

## Caracterização e Aplicações de Microrredes de Missão Crítica

Fabrizio P. Moraes \* Hércules A. Oliveira \*  
Clóvis B. Mendonça Oliveira \* José G. de Matos \*  
Osvaldo R. Saavedra \* Luiz Antonio De S. Ribeiro \*  
Alexandre C. Oliveira \*\* Pedro B. L. Neto \*\*\*

\* Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão,  
São Luís, Brasil, [fabrizio.moraes@discente.ufma.br](mailto:fabrizio.moraes@discente.ufma.br);  
[hercules.oliveira@discente.ufma.br](mailto:hercules.oliveira@discente.ufma.br); [o.saavedra@ieee.org](mailto:o.saavedra@ieee.org);  
[clovis.oliveira@ufma.br](mailto:clovis.oliveira@ufma.br); [gomesdematos@ieee.org](mailto:gomesdematos@ieee.org);  
[l.a.desouzaribeiro@ieee.org](mailto:l.a.desouzaribeiro@ieee.org)

\*\* Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal  
de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, [aco@dee.ufcg.edu.br](mailto:aco@dee.ufcg.edu.br)

\*\*\* Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do  
Maranhão, Balsas, Brasil, [pedroblneto@gmail.com](mailto:pedroblneto@gmail.com)

**Abstract** Mission-critical microgrids present themselves as an opportunity to add resilience and reliability to critical processes, characterized by strict requirements for energy continuity, achieving a strategic connotation for different civil and military sectors. In this context, this article reviews the concepts, classifications, modes of operation, and management of a microgrid, emphasizing critical microgrids. The work also includes cases focused on this application, including the conceptual scope of the circuit and management strategies of a microgrid under implementation in a Brazilian aerospace launch center. Based on this experience and on what has been reported from other microgrids already implemented, the main challenges and particularities involved in the installation and operation of microgrids are addressed, especially those related to the aspects of selectivity, coordination, and resilience of the electrical protection system of the microgrid, also observing criteria of economic and energy optimality.

**Resumo:** As microrredes de missão crítica se apresentam como uma oportunidade para agregar resiliência e confiabilidade aos processos críticos, 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. O trabalho também contempla casos voltados para essa aplicação, incluindo o escopo conceitual do circuito e estratégias de gerenciamento de uma microrrede em fase de implementação em um centro de lançamento aeroespacial brasileiro. Com base nessa experiência e no que já vem sendo reportado sobre outras microrredes já implantadas, se abordam os principais desafios e particularidades envolvidos na instalação e operação de microrredes, especialmente aqueles relacionados com os aspectos de seletividade, coordenação e resiliência do sistema de proteção elétrica da microrrede, observando também critérios de otimalidade econômica e energética.

**Keywords:** mission critical microgrid; distributed generation; renewable energy.

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

### 1. INTRODUÇÃO

As microrredes são sistemas elétricos de potência que integram comumente fontes de energia distribuídas ou concentradas, renováveis ou não-renováveis, sistema de armazenamento e cargas, que podem operar em diferentes níveis de tensão, conectadas ou não com a rede de distribuição de energia elétrica, e são capazes de desempenhar diversas funções técnicas, além de atender aos requisitos de confiabilidade, eficiência e redução de emissões (Sirviö et al., 2020).

Neste contexto, as microrredes podem ser classificadas em alguns grupos, como ilustrado na Figura 1. O primeiro grupo dessa classificação, item (a) da Figura 1, refere-se ao

modo de operação de conexão com a rede de distribuição de energia da concessionária. Neste contexto, as microrredes podem estar conectadas à rede principal (*on-grid*) ou no modo desconectado (*off-grid*). A desconexão pode ser motivada de forma planejada, com a finalidade de atender à exigência de confiabilidade e resiliência do sistema; ou de forma não planejada, resultante de contingências na rede externa ou interna (IEEE, 2018a, 2019).

O segundo grupo, item (b) da Figura 1, 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 (Vosoughi kurdkandi and Nouri, 2020); e iii) híbrida, sendo

\* Este trabalho foi financiado pela Equatorial Energia, ANEEL e CNPq.

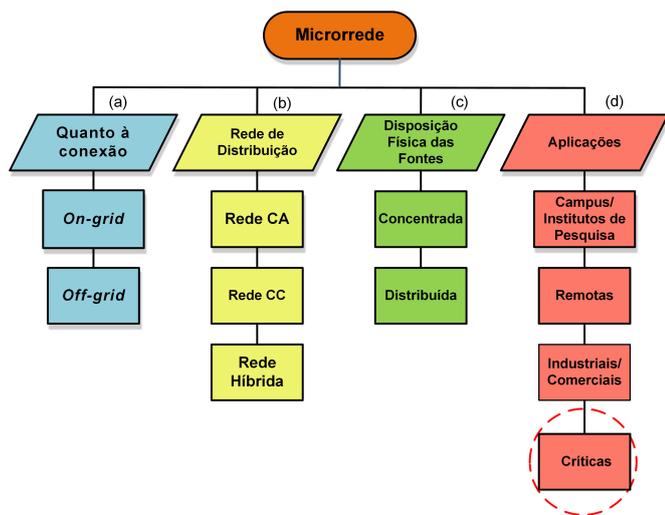


Figura 1. Classificação das microrredes.

a combinação da rede CA com a CC, para atendimento de topologia de microrredes que possuam barramentos CA e CC (Barik et al., 2021).

A disposição física das fontes também é uma forma de classificar os tipos de microrredes, conforme mostrado no item (c) da Figura 1, 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.

Outra forma de diferenciar as microrredes pode ser de acordo com sua aplicação. No item (d) da Figura 1 são mostrados exemplos de aplicações: microrredes em universidades e instituições de pesquisa, microrredes para suprimento de energia à comunidades remotas e/ou isoladas, microrredes comerciais e industriais e microrredes de missão crítica, como aquelas para aplicações em atividades críticas em centros de lançamentos de foguetes, centros cirúrgicos etc.

## 2. MICRORREDES DE MISSÃO CRÍTICA: CARACTERÍSTICAS

Microrrede de missão crítica é um tipo de sistema que não admite interrupção no fornecimento de energia, 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 (S&C, 2020).

As necessidades para microrredes de missão crítica variam de acordo com as exigências impostas em 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.

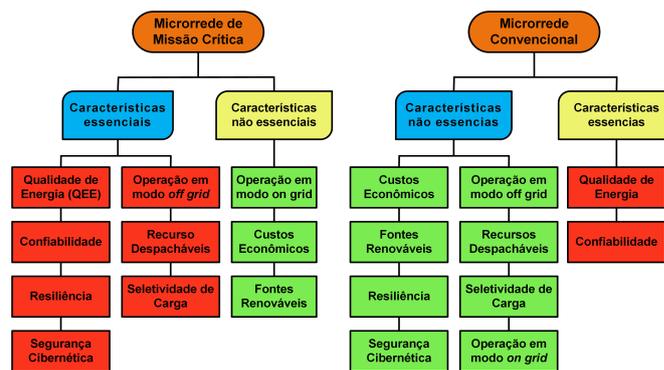


Figura 2. Comparação entre microrrede de missão crítica e microrrede convencional.

A seguir será feita uma breve descrição das características essenciais para uma microrrede de missão crítica, ilustradas 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 transitório: 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, por exemplo, podem ser sensibilizadas, provocando o desligamento de cargas ou mesmo um blecaute (IEEE, 2014).

Segundo a norma IEEE Std. 2030.9 são exigidos os seguintes indicadores de qualidade de energia para microrredes: desvio de frequência/tensão, fator de potência; quedas e elevações de tensão, flutuações e oscilações de tensão, harmônicas, injeção CC, desequilíbrio de tensão, etc (IEEE, 2019).

### 2.2 Operação Off-grid

Em casos de microrredes que podem se conectar com a rede convencional, esta conexão é feita através de uma chave instalada no único ponto de conexão comum entre os dois sistemas, denominado comumente de PCC *Point of Common Coupling*. No modo de operação *off-grid*, a chave do PCC está aberta. 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*. A operação *off-grid* também pode ser determinada de maneira planejada a depender da estratégia de operação da microrrede.

### 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 e N-2). Entre essas fontes despacháveis, as mais aplicadas são geradores baseados em combustíveis fósseis, que podem ou devem garantir o atendimento à carga mesmo durante a indisponibilidade das fontes renováveis. Deve-se destacar que um sistema de armazenamento de capacidade compatível com a carga é também uma unidade despachável, com capacidade de resposta rápida às variações na demanda.

Através de uma combinação ótima entre as fontes despacháveis e renováveis, e coordenadas pelo sistema de gerenciamento da microrrede (*Energy Management System* - EMS), as microrredes podem alcançar níveis elevados de confiabilidade como: menor tempo de reparo, tempo mínimo entre falhas, máxima disponibilidade de fornecimento de energia às cargas, etc.

#### 2.4 Resiliência

A resiliência, no contexto deste trabalho, pode ser definida como a capacidade do sistema de energia elétrica de resistir às contingências na rede de distribuição convencional acessada e eventualmente no próprio sistema da microrrede, 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 do sistema de adaptar-se às alterações de disponibilidade do fornecimento de energia e também se reconfigurar com o propósito de manter a operação do sistema de maneira automatizada. Isso é possível através do gerenciamento otimizado dos recursos energéticos disponíveis (IEEE, 2018b). No modo de operação *off-grid*, 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, geralmente renováveis, ou fornecendo potência para alimentar as cargas.

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 possuírem 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, 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 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 Modos *on-grid* e *off-grid*

Neste modo de operação, a microrrede está interligada a rede principal através da chave 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, do sistema de armazenamento de energia e de condições contratuais com a fornecedora do serviço de distribuição de energia.

Por outro lado, no *off-grid* a microrrede está isolada da rede principal. No caso de microrredes críticas geralmente possuem como objetivo principal a segurança energética e operacional, diferentemente da operação *on-grid* no qual o objetivo principal é econômico.

#### 3.2 Modos de transição

O modo de transição ocorre quando a microrrede está "transitando" entre os modos de operação *on-grid* para *off-grid* e vice versa. Basicamente, os modos de transição são os seguintes:

- **Ilhamento programado**

O ilhamento programado é realizado por meio de decisão e planejamento do operador da microrrede, que configura a transição, geralmente a partir de uma IHM do EMS, para que a microrrede opere em modo *off-grid* (IEEE, 2018a).

- **Ilhamento não programado**

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

#### • Reconexão à Rede Externa

Para a execução da reconexão com a rede externa é necessário que sejam 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 *off-grid* não planejado, a reconexão deve ser precedida de um tempo mínimo de monitoramento da estabilização da rede externa, logo após seu restabelecimento, além de cumprimento de protocolos de segurança para atendimento da NR10. Esta ação é necessária para garantir que a rede externa esteja totalmente recuperada da contingência que causou o ilhamento não planejado e para a segurança de pessoas e equipamentos. Este tempo de monitoramento não deve ser inferior a cinco minutos (IEEE, 2018b).

Após a decisão pela reconexão, as seguintes etapas devem ser observadas: resincronizar as tensões da microrrede com as da rede acessada (ajustar a tensão, o ângulo de fase e a frequência dentro dos limites prescritos especificados da rede), reconectar e, posteriormente, fazer a transição para o modo *on-grid* em estado estacionário (IEEE, 2018b) - (IEEE, 2018a). Desta forma, este procedimento garante a continuidade do fornecimento de energia sem a ocorrência de blackstart.

## 4. CONTROLE E SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA

### 4.1 Controle da microrrede

Segundo a norma IEEE Std. 2030.7, 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 IEEE (2018b):

- durante os modos de operação *off-grid* ou *on-grid* à rede da concessionária;
- nos modos de transição;
- gerenciamento da energia para otimizar os fluxos de potência ativa e reativa;
- provisão de serviços ancilares;
- 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, 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.

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, 2018b), são eles:

- Nível 1 (Controle Primário): abrange as funções executadas pelos equipamentos e ativos da microrre-

des (fontes, conversores de potência, chaves, cargas, controladores, relés, etc.). De modo a controlar corrente, frequência, tensão e potência de um *Distributed Energy Resources* (DER) de forma local, baseando suas ações no *setpoint* 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 externa e/ou outras microrredes. É 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 às 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, comumente, gerencia a interação entre o BESS (*Battery Energy Storage System*), os geradores locais até a conexão com a rede da concessionária a partir da chave do PCC e integra e supervisiona as operações dos dispositivos do sistema de proteção. O EMS está inserido nos níveis 2 e 3 do sistema de controle, e deve ser capaz de proporcionar o controle local e remoto das variáveis de interesse dos componentes principais do sistema, como ativar uma estratégia integrada de despacho de unidades de geração/armazenamento, atender requisitos pré-estabelecidos de segurança operativa, monitorar as grandezas elétricas e os alarmes de todos os componentes da microrrede.

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 de modo suave, resultando em mínimos impactos às cargas da microrrede;
- black start: deve ser capaz de coordenar a restauração da microrrede mesmo após um *blecaute* 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) no modo *off-grid*;
- controle do estado de carga das baterias se existirem;
- gerenciamento da operação dos geradores a diesel se existirem;
- 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;
- 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 PCC, possibilitando a operação intencional da microrrede nos modos *off-grid* e *on-grid*.

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, devendo as cargas serem assumidas pelo conjunto de fontes internas de energia da microrrede. Em sistemas que dispõem de BESS este preferencialmente dever-se-ia assumir a função de formador de rede, preservando o atendimento às cargas prioritárias ou todas as cargas, dependendo do *State of Charge* (SOC) do BESS.

#### 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 *off-grid*. Para executar esse processo é necessária uma fonte de partida, que pode ser um banco de baterias ou outra fonte despachável (IEEE, 2018b).

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. EXEMPLOS DE MICRORREDES DE MISSÃO CRÍTICA

### 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 de pesquisa Showa do Japão na Antártica, tem-se como fonte principal de energia a geração a diesel. Contudo, o custo do transporte de combustível e emissões de dióxido de carbono são um problema. Nesse contexto, a base migrou para um novo sistema de energia, a microrrede (SBMG), introduzindo fontes renováveis de energia (energia solar, energia eólica). A SBMG, é formada por três geradores a diesel, usina fotovoltaica, aerogeradores e células a combustível (SOFC) (Obara et al., 2019).

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 faltas 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 (Obara et al., 2019). 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* 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* (Fairfax County, Virgínia) 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*. 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 a aplicabilidade da microrrede para suportar cenários de contingências (S&C, 2020).

### 5.3 ABB Onboard Microgrid

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 entra na condição de microrredes críticas (Jayasinghe et al., 2017).

Com a incorporação de tecnologias alternativas de energia, recuperação e armazenamento de energia, o EMS dessa microrrede tem papel fundamental para a otimização do uso de energia e atender os critérios de confiabilidade e resiliência. O objetivo é a geração de energia e aplicações de propulsão em navios. 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 e conexão com a rede (quando está atracada no porto) (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. MICRORREDE DE MISSÃO CRÍTICA EM DESENVOLVIMENTO: CLA- $\mu$ GRID

No Brasil está em desenvolvimento uma microrrede de missão crítica, localizada no município de Alcântara, no Estado do Maranhão, cujo objetivo é 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 de Alcântara (CLA).

O CLA se caracteriza dentro da relação de unidades consumidoras altamente críticas por exigir um sistema de fornecimento 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, quando medidas extremas, tais como a desconexão (ilhamento programado) da rede comercial para uma operação autônoma, são implementadas.

A CLA- $\mu$ Grid deverá operar em dois cenários típicos: i) período de campanha e ii) períodos fora de lançamento. Os riscos financeiros são maiores nos cenários de lançamento do que no tempo restante. Isso se deve ao custo relacionado com o desenvolvimento e fabricação dos foguetes e ou satélites. É importante comentar que as campanhas de lançamento do CLA são atualmente atendidas por geradores a diesel isolados da rede da concessionária. Com a implantação da CLA- $\mu$ Grid, mesmo durante as campanhas de lançamentos, as fontes renováveis poderão ser utilizadas para reduzir os impactos econômicos e ambientais, suprindo a maior parte da carga do CLA e reduzindo o consumo de diesel sem comprometer a qualidade da energia, confiabilidade e segurança operacional. Além de aumentar a resiliência e suportar contingências de fontes de geração.

No modo de operação *off-grid*, as estratégias de controle serão associadas às campanhas de lançamento (ilhamento planejado) e aos casos de falhas internas ou externas à microrrede (não planejado). A redundância das fontes de geração é necessária para garantir o fornecimento ininterrupto de energia mesmo em contingências.

## 7. ASPECTOS BÁSICOS DA MICRORREDE CLA- $\mu$ GRID

### 7.1 Escolha da área da microrrede

A área definida para implantação da CLA- $\mu$ Grid dentro do CLA levou em consideração a identificação das cargas de maior criticidade e que estivessem concentradas territorialmente, de modo que facilitasse a delimitação da microrrede a partir do aproveitamento das redes de baixa e média tensão existentes no local. Desta forma, a criticidade das cargas e o mínimo de intervenção possível nas instalações existentes foram preponderantes para a escolha da área de microrrede.

Estes critérios resultaram na incorporação de aproximadamente 80% da carga e circuitos do CLA na microrrede. Embora, tecnicamente, a microrrede pudesse contemplar 100% das instalações do CLA, porém, isto não foi feito devido à indisponibilidade orçamentária.

### 7.2 Topologia da microrrede

As instalações elétricas da microrrede contemplam circuitos em média e baixa tensão, conforme mostrado no diagrama unifilar da Figura 3. Os circuitos de baixa tensão, em 380Y/220 V, atendem às cargas que se encontram distribuídas na microrrede e atendidas por subestações dedicadas.

A rede de média tensão aproveitada para a elaboração da microrrede é radial com dois troncos principais, conforme ilustrado no diagrama unifilar simplificado da Figura 3. Uma alternativa a esta topologia seria distribuir as fontes existentes e adotar uma configuração de rede em média tensão em anel, o que poderia proporcionar incremento em confiabilidade e resiliência. Isto, no entanto, não foi implementado para atendimento do critério de menor intervenção do traçado existente.

### 7.3 Dimensionamento das fontes de energia

Inicialmente, campanhas de medições a partir da instalação de analisadores de qualidade de energia foram realizadas por períodos amostrais para fins de verificação das demandas específicas das cargas distribuídas na microrrede em horários de ponta e fora de ponta, avaliação de indicadores da frequência de ocorrência de contingências e da qualidade da energia disponível. A baixa variação do perfil de carga, observando a sazonalidade no caso concreto, tendo como critério o histórico de faturas, refletiu maior segurança das análises destes dados por amostragem, porém isto é algo que melhor será observado ao longo do comissionamento e acompanhamento da operação da microrrede.

A unidade consumidora está sob a classificação de consumidor de grupo A, horossazonal verde, com demanda contratada igual a 864 kW e o consumo de energia variando entre 250 e 300 MWh por mês. O perfil de demanda somente da área da microrrede, verificado pelas campanhas de medição, em um dia típico útil corresponde a aproximadamente 560 kW entre os horários das 6 horas da manhã e às 18 horas da tarde e de 170 kW fora deste

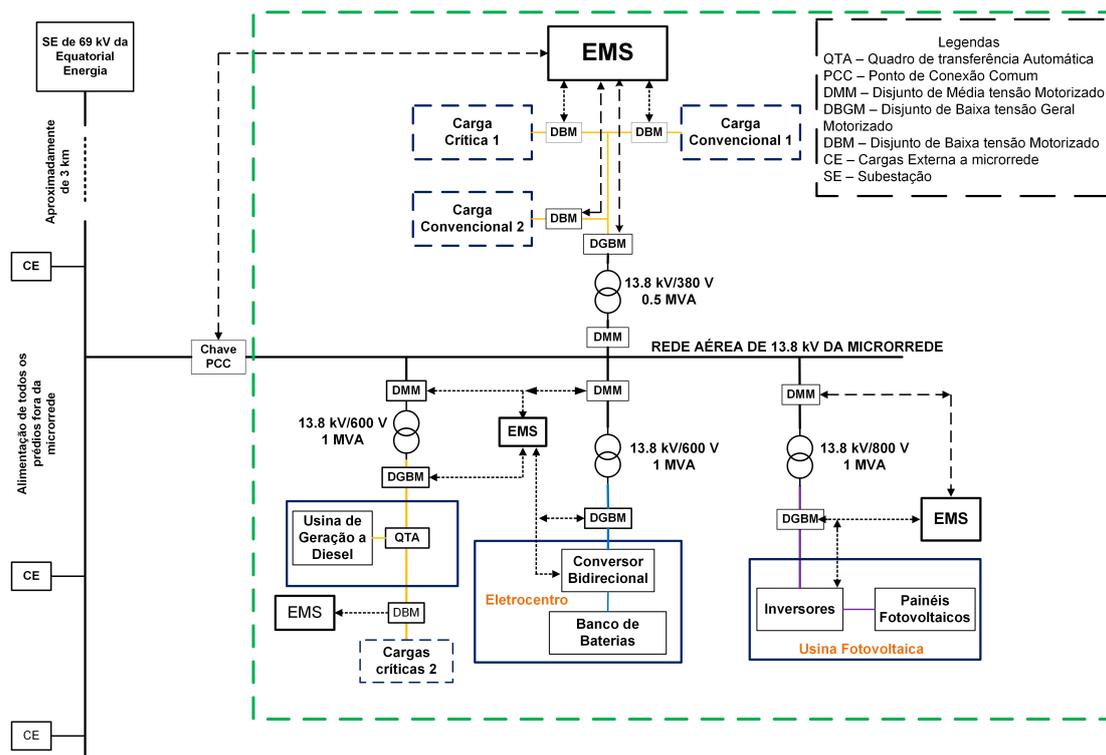


Figura 3. Diagrama simplificado da microrrede CLA- $\mu$ Grid

intervalo. Em um dia típico não útil a demanda permanece em aproximadamente 170 kW durante as 24 horas.

Com base nestas informações e para atendimento do critério (N-1) de fontes, resiliência e continuidade operacional em períodos de campanhas, além de se acrescentar benefícios de redução na fatura de energia e no uso de combustíveis fósseis, a microrrede proposta é composta por uma usina fotovoltaica de 1,25 MWp, um sistema de armazenamento de energia de 1MW/1MWh, composto por baterias de íon-lítio, e três geradores a diesel de 375 kVA/300 kW, em regime *standby*, e 338 kVA/270 kW cada, operando em regime *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 ou indisponibilidade de fontes de geração.

#### 7.4 Proteção Elétrica e Sistema de Gerenciamento da Microrrede

Os critérios de gerenciamento da microrrede devem levar em conta a operação nos modos *on-grid* e *off-grid*, além de atender os requisitos de transição entre eles.

Fundamentalmente, o gerenciamento deve manter o balanço de potência, quando em modo *off-grid*, além de observar os indicadores de qualidade de tensão, de garantia de segurança de pessoas e equipamentos e de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e de melhorar a confiabilidade e a resiliência no atendimento das cargas críticas. Isto se traduz na necessidade de centralizar o controle da

microrrede em um único elemento, EMS, para a supervisão e tomada de decisões, sendo assistido preferencialmente por dispositivos de manobras telecomandadas, como os disjuntores de médias tensão e de alguns disjuntores de baixa tensão, no caso concreto, da microrrede do CLA, além da chave do PCC.

Um ponto particularmente crítico diz respeito à proteção elétrica da microrrede. Soluções convencionais muitas vezes não atendem plenamente aos critérios de proteção exigidas nesta aplicação. Por exemplo, a chave do PCC precisa ter dois grupos de proteção direcionais, sendo um na direção rede-microrrede e outro na direção microrrede-rede. Ainda assim, as coordenações entre os dispositivos de manobra e proteção (disjuntores, entre outros) e as proteções intrínsecas dos conversores eletrônicos de potência podem ser comprometidas em razão dos diferentes tempos de atuação em caso de curtos-circuitos.

No caso específico na microrrede do CLA, por exemplo, no modo *on-grid* a topologia da rede de média tensão possui múltiplos pontos de aterramento, facilitando a operação da proteção para faltas que envolvem a terra, ao ponto das técnicas convencionais poderem ser aplicadas. Por outro lado, no modo *off-grid*, a rede de média tensão ganha a topologia de um sistema de distribuição não aterrado, atribuindo a vantagem de mais resiliência para a microrrede, pois para o caso de uma primeira falta a terra não haveria a necessidade de desenergizar o sistema. Caso não seja prioritária esta característica e o circuito deva ser desenergizado na condição de primeira falta à terra, o projeto do sistema de proteção requer a participação do EMS, recebendo as informações dos sensores e atuadores para comandar a desenergização da microrrede ou reconfigurá-la, isolando as partes não afetadas pela falta, de modo a viabilizar o

atendimento das cargas locais pelas fontes de backup mais próximas.

Além disso, critérios de atendimento normativo do sistema de proteção exigidos pela empresa responsável pela rede de distribuição acessada precisam ser previstos, ainda que não se tenha na maioria das concessionárias de distribuição de energia no Brasil normas específicas voltadas para microrredes, restando o aproveitamento e adequação de normas sobre elaboração de redes de distribuição para aplicações específicas na microrrede.

Por outro lado, a atual disponibilidade tecnológica para a integração de todos estes dados apresenta limitações, sendo dependente de decisões realizadas de maneira individual, autônoma e não colaborativa através dos relés e chaves com microprocessamento.

## 8. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma revisão sobre microrredes, com ênfase em microrredes críticas, abordando as características essenciais dessa aplicação, cujos 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 da microrrede em construção no CLA, localizado no nordeste do Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da Equatorial Energia, ANEEL e CNPq.

## REFERÊNCIAS

- ABB (2019). Onboard microgrid overcome your power distribution challenges. 1–4. doi:<https://library.e.abb.com/public/d3b1e11e3d424a2dbdb9dca675625c3d/Marine%20Microgrid-20190607a.pdf>.
- Barik, A.K., Das, D.C., Latif, A., Hussain, S.M.S., and Ustun, T.S. (2021). Optimal voltage–frequency regulation in distributed sustainable energy-based hybrid microgrids with integrated resource planning. *Energies*, 14(10). doi:10.3390/en14102735. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/10/2735>.
- 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.
- 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/IEEEESTD.2018.8332112.
- IEEE (2018b). Ieee standard for the specification of microgrid controllers. *IEEE Std 2030.7-2017*, 1–43. doi:10.1109/IEEEESTD.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/IEEEESTD.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.
- 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.
- Obara, S., Hamanaka, R., and El-Sayed, A.G. (2019). Design methods for microgrids to address seasonal energy availability – a case study of proposed showa antarctic station retrofits. *Applied Energy*, 236, 711–727. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.031>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918318506>.
- 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). Prodinst. módulo 8 – qualidade da energia elétrica. *ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema elétrico nacional*.
- 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.
- Sirviö, K., Kauhaniemi, K., Ali Memon, A., Laaksonen, H., and Kumpulainen, L. (2020). Functional analysis of the microgrid concept applied to case studies of the sundom smart grid. *Energies*, 13(16). doi:10.3390/en13164223. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/16/4223>.
- Vosoughi kurdkandi, N. and Nouri, T. (2020). Analysis of an efficient interleaved ultra-large gain dc-dc converter for dc microgrid applications. *IET Power Electronics*, 13. doi:10.1049/iet-pel.2019.1138.
- 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>.