que são abordadas na norma (IEEE 1547.4, 2011).

- a) Mudanças de direção e magnitude do fluxo de potência;
- b) Controle de tensão, frequência e qualidade de energia;
- c) Quantidade de possibilidade de pontos de conexão;
- d) Mudança nos esquemas de proteção;
- e) Monitoramento, troca de informação e controle;
- f) Características de carga na área local do SEP que será ilhado;
- g) Características e funcionalidade das GDs;
- h) Condições de regime permanente e transitórios;
- i) Interação entre as fontes de energia;
- j) Margem de reserva, limitação de carga e resposta a demanda;
- k) Captação de baixa carga.

Também deve se salientar que quando se desconecta da rede algumas preocupações nessas microrrede são vistas como (IEEE 1547.4, 2011):

- a) Possibilidade de danos de equipamentos por variações de tensão e frequência da energia entre pela fonte;
- b) Uma GD adequada e confiável;
- c) Redução da área de confiabilidade do SEP pelo aumento da complexibilidade do Sistema;

- d) Segurança para população comum, pessoal de emergência e operadores;
- e) Possibilidade de redução na qualidade de energia;
- f) Peso na probabilidade de falta na mudança entre os modos de operação, integrado e ilhado;
- g) Coordenação na proteção do Sistema;
- h) Coordenação de esquemas de sobrecarga;
- i) Regulação de tensão e frequência;
- j) Desequilíbrio de carga;
- k) Harmonização entre geração e carga.

A norma também lista as principais questões que devem ser observadas para quem deseja tal operação, que são (IEEE 1547.4, 2011):

- a) Deve existir um acordo entre o operador da área local do SEP para a possibilidade de operação em modo ilha;
- b) A partição e não participação da GD precisa ser identificada;
- c) Antes da formação de uma ilha planejada, cada GD que está operando em paralelo com a respectiva área do SEP de respeitar as diretivas das normas locais de operação;
- d) Estudos devem ser elaborados para a operação adequada do planejamento da ilha;
- e) As devidas adequações da área do SEP para a operação do modo ilhado;
- f) Na iniciação da ilha, deve ser determinada qual a capacidade geração suficiente para suportar a carga da ilha;
- g) A ilha planejada deve manter tensão e frequência para todos os componentes da ilha planejada;
- h) Na ilha planejada, devem ser tomadas considerações para o balanceamento de geração e carga, para evitar o desequilíbrio.

O isolamento ocorre com o uso de um dispositivo que interrompe a ligação com a concessionária, a *Static Switch* (chave estática), através da leitura de tensão local. De maneira que quando o Sistema elétrico de potência falha por algum motivo, então a chave abre e o sistema da microrrede passa a trabalhar de forma ilhado, garantindo a autonomia das cargas sensíveis durante o evento ilhado (IEEE 1547.4,

2011). Após o isolamento, uma microrrede consegue se reconectar com a rede automaticamente depois que não se observam distúrbios presentes.

A sincronização é feita usando a diferença de frequência entre a microrrede ilhada e a rede da concessionária garantindo que não haverá transiente durante o processo e não precisar combinar frequência e ângulo de fases no ponto de conexão (IEEE 1547.4, 2011). Cada microfonte consegue equilibrar perfeitamente a potência na microrrede ilhada através do uso de controlador de inclinação potência vs. frequência.

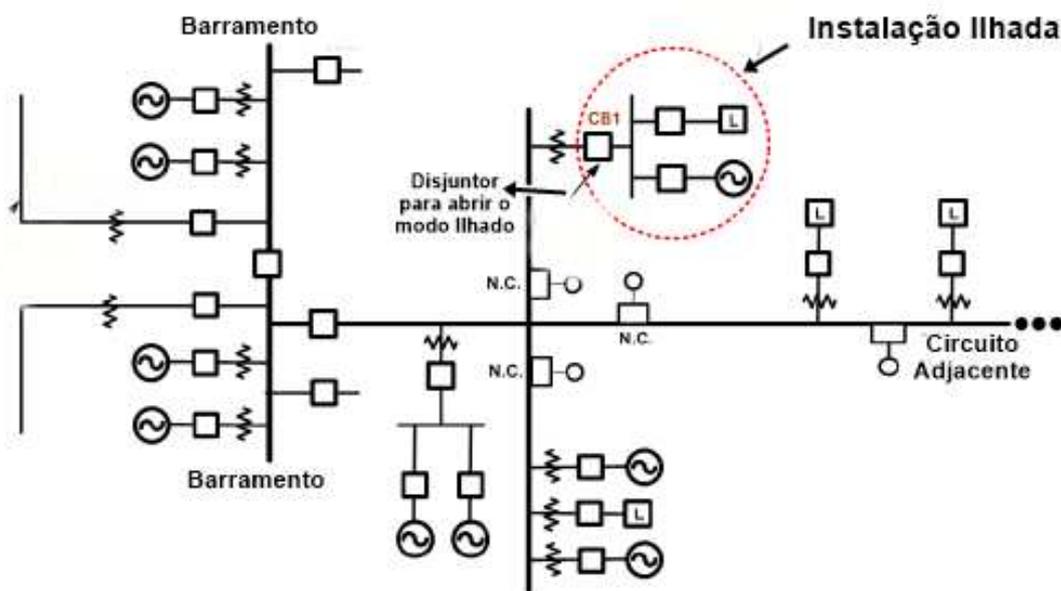
Nessa situação a inclinação da frequência se difere da rede principal facilitando a reconexão. Nessa microrrede um grupo de alimentadores dispostos de forma radial se conectam em um único ponto com a rede da concessionária e alguns alimentadores CA têm cargas sensíveis necessitando de geração local para elas; outras não tem essa exigência, caso das cargas não sensíveis (IEEE 1547.4, 2011).

Com base na norma IEEE 1547.4, de 2011, veremos as formas como o ilhamento pode acontecer. As ilhas podem ser divididas em 7 formas de operação diferentes.

4.3.2.1 Ilhamento local

É a maneira mais básica de operação apresentada e pode ser considerada uma rede simples porque o isolamento é na instalação local que se desconecta do SEP (sistema elétrico de potência). O transformador está fora da região da microrrede com a rede da concessionária. Nessa situação, quando há uma queda de energia na rede da concessionária, todas as fontes da microrrede passam a atender as cargas prioritárias e desconecta as cargas não sensíveis (caso não haja geração suficiente para todas as cargas) (IEEE 1547.4, 2011). Na figura 16 mostra um ilhamento local.

Figura 16 - Ilhamento local



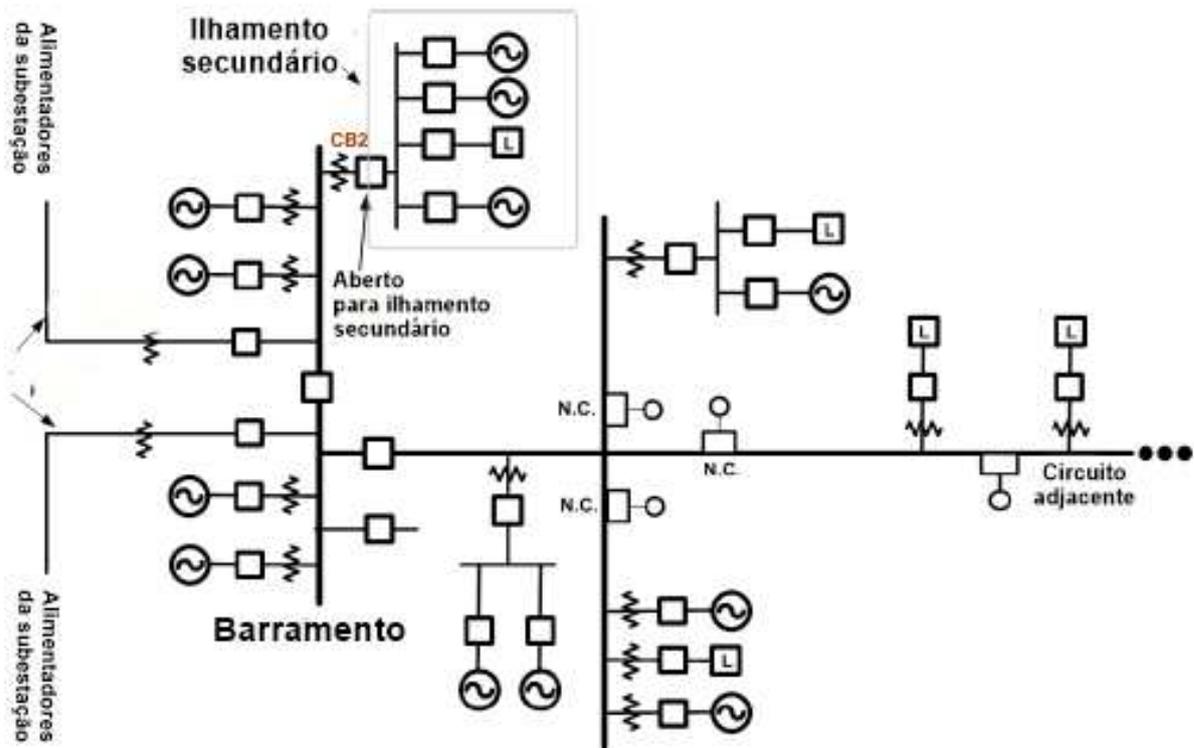
Fonte: Adaptado de *IEEE 1547.4, 2011*

Nessa forma de isolamento é importante que haja proteção isolando a ilha antes mesmo que a proteção da rede atue. As cargas que não são essenciais devem ser desligadas para que as fontes alimentem as partes mais importantes até que a rede seja restabelecida através da conexão com o Sistema Elétrico de Potência obviamente utilizando métodos para sincronizar as fontes com a rede antes de acoplar novamente (IEEE 1547.4, 2011). Essa situação é comum e pode ser visto como uma residência de pequeno porte que produz energia e consome no mesmo local.

4.3.2.2 Ilhamento secundária

A configuração de ilhamento secundário apresenta como característica mais unidades geradoras e consumidoras que apresentam transformador fora da ilha. Podemos perceber que há possibilidade de muitos REDs e isso faz com que possa incrementar unidades de produção distribuída exclusiva para a rede elétrica além de poder projetar unidades de armazenamento de energia (IEEE 1547.4, 2011). A figura 17 aborda uma microrrede com ilhamento secundário.

Figura 17 - Ilhamento secundário



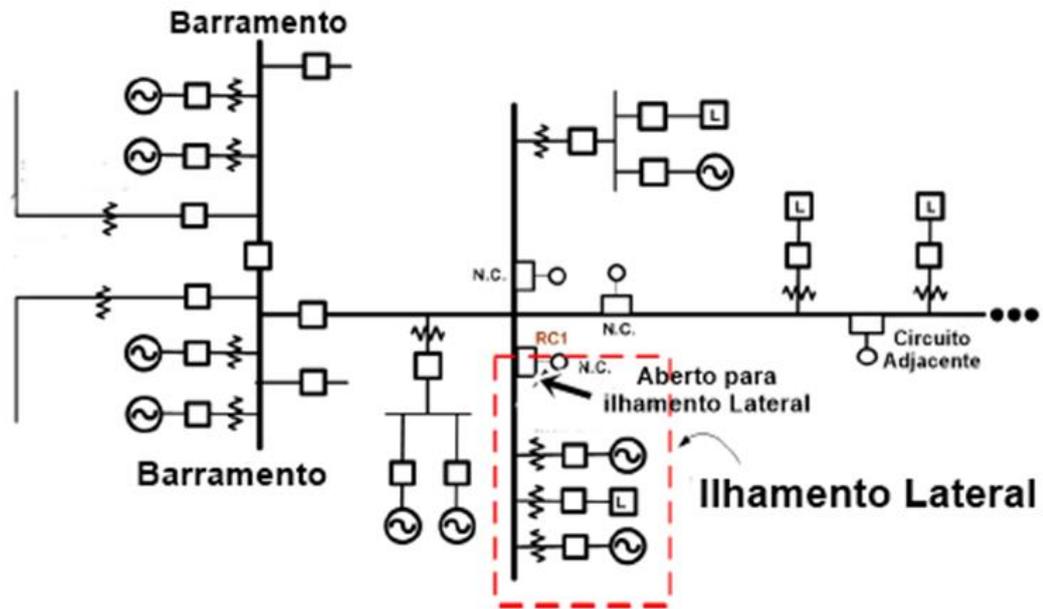
Fonte: Adaptado de IEEE 1547.4, 2011

Essa situação pode ser um hospital, onde há unidades dedicadas exclusivamente a produzir energia para as cargas em momentos de falha e armazenar energia que serão utilizadas pelas cargas prioritárias. Pode ser também uma unidade de médio porte que armazene energia para repassar ao sistema elétrico de potência.

4.3.2.3 Ilhamento lateral

Aqui as fontes geradoras e cargas estão ligadas ao barramento do sistema elétrico de potência (IEEE 1547.4, 2011). Nesse tipo de situação residências estão produzindo e outras consumindo de forma que podem ser agregadas ou retiradas da rede de energia principal. Nessa ilha os transformadores fazem parte dela porque em caso de problemas toda a região conectada nesse barramento deve ser desconectada caracterizando uma comunidade de produtores e consumidores. A seguir a situação é ilustrada na figura 18.

Figura 18 - Ilhamento lateral

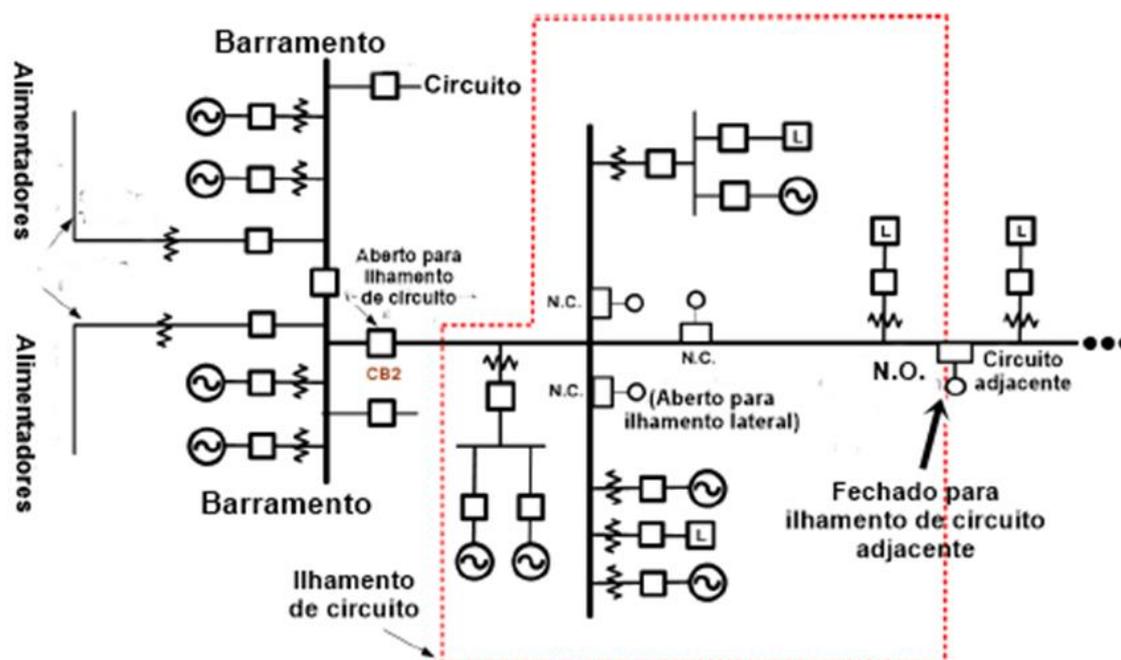


Fonte: Adaptado de IEEE 1547.4, 2011

4.3.2.4 Ilhamento de circuito

Essa configuração apresenta como característica ser uma mistura de todas as anteriores, fazendo que haja coordenação de todas as outras formas presentes em sua microrrede (IEEE 1547.4, 2011). A figura 19 mostra a configuração ilha de circuito.

Figura 19 - Ilhamento de circuito



Fonte: Adaptado de IEEE 1547.4, 2011

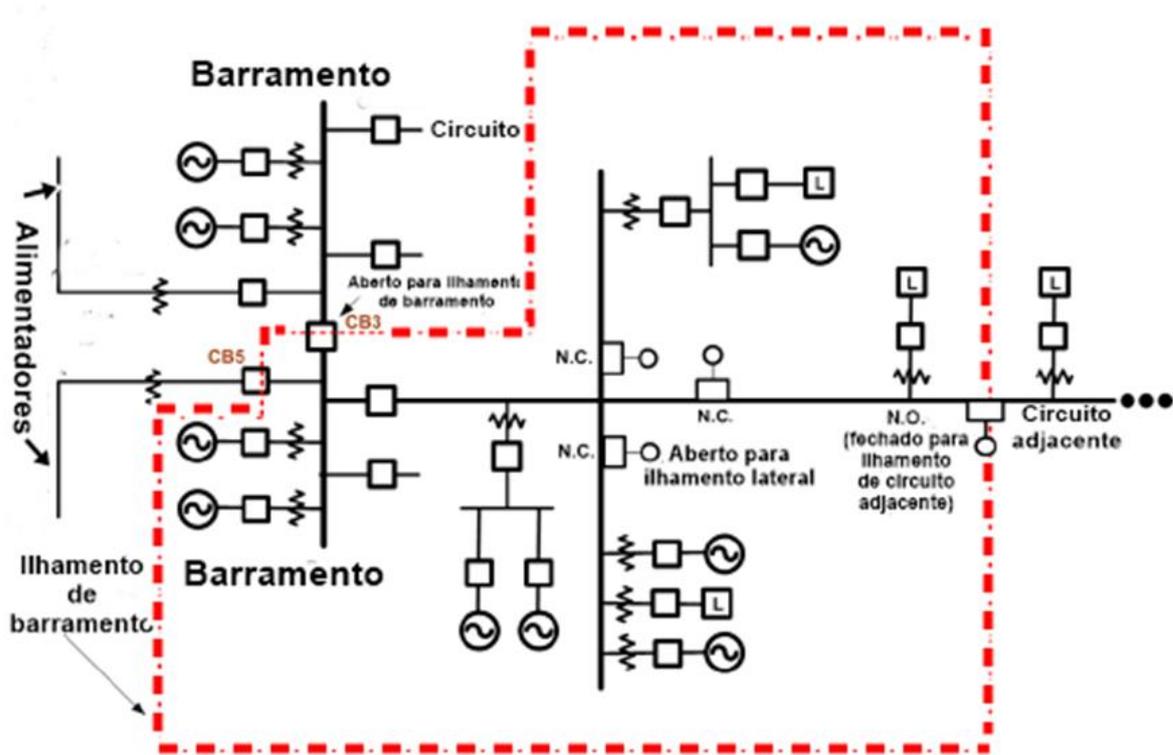
4.3.2.5 Ilhamento de barramento

É uma forma de configuração interessante que pode ser usada para suprimento de uma seção em caso de falha em uma linha de alimentação ou subestação específica.

Na ilha de circuito as chaves de secção automática fazem o isolamento da região que passa a operar em uma situação isolada, como as *Smart Grids* projetam que a rede maneje os recursos para contornar as falhas na rede de forma que o maior número de cargas possa ser atendido.

Nesse caso o atendimento não é feito por outro elo da rede, mas sim pela própria microrrede que se encarrega de manter a região energizada (IEEE 1547.4, 2011). É mostrada a figura 20 o ilhamento de barramento.

Figura 20 - Ilhamento de barramento

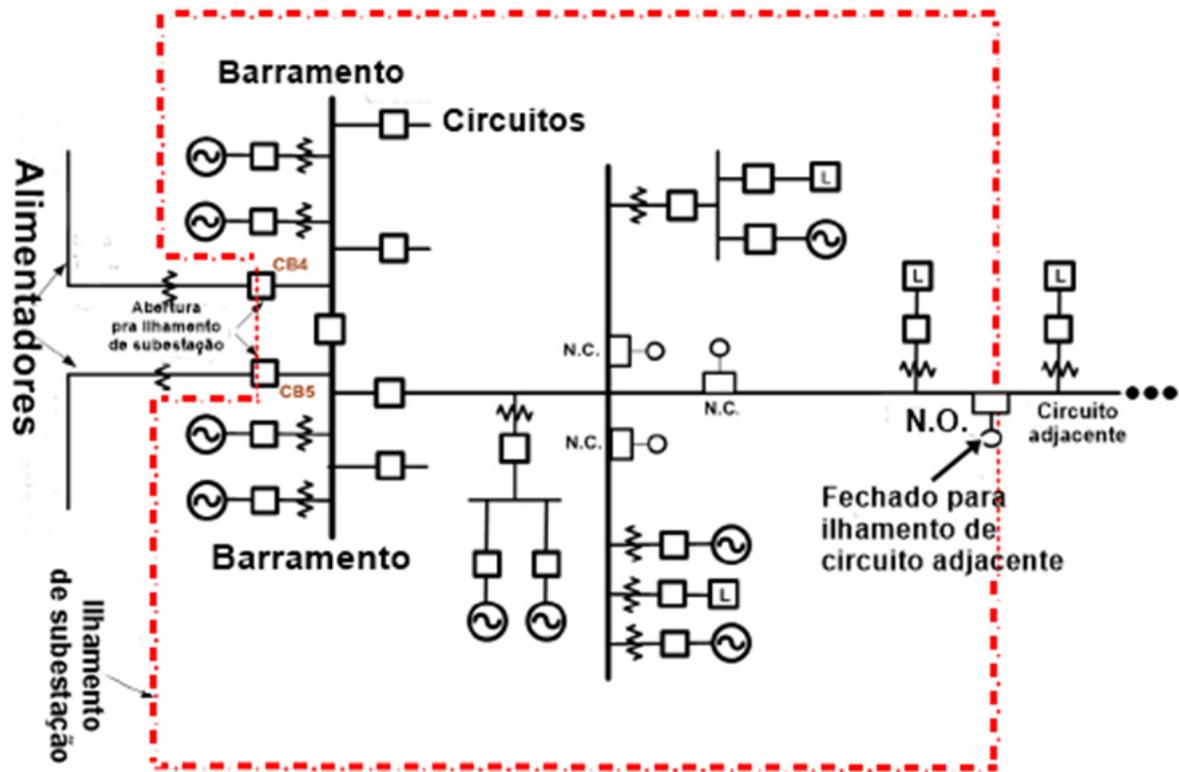


Fonte: Adaptado de IEEE 1547.4, 2011

4.3.2.6 Ilhamento de subestação

Na configuração de ilhamento de subestação todas as cargas e fontes estão sendo alimentadas por uma única subestação e todos os barramentos conectados a essa subestação estão presentes nessa forma de microrrede (IEEE 1547.4, 2011). A figura 21 mostra uma situação de ilhamento de subestação.

Figura 21 - Ilhamento de subestação

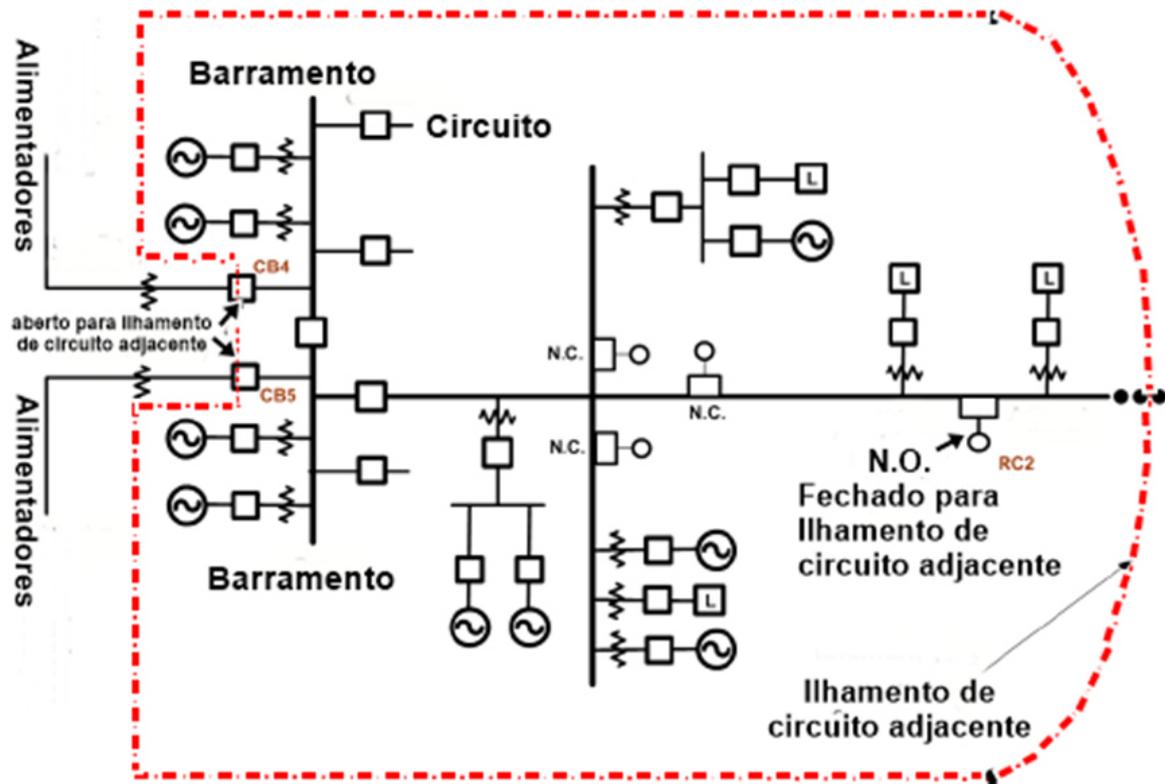


Fonte: Adaptado de IEEE 1547.4, 2011

4.3.2.7 Ilhamento com circuitos adjacentes

Essa forma de ilhamento ocorre quando as fontes de uma subestação conseguem suprir os elementos de uma subestação vizinha onde em uma operação padrão da rede seria desligada e esse processo obviamente isola essas duas subestações para que possam ocorrer de forma segura (IEEE 1547.4, 2011). A seguir é mostrada a figura 22 com o ilhamento com circuitos adjacentes.

Figura 22 - Ilhamento com circuitos adjacentes



Fonte: Adaptado de IEEE 1547.4, 2011

5 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE MICRORREDES

5.1 LO3 Energy- Brookly Microgrid

O projeto Brooklyn Microgrids foi implementado em 2012 no bairro do Brooklyn em Nova York por iniciativa de uma empresa chamada LO3 Energy. Essa empresa retirou a parcela da concessionária do gerenciamento da microrredes deixando-o por conta de uma solução em blockchain que faz todo o processo de transferência de energia, produzido de forma autônoma na modalidade *peer to peer*. A figura 23 mostra a vista de painéis fotovoltaicos do projeto Brooklyn Microgrid.

Figura 23- Projeto de microrrede de sucesso.



Fonte: LO3 Energy

A ideia inicial era operar como opção de backup durante instabilidades climáticas, como tempestades, ciberataques e outras interrupções comuns ao sistema nos Estados Unidos. Ao longo do tempo, as instalações da LO3 Energy se expandiram buscando alcançar novas formas de mercado e para isso foi agrupando novas tecnologias e agregando mais investimentos e entidades buscando dessa forma uma comunidade robusta de geração de energia, incentivando novas iniciativas para o futuro.

O projeto de microrredes no Brooklyn em nova York está dividido em duas partes onde a primeira corresponde a geração de fato e desenvolvimento da estrutura da microrrede e a segunda corresponde a TransActive Grid(TAG) que faz a comercialização de energia a partir de blockchain. Com a TAG uma pessoa poderia vender a energia para outra sem a interação de uma terceira parte, como a concessionária. A microrrede do Brooklyn está bastante avançada em termos de sofisticação e visão de mercado possibilitando para o futuro um agrupamento de várias microrredes que estarão conectadas via TAG em um bloco gigantesco e totalmente integrado (BREUER, 2016; MOLLY, 2017).

5.2 Alcatraz Island Microgrid

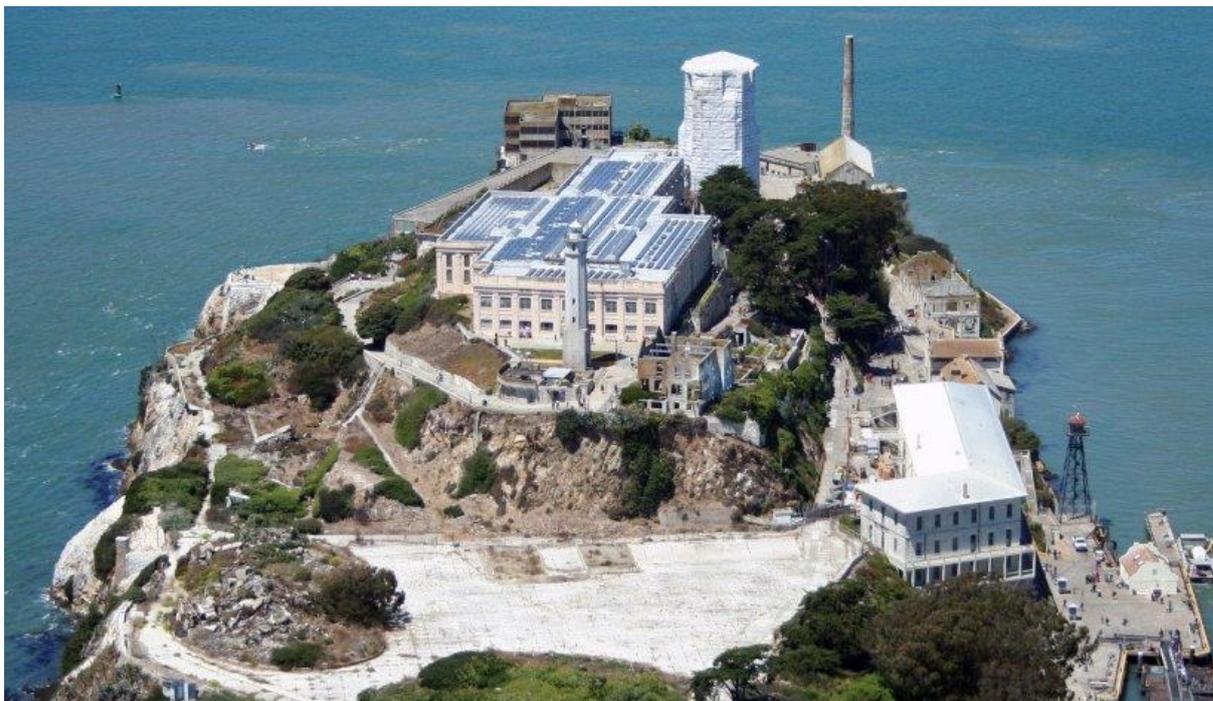
A prisão de Alcatraz está desativada como atividade prisional, mas é um importante ponto de visitação anual. Ela concentra um dos maiores projetos de microrredes dos EUA. Combinando um sistema de energia tanto solar como diesel representando 305 kW instalados apenas dos arranjos solares conectados a um sistema de baterias e inversores.

O projeto dessa microrrede custou 7,1 milhões de dólares através de fundos de investimento e reduziu o consumo de combustível na ilha 45% desde 2012, uma economia de 95 mil litros de diesel por ano. A ilha está totalmente isolada da rede convencional. Apresentando entre os componentes de sua microrrede:

- 959 fotovoltaicos (PV) painéis solares (305 kW)
- 8 inversores (100 kW cada)
- 480 baterias (1,920 kW horas de armazenamento de energia)
- 2 diesel generators
- 1 controller device to coordinate generator operation.

O sistema ainda opera com 15% abaixo da capacidade que foi projetado devido principalmente a incapacidade de as baterias guardarem toda a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos. Há interesse de reduzir essa diferença para 5% utilizando estratégias na operação de carregamento das baterias através da utilização de controles mais eficientes (US, 2017. tradução própria). A figura 24 mostra a vista da prisão de Alcatraz onde opera uma das maiores microrredes dos EUA.

Figura 24 - Alcatraz Island Microgrid



Fonte: EUA, 2017

5.3 Outros exemplos

A Microgrid Knowledge elenca algumas iniciativas (MICROGRID KNOWLEDGE, 2022).

Tabela 3 - Projetos e iniciativas com microrredes em 2022.

Projetos	Local	Características
Nigerian rollout of multiple microgrids shows opportunity for scale	Nigeria	Projeto realizado com o suporte do banco mundial e desenvolvido pela Husk Power Systems que desenvolveu 6 novas microrredes simultaneamente na Nigeria como parte de um programa de eletrificação rural. O projeto mostra consideráveis possibilidade de escalabilidade das microrredes a partir de seu lançamento. Se encontra localizado no estado de Nasarawa, o projeto de microrrede solar híbrida proverá eletricidade limpa, confiável e acessível para cerca de 5000 residências e 500 negócios. Seis comunidades do governo local de Doma e Lafia terão acesso a eletricidade pela primeira vez. As comunidades são Rukubi, Idadu e Igbabo em Doma e Kiguna, Akura e Gidan Buba em Lafia.

		O projeto também apoiará as atividades de agricultura local.
Tiny town in Australia offers MyTown microgrid model	Austrália	O Governo da Austrália deseja criar um modelo de cidade provida de energia vinda de microrredes e replica esse modelo para outras cidades. A cidade escolhida foi a pequena Heyfield (com 2000 habitantes). O desenvolvimento está a cargo do instituto para futuro sustentável da Universidade de Tecnologia de Sidney.
Microgrid project offers path to residential electrification	Reino Unido	No Reino Unido a Quinn Estates, empresa dedicada a projetos residenciais, trabalha para aproximar as residências com as microrredes através de <i>SmartGrids</i> , uma microrrede como uma companhia prestadora de serviços que está apoiada pela concessionária. SNRG SmartGrids (empresa responsável pela implantação do projeto em parceria com Quinn Estates) desenhará, financiará, construirá e operará sua própria microrredes privadamente, como serviço para de energia para 162 residências construídas para esse objetivo. Este projeto reflete o fato de que nós precisamos descarbonizar nosso consumo para alcançar os objetivos climáticos. As casas padrões do futuro irão requerer que sua estrutura seja zero carbono e eletricidade sem encanamento de gás. O projeto tem objetivo de implementar até 2025 segundo estimativas do governo e da SNRG SmartGrids.
Resilient Palisades issues solicitation in first phase of Pali Microgrid	EUA	Em Pacific Palisades, Califórnia, a Pali Microgrid é esperada para ser uma das primeiras microrredes comunitárias nos Estados Unidos instalada em uma comunidade residencial. Na primeira fase, os desenvolvedores do projeto tentarão baixar os custos da energia solar e instalações de bateria através da compra em massa de energia, reduzir os custos de aquisição de intermediários e transferir o excesso para suas próprias residências e negócios da Pacific Palisades.

Fonte: Autor, adaptado da Microgrid Knowledge (MICROGRID KNOWLEDGE, 2022)

6 CONCLUSÃO

Ao atingir o objetivo geral proposto, este trabalho contribui significativamente para o entendimento das microrredes como peças fundamentais no que se refere à modernização e otimização dos sistemas de distribuição de energia. Além disso, ressalta-se a importância estratégica dessas microrredes no contexto das *Smart Grids*, fornecendo não apenas soluções técnicas, mas também insights valiosos para gestores, reguladores e demais stakeholders envolvidos na evolução do setor elétrico.

O trabalho enfatizou as microrredes inteligentes em seus aspectos conceituais e a tecnologia presente como os REDs, os dispositivos de eletrônica de potência, as cargas, a segurança da microrrede, além de mostrar que as microrredes apresentam geração distribuída como sua principal forma de interagir internamente e ligada a rede da concessionária. O levantamento de todos esses conceitos e características sobre microrredes tiveram por objetivo final mostrar que as microrredes desempenha uma função destacada na produção, gerenciamento, consumo com segurança para a rede da concessionária e para o consumidor.

A *Smart Grid* se traduz em uma rede elétrica que se utiliza dos melhores métodos para fazer com que a rede seja confiável, segura, sustentável, e com participação ativa dos elementos consumidores da rede e é exatamente isso que as microrredes oferecem de experiência.

Portanto, concluímos que as microrredes não apenas representam uma evolução tecnológica, mas também desempenham um papel catalisador na transição para sistemas elétricos mais inteligentes, sustentáveis e eficientes. Este trabalho, ao alcançar seu objetivo geral, não apenas abre caminho para novas pesquisas e desenvolvimentos, mas também destaca a urgência e relevância de incorporar essas inovações na matriz energética global. Estamos diante de um futuro no qual as microrredes desempenharão um papel central na construção de um setor elétrico mais resiliente, sustentável e alinhado com as demandas da sociedade moderna.

REFERENCIAS

AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. **Toward a smart grid: power delivery for the 21st century**. IEEE Power and Energy Magazine, v. 3, n. 5, p. 34-38, 2005. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1507024>>. Acesso em: 01 dez. 2022

Smart Grid Communications. **NIST (National Institute of Standards and Technology)**. 07 Mai. 2018. Disponível em: <<https://www.nist.gov/programs-projects/smart-grid-communications-0>>. Acesso em: 14 de nov. 2022.

Technology Roadmap: **Smart Grids**. IEA. 2011. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/smart-grids>>. Acesso: 14 de nov. de 2022

FALCÃO, D. M. **Integração de tecnologias para viabilização da Smart Grid**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 3. (SBEE 2010), Belém, p. 1-5. 2010. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/odilon/te339/artigo_SMART_GRID.PDF>. Acesso em: 01 dez. 2022.

FALCÃO, D. M. **Smart Grid e Microrredes: O Futuro já é Presente**. In: Anais do VIII SIMPASE, Rio de Janeiro RJ, 9-14 Agosto de 2009. Disponível em: <<http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/ctee/simpase2009/documentos/IT%2044%20-%20Smart%20Grids%20e%20Microrredes%20O%20Futuro%20j%C3%A1%20%C3%A9%20Presente.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2022

DATARAIN. O que é tecnologia Smart Grid?. s/d. **Ilustração**. Disponível em: <<https://www.datarain.com.br/blog/smart-grid/>>. Acesso em: 01 dez. 2022.

NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability. Standards. Smart Grid Conceptual Model. Conceptual model. Release 3.0. Illustration. Fev. 2014. Disponível em: <<https://www.nist.gov/image/conceptualmodel20140204-28feb2014jpg>>. Acesso em: 01 dez. 2022.

BNDES. Razões para implementar Smart Grids no Brasil. Figura. 2013. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2927/1/RB%2040%20Redes%20el%C3%A9tricas%20inteligentes_P.pdf>. Acesso em: 04 jul 2023

WEG. Medidores Inteligentes de Energia SMW. s/d. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Circuitos-El%C3%A9tricos/Multimedidores-e-Medidores-Inteligentes/Medidores-Inteligentes-de-Energia-SMW/Medidores-Inteligentes-de-Energia-SMW/p/MKT_WDC_BRAZIL_METERS_SMW> . Acesso em: 30 jun 2023

Electric Energy. AMI System Overview Chain. s/d. Ilustração. Disponível em: <<https://electricenergyonline.com/energy/magazine/525/article/InternetStandar>>

[ds-Come-to-the-Advanced-Metering-Infrastructure.htm](#)>. Acesso em: 30 jun 2023

Semantic scholar. FiWi Networks for Advanced Metering Infrastructure - Smart Grid. 2015. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Optimal-dimensioning-of-FiWi-networks-over-advanced-Inga-Ortega-Peralta-Sevilla/c4ab4e5ac85c2e40a3e70f8bc16ef371edad8897>>. Acesso em: 30 jun 2023
ABOBEIRA, F.L.; CRUZ, A.F. dos S. Gerenciamento da Smart Grid. Figura. 2016.

NASEO- National Association of State Energy. Microgrids State Working Group. Exemple Microgrid. s/d. Disponível em: <<https://www.naseo.org/issues/electricity/microgrids>>. Acesso em: 9 abr. 2023

My Scesolar. s/d. Disponível em: <https://myacesolar.com/wp-content/uploads/2019/07/Microgrid-Graphic-1.png>. Acesso em: 30 jun 2023

VAFAMEHR, A. Hierarchical control structure of AC/DC microgrid. 2016. **Ilustração.** Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040619016301695>>. Acesso em: 30 jun 2023

KUMAR, D.; ZARE, F.; GHOSH, A. **DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects.** 2017. Ilustrações. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7937799>>. Acesso em: 30 jun 2023.

Oliveira, H. A. **Barramento híbrido.** 2017. Disponível em: <<http://www.tedebc.ufma.br:8080/jspui/bitstream/tede/1408/2/HerculesAraujo.pdf>>. Acesso em: 30 jun 2023.

LEIER. Métodos de controle hierárquico. s/d. figura. Disponível em: <<https://leier.ct.ufrn.br/projects.html>>. Acesso em: 30 jun 2023

IEEE. Métodos de operação off-grid. s/d. Figura. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5960751>>. Acesso em: 30 jun 2023

Ministério de Minas e Energia (MME). Relatório Smart Grid. **Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes Ministério de Minas e Energia.** 03 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/relatorio-smart-grid-1/documentos>>. Acesso em: 01 dez. 2022

RIVERA. R.; ESPOSITO A. S.; TEIXEIRA I. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. **Revista do BNDES** 40, dez. 2013. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2927>>. Acesso em: 01 de dez. de 2022

DECRETO-LEI Nº 2.848 (Presidência da República de 7 de dezembro de 1940)

Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del2848.htm>.
Acesso em: 22 de abr. 2023

YAN, Y; QIAN, Y.; SHARIF, H.; TIPPER, D. **A Survey on Smart Grid Communication [13] Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges**. IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 15, No. 1, p. 5-20, First Quarter, 2013. Disponível em:
<<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1315&context=electricalengineeringfacpub>>. Acesso em: 01 dez. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482: **Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências**. 17 Abril de 2012. Disponível em:
<<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2022

LEI Nº 14.300 (Presidência da República de 6 de janeiro de 2022). disponível em:
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm.

PARHIZI, S.; LOTFI, H.; KHODAEI, A.; BAHRAMIRAD, S. **State of the Art in Research on Microgrids: A Review**, IEEE Access, v. 3, p. 890-925, 2015

ABOBEIRA, F.L.; CRUZ, A.F. dos S. **A IMPORTÂNCIA DO SMART GRID NA REDE ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO DO BRASIL**. Versão 15 DE 2016.
Disponível em: <<https://revistas.unifacs.br/index.php/sepa/article/view/4375>>.

What is IED? IED — Intelligent Electronic Device. **iGRID T&D**. Disponível em:
<<https://www.igrtd.com/smartguide/gridandsubstationautomation/ied-intelligent-electronic-device/>>. Acesso em: 9 abr. 2023

MEMON, A. A.; KAUHANIEMI, K. **A Critical Review of AC Microgrid Protection Issues and Available Solutions**. Electric Power Systems Research, v. 129, p. 23-31, 2015. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779615002163>>.
Acesso em: 03 jul 2023.

HAUSER, C. H.; BAKKEN, D. E.; DIONYSIOU, I.; GJERMUNDROD, K. H.; IRAVA, V. S.; HELKEY, J.; BOSE, A. **SECURITY, TRUST, AND QOS IN NEXT GENERATION CONTROL AND COMMUNICATION FOR LARGE POWER SYSTEMS**. INT. J. CRITICAL INFRASTRUCTURES, VOL. 4, 2008. Disponível em:
<<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=468f36d22ed2af17c60d3d26c48441be249c882d>>. Acesso em 04 jul 2023.

PIAGI, P.; LASSETER, R. H. **Autonomous Control of Microgrids**. IEEE PES Meeting, Montreal, 2006. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/1708993>>. Acesso em: 04 jul 2023

ARNOLD, G. W. **Challenges and Opportunities in Smart Grid: A Position Article**. Proceedings of the IEEE. Vol. 99, No. 6, p. 922 – 927, June 2011. Disponível em:

<<https://ieeexplore.ieee.org/document/5768093?arnumber=5768093>>. Acesso em: 01 dez. 2022.

HATZIARGYRIOU, N.; ASANO, H.; IRAVANI, R.; MARNAY, C. **Microgrids**, IEEE Power and Energy Magazine, v. 5, n. 4, p. 78-94, 2007.

SAEED, M. H.; FANGZONG, W.; KALWAR, B. A.; IQBAL, S. **A Review on Microgrids' Challenges & Perspectives**. IEEE, v. 9, p. 166502 - 166517, 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9648165>>. Acesso em: 30 jun 2023

ONS. Resultados de operação: qualidade de suprimento. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento>>. Acesso em: 22 de abr. 2023

Empresa de Pesquisa Energética. Matriz energética e elétrica. ABCDEnergia Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 22 de abr. 2023

KROPOSKI, B.; LASSETER, R.; ISE, T.; MOROZUMI, S.; PAPATHANASSIOU, S.; HATZIARGYRIOU, N. **Making Microgrids Work**. IEEE Power and Energy Magazine, v. 6, n. 3, p. 40-53, 2008. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4505826>>. Acesso em: 03 jul 2023.

AL-SHEHRI, M. A.; GUO, Y.; LEI, G. **A Systematic Review of Reliability Studies of Grid-Connected Renewable Energy Microgrids**. 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE). 12-13 junho 2020, Istambul, Turquia. IEEE. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9179273>>. Acesso em: 30 jun 2023

GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C.; MATAS, J.; DE VICUNA, L. G.; CASTILLA, M. **Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization**. IEEE. v. 58, n. 1, p. 158 – 172, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5546958>> . Acesso em: 30 jun 2023

ROCABERT, J.; LUNA, A.; BLAABJERG, F.; RODRÍGUEZ, P. **Control of Power Converters in AC Microgrids**, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 27, n. 11, p. 4734-4749, 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6200347>>. Acesso em: 04 jul 2023.

VASILAKIS, A.; ZAFEIRATOU, I.; LAGOS, D. T.; HATZIARGYRIOU, N. D. **The Evolution of Research in Microgrids Control**. IEEE, Atenas, v. 7, n., p. 331 – 343, 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9220911>>. Acesso em: 04 jul 2023

THOMBARE, R. D.; DESHMUKH, N. B.; MORE, D. S. Nine switch bidirectional converter for hybrid AC/DC microgrid system. In: **2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)**, 2016, pp. 3061-

3066. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7755264>>. Acesso em: 04 jul 2023

PRAGYA; THAKUR, R. **A Review of Architecture and Control Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid**. IEEE, Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP), International Conference on. 21-23 July 2022. IEEE. 25 August 2022.

CARRASCO, J. M. et al. **Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey**, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 53, n. 4, p. 1002-1016, 2006.

QIN, W.; LIU, X.; HAN, X.; LIU, J.; ZHU, X.; MI, X. **Improved Control Strategy for Automatic Charge and Discharge of DC Microgrid Energy Storage Systems**, Grid Technology, v. 38, p. 1827-1834, 2014. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=468f36d22ed2af17c60d3d26c48441be249c882d>>. Acesso em: 04 jul 2023

Brooklyn Microgrid. Disponível em: <<https://www.brooklyn.energy/>>. Acesso em: 04 jul 2023

WOOD, E. 22 intriguing microgrid projects to watch in 2022. 2022 looks to be a big year for microgrid progress and innovation. Here is the Microgrid Knowledge list of 22 microgrid projects to watch in 2022. **Microgrid Knowledge**. Jan. 11, 2022. Disponível em: <<https://www.microgridknowledge.com/editors-choice/article/11427497/22-intriguing-microgrid-projects-to-watch-in-2022>>. Acesso em: 04 jul 2023.

BREUER, H. A Microgrid Grows in Brooklyn. **Siemens**. 16 fev 2018. Disponível em: <<https://www.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/energytransition/a-microgrid-grows-in-brooklyn.html>> Acesso em: 04 jul 2023

C. ABBEY et al. **Powering through the storm: Microgrids operation for more efficient disaster recovery**. IEEE Power Energy Mag., v. 12, n. 3, p. 67-76, 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6802506>>. Acesso em: 04 jul 2023

Welcome to Alcatraz: One of the Largest Microgrids in the United States. **Office of Energy Efficiency & Renewable Energy**. 26 jan 2017. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/articles/welcome-alcatraz-one-largest-microgrids-united-states>> Acesso em: 04 jul 2023

Alcatraz Island Microgrid. Microgrids across the United States, key examples of Microgrids in California and across the nation. Disponível em: <<https://clean-coalition.org/community-microgrids/microgrids-across-the-united-states/>>. Acesso em: 04 jul 2023.

Advanced Metering Infrastructure (AMI). Gartner. Disponível em:
<<https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/advanced-metering-infrastructure-ami>>. Acesso em: 9 abr. 2023

YU, R.; ZHANG, Y.; GJESSING, S.; YUEN, C.; XIE, S.; GUIZANI, M. **Cognitive radio based hierarchical communications infrastructure for smart grid.** IEEE Network, v.25, n.5, p.6-14, 2011. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/6033030>>. Acesso em: 04 jul 2023

STRBAC, G.; HATZIARGYRIOU, N.; LOPES, J. P.; MOREIRA, C.; DIMEAS, A.; PAPADASKALOPOULOS, D. **Microgrids: Enhancing the resilience of the European megagrid.** IEEE Power Energy Mag., v. 13, n. 3, p. 35-43, 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7091085>>. Acesso em: 04 jul 2023

TON, D. T.; SMITH, M. A. **The U.S. department of energy's microgrid initiative.** The Electricity Journal, v. 25, n. 8, p. 84-94, 2012. Disponível em:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040619012002254>>. Acesso em: 04 jul 2023.

Modelo de Objetos para Dispositivos do Smart Grid. Smart Grid IEC 6185. Disponível em:
<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2014_2/pedrohenrique/mo.html>. Acesso em: 9 abr. 2023

O que são microrredes?. **GRID energia.** Disponível em:
<<https://gridenergia.com.br/microrredes/>>. Acesso em: 9 abr. 2023

Como funciona o Mercado Livre. **ABRACEEL.** Disponível em:
<<https://abraceel.com.br/mercado-livre/#como-funciona-o-mercado-livre>>. Acesso em: 01 dez. 2023

H2Brasil - Expansão do Hidrogênio Verde. **Ministério de Minas e Energia.** Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/h2-brasil>>. Acesso em: 01 dez. 2023

RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 1.059(ANEEL de 7 de fevereiro de 2023)
Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=442297>>. Acesso em: 01 dez. 2023

HART, D. W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos.** Tradução de R. Abdo; Revisão Técnica de A. Pertence Jr. Porto Alegre: AMGH, 2012.

LASSETER, R. H. et al. **Integration of Distributed Energy Resources: The CERTS Microgrid Concept,** in Consortium Electric Reliability Technology Solutions, Berkeley, Estados Unidos da América, p. 1–27, Abril 2002. Disponível em:
<file:///C:/Users/User/Downloads/eScholarship%20UC%20item%209w88z7z1.pdf>. Acesso em: 02 jul 2023

BUDKA, K. C.; DESHPANDE, J. G.; DOUMI, T. L.; MADDEN, M.; MEW, T.
Communication Network Architecture and Design Principles for Smart Grids.
Bell Labs Technical Journal, v.15, n. 2, 205 - 227, 2010. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/6781113>>. Acesso em: 06 jul 2023

Empresa de Pesquisa Energética EPE. Balanço Energético Nacional. Disponível em:
<<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 02 jul 2023.

CHIKUNI, E.; DONDO, M. **Investigating the security of electrical power systems SCADA.** IEEE AFRICON 2007, Windhoek, South Africa. IEEE. p.1-7, 2007.
Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/440153>. Acesso em: 04 jul 2023