

Caracterização e Aplicações de Microrredes de Missão Crítica

Fabricio P. Moraes* Hércules A. Oliveira* Pedro B. L. Neto**
Osvaldo R. Saavedra* Clóvis B. Mendonça Oliveira*
Luiz Antônio De S. Ribeiro* Marcelo F. A. Junior***
Lucas de P. A. Pinheiro*** Rogério M. Cazo****

* Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão,
São Luís, Brasil, fabricio.moraes@discente.ufma.br;
hercules.oliveira@discente.ufma.br; o.saavedra@ieee.org;
clovis.oliveira@ufma.br; l.a.desouzaribeiro@ieee.org

** Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do
Maranhão, Balsas, Brasil, pedroblneto@gmail.com

*** Equatorial Energia, São Luís, Brasil,
marcelo.augusto@equatorialenergia.com.br;
lucas.pinheiro@equatorialenergia.com.br

**** Força Aérea Brasileira / Centro de Lançamento de Alcântara,
Alcântara, Brasil, moreirarmc@fab.mil.br

Abstract: The insertion of renewable sources in the electric power system (SEP) is in vogue, with the objective of meeting the demand for electric energy, mitigating environmental pollutants and achieving socioeconomic benefits. brought a new concept of electrical systems, the microgrids. A microgrid consists of the integration of distributed energy resources and loads, and can behave as a single controllable unit, being able to operate in the modes connected to the conventional grid or isolated from it. Mission-critical microgrids present themselves as an opportunity to add resilience and reliability to critical processes, that is, processes that are characterized by strict requirements for energy continuity, achieving a strategic connotation for different civil and military sectors. In this context, this article presents a review of the concepts, classifications, modes of operation and management of a microgrid with emphasis on critical microgrids. In addition, it presents typical cases focused on this application, including the conceptual scope of the power circuit and management logic of a microgrid under implementation in a Brazilian Launch Center, with an installed capacity of 3.125 MW of distributed generation.

Resumo: A inserção de fontes renováveis no sistema elétrico de potência (SEP) está em voga, com o objetivo de atender a demanda de energia elétrica, mitigar os poluentes ambientais e alcançar benefícios socioeconômicos. A integração dessas fontes à rede convencional, associada à geração distribuída, trouxe um novo conceito de sistemas elétricos, as microrredes. Uma microrrede consiste na integração de recursos energéticos distribuídos e cargas, e podendo se comportar como uma única unidade controlável, sendo capaz de operar nos modos conectado a rede convencional ou isolada dela. As microrredes de missão crítica se apresentam como uma oportunidade para agregar resiliência e confiabilidade aos processos críticos, ou seja, processos que se caracterizam por rigorosas exigências de continuidade de energia, alcançando uma conotação estratégica para diferentes setores civis e militares. Nesse contexto, este artigo apresenta uma revisão dos conceitos, classificações, modos de operação e gerenciamento de uma microrrede com ênfase em microrredes críticas. Além disso, apresenta casos típicos voltados para essa aplicação, incluindo o escopo conceitual do circuito de potência e lógica de gerenciamento de uma microrrede em fase de implementação em um centro de lançamento aeroespacial brasileiro, com capacidade em potência instalada de 3,125 MW de geração distribuída.

Keywords: critical microgrid; distributed generation; renewable energy.

Palavras-chaves: Microrrede crítica; geração distribuída; energia renovável.

1. INTRODUÇÃO

As microrredes podem ser definidas como um conjunto de cargas e recursos energéticos distribuídos e interconectados que atuam como uma única entidade controlável, sendo capaz de operar de modo conectado à rede principal ou de forma autônoma (Hatziargyriou, 2014), podendo transitar

* Este trabalho foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - código de financiamento 001, e Equatorial Energia.

entre os modos conforme conveniência das condições estabelecidas pelos usuários. De modo similar, as microrredes são também definidas com um sistema de distribuição de pequeno porte com recursos energéticos distribuídos associados a dispositivos de armazenamento e um sistema de supervisão, monitoramento, operação e controle (Ton and Smith, 2012).

As microrredes podem ser classificadas de acordo com vários critérios, como apresentado na Figura 1. O primeiro grupo dessa classificação, Figura 1(a), se refere ao tipo de

conexão com a rede da concessionária, de maneira que as microrredes podem estar conectadas à rede principal (*on-grid*), presumindo os prêmios associados às vantagens da conexão a um sistema de geração centralizada. Há também a operação desconectada da rede principal (*off-grid*), cuja desconexão pode ser motivada por: i) de forma planejada, com a finalidade de atender a exigência de confiabilidade e resiliência do sistema; e ii) de forma não planejada, resultante de contingências na rede externa (IEEE, 2018a, 2019).

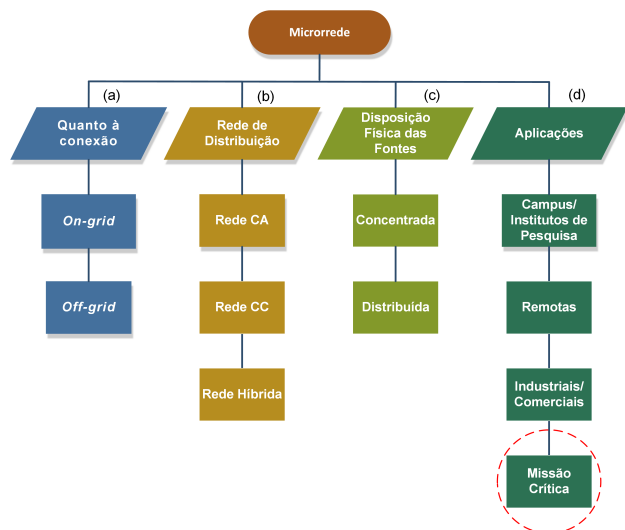


Figura 1. Classificação das microrredes.

O segundo grupo, Figura 1(b), leva em consideração os tipos de rede de distribuição com basicamente três topologias: i) a mais convencional corresponde à topologia de rede de distribuição em corrente alternada (CA), na qual a rede é composta exclusivamente por barramentos CA (J.G. de Matos, 2015); ii) em corrente contínua (CC), com aplicações mais específicas para atendimento de critérios de segurança ou perfis atípicos de demanda de cargas (Kakigano et al., 2010); e iii) híbrida, sendo a combinação da rede CA com a CC, para atendimento de topologia de microrredes que possuam barramentos CA e CC (Rodríguez-Díaz et al., 2015).

A disposição física das fontes também é uma forma de classificar os tipos de microrredes, conforme mostrado na Figura 1(c), podendo ter duas formas de organização (Oliveira et al., 2017):

- topologia concentrada, em que todas as fontes de geração são conectadas a um mesmo barramento;
- topologia distribuída, em que todas as fontes de geração são conectadas estrategicamente ao longo da rede de distribuição de energia elétrica da microrrede;

Pode-se também diferenciar as microrredes de acordo com o perfil de demanda, Figura 1(d), onde são consideradas as condições do contrato de faturamento, confiabilidade e resiliência exigidos pelos usuários. Atualmente existem microrredes no ambiente de Campus ou Institutos de pesquisa, remotas (comunidades isoladas) e industriais (voltadas para o comércio). Existem também as chamadas microrredes de missão crítica, que são utilizadas para atender demandas de ativos considerados essenciais, por exemplo bases militares, centro de dados, hospitais e laboratórios,

no qual a confiabilidade e resiliência energética são os principais requisitos (Wang et al., 2014).

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma revisão dos conceitos, definições, tipos e aplicações de microrredes, com ênfase nas de missão crítica, abordando os modos de operação, as funcionalidades, o controle e o funcionamento do sistema de gerenciamento de energia (EMS), além de exemplos de aplicações típicas e caracterização de uma microrrede crítica em fase de implementação em uma base aeroespacial brasileira.

2. MICRORREDES DE MISSÃO CRÍTICAS: CARACTERÍSTICAS

Microrrede de missão crítica é um tipo de sistema que não admite interrupção nem perda de qualidade de energia num horizonte de tempo preestabelecido. Nesse contexto, as bases militares, por exemplo, se destacam, uma vez que requerem alta confiabilidade no fornecimento de energia para cargas críticas, alta segurança cibernética, redução de custo de fontes despacháveis de energia e metas de redução de emissão de gases de efeito estufa (T.Tim, 2020).

As necessidades para microrredes de missão crítica variam de acordo com as exigências impostas por cada caso, porém os requisitos preponderantes em todas elas são a resiliência e a confiabilidade. Na Figura 2 pode-se observar algumas características essenciais para este tipo de microrrede em comparação com as microrredes convencionais.

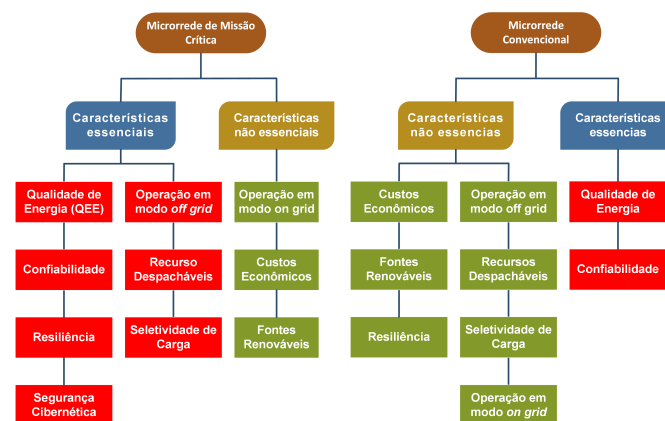


Figura 2. Comparação entre microrrede de missão crítica e microrrede convencional.

A seguir será feita uma breve descrição das características essenciais para uma microrrede crítica, apresentadas na Figura 2.

2.1 Qualidade de Energia

A qualidade de energia está associada a fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a tensão e a corrente (IEEE, 2014). Esses fenômenos podem ser medidos através de alguns indicadores em regime permanente e transitórios: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variações de tensão de curta duração (PRODIST, 2021).

Quando algum desses indicadores está fora dos limites aceitáveis, pode configurar um estado crítico de operação

da microrrede. Em condição de sobretensão e subtensão, as proteções dos conversores de potência dos sistemas de geração e armazenamento de energia podem ser sensibilizadas, provocando o desligamento de cargas ou mesmo um blecaute (IEEE, 2014).

Segundo a norma do IEEE Std. 2030.9 "IEEE Recommended Practice for the Planning and Design of the Micro-grid" são exigidos os seguintes indicadores de qualidade de energia para microrredes: desvio de frequência / tensão, fator de potência; outros requisitos avançados envolvem a recomendação de considerar quedas e elevações de tensão, flutuações e oscilações de tensão, harmônicas, injeção CC, desequilíbrio, etc. As limitações desses índices devem atender aos requisitos das normas pertinentes.

2.2 Operação off-grid

No modo de operação ilhado, a chave do *Point of Common Coupling* (PCC) está aberta, ou seja, a microrrede está desconectada da rede da concessionária.

Microrredes convencionais normalmente consideram a possibilidade de operação *off-grid* como forma de garantir o atendimento à carga quando houver falha na rede externa, caracterizando uma transição não programada para o modo *off-grid*.

Além desta capacidade de transição, uma microrrede de missão crítica deve prever este tipo de operação por "transição programada", ou seja, a possibilidade de desconexão intencional da rede externa, mesmo que esta esteja em estado operacional normal, evitando quaisquer descontinuidade de energia ou transitórios indesejados.

2.3 Confiabilidade

Em microrredes com grande presença de fontes intermitentes, a participação de fontes despacháveis se torna imprescindível para garantir os critérios mínimos de confiabilidade mesmo que ocorra perda de uma ou mais destas fontes (critérios N-1, N-2). Entre essas fontes despacháveis, as mais aplicadas são geradores baseados em combustíveis fósseis, que podem garantir o atendimento à carga mesmo durante a indisponibilidade das fontes renováveis. Deve-se destacar um um sistemas de armazenamento de capacidade compatível com a carga é também uma unidade despachável, com capacidade de resposta rápida a variações na demanda.

Através de uma combinação ótima entre as fontes despacháveis e renováveis, e coordenadas pelo *Energy Management System* (EMS), as microrredes podem alcançar níveis elevados de confiabilidade como: menor tempo de reparo, tempo mínimo entre falhas, indisponibilidade de carga, etc.

Sob a perspectiva da confiabilidade, a microrrede deve ter as seguintes características:

- Continuidade no atendimento à demanda e transição suave para o modo ilhado;
- Fonte de *backup* durante as falhas com duração e frequência regulares;
- Seletividade de Carga.

2.4 Resiliência

A resiliência, no contexto deste trabalho, pode ser definida como a capacidade do sistema de energia elétrica de resistir à contingências na rede, assegurando o menor tempo possível de interrupção do fornecimento de energia e retornando de forma rápida ao estado normal de operação (Parhizi et al., 2015).

Nas microrredes, a resiliência está associada com a capacidade da mesma de funcionar conectada à rede convencional, ou em modo ilhado, garantindo o fornecimento de energia às cargas locais mesmo quando o sistema elétrico principal não está disponível. Isso é possível através do gerenciamento otimizado dos recursos energéticos disponíveis (IEEE, 2018c). No modo de operação ilhado, o sistema de armazenamento tem um papel fundamental para garantir a resiliência das microrredes, uma vez que são capazes de agir como amortecedores de potência, absorvendo o excesso de geração em razão da presença de fontes primárias não despacháveis, preferencialmente renováveis, ou fornecendo potência para alimentar as carga.

A microrrede deve estar munida de um sistema supervisor e de controle capaz de processar em tempo real dados de medidas em diferentes pontos da microrrede, oferecendo solução que contemple todas as restrições operacionais e comandar de maneira sistêmica todas os componentes controláveis da microrrede. Para uma adequada operação, devem ser definidos *setpoints* para todos os cenários factíveis de contingência e que atendam no menor espaço de tempo possível as exigências mais críticas de carga e também de qualidade de energia.

Embora sejam conceitos bastante correlacionados, resiliência e confiabilidade são aspectos diferentes no contexto das microrredes. A confiabilidade está focada na adequação do sistema ao atendimento à demanda, mas para que este objetivo seja atingido, a microrrede precisa ser resiliente, e isso inclui, por exemplo, a capacidade de rapidamente se recompor após uma falta.

Enquanto a confiabilidade é o objetivo final da microrrede, a resiliência assume um compromisso realístico da operação perante vários eventos, naturais ou não, que podem comprometer a sua operação plena. Estes eventos podem ter diferentes graus de magnitude e de complexidade, além de nem sempre poderem ser previstos. No entanto, quando estes eventos acontecem em uma microrrede resiliente, seus impactos, bem como o tempo de recomposição do sistema, são minimizados, podendo a microrrede priorizar o atendimento às cargas críticas até a sua completa restauração.

2.5 Segurança Cibernética

Um sistema *ciberfísico* é uma rede de interação entre componentes físicos e computacionais. As microrredes se enquadram nessa definição, em virtude de possuir uma infraestrutura física, como as fontes de geração de energia, e computacional (controle, comunicação e automação).

A segurança cibernética é um conjunto de ações sobre pessoas, tecnologias e processos para enfrentar ataques cibernéticos. Sistemas que possuem comunicação com a internet podem ser alvos de ataques cibernéticos. Nas microrredes críticas, como por exemplo em ambientes

militares, essa característica é fundamental, dado que a confidencialidade das informações é primordial.

2.6 Seletividade de Carga

Em situações extremas, para garantir a segurança energética de processos críticos, usa-se a estratégia de seletividade de cargas ou corte de cargas, que consiste na desconexão temporária de algumas cargas, ditas não prioritárias ou de menor prioridade. Esta é uma estratégia utilizada como uma forma de controle emergencial para manutenção do atendimento de cargas críticas ou de maior prioridade.

3. MODOS DE OPERAÇÃO E FUNCIONALIDADES

3.1 Modo conectado (*On-Grid*)

Neste modo de operação a microrrede está interligada a rede principal através do PCC, visando atender aspectos principalmente de valor econômico, ou seja, reduzir o faturamento de energia através de estratégias de gerenciamento de energia como *Peak Shaving* e Arbitragem de Energia, explorando os benefícios das fontes renováveis e do sistema de armazenamento de energia.

Outras funções podem ser realizadas, como por exemplo, regulação da potência reativa, suavização da geração das fontes renováveis e deslocamento da geração renovável (*renewable shifting*).

3.2 Modo ilhado (*Off-Grid*)

Nesse modo de operação, a microrrede está isolada da rede principal podendo operar a partir de uma imposição planejada ou não planejada. Cujo o principal propósito do ilhamento programado deixa de ser econômico e passa a ser de segurança energética.

3.3 Modos de transição

A microrrede deve dispor dos seguintes modos de transição, além dos modos em regime permanente conectado e ilhado:

● Ilhamento programado

O ilhamento programado é realizado por meio da ação manual do operador da microrrede, que desencadeia a transição para operar como um sistema ilhado (IEEE, 2018b).

● Ilhamento não programado

Nesse modo de transição, eventos intempestivos (condições naturais ou estruturais) podem causar a desconexão da microrrede da rede externa, levando ao cenário de ilhamento não programado, mantendo-se assim por certo período a depender da autonomia desejada e da duração da falta.

● Reconexão à Rede Externa

Para a execução da reconexão com a rede externa, é necessário que seja identificadas as causas que levaram ao ilhamento. se devido a uma ação planejada ou a uma contingência na rede externa. Quando a microrrede se encontra inicialmente em modo ilhado não planejado, a

reconexão deve ser precedida de um tempo mínimo de monitoramento da estabilização da rede externa, logo após seu restabelecimento. Esta ação é necessária para garantir que a rede externa esteja totalmente recuperada da contingência que causou o ilhamento não planejado. Este tempo de monitoramento não deve ser inferior a cinco minutos (IEEE, 2018c).

Após a definição pela reconexão, segue-se as etapas seguintes: ressincronizar, ajustar (combinar a tensão, o ângulo de fase e a frequência dentro dos limites prescritos especificados da rede), definir controladores locais e dispositivos de proteção de forma adequada, reconectar e posteriormente fazer a transição para o modo conectado em estado estacionário (IEEE, 2018c). Desta forma, este procedimento garante a continuidade do fornecimento de energia.

A reconexão deverá ser efetivada somente após a verificação dos desvios de tensão, frequência e de fase entre os lados da chave do PCC, e seguindo critérios estabelecidos pela Norma IEEE Std 1547-2018.

4. CONTROLE E SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA

4.1 Controle da microrrede

Segundo a norma IEEE Std. 2030.7 "*IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers*", o sistema de controle de uma microrrede é constituído por um conjunto de funções que a tornam autogerenciável e capaz de operar de forma ilhada ou conectada à rede da concessionária. Este sistema possui funcionalidades de controle e de gerenciamento de energia em tempo real que devem agir nas seguintes situações:

- Durante os modos de operação ilhado ou conectado à rede da concessionária;
- Nos modos de transição;
- Gerenciamento da energia para otimizar os fluxos de potência ativa e reativa;
- Provisão de serviços auxiliares;
- Suporte de energia à rede;
- Participação no mercado de energia e/ou na operação da concessionária;

Existem diversas configurações possíveis para as microrredes, conforme alguns requisitos, como por exemplo, a localização e as finalidades do sistema. Dessa forma, esses requisitos a serem atendidos, influenciam diretamente a programação do sistema de controle, o qual é constituído de equipamentos de hardware e de software, de forma concentrada ou distribuída, para garantir que a microrrede seja vista pela rede como uma única unidade controlável.

Contudo, é recomendável que as funções deste sistema estejam distribuídas entre os componentes, em vez de centralizadas em um único controlador. O sistema de controle de uma microrrede possui uma estrutura hierárquica composta por três níveis (IEEE, 2018c), são eles:

- Nível 1 (Controle Primário): Abrange as funções executadas pelos equipamentos e ativos da microrredes (fontes, conversores de potência, chaves, cargas, controladores, relés, etc.). De modo, a controlar corrente, frequência e tensão e potência de um *Distributed*

Energy Resources(DER) de forma local; baseando suas ações no *setpoints* determinado por níveis superiores.

- Nível 2 (Controle Secundário): Esse nível é responsável pelo controle primário e atua nas funções principais de despacho e de transição. Engloba aspectos de qualidade de energia, sincronização e troca de energia com rede e/ou outras microrredes. Responsável pela restauração dos níveis de frequência e tensão, desequilíbrio de tensão, compensação harmônica, etc.
- Nível 3 (Controle Terciário): É responsável por funções de nível mais alto, relativas à rede, de modo a ter operação segura e otimizada da mesma, atendendo as demandas e os contratos do mercado de energia. Suas ações são pautadas em operações inteligentes com o sistema de potência como um todo, coletando e processando informações tanto da microrrede em si como do sistema externo para tomar ações apropriadas aos objetivos de mercado.

4.2 EMS em microrredes de missão crítica

O EMS gerencia a interação entre o BESS (*Battery Energy Storage System*), geradores locais até a conexão com a rede da concessionária a partir do PCC. O EMS está inserido nos níveis 2 e 3 do sistema de controle, de modo a ser capaz de proporcionar o controle local e remoto das variáveis de interesse dos componentes principais do sistema, ativar uma estratégia integrada de despacho de unidades de geração/armazenamento, atender requisitos pré-estabelecidos de segurança operativa, monitorar as grandezas elétricas, estado operacional e alarmes de todo o sistema de armazenamento.

De modo geral, as funcionalidades do EMS devem incluir, Cheng et al. (2018):

- Gerenciamento da transição entre estados (*on-grid* e *off-grid*): deve realizar a transição entre estados *on-grid* e *off-grid* de modo suave, resultado em mínimos impactos às cargas da microrrede;
- Black start: deve ser capaz de coordenar a restauração da microrrede mesmo em modo *off-grid*.
- Automação e proteção: deve gerenciar a atuação de dispositivos de proteção a fim de detectar e isolar faltas.
- Controle Q-V: deve controlar a geração de potência reativa para regulação de tensão;
- Controle de frequência: precisa monitorar e controlar a potência ativa das fontes de geração para regulação da frequência.
- Controle de tensão e frequência (Grid-forming);
- Controle do estado de carga das baterias;
- Gerenciamento da operação dos geradores diesel;
- Implementação de estratégias de despacho das fontes para garantir a máxima resiliência e maximizar a segurança operativa;
- Implementação de estratégias de controle de seleção de cargas, visando a maximização da autonomia de fornecimento de energias às cargas críticas da microrrede;
- Prever cenários de segurança que atendam critérios n-1 dos recursos energéticos do sistema:
 - desconexão de um gerador;

- desconexão do BESS
- desconexão do gerador FV

- Implementação de estratégias de reconexão: resincronização de unidades que estavam desligadas ou foram perdidas temporariamente;
- Prever capacidade de comandar de forma programada a abertura/fechamento da chave de conexão da microrrede com a rede da concessionária, possibilitando a operação, intencional, da microrrede nos modos ilhado e conectado;

Na situação de ilhamento não programado, a saída de operação não prevista da rede da concessionária deverá ser suportada pela microrrede, com a abertura imediata da chave de conexão, preferencialmente assumindo o sistema de armazenamento a função de formador de rede, preservando o atendimento às cargas prioritárias ou todas as cargas, dependendo do *State of Charge*(SOC) atual e dos transitórios a mitigar, posteriormente despachando geradores se a situação exigir.

4.3 Black Start

Na ausência da conexão com a rede externa ou perda da geração própria, a microrrede deve ser capaz de iniciar sua própria geração, e de forma sequencial se reenergizar em modo ilhado. Para executar esse processo é necessária uma fonte de partida, que pode ser um banco de baterias ou outra fonte despachável (IEEE, 2018c); esse processo é denominado *black start*.

O processo de *Black start* possui três etapas: restauração das fontes de geração, reconfiguração da rede e restauração da carga; sendo que a etapa de restauração pode ser feita de duas formas. A primeira é a estratégia *top-down*, em que uma fonte de geração com boa capacidade de *black start* é selecionada e restaurada primeiro, de modo a garantir referência de tensão e frequência para acionar as outras fontes. Esta estratégia prioriza a restauração de um trecho principal da rede, e gradualmente expande a restauração de acordo com o balanço de potência ativa (Wang et al., 2018). A segunda consiste na estratégia *bottom-up* em que algumas fontes de geração com boa capacidade de *black start* são restauradas em paralelo e as fontes que não possuem capacidade de *black start* são restauradas em seguida. A restauração é expandida gradualmente, de modo que a rede é energizada a partir da reconexão das áreas restauradas (Liu et al., 2017).

5. CASOS DE MICRORREDES CRÍTICAS

5.1 Microrrede da base Showa do Japão na Antártica

As estações de pesquisa na antártica possuem suas próprias instalações de geração elétrica, funcionando de forma isolada, ou seja, não estão interligadas a qualquer rede. A escassez de combustível e a indisponibilidade de interconexão caracterizam esses sistemas de energia da Antártica como microrredes isoladas de missão crítica (Saner and Spyros, 2018).

Na base Showa do Japão na Antártica, tem-se como fonte principal de energia a geração diesel. Contudo, o custo do transporte de combustível e emissões de dióxido de

carbono é um problema. Nesse contexto, a base migrou para um novo sistema de energia, a microrrede (SBMG), introduzindo fontes renováveis energia (energia solar, energia eólica). A SBMG, é formada por três geradores a diesel, usina fotovoltaica, aerogeradores e células a combustível (SOFC) (Hamanaka and Obara, 2016).

No verão, as fontes renováveis (em especial a fotovoltaica) tem maior protagonismo no sistema, e o gerador a diesel é utilizado para compensar a flutuação de saída e em momentos das falta de fontes intermitentes. O excedente de eletricidade gerado no verão é usado para produzir hidrogênio através de um eletrolisador de água. No período de inverno, as principais fontes de energia utilizadas são os geradores a diesel, a energia eólica e as células a combustível, visto que a radiação solar média é quase zero ao longo do dia (Hamanaka and Obara, 2016). Dessa forma, o sistema consegue atender seu principal requisito, abastecer de forma contínua toda a base.

5.2 Microrrede da Base Militar de Fort Belvoir (EUA)

A microrrede implantada na base do exército do *Fort Belvoir* EUA tem como objetivo reduzir os custos operacionais e sustentar missões críticas, sendo avaliada como uma solução confiável e resiliente para operações militares e como um modelo replicável para outras futuras instalações militares. Devido à vulnerabilidade crescente do fornecimento de energia, a microrrede *Fort Belvoir* teve que incluir a capacidade de se isolar da rede elétrica até por cinco dias e manter-se nesta condição durante os horários de pico de demanda (S&C, 2020).

Além da segurança energética, o projeto procurou uma maneira econômica de implantar a microrrede sem acumular custos de capital. Para fazer isso, os ativos existentes foram incorporados à microrrede em Fort Belvoir (Fairfax County, Virgínia). Esses ativos incluíam três geradores fixos de gás natural (205 kW, 325 kW e 375 kW) e quatro geradores móveis a diesel de 400 kW (S&C, 2020).

Os geradores móveis são utilizados para emergência, permanecendo ociosos durante grande parte do ano. O objetivo de integrar estes ativos móveis foi validar sua aplicabilidade para suportar uma microrrede em cenários pontuais (S&C, 2020).

5.3 ABB Onboard Microgrid

No mar, o sistema de energia de um navio pode ser considerado uma microrrede ilhada. Em razão da presença de cargas dinâmicas, como cargas de propulsão elétrica, e da necessidade de manter os níveis de qualidade de energia (tensão e frequência), esse sistema entram na condição de microrredes críticas (Jayasinghe et al., 2017).

Com a incorporação de tecnologias alternativas de energia, de recuperação de energia e sistemas de armazenamento de energia, o EMS dessas microrredes tem papel fundamental, para a otimização do uso de energia e atender os critérios de confiabilidade e resiliência. A *ABB Onboard Microgrid* é um exemplo de microrrede dessa categoria. O objetivo desse projeto é geração de energia marítima e aplicações de propulsão. O "mix" de geração desse sistema, é composto por geradores a diesel ou gás, armazenamento de energia por baterias (BESS) e Célula a combustível (ABB, 2019).

O EMS da *ABB Onboard Microgrid* é configurado de acordo com sua necessidade, executando ações como: Controle de propulsão; controle do armazenamento de energia; interface gráfica do usuário, interface para os motores, máquinas rotativas, BESS e conexão com a rede (quando está atracada no porto); interface via Modbus TCP para sistema de automação e alarmes (ABB, 2019).

A tecnologia incorporada na *ABB Onboard Microgrid*, permite a reconfiguração do número e tipos de fontes de energia, consumidores e níveis de energia. As fontes alternativas de energia estão se tornando cada vez mais importantes e, conforme os navios envelhecem, a capacidade de atualizar e alterar as fontes de energia será um benefício significativo para os operadores que buscam estender a vida útil de sua frota e, ao mesmo tempo, reduzir custos (ABB, 2019).

6. MICRORREDES CRÍTICAS EM DESENVOLVIMENTO: CLA- μ GRID

Além dos exemplos citados na seção anterior, no Brasil está em desenvolvimento uma microrrede de missão crítica, localizada no município de Alcântara, no Estado do Maranhão, Brasil. Essa microrrede é produto de um projeto intitulado "Microrrede com fontes de energia renováveis para melhorar a resiliência, a confiabilidade e a qualidade da energia no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA - μ Grid)", o qual tem por objetivo projetar, implementar e testar uma microrrede com fonte de energia renovável e sistema de armazenamento, para atender uma área com cargas críticas e estratégicas dentro do Centro de Lançamento Aeroespacial (CLA). A especificidade desta aplicação demanda alto nível de automação, confiabilidade e qualidade de energia.

O CLA se caracteriza dentro da relação de unidades consumidoras altamente críticas por exigir um sistema de alimentação de energia elétrica com alto índice de confiabilidade, resiliência e qualidade de energia. Os requisitos de segurança energética e confiabilidade são especialmente rigorosos em períodos de campanha de lançamento de foguetes, onde medidas extremas, tais como o desligamento da rede comercial para uma operação autônoma, são implementadas.

A microrrede proposta para o CLA é ilustrada na Figura 3 e é composta por uma usina fotovoltaica de 1,25 MWp, um sistema de armazenamento de energia (BESS) de 1MW/1MWh, composto por baterias de íon-lítio, e três geradores a diesel (GMG) de 338 kVA/270 kW cada (operando em modo *prime*). Considerando que a carga pico da microrrede está na ordem de 560 kW, nota-se um significativo sobredimensionamento da capacidade de geração (3,23 vezes, com BESS descarregado e 5 vezes com o BESS totalmente carregado). Esta assimetria é intencional para outorgar à microrrede capacidades para suportar cenários de eventuais falhas (indisponibilidade) de fontes de geração.

7. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma revisão sobre microrredes, com ênfase em microrredes críticas, abordando as

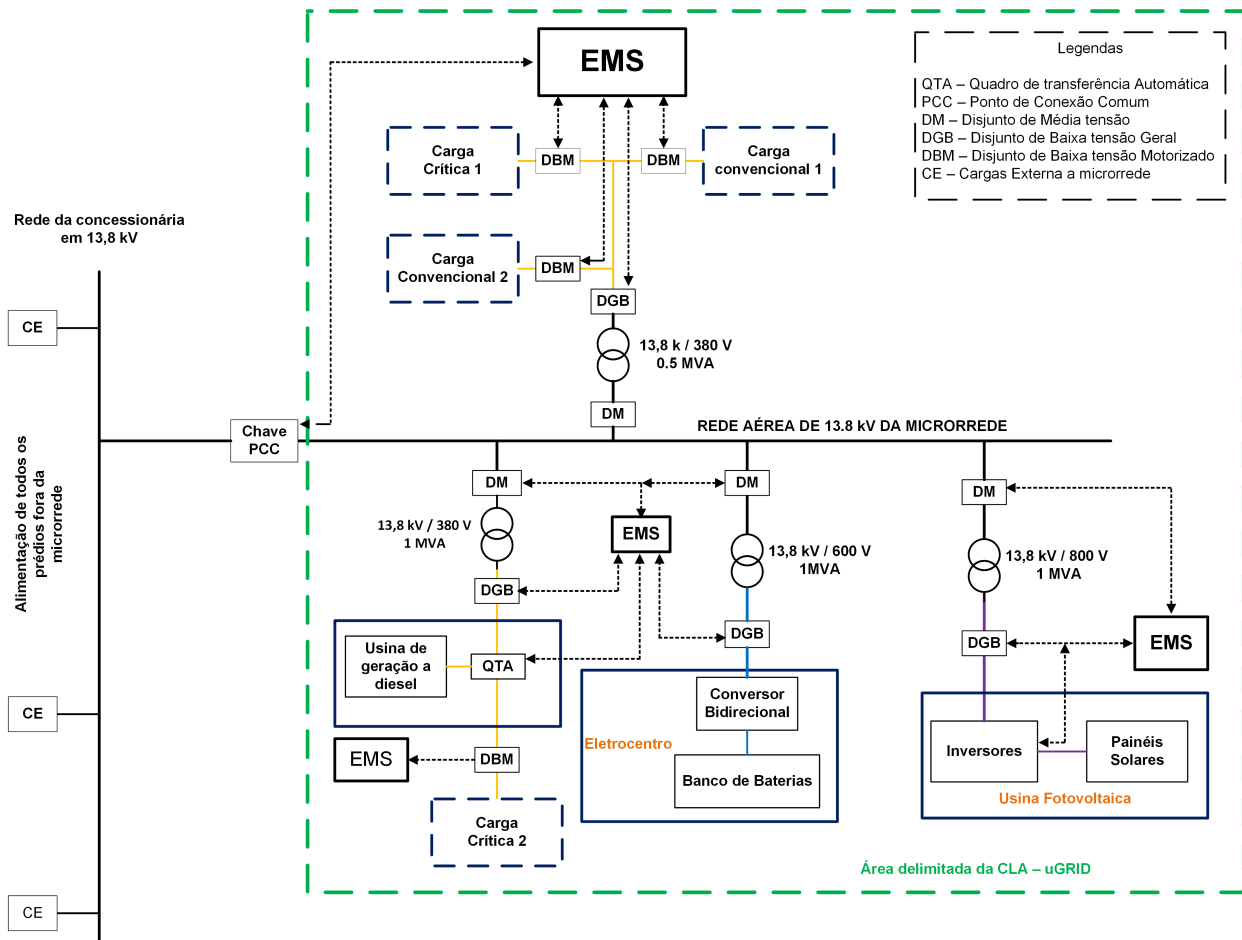


Figura 3. Diagrama simplificado da microrrede CLA-μGrid

características essenciais dessa aplicação, cujo os requisitos principais são resiliência e confiabilidade. As características das microrredes críticas norteiam a programação do sistema de controle e do EMS, com aspectos customizados para o sistema. Nesse contexto, alguns exemplos de sistemas elétricos críticos utilizando a tecnologia de microrredes foram revisados e discutidos, com destaque do projeto em andamento da microrrede crítica do CLA, localizado no nordeste do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte do CNPq, CAPES (código de financiamento 001), Equatorial Energia e ANEEL.

REFERÊNCIAS

ABB (2019). Onboard microgrid overcome your power distribution challenges. 1–4. doi:https://library.e.abb.com/public/d3b1e11e3d424a2dbdb9dca675625c3d/Marine%20Microgrid-20190607a.pdf.

Cheng, Z., Duan, J., and Chow, M.Y. (2018). To centralize or to distribute: That is the question: A comparison of advanced microgrid management systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 12(1), 6–24. doi:10.1109/MIE.2018.2789926.

Hamanaka, R. and Obara, S. (2016). Study on the fuel consumption in the antarctica showa base microgrid. 1599–1603. doi:10.1109/APPEEC.2016.7779761.

Hatzigargyriou, N. (2014). *Microgrids: Architectures and Control*. doi:10.1002/9781118720677.

IEEE (2014). Ieee recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. *IEEE Std 519-2014*, 1–29.

IEEE (2018a). 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)*, 1–138. doi:10.1109/IEEESTD.2018.8332112.

IEEE (2018b). 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)*, 1–138. doi:10.1109/IEEESTD.2018.8332112.

IEEE (2018c). Ieee standard for the specification of microgrid controllers. *IEEE Std 2030.7-2017*, 1–43. doi:10.1109/IEEESTD.2018.8340204.

IEEE (2019). Ieee recommended practice for the planning and design of the microgrid. *IEEE Std 2030.9-2019*, 1–46. doi:10.1109/IEEESTD.2019.8746836.

Jayasinghe, S.G., Meegahapola, L., Fernando, N., Jin, Z., and Guerrero, J.M. (2017). Review of ship microgrids: System architectures, storage technologies and power quality aspects. *Inventions*, 2(1). doi:10.3390/inventions2010004. URL https://www.mdpi.com/2411-5134/2/1/4.

J.G. de Matos, Silva, Felipe S. F. e Ribeiro, L.A.d.S. (2015). Power control in ac isolated microgrids with

- renewable energy sources and energy storage systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 3490–3498. doi:10.1109/TIE.2014.2367463.
- Kakigano, H., Nomura, M., and Ise, T. (2010). Loss evaluation of dc distribution for residential houses compared with ac system. In *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -*, 480–486. doi:10.1109/IPEC.2010.5543501.
- Liu, J., Chen, A., Du, C., and Zhang, C. (2017). An improved method for black start of hybrid microgrids. In *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 9187–9192. doi:10.23919/ChiCC.2017.8028820.
- Oliveira, H.A., de Souza Ribeiro, L.A., de Matos, J.G., Mendez, O.R.S., and de Assunção, M.P.F. (2017). Hybrid dc and ac power distribution network as an alternative solution for isolated microgrids. In *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 1–6. doi:10.1109/COBEP.2017.8257340.
- Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., and Bahramirad, S. (2015). State of the art in research on microgrids: A review. *IEEE Access*, 3, 890–925. doi:10.1109/ACCESS.2015.2443119.
- PRODIST (2021). Prodist. módulo 8 – qualidade da energia elétrica. *ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema elétrico nacional.*
- Rodriguez-Diaz, E., Savaghebi, M., Vasquez, J.C., and Guerrero, J.M. (2015). An overview of low voltage dc distribution systems for residential applications. In *2015 IEEE 5th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)*, 318–322. doi:10.1109/ICCE-Berlin.2015.7391268.
- Saner, C.B. and Spyros, S.K. (2018). Fuel savings in remote antarctic microgrids through energy management. 1–6. doi:10.1109/UPEC.2018.8541935.
- S&C (2020). Mission-critical military base enhances power resiliency with sc’s microgrid control system. *SC ELECTRIC COMPANY*, 1–4.
- Ton, D.T. and Smith, M.A. (2012). The u.s. department of energy’s microgrid initiative. *The Electricity Journal*, 25(8), 84–94. doi:https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619012002254>.
- T.Tim (2020). Mission-critical military base enhances power resiliency with sc’s microgrid control system.
- Wang, D., Mao, C., Lu, J., and Lee, W.J. (2014). Electronic power transformer to secure the power supply of a mission critical microgrid. In *2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, 1–8. doi:10.1109/IAS.2014.6978383.
- Wang, J., Mu, L., Zhang, F., and Zhang, X. (2018). A parallel restoration for black start of microgrids considering characteristics of distributed generations. *Energies*, 11(1). URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/1>.