

Estudo sistemático sobre microrredes e redes elétricas inteligentes**A systematic study on microgrids and smart grids**

DOI:10.34117/bjdv6n9-122

Recebimento dos originais: 01/09/2020

Aceitação para publicação: 08/09/2020

João Pedro Mancini Abuabud

Graduando em Engenharia Elétrica na Universidade de Araraquara (UNIARA)

Instituição: Universidade de Araraquara (UNIARA)

Endereço: Rua Carlos Gomes, 1338 – Araraquara-SP, Brasil

E-mail: joao.abuabud@outlook.com

Pedro Henrique Aquino Barra

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Instituição: Universidade de Araraquara (UNIARA) / Universidade de São Paulo (USP)

Endereço: Rua Carlos Gomes, 1338 – Araraquara-SP, Brasil

E-mail: pedrohenrique_ab@hotmail.com

RESUMO

A crescente demanda por energia no mundo ao longo dos anos vem requerendo por parte dos países soluções mais seguras e sustentáveis relacionadas à geração de energia. Grande parte das fontes que constituem a matriz elétrica mundial é não renovável, contribuindo para o aumento do efeito estufa e outras contraproducentes consequências. A solução desse problema, em partes, advém da utilização de fontes renováveis de energia integradas aos sistemas elétricos, como as microrredes, que são redes elétricas localizadas que permitem a integração de recursos distribuídos de geração e armazenamento de energia para o atendimento confiável e resiliente dos seus consumidores. Diante deste contexto, este artigo apresenta um estudo da literatura técnica concernente às microrredes e redes elétricas inteligentes. Os conceitos associados às microrredes são apresentados e estudados, bem como as vantagens e desvantagens na utilização das microrredes. Complementarmente, este artigo também apresenta um breve e atual levantamento de microrredes em operação no mundo. Para a obtenção dos artigos científicos e textos descritos neste estudo, a base de dados mais utilizada foi a Scopus, sendo selecionados os artigos publicados nos últimos 20 anos (2000-2020), com maior ênfase para artigos mais recentes e mais citados neste período. Por fim, este artigo apresenta uma análise dos desafios existentes e tendências futuras para a pesquisa na área das microrredes. Conclui-se que as microrredes são promissoras para a integração de recursos distribuídos à rede elétrica, mas que soluções dos desafios existentes são imprescindíveis para a sua larga implementação.

Palavras-chave: Microrredes, Fontes Renováveis de Energia, Recursos Distribuídos de Energia, Redes Elétricas Inteligentes, Sistemas Elétricos de Potência.

ABSTRACT

The rising energy demand worldwide over the years requires secure and sustainable solutions associated with the power generation for all the countries. Most power sources of the world's electricity matrix are not renewable, contributing to the increase in the greenhouse effect and other counterproductive consequences. As one of the solutions for this concern is the crescent utilization of renewable energy sources integrated into the electric power grids, such as microgrids, which are localized electrical networks that allow the integration of generation distributed resources and

energy storage systems, increasing the dependability and resilience of the power supply. This paper aims to present a literature review related to the microgrids and smart grids in this context. The basic concepts of microgrids are presented and analyzed, showing the advantages and disadvantages of the microgrids' implementation. Additionally, this paper also presents a brief and current compendium of existing microgrids worldwide. For obtaining the articles and documents used here, Scopus was the most used database, retrieving the published papers in the last 20 years (2000-2020), with an added emphasis on the most recent and high-cited papers in this period. Lastly, this paper shows an analysis of the existing challenges and research trends in the microgrids' field. Microgrids promise to contribute to the integration of distributed energy resources into the electric power grid, but the solution for the existing challenges is imperative for their broad implementation.

Keywords: Microgrids, Renewable energy sources, Distributed energy resources, Smartgrids, Electric Power System.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a demanda global por energia apresenta crescimento, o que exige que os países forneçam soluções mais seguras e sustentáveis relacionadas à produção de energia. A maioria das fontes que compõem a matriz elétrica mundial não é renovável, emitindo CO₂, agravando o efeito estufa, e implicando em outras consequências para o meio ambiente. Este problema pode ser parcialmente resolvido com o uso de fontes de energia renováveis, como geração fotovoltaica, geração de energia eólica e biogás. Devido à dificuldade na operação e controle de múltiplas fontes renováveis de energia e outros recursos distribuídos no sistema elétrico, os conceitos associados às microrredes e redes elétricas inteligentes têm emergido como mais um passo para a modernização no formato de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, contribuindo para a integração dessas fontes renováveis nos sistemas elétricos (HATZIARGYRIOU; ASANO; IRAVANI; MARNAY, 2007).

As microrredes são redes elétricas localizadas que permitem a integração de recursos distribuídos de geração e armazenamento de energia para atender, integralmente ou parcialmente, as cargas elétricas de um sistema de distribuição. De forma ilhada (autônoma) ou conectada à rede principal, as microrredes podem atender cargas críticas com maior confiabilidade e resiliência, mitigando o impacto de possíveis distúrbios que possam ocorrer na rede principal. Nota-se, portanto, que o conceito de microrredes apresenta-se como uma solução altamente promissora para a segura integração dos recursos energéticos distribuídos e cargas neste novo contexto dos sistemas elétricos (KATIRAEI; IRAVANI; HATZIARGYRIOU; DIMEAS, 2008).

Na implementação de microrredes, torna-se necessária uma infraestrutura que possa ajudar a monitorar as falhas (caso haja alguma), coletar os dados do sistema e manter a confiabilidade e a qualidade da energia. Essa infraestrutura pode ser entendida como sendo inteligente, dando origem ao termo rede elétrica inteligente, mais conhecida como *Smart Grid*. A ideia principal desse modelo

é acrescentar inteligência à rede elétrica atual, permitindo a coleta de dados em tempo real e também permitindo o monitoramento e o controle da rede de forma autônoma, com o objetivo de garantir confiabilidade, eficiência e qualidade da energia elétrica. Nas *Smart Grids*, com o controle de forma autônoma, o consumidor também possui a possibilidade de gerar energia e caso queira, vendê-la, possuindo um fluxo de comunicação e de energia bidirecional e com seu sistema automatizado. Dessa forma, as *Smart Grids* têm também como foco a redução de falhas humanas, fazendo com que a resposta para a falha seja mais rápida e eficaz (GUIMARÃES; MURILLO; ANDREONI; MATTOS; FERRAZ; PINTO; COSTA; DUARTE, 2013).

Apesar das inúmeras vantagens oriundas da implantação das microrredes e da existência de alguns protótipos ao redor do mundo, alguns desafios técnicos ainda se encontram em aberto, tais como proteção, qualidade da energia, controle, operação *plug-and-play*, entre outros (HATZIARGYRIOU; ASANO; IRAVANI; MARNAY, 2007). Dessa forma, diversos pesquisadores têm empregado esforços para o desenvolvimento de soluções e estratégias voltadas para esses desafios com o objetivo de tornar cada vez mais viável a disseminação das microrredes.

Diante do contexto apresentando, este artigo visa apresentar um estudo associado com as microrredes e as redes elétricas inteligentes. Para tanto, conceitos fundamentais relacionados às microrredes e seus componentes são apresentados. Adicionalmente, algumas possibilidades de configurações das microrredes são discutidos. Na sequência, um levantamento técnico atual de microrredes em operação ao redor do mundo é exposto. Por fim, desafios existentes que apresentam-se como barreiras para a larga implementação das microrredes são apresentados.

2 METODOLOGIA

Este estudo enquadra-se como um artigo de revisão sistemática da literatura. Para a obtenção dos artigos científicos e textos descritos neste estudo, foram utilizadas as bases de dados da SciELO, Google Acadêmico, e sobremaneira, da Scopus (SCOPUS, 2019). Foram utilizadas as palavras chave: Microrredes, Redes Elétricas Inteligentes, Sistemas Elétricos de Potência e os seus termos equivalentes em inglês, *Microgrids*, *Smart Grids* e *Electric Power Systems*. Dessa forma, foram selecionados para análise os artigos publicados nos últimos 20 anos (2000-2020), com maior ênfase para os artigos mais recentes e para os artigos mais citados no período.

3 MICRORREDES

O conceito de microrredes se assemelha com a concepção geral de uma *Smart Grid*, visto que proporciona um aumento na qualidade, confiabilidade e segurança da energia elétrica e também na qualidade ambiental da geração, mediante a implementação de uma tecnologia capaz de melhorar

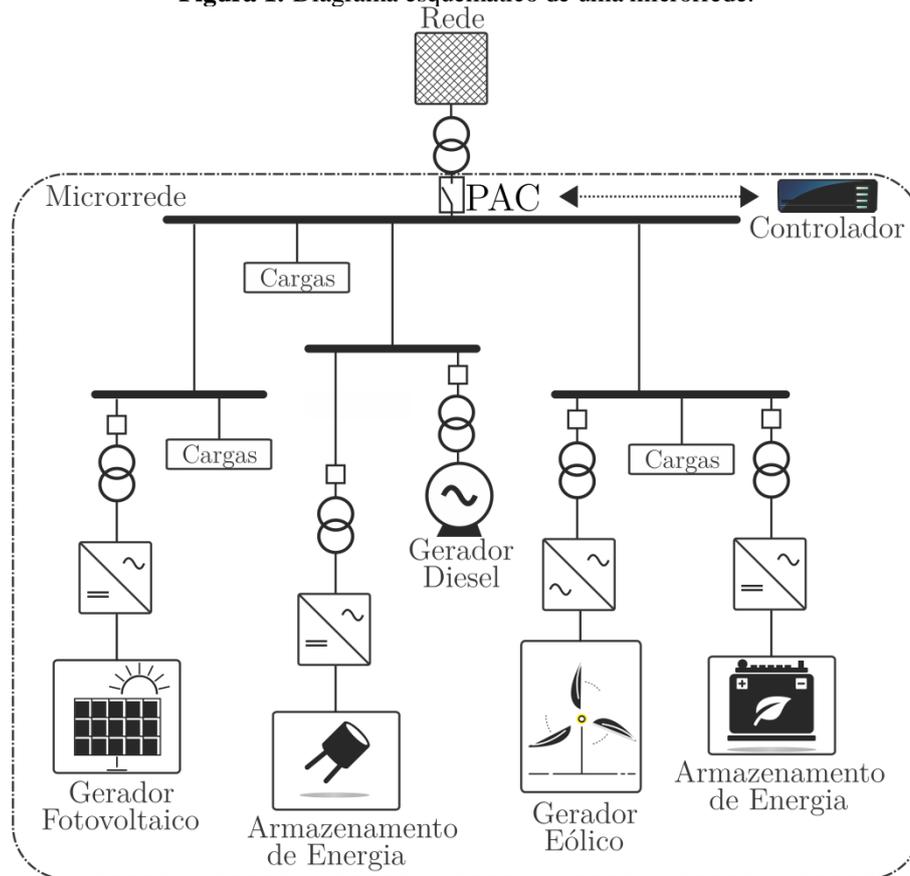
as técnicas de comunicação e automação, em um novo ambiente regulatório e de mercado. Entretanto, as microrredes, por si só, são uma inovação tecnológica de grande impacto (FALCÃO, 2009).

A Figura 1 apresenta um esquema típico de uma microrrede. A microrrede abrange uma porção de um sistema de distribuição de energia elétrica localizado à jusante do ponto de acoplamento comum (PAC) com a subestação, e inclui uma variedade de recursos distribuídos de energia (RDs) e diferentes tipos de usuários finais. Os RDs consistem em unidades de geração distribuída (GDs) e de sistemas de armazenamento de energia (SAEs) com diferentes capacidades e características. O ponto de conexão elétrica entre a microrrede e a concessionária, no barramento de média tensão do transformador da subestação, é chamado de ponto de acoplamento comum (PAC) (KATIRAEI; IRAVANI; HATZIARGYRIOU; DIMEAS, 2008).

O esquema da Figura 1 normalmente opera conectado com o transformador da subestação. Entretanto, uma microrrede é feita para ter a capacidade de gerar, controlar e operar a energia produzida por ela, de modo que, quando desconectada da subestação, continue atuando de forma ilhada, mantendo o fornecimento contínuo de energia para seus consumidores (KATIRAEI; IRAVANI; HATZIARGYRIOU; DIMEAS, 2008). Esta desconexão pode ocorrer, por exemplo, quando na existência de distúrbios na rede elétrica principal. Sem a existência da microrrede, o fornecimento de energia estaria comprometido, todavia, com a microrrede, existe a possibilidade de continuidade no fornecimento.

Para que uma microrrede tenha os requisitos necessários para atender uma demanda de um local, são utilizados alguns componentes essenciais em sua composição, os quais são detalhados na sequência.

Figura 1: Diagrama esquemático de uma microrrede.



3.1 FONTES

Nas microrredes, vários tipos de fontes podem ser empregados, como geradores síncronos despacháveis, geradores eólicos e geradores fotovoltaicos.

Os geradores síncronos despacháveis, em sua maioria, quando utilizados em uma microrrede, são movidos com um motor a diesel ou a gás natural. São utilizados em grande parte para atuarem como uma forma de segurança para o sistema caso haja algum problema na rede e também para que a microrrede continue operando de forma ilhada até que seja reconectada a subestação. Podendo ser configurado como excitador, atuando como um regulador da tensão e da potência reativa, ou como governador, atuando como um ajustador da tensão e da potência reativa (FU; NASIRI; SOLANKI; BANI-AHMED; WEBER; BJAVARAJU, 2015).

As fontes de energia renováveis são os principais componentes de uma microrrede para que ela garanta sustentabilidade e capacidade de fornecimento. Os tipos mais comuns de fontes renováveis utilizadas são a energia eólica e a energia fotovoltaica (FU; NASIRI; SOLANKI; BANI-AHMED; WEBER; BJAVARAJU, 2015).

A energia eólica é a energia obtida através da conversão da energia cinética do vento em energia elétrica, isso ocorre através da incidência do vento nos aerogeradores que captam a energia

cinética e a transformam em energia elétrica, esse processo é feito graças ao rotor que é capaz de gerar a potência mecânica a partir da rotação de suas pás no topo da torre. Existem dois tipos de turbinas eólicas utilizados nos dias de hoje, as de eixo vertical (que possuem suas pás girando ao redor da torre e a favor do vento) e as turbinas de eixo horizontal (que possuem três pás que atuam de modo contrário ao vento, cortando-o) que são as mais utilizadas (WAGNER, 2017).

A energia fotovoltaica é a energia obtida através da conversão de energia solar em energia elétrica, que ocorre em um dispositivo semicondutor conhecido como célula solar. A célula solar é uma unidade que fornece uma tensão e uma corrente de saída ao sistema. Para ser implementada a energia fotovoltaica em sistemas mais práticos, que demandam de uma corrente e uma tensão específica, várias células solares são conectadas formando um painel solar, e para que essa geração seja feita em larga escala, vários painéis são conectados formando um conjunto solar. A energia solar também possui mais uma forma de ser utilizada para geração de energia que é através da acumulação de calor através dos chamados coletores solares (ZEMAN, 2011).

Para que ambas fontes operem em seu ponto de máxima potência, são conectadas a um inversor de corrente quando presentes na microrrede (HADDADIAN; NOROOZIAN, 2015).

3.2 INVERSOR CONTROLANDO A POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

A função desta configuração do inversor é regular a potência ativa e reativa da saída, sendo que esta configuração é utilizada principalmente em fontes de energia renováveis, tais como eólica e fotovoltaica, como citado acima. O inversor possui também proteção de sobrecorrente por causa de seus limites de saturação, agrega uma robustez com relação as variações presentes no conversor e possui uma corrente dedicada que, através da tensão do terminal AC, pode regular a corrente de linha presente (FU; NASIRI; SOLANKI; BANI-AHMED; WEBER; BJAVARAJU, 2015).

3.3 INVERSOR CONTROLANDO AMPLITUDE E ÂNGULO DA TENSÃO

Diferente da primeira configuração, este inversor tem por objetivo regular a amplitude e o ângulo do sistema. Neste caso a frequência e a tensão de operação são controladas pelo próprio inversor, e não impostas pelo sistema como é no caso do inversor de corrente. O objetivo principal do controle é regular a amplitude, frequência e ângulo fasorial da tensão de carga na presença de distúrbios na corrente de carga (FU; NASIRI; SOLANKI; BANI-AHMED; WEBER; BJAVARAJU, 2015).

3.4 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os sistemas de armazenamento de energia não só gerenciam e controlam as funções dos dispositivos de armazenamento com o intuito de fornecer suporte de energia para as cargas locais, como também tentam maximizar sua vida útil, eficiência e segurança. Ele também se comunicam com a parte superior da unidade de controle para executar outras atividades, como *peak-shaving*, *load-shifting*, regulação de tensão e regulação de frequência. Como vários geradores distribuídos e clientes demandam diferentes perfis de potência reativa, pode ser um desafio para o sistema se manter estável. Com isso, verifica-se que os sistemas de armazenamento de energia possuem um papel fundamental na rede, estabilizando a tensão e a frequência da microrrede para aplicações de curto e longo prazo. Pode-se também ser utilizada em baixas escalas, como o gerenciamento da taxa de rampa de energia renovável e também em escalas de utilidade, como regular a frequência de utilidade (FU; NASIRI; SOLANKI; BANI-AHMED; WEBER; BJAVARAJU, 2015).

3.5 CONTROLADOR CENTRAL

Em uma microrrede existem várias GDs localizadas a uma certa distância entre elas. Existe a necessidade de manter a operação e o controle de todas as GDs de modo coordenado para que se mantenha a estabilidade do sistema e assim, fazendo com que a microrrede atinja todas as suas metas operacionais. Isso pode ser feito por um controlador que coordene todos os controladores das fontes geradoras menores por meio de uma rede de comunicação. Esse controlador é chamado de controlador central da microrrede (MGCC) e ele pode receber os dados de todos os controladores locais e dos sistemas de monitoramento da microrrede e assim, tomar todas as decisões necessárias do ponto de vista do sistema (RASHEDUZZAMAN; BHASKARA; CHOWDHURY, 2012).

O MGCC se torna necessário para analisar a qualidade da energia no PAC e sendo assim, pode decidir entre trabalhar com a rede ou iniciar a operação no modo ilhado. Caso esteja em modo ilhado e seja necessário voltar para a rede, o MGCC é responsável pela resincronização quando a rede é restaurada, adequando a tensão e a frequência da microrrede com a do lado da rede principal. Portanto, para uma coordenação adequada das fontes de energia, para fins de resincronização e decisões de ilhamento, é necessário um controlador central de microrrede (KAUR; KAUSHAL; BASAK, 2016).

3.6 INFRAESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO

A infraestrutura de comunicação da microrrede pode ser feita com o uso de várias tecnologias como Ethernet, wireless, utilizando protocolos como o IEC 61850. A eficácia da comunicação entre os componentes da microrrede depende principalmente da estrutura da

microrrede e do seu sistema de controle. Existem dois tipos de infraestrutura de comunicação em uma microrrede, centralizada ou descentralizada. A centralizada possui um controlador principal na microrrede que faz a coleta dos dados essenciais de todos os componentes e efetua as ações necessárias. Já na configuração descentralizada, todos os componentes possuem um controlador próprio que efetuará as ações necessárias para o próprio componente isolado de acordo com suas necessidades. Os componentes da microrrede costumam ser controlados usando o modo descentralizado de tomada de decisão, a fim de manter o equilíbrio da demanda e do fornecimento proveniente das fontes distribuidoras e da rede principal (SAFDAR; HAMDAOUI; COTILLA-SANCHEZ; GUIZANI, 2013).

Um sistema de comunicação é fundamental para operar uma microrrede de forma segura, eficiente e confiável. A comunicação entre controladores integra componentes da microrrede como uma entidade controladora e uma entidade funcional e permite a utilização de algoritmos de controle avançados que melhoram o funcionamento da microrrede, tornando-a mais econômica e otimizada. O sistema de controle supervisão e aquisição de dados (SCADA) da microrrede coleta as configurações e o status da rede em tempo real por meio da comunicação e interatua com o software de gerenciamento da microrrede e com o sistema operador para executar operações mais avançadas, como a resposta à demanda, desativação ou reconexão, confirmação da rede etc (FU; NASIRI; SOLANKI; BANI-AHMED; WEBER; BJAVARAJU, 2015).

4 TIPOS DE MICRORREDES

Pode-se citar três tipos de microrredes que atuam de diferentes maneiras e possuem uma estrutura típica para cada tipo, as quais são detalhados na sequência.

4.1 MICRORREDES AC

As microrredes que operam com tensão AC e fornecem a mesma ao sistema integrado são denominadas microrredes AC. As fontes de geração, os dispositivos de armazenamento e outros equipamentos do sistema estão interconectados em um barramento AC para poder alimentar as cargas AC existentes. Essas microrredes podem ser introduzidas a uma rede de energia já existente sem nenhum tratamento específico para seu controle e são projetadas e implementadas para utilizar da potência AC existente no sistema, como frequência, níveis de tensão e princípios de proteção para sua própria proteção (JUSTO; MWASILU; LEE; JUNG, 2013). As microrredes AC podem ainda ser monofásicas ou trifásicas (CHANDAK; BHOWMIK; ROUT, 2019).

4.2 MICRORREDES DC

As microrredes DC podem se conectar em redes AC com diferentes frequências para que haja a conversão de energia dentro da mesma e, assim, alimentando tanto aparelhos AC como DC sem que haja variação da energia. Como as microrredes usualmente incluem fontes e baterias renováveis em seu sistema, as microrredes DC trarão uma capacidade de aumentar a eficiência do sistema. As microrredes DC, na rede principal, podem vir a exercer um papel efetivo na solução de problemas operacionais. As microrredes DC podem ainda ser utilizadas para suporte de tensão, utilizando da sua capacidade de inserir energia reativa como um serviço adjunto do sistema (ELSAYED; MOHAMED; MOHAMMED, 2015).

4.3 MICRORREDES HÍBRIDAS AC/DC

Microrrede híbrida AC/DC é uma microrrede que contém fontes de energia AC/DC e cargas AC/DC. O modo no qual as cargas e as fontes então conectadas no sistema e o modo no qual os barramentos AC/DC são configurados, pode-se classificar a microrrede híbrida AC/DC como microrrede híbrida AC acoplada, microrrede híbrida DC acoplada ou microrrede híbrida AC-DC acoplada. Nas microrredes híbridas AC acopladas, vários GDs e SAEs são conectados ao barramento AC por meio dos conversores de interface. Nas microrredes híbridas DC acopladas, as GDs e os SAEs são conectados ao barramento DC e um conversor de interfaceamento (IFC) é utilizado para conectar os barramentos AC e DC. Nas microrredes híbridas AC-DC acoplada, as GDs e os SAEs são conectados ao barramento AC e DC, e os barramentos são interligados por um conversor de interligamentos (ILC) (NEJABATKHAH; LI, 2014).

Um aspecto crítico sobre a operação das microrredes híbridas AC/DC é a estratégia de controle e o esquema de gerenciamento de energia, ambos essenciais para que a operação seja sólida (NEJABATKHAH; LI, 2014). Elas também estão se tornando um foco muito presente em pesquisas devido ao anseio de reduzir o grande número de conversões reversas em redes AC ou DC e para facilitar a conexão de várias fontes renováveis e cargas AC e DC no sistema de energia (XIAO; LUO; SHUAI; JIN; HUANG).

5 APLICAÇÕES DE MICRORREDES

Existem várias microrredes com diferentes fontes geradoras de energia, funcionalidades, controladores, sistemas de armazenamento, comunicação e tipos de carga implementadas ao redor do mundo. A seguir, devido à limitação de espaço do artigo, serão apresentadas dez microrredes em funcionamento.

A microrrede de DeMoTec da University of Kassel, na Alemanha, possui uma topologia do tipo malhada, sendo operada em AC. Em sua composição, observam-se fontes geradoras de energia eólica, fotovoltaica, dois geradores a diesel e também duas baterias, sendo que o armazenamento de energia pode ser feito tanto nos geradores a diesel como nas baterias. Possui cargas residenciais e comerciais e o seu controle é feito com a obtenção dos dados dos controladores locais de cada componente, comunicando-se toda a rede via Ethernet (BARNES; DIMEAS; ENGLER; FITZER; HATZIARGYRIOU; JONES; PAPATHANASSIOU; VANDENBERGH, 2005).

A microrrede de Manchester, no Reino Unido, possui uma topologia do tipo radial, operando em AC. Em sua composição, geradores síncronos são responsáveis pela geração da energia e *flywheels* responsáveis pelo armazenamento. Possui apenas cargas comerciais em sua composição, que são controladas por meio da obtenção de dados dos controladores locais. Sua comunicação é feita pelo sistema de controle supervisão e aquisição de dados (SCADA) (MARIAM; BASU; CONLON, 2016).

A microrrede da University of Nottingham, no Reino Unido, possui uma topologia do tipo radial, operada em DC. Possui em sua composição fontes de geração de energia eólica e o armazenamento de energia é feito através do uso de baterias. Tem em sua configuração apenas cargas residenciais, que são controladas de forma descentralizada, sendo sua comunicação feita por meio da LAN (comunicação de usuários locais) e por GPRS (serviços gerais de pacote por rádio) (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

A microrrede de Kyoto, no Japão, possui uma topologia do tipo malhada, operada em AC. Tem em sua composição fontes geradoras de energia, tais como eólica, fotovoltaica e células de combustível e seu armazenamento feito por baterias. Na sua configuração, apresenta cargas comerciais e industriais, controladas de modo centralizado e com sua comunicação feita através de ISDN ou ADSL (MOROZUMI; NAKAMA; INOUE, 2008).

A microrrede de Aichi, no Japão, possui uma topologia do tipo radial e é operada em AC. Tem em sua composição fontes de geração de energia eólica, fotovoltaica, de biogás e da combinação de calor e energia, e seu armazenamento é feito com o uso de baterias. Sua configuração baseia-se basicamente em cargas industriais e residenciais com o seu controle feito de modo centralizado (ARAKI; TATSUNOKUCHI; NAKAHARA; TOMITA, 2009).

A microrrede NSBET, na Irlanda, possui uma topologia do tipo radial, sendo operada em AC. Seus componentes são fontes de geração de energia eólica, células de combustível e combinação de calor e energia, e seu armazenamento feito com o uso de baterias. Em sua composição também encontram-se cargas do tipo residencial com o seu controle feito de modo centralizado dotado de uma infraestrutura de comunicação (LIDULA; RAJAPAKSE, 2011).

A microrrede de Girona, na Espanha, possui uma topologia do tipo malhada, AC. Tem como parte de seus componentes fontes geradoras de energia eólica e fotovoltaica e o seu armazenamento é feito através de geradores à diesel e baterias. Sua composição baseia-se em carga comerciais e residenciais, seu controle é feito de modo centralizado e sua comunicação por meio de *Zig Bee*, que é um protocolo de comunicação sem fio que tem como função interligar componentes inteligentes (SALAS; GUERRERO; SUREDA, 2014).

A microrrede BC Hydro Boston Bar, no Canadá, possui uma topologia do tipo radial, AC. Seus componentes são turbinas hidrelétricas e seu armazenamento é feito por meio de geradores à diesel. É composta por apenas cargas residenciais e controlada de forma descentralizada com um controle PQ, o controle PQ usa a queda de frequência e tensão compatível com a rede para fazer a análise dos dados obtidos, e sua comunicação é feita por meio de uma rede sem fio (Wireless Network) (BENJAMIN; ROBERT; TOSHIFUMI, 2008).

A microrrede da universidade técnica nacional em Atenas (NTUA), na Grécia, possui uma topologia do tipo radial, sendo operada em AC. Possui em sua composição fontes geradoras de energia eólica e fotovoltaica, e seu armazenamento é feito por meio de baterias. Sua configuração baseia-se apenas em cargas comerciais, seu controle é feito por meio de um controle PQ local sistemas multi-agentes que conseguem agrupar e analisar todos os dados obtidos pelos PQs locais (MITRA; DEGNER; BRAUN, 2008).

A microrrede de Ramea, no Canadá, possui uma topologia do tipo malhada, sendo operada em AC. Têm em seus componentes geradores à diesel e turbinas de geração de energia eólica, e seu armazenamento é feito por meio de baterias. Sua configuração conta apenas com cargas residenciais. O seu controle é feito de modo descentralizado e sua comunicação é feita pelo sistema de controle supervisão e aquisição de dados (SCADA) (HATZIARGYRIOU; ASANO; IRAVANI; MARNAY, 2007).

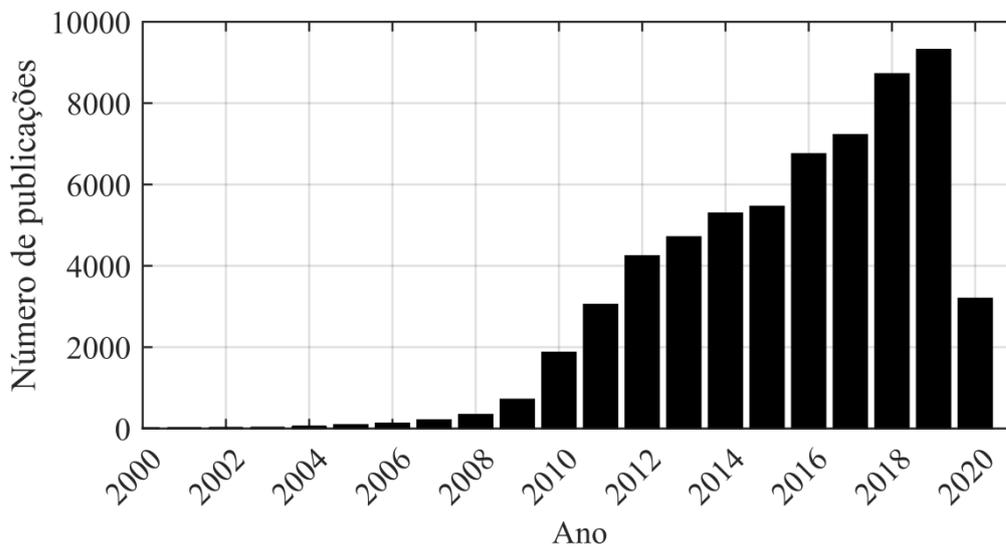
Do exposto nesta subseção, verifica-se que as microrredes podem ser estruturadas de vários modos e com vários tipos de componentes para atender uma necessidade pontual, aproveitando os recursos naturais que estão mais presentes e controlando a distribuição da energia gerada com mais segurança, qualidade e confiabilidade. No entanto, verifica-se de certa forma uma quantidade ainda pequena de microrredes, devido aos desafios existentes para sua larga implementação. Na próxima seção, alguns desses desafios são apresentados.

6 DESAFIOS EXISTENTES E TENDÊNCIAS FUTURAS

Ao analisar o atual panorama de desenvolvimento e aplicação das microrredes, verifica-se que ainda existem desafios, que apresentam-se como barreiras para sua larga implementação. Não

obstante, esses desafios apresentam-se aos pesquisadores como tendências de pesquisa e desenvolvimento. Nesse contexto, apresenta-se a Figura 2, obtida por meio do banco de dados da Scopus, que ilustra a quantidade de publicações relacionadas às microrredes a partir do ano 2000. Por meio desta figura, observa-se que a quantidade de publicações relacionadas com as microrredes é crescente com o passar dos anos, evidenciando a importância das microrredes. Vale ressaltar que o menor número de publicações no ano de 2020 deve-se ao fato deste ainda não ser um ano completo no momento da análise. Por outro lado, esta ascendência do tema em meio às publicações também consubstancia o que foi exposto acima, isto é, a existência de desafios a serem explorados e solucionados pelos pesquisadores.

Figura 2: Números de publicações sobre microrredes ao decorrer dos anos.



Na sequência serão citados e descritos alguns dos desafios existentes, que vêm apresentando-se como tendências para pesquisas em diversos países. Em cada um dos desafios apresentados, artigos de revisão dedicados ao tema em questão são indicados para uma leitura aprofundada sobre cada tema.

6.1 POLÍTICA E NORMAS

Existe a necessidade da formação de um conjunto de regras, padrões, políticas e procedimentos universais para que haja o incentivo e o auxílio na implementação de microrredes no mundo todo. Fazendo assim com que haja um padrão fácil de ser analisado e caso necessite, de ser corrigido pelos responsáveis pela microrrede. Esse tipo de transformação requer a fuga da hierarquia e arquitetura, de certa forma engessada, existente no padrão centralizado atual. Mais informações relacionadas à questão de políticas e normas são amplamente discutidas por Wolsink (2020).

6.2 MODO DE OPERAÇÃO

Uma estratégia bem definida onde as microrredes podem transitar entre o seu modo ilhado e o seu modo conectado com a rede sem que haja algum problema no seu funcionamento deve ser desenvolvida. Como em alguns casos os sistemas de controle e proteção dependem do modo de operação da microrrede, é extremamente importante que essa estratégia seja robusta e confiável. Para maiores informações sobre essa preocupação, indica-se o estudo de Lou et al. (2020).

6.3 MODELAGEM

Para o desenvolvimento da pesquisa relacionada às microrredes, uma modelagem fidedigna da microrrede e seus componentes deve ser desenvolvida. Esses modelos devem considerar as complexidades na operação das microrredes e, a depender do objeto de estudo, deve considerar os controles centralizados e descentralizados presentes nas microrredes. Alguns dos aspectos relacionados à modelagem dos elementos da microrrede, em maior profundidade, podem ser encontrados em Aprilia et al. (2020).

6.4 PROTEÇÃO

As microrredes trazem uma série de desafios relacionados à proteção. Uma das principais preocupações é a grande variação nas correntes de curto-circuito dependendo do modo de operação da microrrede. Esses desafios inviabilizam a aplicação da proteção convencional, sendo necessário, portanto, o desenvolvimento de estratégias e esquemas compatíveis com as possibilidades de operação das microrredes. Esses desafios e possíveis soluções são amplamente discutidos em Barra et al. (2020).

6.5 CONTROLE

O desafio de controle surge em microrredes operando em modo ilhado, onde se necessita de uma estratégia de controle eficiente para monitorar os parâmetros dos sistemas quando a microrrede possui elementos operacionais com características diversificadas. Adicionalmente, tem-se a possibilidade de aplicação de esquemas de controle dependentes de comunicação ou não, centralizados ou descentralizados. Informações aprofundadas sobre o controle de microrredes foram abordadas por Yamashita et al. (2020).

6.6 ESTABILIDADE

O desafio existente com relação à estabilidade surge sobremaneira em microrredes que estão funcionando no modo ilhado, onde não possuem uma estratégia de controle eficiente que consegue

manter um equilíbrio entre a demanda de carga e a energia gerada. Em San et al. (2020), os aspectos relacionados à estabilidade em microrredes é amplamente discutida e serve como uma ótima fonte de consulta e iniciação ao assunto.

6.7 INFRAESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO

É necessário criar uma infraestrutura de comunicação confiável e segura, onde possa haver a integração da medição inteligente e do controle das microrredes (SANTOS; MOTA, 2020). Fazendo assim com que haja uma comunicação entre as microrredes e uma possível comparação de dados para analisar sua estabilidade ou seus problemas. Vale destacar ainda que várias proposições atuais associadas com controle e proteção requerem uma infraestrutura de comunicação, o que torna este um assunto crítico. Temas associados com *cyberattacks*, *cybersecurity* são emergentes em pesquisas. No estudo realizado por Marzal et al. (2020), os desafios atuais e tendências futuras relacionadas com o campo de comunicação em microrredes são abordados.

6.8 GERENCIAMENTO DE ENERGIA

Conforme mencionado anteriormente, tem-se uma diversidade de fontes de energia presentes nas microrredes, sobremaneira, renováveis. Adicionalmente, existe a presença de sistemas de armazenamento de energia. Portanto, torna-se imprescindível uma estratégia para o gerenciamento de energia de todos esses dispositivos. Em Vera et al. (2019) é apresentada uma revisão da literatura aprofundada sobre o gerenciamento de energia em microrredes.

6.9 INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A integração dos sistemas de armazenamento de energia com as microrredes também é uma tendência em pesquisa na atualidade. No momento, existem diversas tecnologias de armazenamento com diferentes características e aplicações. Dessa forma, estudos relacionados à escolha do tipo de tecnologia, dimensionamento, bem como a alocação desses elementos nas microrredes tornam-se fundamentais para a operação otimizada de todo o sistema. Um exemplo de estudos que consideram essas preocupações é o realizado por Hannan et al. (2020), que apresenta uma revisão da literatura de algoritmos para o dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia.

6.10 INTEGRAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Outro desafio existente diz respeito à integração dos veículos elétricos com as microrredes. A importância desta integração deve-se à necessidade de eletrificar o transporte, devido principalmente a questões ambientais. Existem estudos que indicam que a integração dos veículos

elétricos com as redes elétricas pode ser benéfica, contribuindo com a operação e serviços ancilares. Um estudo aprofundado sobre este tema é apresentado por Saldaña et al. (2019).

7 CONCLUSÃO

Nota-se que para a geração de energia tornar-se mais renovável, devido à intermitência de fontes como a eólica e a fotovoltaica, a presença de sistemas de armazenamento de energia torna-se necessária. Dessa forma, o controle e a integração desses elementos à rede elétrica é um desafio a ser superado, tendo como solução promissora a utilização dos conceitos de microrredes e redes elétricas inteligentes. Este artigo de revisão mostrou em detalhes os componentes e configurações existentes em uma microrrede, e que estas são uma configuração do sistema elétrico que fornece benefícios ao meio ambiente, trazendo também vantagens econômicas em comparação com os sistemas de energia existentes atualmente. A emergência do tema faz com que pesquisadores ao redor do mundo direcionem esforços para a solução dos desafios existentes, apresentando neste artigo, tornando possível a implementação das microrredes em larga escala. Verificou-se por meio do levantamento realizado que a quantidade de publicações relacionadas às microrredes é crescente ao longo dos anos, o que indica que o tema é relevante e atual, porém apresentando lacunas e aberturas para novas investigações e projetos de pesquisa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- APRILIA, E.; MENG, K.; ZEINELDIN, H.H.; HOSANI, M.A.; DONG, Z.Y. **Modeling of distributed generator and converters control for power flow analysis of networked islanded hybrid microgrids**, Electric Power Systems Research, vol. 184, 2020.
- ARAKI, I.; TATSUNOKUCHI, M.; NAKAHARA, H.; TOMITA, T. **Bifacial PV system in Aichi Airport-site Demonstrative Research Plant for New Energy Power Generation**, Solar Energy Materials & Solar Cells, vol.93, p. 911-916, apr. 2009.
- BARNES, M.; DIMEAS, A.; ENGLER, A.; FITZER, C.; HATZIARGYRIOUT, N.; JONES, C.; PAPATHANASSIOU, S.; VANDENBERGH, M. **MicroGrid Laboratory Facilities**, International Conference on Future Power Systems, nov. 2005.
- BARRA, P.H.A.; COURY, D.V.; FERNANDES, R.A.S. **A survey on adaptive protection of microgrids and distribution systems with distributed generators**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 118, 2020.
- BENJAMIN, K.; ROBERT, L.; TOSHIFUMI, I. **A look at microgrid Technologies and testing, projects from around the world**, IEEE Power and Energy magazine, p. 41-53, 2008.
- CHANDAK, S.; BHOWMIK, P.; ROUT, P. K. **Robust power balancing scheme for the grid-forming microgrid**, IET Renewable Power Generation, dec. 2019.

ELSAYED, A. T.; MOHAMED, A. A.; MOHAMMED, O. A. **DC microgrids and distribution systems: An overview**, *Electric Power Systems Research*, p. 407-417, 2015.

FALCÃO, D. M. **Smart Grids e Microrredes: O Futuro Já é Presente**, *Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos*, 2009.

FU, Q.; NASIRI, A.; SOLANKI, A.; BANI-AHMED, A.; WEBER, L.; BHAVARAJU, V. **Microgrids: Architectures, Controls, Protection, and Demonstration**, *Electric Power Components and Systems*, p. 1453-1465, 2015.

GUIMARÃES, P. H. V.; MURILLO, A.; ANDREONI, M.; MATTOS, D. M. F.; FERRAZ, L. H. G.; PINTO, F. A. V.; COSTA, L. M. K.; DUARTE, O. C. M. B. **Comunicação em Redes Elétricas Inteligentes: Eficiência, Confiabilidade, Segurança e Escalabilidade**, 31º *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, p. 101-164, 2013.

HADDADIAN, H.; NOROOZIAN, R. **Optimal Operation of Active Distribution Systems Based on MicroGrid Structure**, *Renewable Energy*, p. 1-24, dec. 2016.

HANNAN, M.A.; FAISAL, M.; KER, P.J.; BEGUM, R.A.; DONG, Z.Y.; ZHANG, C. **Review of optimal methods and algorithms for sizing energy storage systems to achieve decarbonization in microgrid applications**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 131, 2020.

HATZIARGYRIOU, N.; ASANO, H.; IRAVANI, R.; MARNAY, C. **An overview of ongoing research, development, and demonstration projects**, *IEEE Power & Energy magazine*, p. 79-94, jul. 2007.

HATZIARGYRIOU, N.; ASANO, H.; IRAVANI, R.; MARNAY, C. **Microgrids**, *IEEE power & energy magazine*, p. 78-94, jul.-aug. 2007.

JUSTO, J. J.; MWASILU, F.; LEE, J.; JUNG, J.-W. **AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 387-405, 2013.

KATIRAEI, F.; IRAVANI, R.; HATZIARGYRIOU, N.; DIMEAS, A. **Microgrids Management**, *IEEE power & energy magazine*, p. 54-65, may. -jun. 2008.

KAUR, A.; KAUSHAL, J.; BASAK, P. **A review on microgrid central controller**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 338-345, 2016.

LIDULA, N.W.A.; RAJAPAKSE, A.D. **Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.15, p. 186-202, 2011.

LOUR, G.; GU, W.; ZHU, J.; LI, P.; ZHANG, X. **A novel control strategy for the seamless transfer of microgrids based on disturbance observer**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.118, 2020.

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

MARZAL, S.; SALAS, R.; MEDINA, R.G.; GARCERÁ, G.; FIGUERES, E. **Current challenges and future trends in the field of communication architectures for microgrids**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, p. 3610-3622, 2018.

MITRA, I.; DEGNER, T.; BRAUN, M. **Distributed generation and microgrids for small island electrification in developing countries: A review**, *Solar Energy Society of India*, p. 6-20, jan. 2008.

MOROZUMI, S.; NAKAMA, H.; INOUE, N. **Demonstration projects for grid-connection issues in Japan**, *Elektrotechnik & Informationstechnik*, p. 426-431, dec. 2008.

NEJABATKHAH, F.; LI, Y. W. **Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid**, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014.

RASHEDUZZAMAN, Md.; BHASKARA, S. N.; CHOWDHURY, Badrul H. **Implementation of a Microgrid Central Controller in a Laboratory Microgrid Network**, *North American Power Symposium (NAPS)*, sep. 2012.

SAFDAR, S.; HAMDAR, B.; COTILLA-SANCHEZ, E.; GUIZANI, M. **A Survey on Communication Infrastructure for Micro-grids**, *9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, jul. 2013.

SALAS, P.; GUERRERO, J. M.; SUREDA, F. **Mas Roig Mini-Grid: A Renewable-Energy-Based Rural Islanded Microgrid**, *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, p. 975-982, may. 2014.

SALDAÑA, G.; MARTIN, J.I.S.; ZAMORA, I.; ASENSIO, F.J.; OÑEDERRA, O. **Electric vehicle into the grid: Charging methodologies aimed at providing ancillary services considering battery degradation**, *Energies*, vol. 12, no. 12, 2019.

SAN, G.; WENLIN, Z.; GUO, X.; HUA, C.; XIN, H.; BLAABJERG, F. **Large-disturbance stability for power-converter-dominated microgrid: A review**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 127, 2020.

SANTOS, L.H.S.; MOTA, L.T.M. **Use of long range wireless technology for smart grids**, *Brazilian Journal of Development*, vol. 6, 2020.

SCOPUS Database. Disponível em: <https://www.scopus.com>. Acessado em 20 de maio de 2020.

VERA, Y.E.G.; DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AUGUSTÍN, J.L. **Energy management in microgrids with renewable energy sources: A literature review**, *Applied Sciences*, vol. 9, 2019.

YAMASHITA, D.Y.; VECHIU, I.; GAUBERT, J-P. **A review of hierarchical control for building microgrids**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 118, 2020.

WAGNER, H.-J. **Introduction to wind energy systems**, *EPJ Web of Conferences*, vol. 148, jul. 2017.

WOLSINK, M. **Distributed energy systems as common goods: Socio-political acceptance of renewables in intelligent microgrids**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 127, 2020.

XIAO, H.; LUO, A.; SHUAI, Z.; JIN, G.; HUANG, Y. **An Improved Control Method for Multiple Bidirectional Power Converters in Hybrid AC/DC Microgrid**, *IEEE Transactions on Smart Grid*, p. 1-8.

ZEMAN, M. **Introduction to Photovoltaic Solar Energy**, *TU Delft Academic Press*, 2011.