



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ISABEL PEREIRA RIBEIRO DE MENEZES

DESAFIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE MICRORREDES ISOLADAS

Palmas/TO
2021

ISABEL PEREIRA RIBEIRO DE MENEZES

DESAFIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE MICRORREDES ISOLADAS

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, para obtenção do título de Bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientadora: M^a. Gisele Souza Parmezzani Marinho

Palmas/TO
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M543d Menezes, Isabel Pereira Ribeiro de .
Desafios para Implementação de Microrredes Isoladas. / Isabel Pereira Ribeiro de Menezes. – Palmas, TO, 2021.
51 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2021.
Orientadora : Gisele Souza Parmezzani Marinho

1. Energia Elétrica. 2. Geração Distribuída. 3. Microrredes. 4. Ilhamento Intencional. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

ISABEL PEREIRA RIBEIRO DE MENEZES

DESAFIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE MICRORREDES ISOLADAS

Projeto de Graduação foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 16 / 12 / 2021

Banca Examinadora



Assinado de forma digital por Gisele Souza Parmezani Marinho
DN: cn=Gisele Souza Parmezani Marinho, o=Universidade
Federal do Tocantins - UFT, ou=Engenharia Elétrica - Campus
de Palmas, email=giselemarinho@uft.edu.br, c=BR
Dados: 2021.12.16 15:40:29 -03'00'

Prof.^a. M.^a Gisele Souza Parmezani Marinho, UFT



Assinado digitalmente por ALCY MONTEIRO JUNIOR.02054783102
DN: C=BR, O=ICP-Brasil, OU=AC SOLUTI Multipla v5, OU=32075287000105,
OU=Presencial, OU=Certificado PF A1, CN=ALCY MONTEIRO JUNIOR:
02054783102
Razão: Em atesto a precisão e a integridade deste documento
Localização: Palmas - TO
Data: 2021.12.16 16:31:29-03'00'

Prof. M.^c. Alcy Monteiro Junior, UFT



Prof. Dr. Adeliucio Maximiano Sobrinho, UFT

Palmas - TO, 2021

Dedico este trabalho à Deus, por me desafiar a chegar até aqui, por seu o meu combustível. Aos meus pais, por criarem uma filha fora da curva. Às minhas avós, por serem a minha torcida. Vocês são incríveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, por todas as vezes que me incentivaram a continuar a jornada e a pensar sempre positivo, por serem minha base.

Agradeço aos meus amigos, por nunca me deixarem para trás, por me acompanharem em mais este desafio.

Agradeço aos meus colegas que estiveram comigo ao longo desses quatro anos, e aos meus professores, por todos os ensinamentos.

Agradeço a minha orientadora, professora Gisele Marinho, por toda compreensão, orientação, ajuda e incentivos para a construção deste trabalho.

A cada um que passou pela minha vida ao longo desses quatro anos: vocês foram essenciais. Obrigada por tudo, por tanto.

RESUMO

À medida que a sociedade se desenvolve, os consumidores de energia elétrica tornam-se mais exigentes. Cada vez mais faz-se necessário que a rede possua maior confiabilidade e distúrbios menores ou inexistentes. Mediante a isso, o mercado energético apresenta propostas arrojadas para geração de energia, como as microrredes. Elas se caracterizam pela proximidade entre geração e consumidor final, além da flexibilidade no controle do fluxo de energia podendo tanto receber energia da rede quanto fornecer. Diante disso, encontram-se as redes de energia em modo ilhado/isolado, que têm se tornado opções confiáveis para o funcionamento do sistema elétrico. Este trabalho consiste em uma apresentação de informações a respeito dos desafios ao se implementar uma microrrede ilhada. Atualmente, os maiores empecilhos encontram-se na legislação, que ainda não é capaz de determinar os requisitos necessários para o seu controle, e nos valores de referência para suas variáveis. Por meio de pesquisa exploratória, serão levantados os principais conceitos referentes ao tema e relevantes a âmbito da engenharia elétrica.

Palavras-chave: Energia. Microrredes. Isolada. Flexibilidade.

ABSTRACT

As society develops, electricity consumers become more demanding. It is increasingly necessary for the network to have greater reliability and minor or non-existent disturbances. Through this, the energy market presents bold proposals for energy generation, such as microgrids. They are characterized by the proximity between generation and the final consumer, in addition to the flexibility in controlling the energy flow, being able to either receive energy from the grid or supply it. In this way, there are energy networks in isolated mode, which have become reliable options for the operation of the electrical system. This work consists of a presentation of information about the challenges when implementing an isolated microgrids. Currently, the biggest obstacles are found in the legislation, which is not yet able to determine the necessary requirements for its control, and in the reference values for its variables. Through exploratory research, the main concepts related to the topic and relevant to the scope of electrical engineering will be raised.

Keywords: Energy. Microgrids. Isolated. Flexibility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Arquitetura típica de uma microrrede	20
Figura 2: Classificação das variações de tensão de curta duração	26
Figura 3: Estrutura hierárquica de controle de microrredes	32
Figura 4: Conversor formador da rede	36
Figura 5: Diagrama de controles internos e primário (método de controle droop) de uma unidade de GD e inversor para microrrede CA.....	37
Figura 6: Curvas características droop de potência ativa e frequência ($P \times \omega$) e de potência reativa e tensão ($Q \times E$)	38
Figura 7: Conversor seguidor da rede	40
Figura 8: Conversor de suporte à rede operando como fonte de corrente.....	40
Figura 9: Conversor de suporte à rede operando como fonte de tensão.....	41
Tabela 1: Limites de parâmetros de sincronização para interconexão entre sistemas.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABMR	Associação Brasileira de Microrredes
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CGD	Central Geradora Distribuída
DMS	Distribution Management System
FC	Fluxo de Carga
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas
LC	Load Controller
GD	Geração Distribuída
MC	Microsource Controller
MGCC	Microgrid Central Controller
MI	Microrrede Ilhada/Isolada
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
UG	Unidade Geradora

SÚMARIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa	12
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
1.3 Metodologia.....	13
2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	14
2.1 Geração distribuída.....	14
2.1.1 Vantagens	16
2.1.2 Desvantagens.....	16
2.1.3 Legislação vigente no Brasil	17
2.2 Microrredes.....	18
2.2.1 Arquitetura de uma microrrede	19
2.2.2 Ilhamento de uma microrrede.....	20
2.2.3 Controle de uma microrrede	21
2.2.4 Comunicação de uma microrrede	22
2.2.5 Transição entre os modos de operação de uma microrrede.....	23
2.2.6 Distúrbios em microrredes isoladas.....	24
3 DESAFIOS EM MICRORREDES ISOLADAS.....	27
3.1 Legislação a respeito de microrredes isoladas	28
3.2 Tensão e frequência em microrredes isoladas	31
4 CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Há alguns anos, o setor energético vem sofrendo mudanças significativas a partir de uma difusão das mais diversas inovações tecnológicas. Atualmente, a massa de consumidores ligados à baixa tensão conseguiu lugar ativo no sistema elétrico.

Com a popularização de geração de energia eólica e principalmente solar, o setor elétrico lida com uma maior volatilidade, compelindo-a para um novo paradigma, que, segundo Castro (2016), “a procura contribui com a produção para o equilíbrio do sistema” ao invés do anterior “a produção segue a procura” (CASTRO, 2016).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, a geração distribuída tem como característica a proximidade do centro de consumo com a instalação dos geradores de pequeno porte. Em 2012, a agência criou a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, atualizada pela nº 687/2015, que foi um grande marco da geração distribuída de pequeno porte no país (ANEEL, 2012).

A partir de tal resolução, o consumidor passa a ter amparo legal para a geração de sua própria energia elétrica, podendo utilizar fontes renováveis, cogeração qualificada, além de injetar na rede de distribuição todo o excedente de sua produção. Dentre suas vantagens, tem-se o baixo impacto ambiental e uma diversificação da matriz energética, bem como uma proteção de expansões em sistema de distribuição e transmissão de energia (BAJAY, 2018).

Dentro desse novo universo energético, tem-se as microrredes de energia, que são as redes elétricas que permitem a junção de recursos de geração distribuída, bem como armazenamento de energia, para atender de forma integral ou parcial as cargas elétricas de um determinado sistema de distribuição (ABUABUD, 2020).

Tanto conectada à rede quanto de forma isolada, as microrredes proporcionam uma maior confiabilidade ao atender cargas críticas, diminuindo o impacto de possíveis distúrbios que ocorram na rede principal. Dessa forma, tal tipo de rede torna-se uma forma segura para atender a nova demanda de geração distribuída (ABUABUD, 2020).

1.1 Justificativa

A utilização de uma microrrede vem se tornando uma das formas mais seguras para diminuição do impacto de possíveis distúrbios decorrentes da rede principal, além de ser uma alternativa para a integração das redes renováveis no sistema.

Contudo, desafios são impostos quando da sua implementação em modo ilhado, pois a referência dos níveis de tensão e frequência antes mantidas pela rede de distribuição, agora precisam ser definidos pelos próprios elementos que compõem o sistema. Tem-se também a legislação, que não traz propostas claras e precisas sobre como manter seus níveis de controle e segurança.

A relevância desta pesquisa é exposta pela apresentação dos desafios para implementação de uma microrrede quando operando em modo isolado, trazendo alternativas para o controle dos níveis de tensão e frequência. Além disso, fará uma revisão bibliográfica dos conceitos mais importantes deste tópico para a área de engenharia elétrica, contribuindo na formação dos alunos vindouros e que lerão este trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar os desafios e alternativas existentes para o controle dos níveis de tensão e frequência de uma microrrede quando operando em modo ilhado.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. Revisão bibliográfica a fim de entender o funcionamento de uma microrrede e seus modos de operação.
- b. Revisão bibliográfica a fim de elencar alguns distúrbios que podem ocorrer e afetar o desempenho do sistema elétrico.

- c. Apresentação de normas e procedimentos que embasem o funcionamento de uma microrrede em modo isolado.
- d. Apresentação de alternativas para o controle dos níveis de tensão e frequência na microrrede isolada.

1.3 Metodologia

Este trabalho utilizará a metodologia de pesquisa exploratória, assumindo a forma de pesquisa bibliográfica, visto que, segundo GIL (2002), tem como objetivo proporcionar uma familiaridade com a área de estudo, além de sua delimitação.

Nesse sentido, para elaboração deste trabalho, serão usadas bases de dados de publicações do Instituto de Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas - IEEE, da ANEEL, da Comunidade Acadêmica Federada, bem como livros e catálogos técnicos de equipamentos.

O principal tópico de estudo deste trabalho será a apresentação dos desafios para a implementação de uma microrrede isolada, explanando a respeito do que a legislação traz como suporte para o desenvolvimento deste tipo de rede e apresentando alternativas para o controle de sua tensão e frequência.

2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Em meados do século XIX, antes de Thomas Edison criar a primeira companhia elétrica, toda a energia era produzida próximo ao local de consumo. Após a inauguração da companhia, teve-se uma inclinação à geração centralizada de energia, onde essa era conectada a um sistema de distribuição (SGUAÇABIA, 2015)

Em meio às crises de petróleo iniciadas nos anos 70, a geração de energia por meio de outras formas, que não as tradicionais centrais produtoras, começou a ganhar espaço no mercado. Já a partir de meados da década de 90, diversas competições em serviços de energia elétrica estimularam a apresentação de custos competitivos (SANTOS, 2008).

A partir de tais feitos, houve uma significativa transformação do mercado de energia, onde iniciou-se a produção de novos equipamentos que possibilitaram uma maior demanda pela Geração Distribuída (GD). Nessa época, em países como a Finlândia e a Holanda, a produção de energia por meio da geração distribuída ultrapassava 40% das necessidades elétricas nacionais. Em contrapartida, os altos investimentos que a geração centralizada demandou, e que precisariam ser pagos ainda, fizeram com que a introdução da GD em outros países fosse muito lenta (SANTOS, 2008).

Ademais, um dos fatores que colaboraram para o crescimento da geração distribuída foi o aumento de consumo da energia em regiões que não são bem assistidas por meio da geração centralizada. Isto acabou tornando as produções tradicionais opções secundárias, mediante a apresentação de novas formas de produção mais adequadas e factíveis a determinadas unidades.

2.1 Geração distribuída

No Brasil, a geração distribuída foi definida em julho de 2004 pelo decreto nº 5.163 como sendo:

“Art. 14. Para fins deste decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados [...], conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento” (BRASIL, 2004).

A geração distribuída difere em alguns fatores da geração tradicional, centralizada. Estas caracterizam-se por estarem distantes dos consumidores, bem como por possuírem longos sistemas de transmissão e distribuição para que sua produção chegue ao consumidor final.

Possuem também um fluxo de energia que ocorre em apenas um sentido, sendo este da geração para as cargas. Além disso, a maioria ocupa uma área extensa para sua instalação, assim como necessita de um alto tempo para que ocorra sua implantação, como por exemplo as usinas hidrelétricas. Ademais, toda sua produção segue diretamente para o sistema de transmissão (SANTOS, 2008).

Em contrapartida, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016) caracterizou a geração distribuída como aquela que possui proximidade do centro de consumo com a instalação de geradores de pequeno porte.

Através da Resolução Normativa nº 687/2015, a ANEEL passou a classificar a geração distribuída de acordo com a sua potência instalada. Teve-se então, a divisão em Microgeração Distribuída, onde a potência instalada precisa ser menor ou igual a 75 kW, e em Minigeração Distribuída, com uma potência superior a 75 kW, sendo ainda menor ou igual a 3 MW para a geração a partir de fonte hídrica e 5 MW para as demais fontes (ANEEL, 2018).

A GD aplica-se e torna-se mais adequada em diversas situações, como por exemplo, no atendimento às zonas rurais e isoladas, oferecendo baixos investimentos para sua implementação e funcionamento quando comparada com a geração centralizada (SEVERINO, 2008).

Tem-se também que nos grandes centros urbanos, onde se tem uma alta demanda de carga e a rede tem dificuldade em atendê-la, a GD torna-se uma melhor opção para a geração de energia. Isso, devido aos altos custos que seriam demandados pelas centrais de produção para o reforço da rede, além de outros investimentos e perdas que são majoradas considerando esta sobrecarga.

Por fim, há ainda consumidores que necessitam de um fornecimento de energia de alta qualidade, sem distúrbios ou interrupções em seu fornecimento. Nesses casos, a geração distribuída torna-se uma solução mais econômica para atender necessidades específicas.

2.1.1 Vantagens

Diversas são as vantagens que se tem ao utilizar-se da geração distribuída. Tanto o consumidor, quanto empresas do setor e a economia local se beneficiam do aumento pela procura deste tipo de produção de energia.

Entre alguns fatores, pode-se destacar as perdas na rede de transmissão e distribuição, onde na GD são menores que nas tradicionais gerações, o que acaba proporcionando uma diminuição de custos de exploração e um menor investimento em reforços no sistema (SANTOS, 2008).

Além disso, tem-se também pontos como:

- a. Crescimento na qualidade do serviço aos consumidores próximos à produção local, devido a fonte não estar sujeita a falhas decorrentes da transmissão e distribuição (como ocorre muitas vezes na geração centralizada).
- b. Baixo tempo para implementação, quando comparada à geração centralizada.
- c. Particularidades de cada consumidor podem ser implementadas de maneira personalizada.
- d. Locais remotos que não possuem uma infraestrutura de transmissão e distribuição podem ser atendidos por meio da geração em modo isolado.
- e. Baixo impacto ambiental, devido a possibilidade de utilização de fontes renováveis.

2.1.2 Desvantagens

Mediante a uma correta instalação, implementação e controle da GD, são baixas as desvantagens de sua utilização. Contudo, é necessário levá-las em consideração, onde sua principal causa está ligada ao crescente número de entidades necessárias para sua utilização.

Como principal desvantagem, pode-se citar a complexidade do sistema elétrico, onde o seu planejamento e a sua operação tornam-se mais complicados. Tem-se também a complexidade administrativa, comercial e contratual, que se torna maior (SANTOS, 2008). Além disso o controle da frequência e tensão das máquinas geradoras internas à microrrede

isolada, a manutenção da qualidade de energia, a proteção e a segurança também são pontos que devem ser considerados com cautela quando o isolamento intencional é considerado.

Pode-se elencar ainda o crescimento na complexidade dos procedimentos para manutenção, bem como para medidas de segurança. Ademais, tem-se que o aumento da utilização da GD proporciona uma diminuição na utilização das instalações das concessionárias e centrais produtoras, o que acarreta um aumento do custo de fornecimento de seus serviços (SANTOS, 2008).

2.1.3 Legislação vigente no Brasil

A partir das crescentes atividades do setor elétrico, foi imprescindível a elaboração de leis, decretos e resoluções normativas, a fim de proporcionar uma regulamentação específica que padronizasse as atividades provenientes do setor energético.

Tal padronização, assegura, acima de tudo, um fornecimento de qualidade, adequado e contínuo, da energia elétrica para os consumidores. Além disso, com as novas regulamentações, a geração distribuída sofreu grandes incentivos para sua implementação.

A primeira lei a constituir incentivos para o aumento da geração distribuída no sistema nacional foi a nº 9.427/1996. Tal lei não só estabeleceu a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), como também possibilitou a redução na tarifa de transporte de energia e a comercialização de energia gerada por empreendimentos de baixa potência (REZENDE, 2015).

Posteriormente, em abril de 2002, teve-se a implementação da lei nº 10.438, que criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). Tal programa tinha como principal pauta a ampliação da utilização de energia eólica, biomassa e pequenas hidrelétricas, para a geração de energia elétrica, por meio de produtores autônomos.

Já em março de 2004, teve-se um importante marco na legislação referente à geração distribuída. A lei nº 10.848 foi a primeira a trazer em seu escopo a denominação de geração distribuída no Brasil. Essa lei permitiu que a GD pudesse ser utilizada para suprir a demanda de consumidores ligados no SIN - Sistema Interligado Nacional (BRASIL, 2004).

Após as mais diversas leis e decretos, teve-se então a consolidação no Brasil da Resolução Normativa nº 482/2012, posteriormente atualizada pela nº 687/2015. Tal normativa pode ser construída a partir de consultas e audiências públicas entre os anos de 2010 e 2011, que adquiriram a colaboração da sociedade sobre as barreiras existentes no país para a GD e sua regulação (REZENDE, 2015).

Tais resoluções fazem parte da legislação vigente no Brasil, e trouxeram, entre outros, os conceitos de microgeração distribuída e minigeração distribuída. Além disso, apresentaram o funcionamento do sistema de compensação de energia (REZENDE, 2015).

2.2 Microrredes

Segundo JUNIOR (2020), microrrede consiste em uma rede elétrica de tamanho reduzido. Dessa maneira, deve-se ter nela uma incorporação de sua estrutura, inserindo componentes como geração, distribuição e consumo de energia.

Já para a ANEEL (2014), uma microrrede é uma “rede de distribuição de energia elétrica que pode operar isoladamente do sistema de distribuição, atendida diretamente por uma unidade de geração distribuída.”

O fato é que em microrredes, as gerações de energia são feitas em menor proporção do que nas tradicionais centrais geradoras. Para isto, são utilizadas as tecnologias de geração distribuída, de baixa e média capacidade de potência.

Mediante a isso, tem-se que o desenvolvimento das microrredes cresceu alinhado ao da geração distribuída, onde ambas possuem proximidade ao local de consumo, reduzindo as tradicionais linhas de distribuição utilizadas pelas concessionárias.

Nesse novo modelo de rede, o número de consumidores é limitado a sua região ocupada, ao contrário da rede tradicional, que em determinados períodos são necessárias expansões para se ter um alcance maior dos consumidores (JUNIOR, 2020).

As microrredes são aquelas entre a baixa e média tensão e estão no âmbito das redes inteligentes. Elas conseguem tanto receber energia da rede quanto fornecer. São redes flexíveis que controlam o fluxo de energia, além de gerenciar e armazenar. Ao se constituir uma

microrrede dentro de um sistema elétrico, ela pode passar a operar em dois modos, sendo eles o modo ilhado/isolado do SIN e o modo conectado à rede de distribuição.

Tem-se que uma microrrede isolada do sistema elétrico possui cargas conectadas e geração suficiente de modo a poder continuar em operação mesmo que ocorra alguma desconexão com a rede. Isto acaba proporcionando um aumento da confiabilidade do sistema, visto que ocorrerá uma redução no tempo em que será interrompido o fornecimento de energia elétrica.

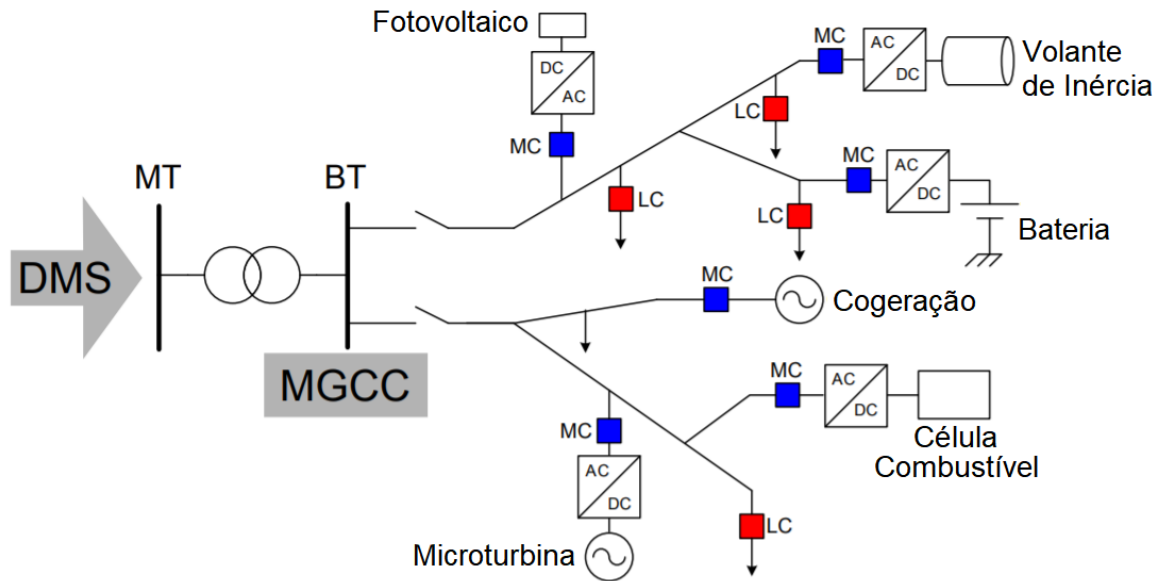
2.2.1 Arquitetura de uma microrrede

A arquitetura básica de uma microrrede é composta por um transformador de distribuição, que faz a conexão da microrrede à rede principal. Esse ponto de conexão com a rede principal é denominado de Ponto de Acoplamento Comum (PAC), e é nele onde é preciso alocar-se os dispositivos de proteção que realizam as operações de ilhamento e resincronização da microrrede com a rede principal (RESE, 2012).

Além disso, uma microrrede é também composta pelas fontes geradoras de energia, bem como os dispositivos que armazenam a energia gerada e dos que realizarão o controle em nível local e central (RESE, 2012). A Figura 1 exemplifica uma arquitetura básica de uma microrrede, podendo identificar-se os elementos de:

- a. Alimentadores partindo de BT (barramento) e alimentando as cargas;
- b. Microfontes de energia, sendo as células fotovoltaicas, microturbina (atualmente algumas podem realizar todo seu controle em corrente alternada) e células de combustível;
- c. Dispositivos que realizam o armazenamento da energia, sendo as baterias e volantes de inércia;
- d. Elementos de controle e supervisão, sendo o MC (*Microsource Controller*) e o LC (*Load Controller*) os que fazem o controle a nível local, e o MGCC (*Microgrid Central Controller*) e DMS (*Distribution Management System*) os que fazem o controle a nível central.

Figura 1: Arquitetura típica de uma microrrede



FONTE: RESE, 2012.

2.2.2 Ilhamento de uma microrrede

De acordo com o Instituto dos Engenheiros Eletrônicos e Eletricistas, um ilhamento pode ser definido como uma disposição na qual uma parte do Sistema Elétrico de Potência (SEP) torna-se energizado exclusivamente por geradores distribuídos, estando eletricamente separados do restante do sistema elétrico (IEEE, 2008).

A diferenciação de um ilhamento intencional para um ilhamento não intencional configura-se em que no intencional tem-se a desconexão de maneira segura do alimentador, de modo controlado, com manobras e procedimentos previstos e pré-estabelecidos. Enquanto isso, no ilhamento não intencional ou acidental, tem-se uma potência que flui não apenas para a carga do usuário, mas também para outras partes, de modo imprevisível e randômico, tornando-se não segura.

De acordo com a ANEEL, as proteções instaladas nos geradores distribuídos são concebidas e estabelecidas de modo a impossibilitar seu funcionamento em modo isolado. Apesar disto, tem-se que a operação em modo isolado pode trazer confiabilidade ao sistema elétrico, de modo que se tem tendenciado a permitir tal operação (ANEEL, 2010).

No momento em que ocorre a formação de um sistema em modo ilhado, ele deixa de ser suprido pela subestação da concessionária, perdendo sua principal fonte de corrente de curto-circuito. A partir desse instante, pode-se ter a perda da coordenação entre os dispositivos de proteção de sobrecorrente, bem como uma drástica redução da velocidade de atuação desses dispositivos (SGUAÇABIA, 2015).

Além disso, tem-se ainda que em casos específicos pode ocorrer a não ativação dos dispositivos de proteção, na ocorrência de falhas no sistema isolado. Mediante a isso, tem-se um enorme conflito com a operação em modo isolado, tendo em conta que normalmente a distribuição de energia elétrica possui seus ramais protegidos por dispositivos de proteção de sobrecorrente não reajustáveis, como os fusíveis e proteções distancias (SGUAÇABIA, 2015).

Ademais, pode-se ainda ter dificuldades quanto à integridade do sistema, à qualidade da potência, da tensão e da frequência fornecida a equipamentos particulares, bem como a segurança das equipes de manutenção em campo, que podem tocar as linhas isoladas que estejam energizadas sem aviso (SILVEIRA, 2020).

Para mitigar os efeitos de tais distúrbios, faz-se necessário que a Central Geradora Distribuída (CGD) possua mecanismos de proteção em seu inversor. Tais mecanismos são nomeados de função AI, e possuem a finalidade de identificar e isolar a CGD da rede elétrica isolada (SILVEIRA, 2020).

Ademais, tem-se que a mudança do modo de funcionamento da microrrede conectada à rede principal para o modo ilhado, é garantida, de forma estável, pela rápida ação dos controladores locais MC e LC (observados na figura 1), que podem dividir a demanda da rede entre as microfuentes de energia (RESE, 2012).

2.2.3 Controle de uma microrrede

Entre as estratégias de controle para uma microrrede, tem-se o controle descentralizado/distribuído e o controle centralizado/hierárquico. No modo descentralizado, os principais responsáveis pelo controle são os controladores das microfuentes.

Tais controladores geram competição entre os geradores, de modo que eles consigam uma geração maior, que atenda às demandas de carga e enviem para a rede principal o máximo de energia possível (RESE, 2012).

Para que este tipo de controle seja implementado, é preciso observar aspectos como o envio de programação de geração de cada microfonte para o operador do sistema, onde nesse modo de controle não se faz necessário. É necessário apenas um agente extra que registre as propostas de preço das microfones e verifique os fluxos de potência na rede (RESE, 2012).

Já para a estrutura de controle centralizado, tem-se a subdivisão em três níveis de controle, sendo eles o local (primário), o central da microrrede (secundário) e o gerenciamento e controle do sistema de distribuição (terciário) (LEAL, 2019).

O controle primário garante a estabilidade de operação. Ele permite uma variação de tensão e frequência em um determinado espaço de tempo, que limita o efeito de correntes circulantes e garante que a potência seja compartilhada de maneira proporcional (LEAL, 2019).

Quando a rede se encontra no modo interligado, o controle primário é o responsável pelo controle dos níveis de injeção de potência ativa e reativa; quando em modo ilhado, ele otimiza as introduções de potência ativa e reativa da microfonte e promove o seguimento da carga de forma rápida (RESE, 2012).

No controle secundário, são reajustados os dados de referência para todas as grandezas controladas pelo primário, visando anular erros de tensão e frequência que possam ocorrer em cada mudança na geração ou na carga (LEAL, 2019).

Já no controle terciário, ocorre a supervisão de toda a rede buscando sua otimização. Dentre suas principais funções, tem-se a manutenção do balanço da rede, a diminuição dos custos de geração e a diminuição das perdas de potência na transmissão. Devido a isso, torna-se o nível mais complexo para o modo de controle centralizado (LEAL, 2019).

2.2.4 Comunicação de uma microrrede

Em microrredes, a comunicação é uma parte essencial para seu funcionamento. Através dela, são coordenadas todas as operações das fontes e cargas da rede, conforme as decisões do controlador central (MARYAMA, 2013).

Dentre os diversos protocolos utilizados, tem-se o Modbus e o DNP3, onde aquele é um modelo mais antigo, porém amplamente utilizado, enquanto este é um modelo mais avançado (MARYAMA, 2013).

O protocolo DNP3, ou IEE 1815, possui vários recursos, como por exemplo, a capacidade de enviar a mesma mensagem para diversos dispositivos, dados com precisão de tempo, sincronização precisa do tempo e relatório por exceção, mostrando apenas as mudanças nos dados (SILVA, 2017).

Além disso, o DNP3 trabalha com dispositivos de configurações mestre e estação remota. O dispositivo de configuração mestre realiza a verificação periódica dos outros dispositivos de maneira cíclica, escoando os dados para o administrador. Já a estação remota realiza a coleta, armazenamento e envio dos dados solicitados pelo dispositivo mestre ou quando faz a identificação de um distúrbio que deve ser reportado (SILVA, 2017).

Já para o protocolo Modbus, que foi originalmente desenvolvido pela Modicon, tem-se que a comunicação é realizada por meio de solicitações sobre o mapa de memória dos equipamentos, onde estão informações como, por exemplo, os valores de leitura de grandezas elétricas e valores de geração para as fontes. Nesse modelo, existem mapas de memória em todos os equipamentos modbus, bem como no próprio controlador central de uma microrrede (MARYAMA, 2013).

2.2.5 Transição entre os modos de operação de uma microrrede

Segundo Silva (2020), “a transição do modo interligado para o modo isolado de forma estável pode ser garantida pela ação rápida dos controladores locais”. Tendo em vista que uma microrrede ilhada possui um desempenho dinâmico estável, é factível a alteração das malhas de tensão, frequência e ângulo dos controladores locais, de modo que a transição ocorra da melhor forma possível (SILVA, 2020).

Quando acontece a desconexão da microrrede com o sistema elétrico principal, os controladores locais são os encarregados de repartir a demanda (incluindo-se as perdas na rede) entre as microfuentes geradoras, garantindo-se uma estabilidade da microrrede ilhada (SILVA, 2020). Além disso, o submódulo 3.6 do Operador Nacional do Sistema (ONS) informa que o tempo de estabilização precisa ser menor que 60 segundos para que se garanta o bom desempenho nas condições de ilhamento, bem como um tempo de resposta menor que 9 segundos (ONS, 2019).

Segundo o mesmo submódulo, o tempo de estabilização é o tempo necessário “para a velocidade da unidade geradora permanecer acima de 95% e abaixo de 105% de seu valor final”. Bem como, o tempo de resposta é “o tempo necessário para a velocidade da unidade geradora atingir 90% do valor final” (ONS, 2019).

Dessa forma, tem-se que dispositivos como o regulador de velocidade, por exemplo, precisam ser rápidos o suficiente para que a frequência seja mantida em níveis convenientes, evitando-se a flutuação de frequência. De maneira análoga, tem-se o controle de tensão, onde o seu regulador também deve realizar respostas rápidas, evitando grandes variações ou até mesmo o colapso na tensão (SILVA, 2020).

Já para a transição do sistema em modo isolado para o reconectado ao sistema principal, tem-se que a microrrede precisa utilizar-se de esquemas de controle que alterem os níveis de tensão e ângulo da barra no PAC, encaixando-se dentro dos níveis pré-definidos, de modo que a reconexão ocorra de maneira suave (SILVA, 2020).

2.2.6 Distúrbios em microrredes isoladas

Atualmente, uma das maiores dificuldades das microrredes, em se tratando da qualidade de energia, consiste na operação em modo ilhado/isolado. Para este modo, não há ainda na legislação regulamentações precisas e claras com indicadores de desempenho. Além disso, diversas são as suas arquiteturas, o que dificulta a elaboração de diretrizes (JUNIOR, 2020).

Contudo, o trabalho em modo ilhado consiste em uma grande vantagem das microrredes. Isto, devido ao alcance que se tem ao instituir tal sistema, podendo levar eletricidade a regiões remotas, onde as concessionárias não conseguem atender.

De acordo com Ferreira (2010), pode-se definir a qualidade de energia elétrica como sendo a qualidade nas formas de onda de tensão e corrente elétricas de um sistema elétrico. Tal tema torna-se relevante a partir do momento em que os consumidores trazem uma exigência maior quanto à qualidade de energia, além do aumento no uso de equipamentos que são sensíveis às perturbações do sistema elétrico (FERREIRA, 2010).

Independentemente de suas motivações, os distúrbios elétricos podem gerar perdas significativas aos consumidores de energia. Tal condição desperta o interesse tanto por parte

das concessionárias, em garantir a qualidade da energia produzida, quanto dos consumidores em monitorar a qualidade recebida (FERREIRA, 2010).

O módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) estabelece os “procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica”, onde aborda tanto a qualidade do produto como a do serviço prestado, e também a qualidade do tratamento de reclamações. Tal módulo se aplica tanto aos sistemas conectados à rede quanto aos isolados (ANEEL, 2021).

Dentro da qualidade do produto, que será o fator abordado neste trabalho, pode-se elencar a tensão em regime permanente, o fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variações de tensão de curta duração.

Em relação a tensão em regime permanente, sabe-se que esta deve ser assistida em todo o sistema de distribuição. Para isto, faz-se necessário que as distribuidoras possuam suporte para tal, e atuem de forma preventiva, de modo que a tensão se mantenha dentro dos padrões estabelecidos (ANEEL, 2021).

É necessário que os níveis de tensão sejam avaliados nos pontos de conexão à rede distribuidora, bem como nos pontos de conexão entre as distribuidoras e nos pontos que fazem conexão com as unidades consumidoras. Além disso, eles podem ser classificados de acordo com as leituras das tensões, podendo ser adequadas, precárias ou críticas, as quais fazem alusão à distância entre a tensão medida e a tensão de referência (ANEEL, 2021).

Já quando se trata do fator de potência, sabe-se que o seu controle precisa ser feito a partir da medição permanente, bem como é necessário levar em conta as disposições em regulamentações para tal. Ademais, os resultados dessas medições precisam ser armazenados por pelo menos cinco anos, dentro dos arquivos das distribuidoras (ANEEL, 2021).

Tratando-se a respeito dos harmônicos, tem-se que suas distorções são, segundo o módulo 8 do PRODIST “fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental” (ANEEL, 2021).

Para o desequilíbrio de tensão, o módulo 8 caracteriza como “qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema” (ANEEL, 2021).

Já sobre a flutuação de tensão, o módulo a classifica como uma variação esporádica ou ainda repetitiva, mas aleatória, do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. Ao realizar sua

avaliação, tem-se por objetivo verificar o incômodo provocado pelo efeito de variações luminosas no consumidor, para aqueles que possuem iluminação alimentada em baixa tensão (ANEEL, 2021).

Em se tratando da variação de frequência, sabe-se que sistemas de distribuição bem como os de geração onde ambos estejam conectados, precisam operar dentro dos limites de frequência de 59,9 Hz e 60,1 Hz. Pode-se ter um aumento desse intervalo mediante a ocorrência de distúrbios no sistema, de modo a garantir o retorno da frequência aos seus níveis normais (ANEEL, 2021).

Por fim, em relação a variação de tensão de curta duração, observa-se que são desvios importantes na amplitude do valor eficaz de tensão em um determinado intervalo de tempo, que precisa ser inferior a três minutos, também segundo o módulo 8 dos procedimentos de distribuição (ANEEL, 2021).

O PRODIST classifica as variações de tensão conforme sua duração, de acordo com a Figura 2.

Figura 2: Classificação das variações de tensão de curta duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

FONTE: Módulo 8 PRODIST, ANEEL 2021.

3 DESAFIOS EM MICRORREDES ISOLADAS

Em redes elétricas, o Fluxo de Carga (FC) visa conhecer seu ponto de operação. Dentre eles, tem-se as variáveis de interesse primário, sendo as tensões complexas e injeções nodais de potência em todos os barramentos, e as variáveis secundárias, como os fluxos de potência nos ramos e as perdas elétricas (ALMEIDA, 2020).

Para isso, é necessário a resolução de equações e inequações algébricas, que vão descrever o comportamento da rede de interesse, dentro do regime permanente. Dessa forma, o fluxo de carga torna-se uma ferramenta importante para a análise das redes elétricas, bem como, é aplicado também em estudos de estabilidade, planejamento, expansão e operação (ALMEIDA, 2020).

Geralmente, as redes de transmissão, distribuição e as microrredes conectadas a uma rede principal, operam com um barramento de referência, que é uma barra conectada a uma Unidade Geradora (UG) que realiza o fechamento dos balanços de potência do sistema (ALMEIDA, 2020).

Por conta disso, a unidade geradora de referência necessita ter uma capacidade de geração variável, além de uma ampla faixa de valores, de maneira que se possa ocorrer tanto despachos pequenos quanto despachos muito superiores às outras UGs conectadas na mesma rede (ALMEIDA, 2020).

Dessa forma, vê-se que nas microrredes conectadas à rede principal, há um barramento de referência, que é modelado no FC como referência do sistema. Assim, é a rede principal que acaba fechando o balanço de potência da microrrede e realiza a manutenção da frequência em valores fixos e preestabelecidos (ALMEIDA, 2020).

Já em relação as microrredes operando em modo isolado, ocorre a perda desta referência, e acaba fazendo com que frequência e tensões do sistema sejam controladas em sua totalidade pelos próprios dispositivos que o compõem (ALMEIDA, 2020).

De acordo com Matos (2014), nas Microrredes Ilhadas (MI), faz-se necessário a criação de uma rede elétrica local. Tal feito pode ser realizado, por exemplo, utilizando-se geradores síncronos convencionais tracionados por motores a diesel (MATOS, 2014).

Contudo, ao considerar-se um atendimento elétrico 24 horas por dia, a utilização de geradores a diesel acarreta a necessidade de uma logística adequada, que realize o suprimento

regular de combustível e manutenções mais frequentes, sobretudo do motor a diesel (MATOS, 2014).

Nos casos em que a microrrede é concebida para operação apenas em modo ilhado, ela é voltada, na maior parte das vezes, para o atendimento a áreas rurais e comunidades em localidades remotas, onde a extensão dos sistemas de distribuição é considerada inviável, seja por motivos técnicos, seja por motivos financeiros (ALMEIDA, 2019).

Dessa forma, vê-se que um dos grandes desafios para as microrredes é a adequação de novos níveis de tensão e frequência para sua operação em modo ilhado. Além disso, há um impasse em relação a legislação, que ainda não traz uma norma específica sobre o funcionamento de MIs.

Nos tópicos subsequentes serão apresentadas as normas que atualmente servem de base para orientação a respeito do controle de uma microrrede isolada, bem como alternativas para o controle e estabelecimento dos seus níveis de tensão e frequência.

3.1 Legislação a respeito de microrredes isoladas

Sabe-se que quando a microrrede encontra-se conectada à rede elétrica, não há muitos impasses e elas devem seguir as normas das redes em que estão ligadas. Já na operação em modo ilhado, surgem diversos desafios, pois a legislação ainda não possui regulamentos precisos e claros ao se tratar deste tema.

Devido as microrredes utilizadas atualmente serem uma tecnologia relativamente nova, bem como apresentarem uma vasta gama de opções em relação a sua arquitetura, diversos são os obstáculos ao se consolidar regras claras que conduzam sua operação. Torna-se complicada a elaboração de diretrizes que englobem todas as suas possibilidades.

Contudo, independentemente da microrrede que será implementada, há requisitos técnicos mínimos a se levar em consideração. O primeiro é em relação a segurança, onde os dispositivos de proteção precisam ser sensibilizados a agir rapidamente.

Para esse momento, onde a geração encontra-se bem mais próxima aos consumidores, é imprescindível um cuidado mais minucioso com o sistema. É preciso evitar sobretensões e sobrecorrentes por períodos prolongados, bem como os níveis mínimos e máximos de tensão,

frequência e potência devem ser definidos de modo que os elementos da MI não sejam danificados (JUNIOR, 2020).

Além disso, também é necessário estabelecer os limites para poluição e demais efeitos negativos ao meio ambiente, em animais e seres humanos que estão nos perímetros de uma microrrede. Preservar uma alta confiabilidade é essencial para a concepção da MI (JUNIOR, 2020).

Por conta de todos esses fatores, atualmente existem poucas normas, regulamentações, guias ou leis em vigor que tratam exclusivamente a respeito de microrredes ilhadas, seus parâmetros e suas particularidades. Dessa forma, neste trabalho são apenas pontuadas as principais legislações existentes, para uma maior compreensão a respeito do tema.

O IEEE lançou nas últimas décadas algumas normas a respeito de microrredes. Acompanhando a norma IEEE 1547, desenvolvida inicialmente em 2003 (posteriormente atualizada em 2018), no ano de 2011 surgiu a norma IEEE 1547.4. Esta é um guia para projeto, operação e integração de sistemas de recursos distribuídos ilhados, que foram nomeados de microrredes (IEEE, 2018).

Dando continuidade, teve-se a IEEE 2030, também iniciada em 2011, onde apresentou um guia para a interoperabilidade entre redes elétricas inteligentes, além de apresentar três documentos específicos a respeito de microrredes:

- IEEE 2030.7 de 2017: apresentou especificações dos controles e do sistema de gerenciamento de energia, de modo a possibilitar um funcionamento adequado das microrredes, a despeito das topologias, configurações ou jurisdições utilizadas.
- IEEE 2030.8 de 2018: trouxe uma abordagem sobre recomendações para os procedimentos de testes de controles e suas funções em microrredes, seguindo determinados requisitos mínimos.
- IEEE 2030.9 de 2019: trouxe recomendações práticas e fatores para o planejamento e projeto de microrredes, atentando-se para a segurança, qualidade de energia, medições, configuração do sistema e avaliações dos esquemas.

Outra organização que vem trabalhando com documentos específicos para microrredes é a IEC (International Electrotechnical Commission), que prepara e publica normas internacionais para todas as tecnologias elétricas, eletrônicas e seus semelhantes.

Dentro da série IEC 62898, ela vem desenvolvendo normas importantes a respeito das microrredes. No IEC TS 62898-1:2017, ela apresenta um guia para planejamento de microrredes em corrente alternada, podendo tanto trabalhar no modo ilhado quanto no modo conectado à rede (IEC, 2017).

Outra subcategoria da presente norma, é o IEC TS 62898-2:2018, que também é um guia sobre microrredes em corrente alternada. Contudo, esse guia é direcionado a operação e aos controles, tais como os modos de operação e a transferência entre eles, o sistema de gerenciamento de energia e os procedimentos a serem adotados para monitoramento e comunicação (IEC, 2018).

Pode-se observar que as publicações existentes não versam sobre princípios rigorosos a serem impostos, mas apenas como base para conduzir os projetos, planejamentos, controles e demais especificações sobre a operação de uma microrrede. Isto ocorre como consequência das adversidades enumeradas anteriormente, a respeito da implementação de uma microrrede.

No Brasil teve-se a criação da Associação Brasileira de Microrredes (ABMR), em 2018, com início de suas atividades em julho de 2020. Esta associação veio como uma alternativa para a resolução dos desafios referentes a esse setor.

Reunindo profissionais de toda a cadeia produtiva, a ABMR traz a proposta de “um canal de diálogo com a sociedade civil, instituições governamentais e atores locais, estimulando o avanço tecnológico da matriz elétrica nacional” (ABMR, 2021).

Ao longo do ano de 2021, a ABMR desenvolveu diferentes grupos de trabalho. O primeiro, denominado GT1, tem o objetivo de elaborar uma nova norma ABNT, apoiando o desenvolvimento e a adoção de padrões industriais. Na sequência, tem-se o GT2 que visa a formação de novos modelos de negócios para o mercado das microrredes e o GT3 que objetiva a propagação do conhecimento por meio de programas de treinamento e divulgação de informações educacionais (ABMR, 2021).

Vê-se, portanto, que a ABMR lidera a elaboração da primeira norma técnica brasileira sobre padrões de microrredes. Tal objetivo está sendo pleiteado em parceria com o Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações, dentro do GT1.

Para o desenvolvimento dessa primeira norma, estão sendo usados como referência a IEC TS 62898-1:2017, citada anteriormente, pois a mesma fornece bases para o planejamento e a especificação de projetos de microrredes. O escopo da norma de referência traz ainda a

aplicação de microrredes, análise de recursos, previsão de geração e carga, entre outros (ABMR, 2021a).

Portanto, devido a legislação nacional que ainda não traz um documento claro e preciso sobre os procedimentos a serem adotados para a implementação de uma microrrede isolada, tal forma de geração de energia é ainda pouco disseminada no país.

Ademais, vale ressaltar que como visto no capítulo 2.2.2, as proteções instaladas nos geradores distribuídos são concebidas e estabelecidas de modo a impossibilitar seu funcionamento em modo isolado. Este é também um importante fator que deve ser levado em consideração para a baixa adesão a esse sistema.

3.2 Tensão e frequência em microrredes isoladas

Como abordado anteriormente, uma microrrede isolada não possui um barramento de referência advindo da rede de distribuição. Dessa forma, os próprios dispositivos que compõem a MI é que realizarão os controles de tensão e frequência do sistema.

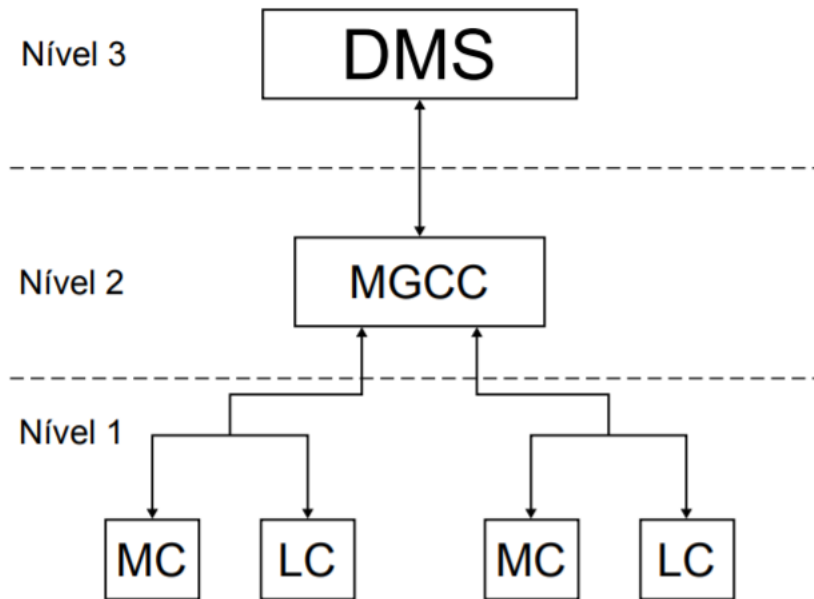
Diversas estratégias podem ser adotadas para o controle dos níveis de tensão e frequência em uma MI. No decorrer deste tópico serão apresentadas alternativas para este controle, de modo que se possa obter um viável funcionamento da microrrede operando em modo ilhado.

Como citado no capítulo 2.2.3, o controle pode ser realizado por meio de um sistema descentralizado/distribuído ou centralizado/hierárquico. Este trabalho se aterá a análise apenas do controle hierárquico.

Viu-se que no controle hierárquico há a subdivisão em três níveis de controle, sendo eles o local (primário), o central da microrrede (secundário) e o gerenciamento e controle do sistema de distribuição (terciário). Vale ressaltar que essa padronização em três níveis é decorrente dos códigos de rede previstos para o futuro (SILVA, 2020).

Na Figura 3 pode-se observar um esquemático deste controle, sendo o MC (*Microsource Controller*) e o LC (*Load Controller*) dispositivos de controle local, e o MGCC (*Microgrid Central Controller*) e DMS (*Distribution Management System*) o central.

Figura 3: Estrutura hierárquica de controle de microrredes



FONTE: RESE, 2012.

O MC é o controlador de nível local, sendo responsável pelo controle de cada microfonte. Ele emprega sinais locais de tensão, frequência e injeções de potência como variáveis de realimentação. Também proporciona muita flexibilidade para o funcionamento da microrrede.

Quando operando em modo isolado, possui autonomia para proporcionar a otimização local das injeções de potência ativa e reativa da microfonte, além de possibilitar o seguimento da carga de forma rápida. No modo conectado à rede distribuidora, ele é responsável pelo controle dos níveis de injeção de potência ativa e reativa de acordo com o determinado pelo MGCC (RESE, 2012).

Já o LC, que também está a nível local, é instalado junto às cargas controláveis, de modo que se tenha um controle de carga de acordo com orientações emitidas pelo MGCC (de acordo com uma política de gerenciamento da demanda) ou para a realização de cortes de carga (RESE, 2012).

O MGCC, que se enquadra no controle central da microrrede, é responsável pela potencialização dos lucros, bem como um aprimoramento da operação da microrrede. Dentro deste controlador, pode-se realizar previsões de carga e previsões de capacidade de geração (RESE, 2012).

Sua melhora da operação é efetuada por meio de sinais de referência enviados ao MC e LC. Também é responsável por monitorar os fluxos de potência ativa e reativa em cada elemento da microrrede, de modo que se evite operação em regiões não seguras (RESE, 2012).

Por fim, tem-se o DMS, que se encontra dentro do gerenciamento e controle do sistema e é o nível mais alto da hierarquia de controle, podendo inclusive estar interligado com vários MGCC. Para os DMS tradicionalmente utilizados no sistema de distribuição, faz-se necessária a adição de funções que permitam a operação ilhada na microrrede (RESE, 2012).

Também é necessário entender que a MI precisa ter referências de tensão e frequência criadas internamente por suas unidades de geração de energia. Esses valores irão direcionar o funcionamento geral e precisam estar dentro de faixas adequadas, de modo que não se tenha problemas com as cargas (SILVA, 2020).

Além disso, também é necessário que não ocorram problemas com os dispositivos de proteção, bem como que a qualidade de energia e a segurança da microrrede não sejam afetadas. Dessa forma, é necessária pelo menos uma GD formadora de rede, que será vista posteriormente (SILVA, 2020).

Ademais, tendo-se que a MI é composta em sua maior parte por GDs associadas a conversores estáticos, a microrrede deve ser amparada pelo paralelismo deles. Precisa-se também que ela trabalhe em amplitude de tensão, em frequência e em fase de tensão iguais (JUNIOR, 2020).

Sabe-se também que o compartilhamento de potências deve ser realizado priorizando as exigências das cargas, impedindo a circulação de correntes entre as GDs, e estando alinhado proporcionalmente às capacidades de produção, efeitos sociais, efeitos econômicos e ambientais de cada dispositivo de GD. Além disso, deve-se manter um equilíbrio entre a produção e o consumo de energia (JUNIOR, 2020).

Como não é viável ter pessoas aptas a realizar a supervisão da operação da microrrede no modo isolado o tempo todo, faz-se necessária uma automatização de seus controles. Ademais, segundo Junior (2020), para que se tenha uma alta confiabilidade é necessário que os controles sejam distribuídos com pouca ou até nenhuma comunicação, de forma que a microrrede tenha a possibilidade de isolar ou separar partes do sistema onde ocorram falhas internas (JUNIOR, 2020).

A primeira estratégia é denominada de Controle *Droop* de Geração, que se encaixa dentro do controle primário de uma microrrede, onde a coordenação dos parâmetros para um adequado funcionamento do sistema é feita a partir do compartilhamento de carga entre as GDs (ALMEIDA, 2020).

Para este tipo de controle, a frequência da rede e as tensões nos barramentos de geração são variáveis e estão diretamente relacionadas ao nível de geração que é solicitado a cada GD da MI. Dessa maneira, as relações de equilíbrio entre potência/frequência e potência/tensão são definidas por meio das características próprias de cada geração distribuída individualmente (ALMEIDA, 2020).

Uma das possibilidades para atingir tal estratégia, é considerar a GD que possua a maior capacidade de geração como sendo o barramento de referência do sistema. Contudo, tal modelo nem sempre pode ser aplicável, pois na maior parte das MI, mesmo as GDs de maior capacidade não possuem geração suficiente de modo a garantir que ocorra o fechamento do balanço de potência da rede, atuando como referência do sistema (ALMEIDA, 2020).

Outro desafio são os algoritmos de FC tradicionais, que encontram o estado do sistema mediante uma definição inicial de um valor fixo e conhecido da frequência de trabalho da rede. Dessa forma, as equações utilizadas para a realização da modelagem da frequência nestes algoritmos não possibilitam que ela seja desconhecida ou mesmo que seja acrescentada como uma variável adicional dentro do problema (ALMEIDA, 2020).

Diante de tais pontos, surgiram estudos com o propósito de solucionar o FC de microrredes isoladas, observando suas características individuais e a problemática apresentada. O estudo do Método Newton Raphson Modificado é um desses.

Este método é baseado na expansão da série de Taylor, no qual é feita uma simplificação, onde é desprezada as derivadas parciais de ordem maior que 1. A partir daí, tem-se um complexo método por meio da preparação da matriz jacobiana composta de derivadas parciais entre as grandezas de maior desejo no FC (AMARAL, 2018).

Além disso, o método apresenta boas características de convergência, contanto que adotada uma estimativa inicial razoável das variáveis. Quanto mais ele se aproxima da solução, mais rapidamente converge a ela, apresentando uma convergência quadrática perto da solução (AMARAL, 2018).

As iterações necessárias para a convergência do método são ainda insensíveis a alguns fatores que poderiam vir a causar problemas, como a escolha do nó de referência, presença de capacitores série e elementos shunt (AMARAL, 2018).

Ademais, vale pontuar que o método *droop* acarreta desvios de tensão e frequência na MI para que se tenha um correto compartilhamento de potências, bem como um adequado paralelismo dos conversores (JUNIOR, 2018).

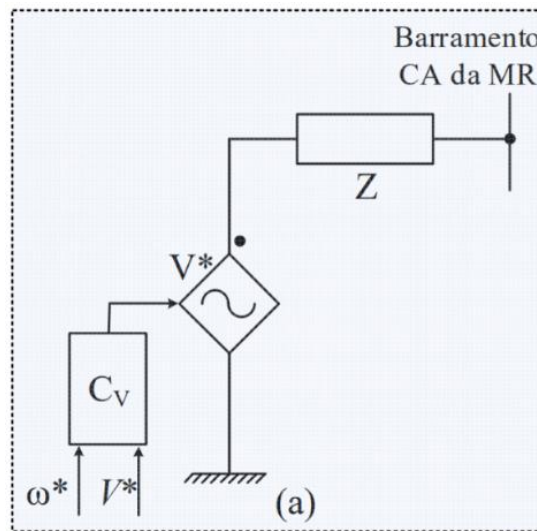
De modo a contornar tal dificuldade, é necessária a utilização do controle secundário na estrutura hierárquica. Este controle tem como objetivo restaurar os valores de tensão e frequência e a correção dos seus erros, para assim a microrrede operar em condições nominais, além de poder também melhorar a distribuição de potências e elevar os níveis de qualidade de energia na MI (JUNIOR, 2018).

Outra possibilidade estratégica, é a utilização de conversores de potência para realizar a interface entre os recursos energéticos da microrrede operando em modo isolado. Neste modelo, os conversores são classificados de acordo com o modo de operação da MI, podendo ser formadores de rede, seguidores de rede ou ainda suporte à rede. Para a utilização no sistema ilhado, os formadores de rede são os conversores apropriados (ALMEIDA, 2019).

Os conversores formadores de rede são controlados para realizar sua operação como uma fonte de tensão em corrente alternada, com amplitude V e frequência w . Eles apresentam uma impedância de saída baixa, podendo aproximar seu comportamento ao de uma fonte de tensão ideal (ALMEIDA, 2019).

Sua operação em paralelo com outros conversores semelhantes demanda um sistema de sincronização atuando de forma precisa. A Figura 4 traz uma representação simplificada desse tipo de conversor.

Figura 4: Conversor formador da rede



FONTE: ALMEIDA, 2019.

Vale ressaltar que a ideia no controle *droop* é simular o comportamento de geradores síncronos isolados em paralelo de uma maneira simples. De modo que o sistema se mantenha estável e não ocorram conflitos no controle da frequência pelas máquinas, o compartilhamento entre elas das variações positivas de cargas precisa estar associado a uma pequena queda em suas velocidades (SILVA, 2020).

Assim, a função que relaciona a frequência com a potência ativa precisa ter uma inclinação ligeiramente negativa. É deste princípio que surgiu o nome deste método, “*droop*” em inglês. Os reguladores vão permitir que se desloque a curva na vertical, modificando a referência de frequência.

Já a inclinação da função, que é nomeada de coeficiente de *droop*, depende das características de cada equipamento. É esta inclinação que indica quais as potências ativas diferentes devem ser produzidas de acordo com as capacidades dos alternadores, de forma automática para uma mesma frequência (JUNIOR, 2020).

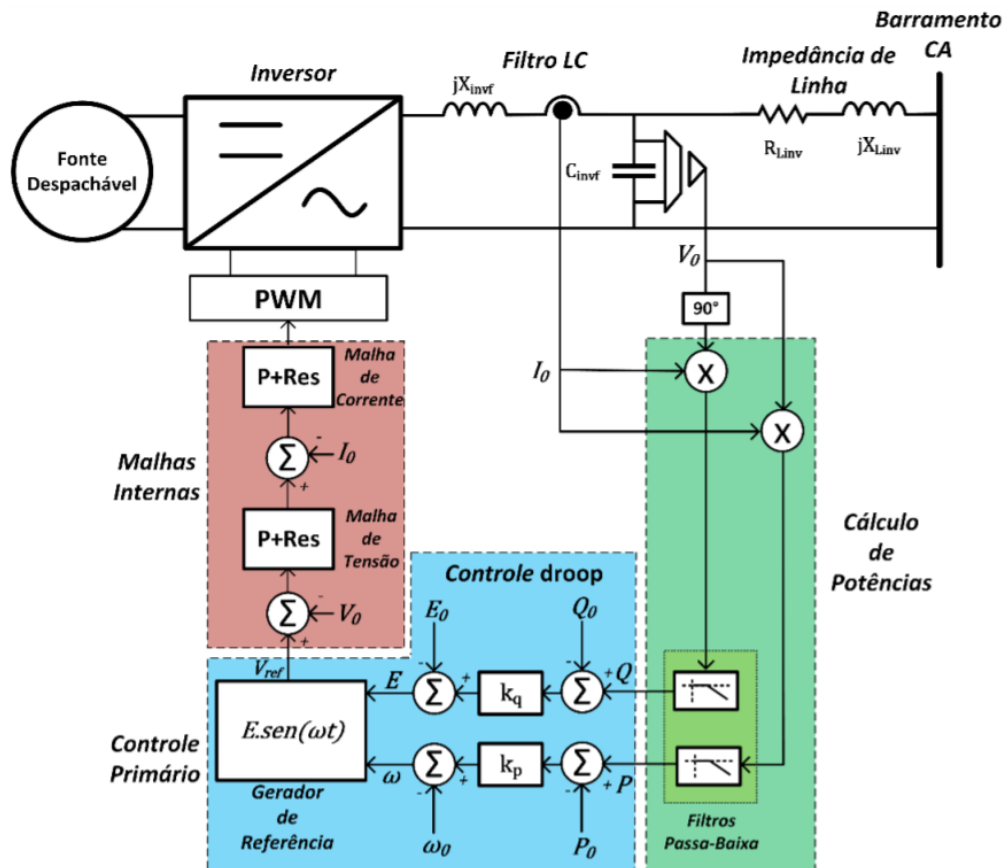
Para o controle de tensão, o processo ocorre de modo similar, sendo também relacionado por uma curva de *droop*, mas em função da potência reativa. Além disso, é por meio dos controles de inversores, que as características *droop* de potência ativa e frequência ($P \times \omega$) e de potência reativa e tensão ($Q \times E$) são implementadas para o compartilhamento das cargas e o paralelismo das unidades (JUNIOR, 2020).

Na Figura 5 pode ser visto o diagrama completo do conversor com controles internos, bem como na Figura 6 podem ser observadas as curvas que representam tais funções. As Equações 1 e 2 abaixo conduzem a operação do método *droop* em cada conversor, onde w é frequência e w_0 a frequência nominal; E é a tensão e E_0 é a tensão nominal; k_p e k_q são os coeficientes de inclinação das curvas; P e Q são as potências produzidas pelo próprio inversor e P_0 e Q_0 as potências ativa e reativa de referência.

$$w = w_0 - k_p (P - P_0) \quad (1)$$

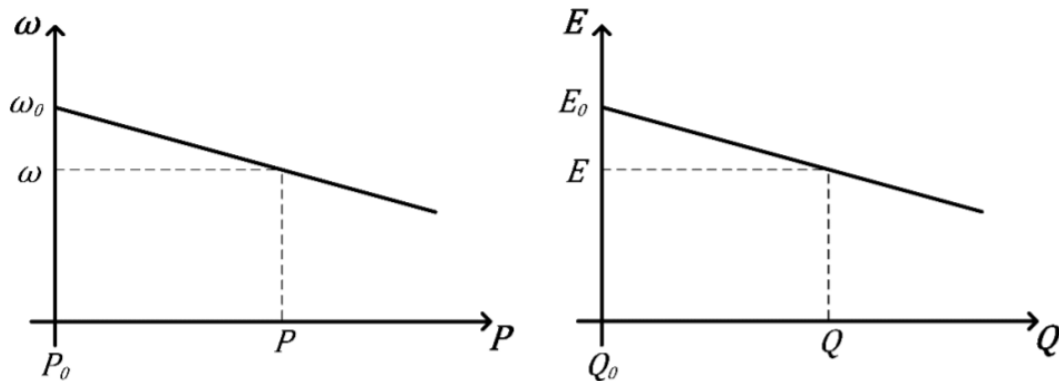
$$E = E_0 - k_q (Q - Q_0) \quad (2)$$

Figura 5: Diagrama de controles internos e primário (método de controle droop) de uma unidade de GD e inversor para microrrede CA



FONTE: JUNIOR, 2020.

Figura 6: Curvas características droop de potência ativa e frequência ($P \times \omega$) e de potência reativa e tensão ($Q \times E$)



FONTE: JUNIOR, 2020.

A amplitude de tensão E , bem como a frequência ω obtidas nas equações 1 e 2 são utilizadas para produzir um sinal senoidal. Este sinal é então aplicado aos controles internos, que irão originar o chaveamento do inversor, que geralmente é realizado por meio de técnicas de modulação por largura de pulso senoidal (JUNIOR, 2020).

A partir disso, são criadas as referências de tensão e de frequência que serão seguidas pelos componentes da microrrede, possibilitando a sua operação no modo isolado. Isto possibilita também que os conversores trabalhem compartilhando as cargas com um paralelismo adequado.

Já as referências de tensão E_0 e de frequência ω_0 são correspondentes aos valores nominais de trabalho da microrrede que se busca. Ao operar no modo isolado, elas são constantes e definidas como as adotadas por concessionárias e normas de qualidade de energia (JUNIOR, 2020).

Dessa forma, as referências produzidas atenderão boa parte das cargas encontradas no mercado e utilizadas pelos consumidores. Tem-se também P_0 e Q_0 , que são as potências ativa e reativa de referência, e estão relacionadas aos valores nominais E_0 e ω_0 . Isto significa que quando a produção do inversor for igual a estas potências, os sinais de tensão e frequência serão seus valores nominais (JUNIOR, 2020).

As potências P e Q são as produzidas pelo próprio inversor ao qual está sendo aplicado o método de controle *droop*. Tais valores são calculados internamente a partir de medições locais, enquanto as outras variáveis das equações de *droop* são constantes ou dadas no modo

ilhado. Já os coeficientes k_p e k_q são os valores para a inclinação das curvas características (JUNIOR, 2020).

Ademais, vale pontuar que o método de controle *droop* não se restringe apenas ao funcionamento da microrrede em modo de operação isolado, podendo também ser utilizado para a conexão com a rede elétrica.

Para se obter uma restauração da tensão, indo do modo isolado para o conectado à rede elétrica, tem-se uma grande gama de possibilidades. Isso devido a tensão em vários pontos da microrrede, ou até mesmo internamente nas unidades geradoras, assumir um valor diferente, e justamente essa peculiaridade é que é essencial para a distribuição de potência e amortecimento (CARVALHO, 2019).

As maneiras mais comuns de se obter a regulação da tensão são regulando-a em apenas um nó específico da microrrede ou regulando o valor da média das tensões, mantendo os desvios necessários para distribuição de potência reativa (CARVALHO, 2019).

Dessa forma, ao se analisar o controle da tensão na microrrede, é importante verificar qual o objetivo pretendido. Ou seja, verificar quais os nós serão controlados, qual a filosofia empregada, se necessita de rede de dados, bem como se é influenciado pela topologia elétrica da microrrede, como a distribuição e a forma de conexão das cargas e linhas, entre outros (CARVALHO, 2019).

Já em relação a frequência, o seu restauro é normalmente mais simplificado, visto que a frequência em regime permanente é a mesma em todos os nós. Normalmente ela é restaurada com precisão para 50 ou 60 Hz (CARVALHO, 2019).

Para essa conexão à rede elétrica é importante também se atentar as classificações dos tipos de conversores de potência citados anteriormente. Os conversores seguidores de rede são apropriados para a operação conectada à rede elétrica. Eles são controlados como fontes de corrente, possuindo em paralelo uma alta impedância de saída (ALMEIDA, 2019).

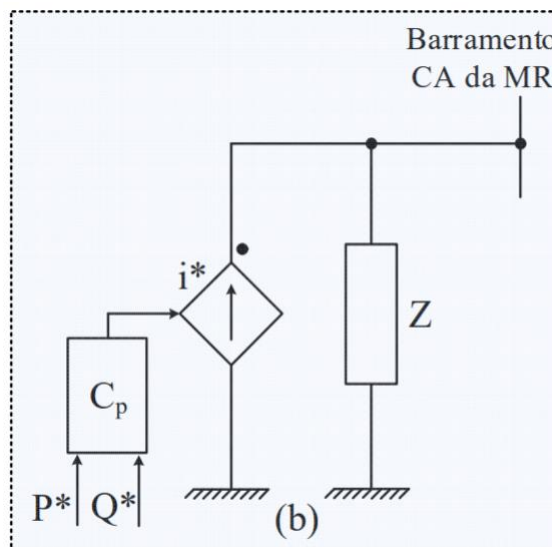
Contudo, tais conversores não são apropriados para o funcionamento em modo isolado, por isto faz-se a necessidade da presença de um conversor formador de rede, de modo a lhe oferecer um suporte à rede (ALMEIDA, 2019).

Já os conversores de suporte à rede podem ser controlados tanto como fonte de tensão como fonte de corrente, podendo operar em ambos os modos (conectado à rede ouilhado).

Entretanto, independente do modo de operação, o objetivo principal é auxiliar na regulação da tensão, controlando as potências ativas e reativas da rede (ALMEIDA).

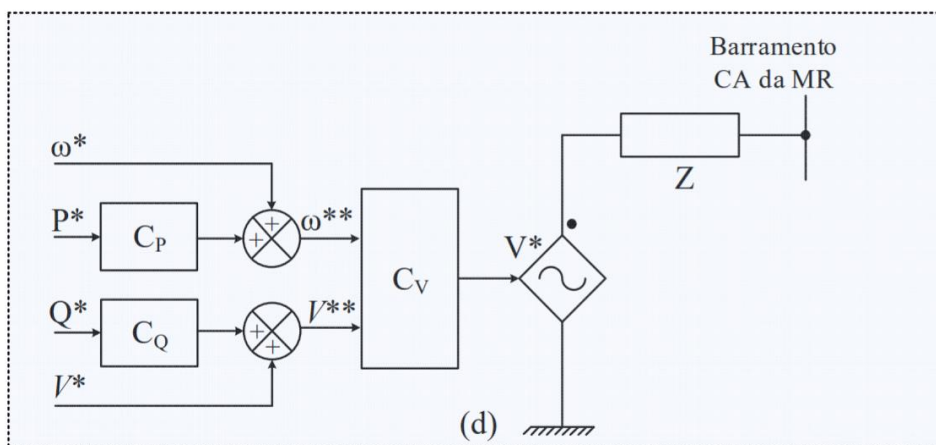
Nas Figuras 7, 8 e 9 apresentadas abaixo pode-se observar a representação desses tipos de conversores, onde V é o fasor tensão, V é amplitude da tensão, ω a frequência angular, I o fasor corrente, Z a impedância, C_v o controle de tensão, C_v o controle de magnitude de tensão, C_ω o controle de frequência, C_p o controle de potência ativa e reativa, CP o controle de potência ativa e C_q o controle de potência reativa.

Figura 7: Conversor seguidor da rede



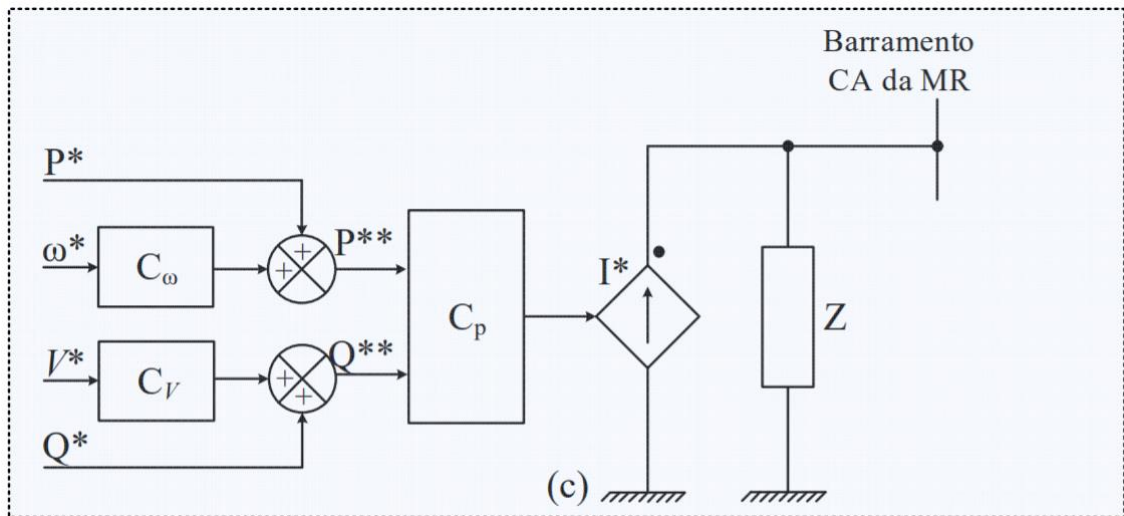
FONTE: ALMEIDA, 2019.

Figura 8: Conversor de suporte à rede operando como fonte de corrente



FONTE: ALMEIDA, 2019.

Figura 9: Conversor de suporte à rede operando como fonte de tensão



FONTE: ALMEIDA, 2019.

Diante de todas essas possibilidades de conversores, é importante também ponderar a respeito do paralelismo entre eles. Mediante a necessidade da conexão de várias fontes em paralelo com a microrrede, é de extrema importância observar as técnicas de controle que serão implementadas.

De uma maneira geral, as técnicas existentes na literatura podem ser classificadas mediante a existência ou não de comunicação entre os conversores de uma microrrede. As estratégias mais difundidas, utilizando-se do controle com comunicação, são o controle centralizado e o mestre-escravo.

No controle centralizado, a corrente total é medida e transmitida para uma central de controle. Mediante as características de cada fonte, a contribuição de cada unidade é determinada e uma malha de controle mais externa controla simultaneamente a tensão do sistema (CARDOSO, 2017).

Já no controle mestre-escravo, a unidade mestre objetiva manter a tensão do sistema em níveis permissíveis para a carga, enquanto as outras unidades (escravas) atuam como despachantes de potência. A unidade mestre é controlada em tensão e as demais em corrente (CARDOSO, 2017).

Nesse tipo de controle, cabe a unidade mestre fazer o balanço de potência entre a geração e a carga. Se o conversor mestre vier a falhar, um outro conversor assumirá a função, de forma

que se evite uma falha total do sistema. Já na configuração em que o paralelismo é feito sem a comunicação entre os inversores, é utilizado o método de controle *Droop*, apresentado anteriormente. (CARDOSO, 2017).

Além disso, outro ponto importante a se atentar ao realizar a conexão da microrrede ilhada à rede distribuidora, é a adequação das condições de sincronismo no Ponto de Acoplamento Comum (citado nos capítulos anteriores), dentro de limites aceitáveis.

Tais limites são estipulados tendo como referência a IEEE Standard 1547-2018, na qual informa, de acordo com a potência instalada do sistema elétrico a ser conectado, valores adequados de diferenças de tensão, frequência e ângulo no PAC.

A Tabela 1 apresenta os valores comumente utilizados como parâmetros para a realização desse sincronismo.

Tabela 1: Limites de parâmetros de sincronização para interconexão entre sistemas

Capacidade das fontes instaladas	Diferença de frequência [Δf]	Diferença de tensão [ΔV]	Diferença angular [$\Delta \theta$]
0 – 500 kVA	0,3 Hz	10%	20°
> 500 – 1500kVA	0,2 Hz	5%	15°
> 1500	0,1 Hz	3%	10°

FONTE: IEEE, 2018.

Assim, percebe-se que embora diversas as dificuldades ao se estabelecer a operação da microrrede em modo isolado, diversas também são as alternativas para contorná-las. Contudo, apesar da ANEEL admitir a possibilidade da operação da microrrede em modo ilhado, essa condição é, geralmente, vetada pelas concessionárias.

Tais empreendimentos almejam evitar riscos à segurança das equipes que trabalham na manutenção da rede, bem como evitar complicações relacionadas à proteção e qualidade da energia, visto que geralmente as proteções instaladas nos equipamentos são concebidas de modo a impossibilitar o funcionamento do modo ilhado (SILVA, 2020).

4 CONCLUSÃO

Vê-se, portanto, que as microrredes são aquelas próximas dos consumidores, de proporções menores que as tradicionais centrais geradoras. Além disso, trazem a opção de poderem operar diretamente por meio de uma unidade de geração distribuída, podendo ser desconectada do sistema de distribuição. São também redes flexíveis que podem tanto receber energia da rede principal quanto injetar nela, e realizar seu controle e armazenamento.

Um dos principais desafios da microrrede é sua operação em modo ilhado, que mesmo sendo geralmente evitada pelos sistemas de geração, possui a vantagem de trazer maior confiabilidade para o sistema elétrico. Suas particularidades consistem na dificuldade em se manter os parâmetros necessários para um bom funcionamento do sistema e da qualidade de energia.

Outros desafios encontram-se também na legislação brasileira, que ainda não prevê regulamentações exatas (no modo isolado) sobre os indicadores de desempenho. Contudo, o modelo atual vem sendo melhorado pela ANEEL, que realiza também consultas públicas que mostram seu interesse em incentivar a diversificação e o aprimoramento da matriz energética brasileira.

Além disso, no ano de 2021 a Associação Brasileira de Microrredes iniciou o desenvolvimento de uma norma técnica específica para este tipo de geração, o que futuramente poderá permitir um melhor aproveitamento das microrredes isoladas, bem como uma maior expansão de sua implementação.

Apesar do controle de tensão e frequência serem um grande desafio a se manter dentro da microrrede isolada, por neste modo de operação ela não possuir parâmetros de referência do sistema de distribuição, que serviriam como direção para o seu funcionamento, viu-se no decorrer da construção deste trabalho que atualmente existem métodos que proporcionam um excelente domínio deles por meio da utilização dos próprios componentes da microrrede.

Logo, viu-se que a operação da microrrede no modo ilhado só é possível devido ao emprego do controle primário, que permite o paralelismo dos conversores, bem como o compartilhamento de potências.

Ademais, o método *droop* de controle se apresenta como um importante componente para a concepção do sistema, visto que ele opera mediante a um paralelismo sem que ocorra a

comunicação dos conversores. Isto torna-se importante à medida que a microrrede precisa ter a possibilidade de isolar ou separar determinadas partes do sistema onde ocorram falhas internas.

Uma opção de equipamento para composição da microrrede é o inversor GEN24 Plus da empresa Fronius, que já é constituído para realizar a operação tanto no modo conectado à rede elétrica quanto no modo ilhado. Podendo ainda ser encontrado no mercado para funcionamento em sistemas monofásicos ou trifásicos.

Para as próximas etapas deste trabalho, sugere-se a análise detalhada de outras variáveis relevantes na manutenção do controle da microrrede isolada, como o fluxo de potência, bem como simulações que possam apresentar uma visualização de como todo esse processo ocorre.

REFERÊNCIAS

ABMR [Associação Brasileira de Microrredes]. **Entenda o papel da Associação que conecta a cadeia produtiva das Microrredes no Brasil**. Associação Brasileira de Microrredes. Foz do Iguaçu, 2021. Disponível em: <<https://www.microrredes.org.br/noticias/1>>. Acesso em: 05 dez. 2021.

ABMR [Associação Brasileira de Microrredes]. **ABMR lidera a elaboração da primeira Norma Técnica Brasileira sobre padrões de microrredes junto à COBEL**. Associação Brasileira de Microrredes. Foz do Iguaçu, 2021a. Disponível em: <<https://microrredes.org.br/noticias/4>>. Acesso em: 05 dez. 2021.

ABUABUD, João Pedro Mancini; BARRA, Pedro Henrique Aquino. **Estudo sistemático sobre microrredes e redes elétricas inteligentes**. Brazilian Journal of Development. Curitiba, 2020. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/16235>>. Acesso em: 29 mai. 2021.

ALFONSO, Taís Oliveira da Silva. **Análise sistêmica do impacto da geração distribuída no sistema de distribuição de energia**. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/221677>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

ALMEIDA, Iasmim A.; SAAVEDRA, Osvaldo R.; OLIVEIRA, Denisson. **O efeito Droop na análise de fluxo de potência em microrredes isoladas**. Congresso Brasileiro de Automática. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/347815837_O_Efeito_Droop_na_analise_de_fluxo_de_potencia_em_microrredes_isoladas>. Acesso em: 04 dez. 2021.

ALMEIDA, Rosana Guimarães. **Gerenciamento e controle distribuído hierárquico primário e secundário aplicado a microrrede CA**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/44456>>. Acesso em: 04 dez. 2021.

AMARAL, Lucas Felipe. **Comparação entre métodos de fluxo de carga para redes de distribuição ativas**. Universidade Federal do Pará. Belém 2018. Disponível em: <<https://ppgee.proesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/DM%2039-2018%20Lucas%20Felipe%20Amaral.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2021.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Geração Distribuída**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=14461914&_101_type=content&_101_groupId=656827&_101_urlTitle=geracao-distribuida-introduc-1&inheritRedirect=true>. Acesso em: 17 mai. 2021.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico**. Anexo à Resolução Normativa nº 674/2015, de 11 de agosto de 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2015674_2.pdf>. Acesso em 22 jul. 2021.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed. Brasília, ANEEL, 2016. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida++2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em 17 mai. 2021.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Módulo 8 PRODIST - Qualidade de Energia Elétrica. Brasília, 2021.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição**. Módulo 4 PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Brasília, 2010.

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. **Regulação dos Serviços de Distribuição**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2015. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao>>. Acesso em: 26 nov. 2021.

BAJAY, S.; JANNUZZI, G.; HEIDEIER, R. **Geração Distribuída e Eficiência Energética Reflexões para o setor elétrico de hoje e do futuro**. International Energy Initiative. Campinas, 2018. Disponível em: <<https://iei-brasil.org/wp-content/uploads/2018/01/Gera%C3%A7%C3%A3o-distribu%C3%ADda-e-efici%C3%Aancia-energ%C3%A9tica-Reflex%C3%B5es-para-o-setor-el%C3%A9trico-de-hoje-e-do-futuro.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2021.

BELLIDO, Marlon Max Huamaní. **Microrredes Elétricas: Uma Proposta de Implementação no Brasil**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Marlon_Max_Huaman%C3%AD_Bellido.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2021.

BORGES, Caio Franco. **Análise da Qualidade da Energia Elétrica em um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Itumbiara, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/299/1/TCC_Caio%20Franco%20Borges.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2021.

BRASIL. **Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995**. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. Brasília, 1995.

BRASIL. **Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996**. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Brasília, 1996.

BRASIL. **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002**. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Brasília, 2002.

BRASIL. **Lei nº 10.848, de março de 2004.** Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 8.631, de 4 de março de 1993, nº 9.074, de 7 de julho de 1995, nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, nº 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Brasília, 2004.

BRASIL. **Lei nº 5.163, de julho de 2004.** Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, 2004.

CAMARGO, Vitor Gibrail de Oliveira. **Medidores inteligentes: o primeiro passo em direção as redes inteligentes.** Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/118480>>. Acesso em: 28 nov. 2021.

CAMELLO, Indianara. **Análise da difusão de microrredes no Brasil pelo método do modelo de Bass.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/2049/TCC-EEL%20-%20Indianara%20Camello.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 26 jun. 2021.

CARDOSO, Tiago Domingos. **Avaliação do Paralelismo de Conversores com Controle por Inclinação em Microrredes Monofásicas.** Centro de Tecnologia de Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/25152>>. Acesso em: 09 dez. 2021.

CARVALHO, Henrique Tannús de Moura. **Controle de microrredes CA: estudo da regulação de frequência e tensões.** Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24331>>. Acesso em 08 dez. 2021.

CASTRO, Nivalde J. de; DANTAS, Guilherme de A. **Políticas Públicas para Redes Inteligentes.** Grupo de Estudos do Setor Elétrico, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Publit Soluções Editoriais. Rio de Janeiro, 2016.

CORIOLANO, T. R.; PEREIRA, A. K.; PINTO, A. E.. **Análise do arcabouço legal da geração distribuída de energia elétrica no Brasil.** Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Essentia Editora IFFluminense. Campos dos Goytacazes, 2020. Disponível em: <<https://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/boletim/article/view/15822/13088>>. Acesso em 24 jun. 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **ABCD Energia: Matriz Energética e Elétrica.** Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2021a. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/ABCDenergia>>. Acesso em: 25 nov. 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021: ano base 2020.** Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2021b. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 26 nov. 2021.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Balanco Energético Nacional: ano base 2020.** Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

FARINA, Annelise Scherer. **Controle de Microrrede Baseado em Frequência**. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11867/1/CT_COELE_2018_1_02.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2021.

FERREIRA, Danton Diego. **Análise de distúrbios elétricos em sistemas de potência**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2010121401.pdf>>. Acesso em 06 de junho de 2021.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

IEC [International Electrotechnical Commission]. **Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification**. IEC TS 62898-1:2017. Geneva, 2017.

IEC [International Electrotechnical Commission]. **Microgrids - Part 2: Guidelines for operation**. IEC TS 62898-2:2018. Geneva, 2018.

IEEE STANDARDS COORDINATING COMMITTEE 21. **IEEE Application Guide for IEEE std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2008.

IEEE [Institute of Electrical and Electronics Engineers]. **IEEE Recommended Practice for the Planning and Design of the Microgrid**. IEEE Std 2030.9-2019, p. 1-46, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8746836. New York, 2019.

IEEE [Institute of Electrical and Electronics Engineers]. **IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces**. IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003), doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112. New York, 2018.

IEEE [Institute of Electrical and Electronics Engineers]. **IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers**. IEEE Std 2030.7-2017, p. 1-43, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8295083. New York, 2018a.

IEEE [Institute of Electrical and Electronics Engineers]. **IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers**. IEEE Std 2030.8-2018, p. 1-42, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8444947. New York, 2018b.

JUNIOR, Marcus Evandro Teixeira Souza. **Estudo e desenvolvimento de métodos de controle para microrredes CA ilhadas e conectadas à rede elétrica**. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/29730>>. Acesso em: 26 jun. 2021.

LEAL, Gustavo Cezimbra Borges. **Análise e modelagem de controle descentralizado de conversores em microrredes de baixa tensão**. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10028438.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

MACHADO, Solange. **Análise do mercado de energia elétrica brasileiro para aplicação da arquitetura blockchain: um estudo para fomentar a digitalização, a descentralização e a descarbonização do setor elétrico**. Centro de Ciências e Tecnologias e Saúde, Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/226833>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

MARYAMA, Victor. **Gerenciamento Energético para Microrredes Inteligentes**. Departamento de Automação e Sistemas, Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/169951/PFC_20131-VictorMaryama.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 jul. 2021.

MATOS, José Gomes de. **Controle de Potência em Microrredes CA Isoladas com Aerogeradores e Bancos de Baterias Distribuídos**. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão. São Luís, 2014. Disponível em: <<http://tedebc.ufma.br:8080/jspui/bitstream/tede/551/1/Tese%20Jose%20Gomes%20de%20Matos.pdf>>. Acesso em: 04 dez. 2021.

MENDONÇA, Lucas Paulis. **Introdução às microrredes e seus desafios**. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003805.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

MIRANDA, Bruna Gelmini; ALVES, Leonardo Ramos da Silva. **Análise de curto-circuito e sistema de proteção em uma rede com geração distribuída utilizando Simulink**. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/53384/53384.PDF>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

ONS [Operador Nacional do Sistema Elétrico]. **Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN**. Plano da operação elétrica de médio prazo do SIN. Brasília, 2021a. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/suprimento-eletrico>>. Acesso em: 26. nov. 2021.

ONS [Operador Nacional do Sistema Elétrico]. **Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão**. Submódulo 3.6 - Procedimentos de Rede. Brasília, 2019.

PINTO, José Octávio Cesário Pereira. **Sistema de proteção para microrredes de baixa tensão baseado em arquitetura multiagente considerando a ocorrência de ilhamentos**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/229284>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

RESE, Leonardo. **Modelagem, análise de estabilidade e controle de microrredes de energia elétrica**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/99294>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

REZENDE, Jaqueline Oliveira. **Geração Distribuída: legislação brasileira, perspectivas e estudos de casos via ATP**. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14591>>. Acesso em 23 jun. 2021.

SANTOS, F. A.; SANTOS, F. M. **Geração Distribuída Versus Centralizada**. Revista Millenium, nº 35, nov. 2008. Disponível em: <<https://revistas.rcaap.pt/millenium/article/view/8312>>. Acesso em 23 jun. 2021.

SEVERINO, Mauro Moura; CAMARGO, Ivan Marques de Toledo; OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves de. **Geração distribuída: discussão conceitual e nova definição**. Revista Brasileira de Energia, v.14, n.1, p.47-69, 2008. Disponível em: <<http://www.sbpe.org.br/rbe/revista/26/>>. Acesso em: 22 jul. 2021.

SILVA, Kauana Palma. **Métodos de projeto de controladores para sistemas elétricos em operação temporária ou permanentemente isolada**. Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/220478>>. Acesso em: 27 jul. 2021.

SILVA, Marcos Antonio Andrade. **Análise de desempenho do protocolo DNP3 encapsulado sobre PLC para aplicações em Redes Inteligentes.** Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2017. Disponível em: <https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/6533/2/MARCOS_ANTONIO_ANDRADE_SILVA.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2021.

SILVEIRA, Alexandre Schopf da. **Método heurístico para otimização do dimensionamento de uma microrrede de energia.** Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2021. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/22619>>. Acesso em: 20 nov. 2021.

SILVEIRA, Martins Eddie. **Estudo de técnicas anti-ilhamento ativas e passivas com foco na redução da zona de não-detecção.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Itumbiara. Itumbiara, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/590>>. Acesso em: 24 jun. 2021.

SGUAÇABIA, Robson Roberto. **Avaliação do Impacto da Geração Distribuída sobre o sistema de Proteção de Sobrecorrente de uma Rede de Distribuição Operando em Ilhamento Intencional.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-25052015-114845/pt-br.php>>. Acesso em: 26 jun. 2021.