

Arquiteturas de microgrids baseadas em fontes híbridas para recarga de veículos elétricos

Leonardo André. Maia * Fabiano. Costa ** José Renes. Pinheiro ***

* Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFBA, Universidade Federal da Bahia, BA, (e-mail: leo_notz@yahoo.com.br).

** Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal da Bahia, BA, (e-mail: fabiano.costa@ufba.br).

*** Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFBA, Universidade Federal da Bahia, BA, (e-mail: jose.renes@ufba.br).

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: jrenes@gepoc.ufsm.br).

Abstract: According to the Brazilian Electric Vehicle Association (ABVE), between January and October 2021, 27,097 electric vehicles (EVs) were sold in Brazil. This is a sales record for this type of vehicle, an increase of 74% compared to 2020. However, the country still lacks infrastructure for charging, either due to lack of regularization or the high prices of EVs practiced in the country. Taking advantage of this scenario, the proposal of the article is to present architectures of *microgrids* based on hybrid sources for recharging EVs. Such arrangements rely on the integration between the electrical grid, energy storage system and renewable energy sources (RES), to recharge EVs and other loads, both in direct current (DC) and alternating current (AC), offering, in addition to environmental benefits from using RES, operational advantages such as improvements in energy quality, reliability and availability.

Resumo: Segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), entre janeiro a outubro de 2021 foram vendidos 27.097 veículos elétricos (VEs) no Brasil. Trata-se de um recorde de vendas desse tipo de veículo, um aumento de 74% em relação à 2020. Entretanto, o país ainda carece de infraestrutura para recarga, seja por falta de regularização, ou pelos altos preços dos VEs praticados no país. Aproveitando deste cenário, a proposta do artigo é apresentar arquiteturas de *microgrids* baseadas em fontes híbridas para a recarga de VEs. Tais arranjos contam com a integração entre rede elétrica, sistema de armazenamento de energia e fontes de energia renováveis (FER), para recarregar VEs e demais cargas, tanto em corrente contínua (DC), quanto corrente alternada (AC), oferecendo, além de benefícios ambientais pela utilização de FER, vantagens operacionais, como melhorias na qualidade, confiabilidade e disponibilidade de energia.

Keywords: Electric vehicles; recharge; microgrids; hybrid sources; renewable energy sources.

Palavras-chaves: Veículos elétricos; recarga; microgrids; fontes híbridas; fontes de energia renováveis.

1. INTRODUÇÃO

A motorização elétrica de veículos é uma estratégia tecnológica crucial para a redução de emissões de gases que contribuem para o efeito estufa, além de ser uma boa alternativa para auxiliar os países a alcançarem metas de diversificação energética (Fouad, 2020).

Em 2010 havia cerca de 17.000 VEs no mundo, sendo que apenas cinco países contavam com mais de 1.000 unidades: China, Japão, Noruega, Reino Unido e Estados Unidos. Em 2019, o número total aumentou para 7,2 milhões de VEs no mundo. Deste montante, nove países contavam com mais de 100.000, sendo a maioria concentrado na China, Europa e Estados Unidos. Ressalte-se que a China tem o maior número de VEs (IEA, 2020).

Com o crescente aumento de VEs, a demanda por infraestrutura para recarga também aumentará. No final de 2019, 7,3 milhões de carregadores de VEs foram instalados em todo o mundo, representando um aumento de 40 % em relação ao ano anterior (IEA, 2020). Estes números mostram a aceitação das pessoas por essa nova tecnologia, que substitui os motores de combustão interna tradicionais por moderno sistema de eletrônica de potência, acionamento de motores e controle.

No Brasil, a popularização do veículo elétrico ainda esbarra no alto preço para a sua aquisição, bem como as faltas de infraestrutura para recarga e regularização. Entretanto, empresas como a Lactec, que é 100% nacional e atua fortemente no mercado de inovação, abrangendo as áreas da ciência, meio ambiente e tecnologia, têm viabilizado o desenvolvimento de um carregador rápido com tecnologia

nacional e 50 kW de potência de carregamento. Com esse tipo de equipamento, torna-se possível a implantação de sistemas de recarga de alta potência, com menor custo, possibilitando o deslocamento dos VEs entre as cidades (Lactec, 2021).

Com o aumento contínuo de VEs, um aspecto motivador de vários estudos é quanto ao impacto que uma grande quantidade de conexões de veículos traria à rede elétrica da Concessionária. Nos momentos de pico de demanda, uma grande quantidade de conexões traria sérias consequências à rede, ameaçando a qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica. Por conseguinte, a coordenação e planejamento do fluxo de potência entre VEs e a rede pública é um problema urgente a ser resolvido (Wang, 2021). Diante de tais condicionantes, a proposta do artigo é apresentar arquiteturas de *microgrids* baseadas em fontes híbridas para a recarga de VEs.

Quanto ao fluxo de potência entre VEs e rede pública, tem-se estudado a implementação da ação *vehicle-to-grid charging* (V2G) em estações de recarga (ERs). A ação V2G possibilita que VEs transfiram energia para a rede elétrica. A ideia consiste em utilizar uma quantidade da bateria do veículo como um *buffer* para a rede elétrica. Sendo assim, os VEs são tratados como componentes de armazenamento de energia para *backup*, e fontes de energia distribuídas, conectadas à rede pública ao mesmo tempo (Wang, 2021).

Com uma estratégia de controle eficiente, pode-se regular o comportamento de carga e descarga das baterias dos VEs, de forma a permitir que estes forneçam energia à rede pública durante os horários de pico de demanda, com as baterias dos veículos sendo carregadas quando a solicitação de demanda da rede for baixa, aliviando assim, o carregamento dos alimentadores (Abraham et al., 2021).

A integração entre fontes renováveis e estações de recarga traz uma série de benefícios, tanto operacionais, quanto ambientais. Logicamente, a expansão de FER reduz a dependência de combustíveis fósseis, resultando em um benefício ambiental. Do ponto de vista operacional, FER distribuídas, juntamente com um sistema de armazenamento, podem ser suficientes para a recarga do veículo no local. Consequentemente, aliviará a rede elétrica, reduzindo as perdas de energia. Ademais, a integração de FER, sistema de armazenamento e veículo elétrico, pode ajudar a reduzir os efeitos que a variabilidade na geração de energia das FER causam à rede, além de reduzir o custo dos sistemas de armazenamento. Pepermans et al. (2005) corrobora com o que foi dito, ao afirmar que a integração entre FER, rede elétrica e ERs, em *smart grids*, possibilita uma alta eficiência de conversão de energia, além da redução de emissões.

Portanto, o estudo de arquiteturas de *microgrids* baseadas em ERs, conectadas à rede, com integrações de FER e sistema de armazenamento, torna-se extremamente relevante diante do atual cenário, bem como nas perspectivas de um futuro próximo.

2. TIPOS DE CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os carregadores de VEs podem ser de dois tipos: *off-board* ou *on-board*. O carregador quando embarcado dentro do

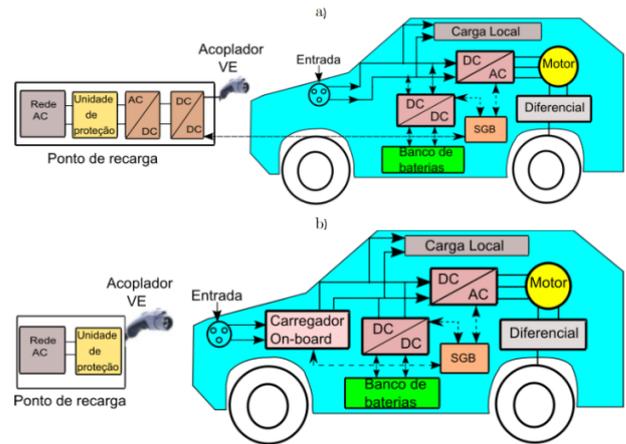


Figura 1. Tipos de carregadores de veículos elétricos: a) carregador *off-board*; b) carregador *on-board*.

veículo elétrico (VE) é dito *on-board*, e quando embarcado fora é dito *off-board* (Rahman et al., 2016a). Os diagramas de blocos com os tipos de carregadores de VEs estão representados na Figura 1.

O carregador *on-board* geralmente é utilizado em aplicações de baixa potência, com os VEs sendo carregados de fontes AC. Já o carregador *off-board* é utilizado para altas potências, com rápida recarga em DC (Kisacikoglu et al., 2015). Carregadores *on-board* não podem oferecer rápida recarga ao VE por causa dos altos custos da eletrônica de potência associados e à necessidade de aumentar a capacidade do carregador do veículo, o que aumentaria consideravelmente o preço deste (Fouad, 2020).

Os principais entraves na utilização do carregador *on-board* são as limitações de potência, que, consequentemente, acabam limitando o tempo de recarga. Carregadores do tipo *off-board* podem oferecer rápida recarga e possibilidade de operação V2G, isto é, transferência de potência do veículo para a rede elétrica.

2.1 Arquiteturas de Estações de Recarga

Quanto à arquitetura das ERs, no que tange à conexão com a rede elétrica, duas formas podem ser consideradas: AC e DC. Na primeira arquitetura, o lado secundário do transformador abaixador é usado como um barramento AC comum, onde cada veículo elétrico é conectado ao barramento por meio de conversores de potência AC/DC independentes. Na segunda arquitetura, um único conversor AC/DC é conectado a um barramento DC comum, que, por sua vez, alimentará cada carga (Jia et al., 2015). As Figuras 2 e 3 ilustram as configurações de ERs com barramentos comuns AC e DC, respectivamente.

Conforme visto na Figura 2, na configuração com barramento AC comum, cada unidade de recarga possui um retificador independente conectado ao barramento, no circuito secundário do transformador. Ademais, com a inclusão de FER, que produzem energia em DC, um novo conversor AC/DC deverá ser acoplado ao barramento. A grande quantidade de níveis AC/DC, além de encarecer a estrutura, pode gerar distorções harmônicas na rede elétrica (Hansen and Hauge, 2017).

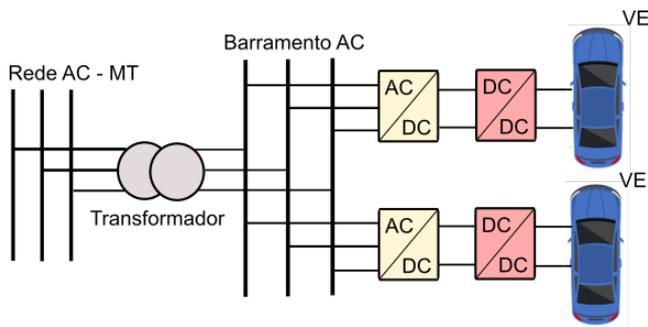


Figura 2. Configuração de estação de recarga com barramento AC comum.

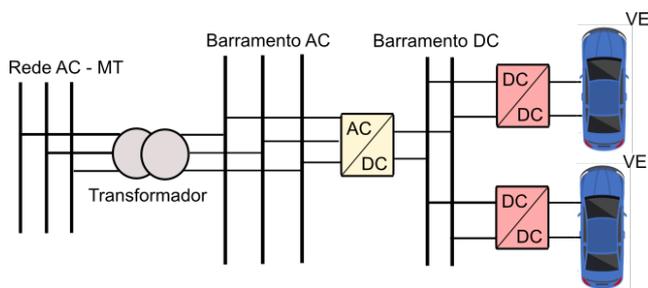


Figura 3. Configuração de estação de recarga com barramento DC comum.

A segunda estrutura supracitada, conforme ilustrada na Figura 3, conta com apenas um único estágio AC/DC, com altos níveis de potência, para a recarga dos VEs. O barramento DC fornece uma flexibilidade operacional maior, com a capacidade de integrar FER e elementos armazenadores de energia, sem a necessidade de novos estágios de conversão, uma vez que muitos destes sistemas produzem energia em DC.

Neste contexto, a estação de recarga baseada em barramento AC possui várias desvantagens que limitam sua eficiência e flexibilidade operacional, dentre as quais, destacam-se (Fouad, 2020):

- (1) Os VEs, células a combustíveis, baterias e sistemas fotovoltaicos são baseados em DC. Portanto, a troca de energia em AC requer mais estágios de conversão de energia, o que reduz a eficiência geral do sistema quando comparada à configuração baseada em barramento DC comum;
- (2) No sistema de recarga AC, as etapas de conversão de energia extra para o carregamento do VE e fonte fotovoltaica, além de encarecer o sistema, aumentam suas complexidade e manutenção, impactando em sua confiabilidade;
- (3) As unidades de recarga de VEs e os painéis fotovoltaicos têm conversores AC/DC independentes, que podem gerar distorções harmônicas indesejáveis;
- (4) A operação V2G requer um carregador bidirecional do VE para possibilitar a carga/descarga. Neste cenário, as baterias dos VEs são geralmente recarregadas da rede e/ou outra fonte, e a energia é reinjetada na rede ou transferida para outro sistema (veículo, sistema de armazenamento). Neste caso, VEs podem operar como uma fonte distribuída controlável conectada à rede. Atualmente, no carregamento baseado em AC,

os carregadores VE bidirecionais são ineficientes e não podem suportar a opção V2G.

Segundo Capasso and Veneri (2015), o sistema DC é benéfico no sentido de que permite reduzir consideravelmente as perdas de energia, além de facilitar a integração de FER, como as usinas fotovoltaicas, uma vez que são utilizados menos conversores de potência. Como essas fontes geram energia em DC, o sistema de recarga alimentado por essas fontes permite o carregamento direto dos VEs do barramento DC. Nesta configuração, o principal desafio é projetar uma única etapa de conversão de energia que permita alta eficiência, alta densidade de energia, fluxo de energia bidirecional e um sistema de controle estável.

3. MICROGRIDS BASEADAS EM FONTES HÍBRIDAS PARA ESTAÇÕES DE RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

A *microgrid*, conforme a LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022, consiste na integração de recursos de geração distribuída, sistema de armazenamento de energia elétrica e cargas em um sistema de distribuição secundário capaz de operar conectado à rede de distribuição de energia elétrica ou de forma isolada, controlando os parâmetros de eletricidade e fornecendo condições para ações de recomposição e de autorrestabelecimento (BOLSONARO, 2022). Conforme visto na seção anterior, a integração entre FER, rede elétrica e ERs em *smart grid*, possibilita uma alta eficiência de conversão de energia, além da redução de emissões.

Quando conectada à rede, a grande penetração de ERs resulta no aumento da demanda requerida. Neste contexto, as FER e os armazenadores de energia desempenham um papel importante na *microgrid*, uma vez que estes, assim como a rede elétrica, servem de suporte, fornecendo potência para as cargas locais e para a recarga dos VEs. Ademais, a depender da finalidade da estação de recarga (ER), os VEs também podem fornecer potência à rede ou a outro VE, por meio das operações V2G e *vehicle-to-vehicle charging* (V2V), respectivamente. Para tanto, devem ser utilizados carregadores bidirecionais.

Portanto, diante da variedade de recursos oferecidos por diferentes estruturas de ERs, somado ao grande aumento de VEs no mundo, é extremamente relevante o estudo das arquiteturas de *microgrids* para ERs.

3.1 Estruturas e Padrões de Recarga de VEs

Destacam-se três métodos de recarga da bateria do VE: carregamento condutor (ou condutivo), carregamento indutivo e técnica de troca de bateria.

O carregamento condutivo, no qual é feito via cabo (*plug-in*), permite a conexão direta entre o carregador e o veículo. Neste caso, há contato físico entre a fonte de alimentação e a bateria. Esses são os carregadores *on-board* e *off-board* vistos na Figura 1. O carregador *on-board* contém retificador e regulação da bateria dentro do veículo, enquanto o carregador *off-board* tem fora (Ahmad et al., 2018).

A transferência de energia indutiva permite o carregamento da bateria usando o campo magnético variável,

sem qualquer conexão galvânica (Lu et al., 2016). Isso simplifica o processo de recarga e reduz o risco de qualquer dano potencial decorrente do manuseio do equipamento elétrico. Esse é o caso de recarga de VEs via sistemas *wireless* (sem fio).

A técnica de troca de bateria, como a expressão sugere, envolve a substituição da bateria esgotada por uma carregada (com sua capacidade plena), para apoiar o acionamento elétrico. Neste contexto, existe uma estação de troca de bateria composta por vários equipamentos, tais como: transformador de distribuição, conversores AC/DC, braços robóticos, sistemas de controle e manutenção, e outros equipamentos envolvidos na troca rápida/automática e carregamento das baterias (Sarker et al., 2013).

Devido ao uso global de VEs, vários padrões de recarga, incluindo diferentes tipos de conectores AC e DC operam com diferentes capacidades de carregamento de energia em todo o mundo. Ademais, existem algumas organizações que estabeleceram padrões de carregamento de VE, tais como: *Society of Automotive Engineers* (SAE), *International Electro-Technical Commission* (IEC) e *CHAdEMO*. Vale a ressalva que a Tesla estabeleceu seus próprios padrões para recarga de VEs (Ahmad et al., 2018).

A norma IEC 61851-1 Ed. 2.0 (IEC, 2010) foi elaborada para fornecer todas as informações relevantes para a construção de uma infraestrutura de recarga. Ela define as classificações dos níveis da tensão de alimentação, modos de carregamento do VE, requisitos específicos para o acoplador do veículo, conector, plugue e tomada. Ela é aplicada tanto para carregadores *on-board* quanto *off-board*, com tensões de alimentação limitadas em 1000 V, em AC, e 1500 V em DC, e para fornecer energia elétrica para quaisquer serviços adicionais no veículo, se necessário, quando conectado à rede de abastecimento.

A IEC 61851-23 Ed. 1.0 (IEC, 2014) foi publicada objetivando padronizar o sistema de recarga DC, especialmente após a comprovação de que este é mais eficiente do que o sistema de carregamento AC. Juntamente com a IEC 61851-1 Ed. 2.0, esta norma fornece os requisitos para recarga em DC, com carregamento condutivo, bem como os requisitos gerais para a comunicação entre uma ER em DC e um VE.

A IEC 62196-2 Ed. 2.0 (IEC, 2016) aplica-se à padronização de alguns acessórios, como: plugues, tomadas, conectores de veículos e acopladores de veículos com pinos e tubos de contato de configurações padronizadas. Estes contam com uma tensão nominal de operação não superior a 480 V AC, frequência de 50 Hz a 60 Hz, e uma corrente nominal não superior a 63 A trifásico ou 70 A monofásico, para uso em carregamento condutivo de VEs.

O padrão SAE J1772 (SAE, 2017) cobre os requisitos gerais físicos, elétricos, funcionais e de desempenho para facilitar o carregamento condutivo de veículos elétricos e híbridos na América do Norte. Ademais, ela define requisitos operacionais e dimensionais para o conector de acoplamento. Segundo Ahmad et al. (2018), o SAE J1772 foi desenvolvido em 2009 para possibilitar o carregamento condutivo e aplicado a VEs e híbridos, incluindo Chevrolet Volt, Nissan Leaf, Ford Focus Electric e Toyota Prius PHEV entre outros.

O padrão SAE J2847-2 (SAE, 2015) estabelece requisitos e especificações para a comunicação entre o VE e o carregador DC *off-board*, para carregamento condutivo, por meio de um acoplador do tipo SAE J1772. Vale a ressalva que tanto o IEC quanto a SAE publicaram vários documentos relacionados à interface VE e rede, aqui apenas foram pontuados alguns.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou em 19 de junho de 2018 a Resolução Normativa nº 819/2018 (ANEEL, 2018), primeira regulamentação sobre a recarga de veículos elétricos por interessados na prestação desse serviço (distribuidoras, postos de combustíveis, shopping centers, empreendedores etc).

A Agência optou por uma regulamentação mínima do tema, objetivando evitar interferências indesejáveis dessas atividades com a operação da rede elétrica. A resolução estabelece critérios para acesso à rede de distribuição e faz algumas observações quanto aos equipamentos a serem utilizados na ER, bem como o seu funcionamento. Na Resolução Normativa ANEEL Nº 1.000, de 7 de dezembro 2021 (ANEEL, 2021) foi inserido um capítulo específico para instalações de recarga de veículos elétricos. Nesta, reforça-se a proibição da operação V2G. No que tange aos padrões de recarga, é mencionado que na unidade consumidora com ER devem ser observadas as normas e os padrões da distribuidora e as normas dos órgãos oficiais competentes, naquilo que for aplicável e não dispuser contrariamente à regulação da ANEEL.

Relativamente à recarga condutiva, normalmente, a ER é uma microgrid nas configurações DC, AC ou híbrida. Neste contexto, as fontes de geração de energia AC e/ou DC são usadas para suprir a ER, enquanto que o carregador, composto por conversores eletrônicos de potência, convertem a energia elétrica de AC para DC ou a energia DC é transformada de um nível para o outro, a fim de fornecer a tensão/potência em um nível adequado para carregar a bateria do VE (Fouad, 2020). Os diferentes níveis máximos de tensão/potência disponíveis para os vários tipos de carregadores de VEs, conforme norma SAE J1772, podem ser classificados conforme Tabela 1.

Tabela 1. Níveis máximos de tensão e potência, conforme norma SAE J1772.

Método	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (kW)
Nível 1 - AC	12	120	1,44
Nível 1 - AC	16	120	1,92
Nível 2 - AC	80	208-240	19,2
Nível 1 - DC	80	50-1000	80
Nível 2 - DC	400	50-1000	400

Ressalta-se que existem outras classificações baseadas em outras normas. Os níveis das ERs são selecionados com base no nível de tensão da rede elétrica local. Essas grandezas elétricas são relevantes no projeto da ER, uma vez que impactarão no custo de recarga, tempo de recarga, equipamentos a serem utilizados e uso da rede elétrica.

3.2 Sistema de Recarga de Veículo Elétrico e Integração de Fontes Renováveis

As diferentes arquiteturas de recarga para VEs podem contar com fontes de energia híbridas (fonte de energia

renovável, sistema de armazenamento e rede elétrica) ou uma fonte de energia dedicada. As fontes híbridas propiciam algumas vantagens operacionais, tais como (Amoroso, 2015):

- Redução do custo de recarga de VEs, por meio de suprimento gratuito gerado por FER;
- Redução de consumo de energia proveniente da rede, resultando em benefícios no que tange à qualidade de energia;
- Garantia de recarga do VE em condições climáticas desfavoráveis, por meio da rede elétrica pública e, em caso de falha desta, a recarga pode ser feita através das FER;
- O sistema de armazenamento estoca o excesso de energia gerada pela FER. Esta energia armazenada pode ser utilizada para auxiliar na recarga dos VEs, alimentar cargas auxiliares conectadas à *microgrid*, ou devolvida à rede.

Dentre as FER disponíveis, a energia solar tem sido a preferível para a recarga de VEs. O módulo fotovoltaico possui uma estrutura simples, tamanho reduzido, o que simplifica seu transporte e instalação. Portanto, pode ser facilmente empregado como uma fonte no local.

Entretanto, a energia fotovoltaica é uma fonte intermitente, sendo fortemente influenciada pela temperatura ambiente e pelos níveis de irradiação locais. Isso significa que a energia gerada é variável ao longo de um dia de operação, podendo alterar-se em curtos intervalos de tempo, o que impacta negativamente o desempenho do sistema de recarga. Para mitigar tais efeitos, utiliza-se o sistema de armazenamento para auxiliar na estabilização do sistema, uma vez que este armazena o excesso de energia gerada durante os períodos mais ensolarados do dia, e a disponibiliza nos períodos de escassez de tal recurso (Novoa and Brouwer, 2018).

4. ARQUITETURAS DE SISTEMAS DE RECARGA BASEADAS EM MICROGRIDS

Uma arquitetura de ER baseada em *microgrid* combina fontes de energia e sistema de armazenamento, podendo operar em modo ilhado ou conectado à rede elétrica. Conforme dito na seção anterior, a geração fotovoltaica é a principal fonte de energia renovável utilizada em ERs, visando fornecer energia para a carga local e VE. Esta seção discute as diferentes arquiteturas de ERs baseadas em *microgrids*, sendo a energia solar a FER presente nas configurações.

4.1 Arquitetura 1: Microgrid Isolada, com Acoplamento DC

Uma *microgrid* isolada com acoplamento DC é alimentada por fontes de energia renováveis e não renováveis, como geradores fotovoltaicos ou de biocombustível, por meio de conversores dedicados (Abraham et al., 2021). Nesta arquitetura, um barramento DC comum é usado para a integração entre fontes de energia, armazenadores e cargas alimentadas em DC, conforme ilustrada na Figura 4. Como o moto-gerador é uma fonte AC, para a sua conexão com o barramento DC é necessária a instalação de um conversor AC/DC. Relativamente aos painéis fotovoltaicos, o

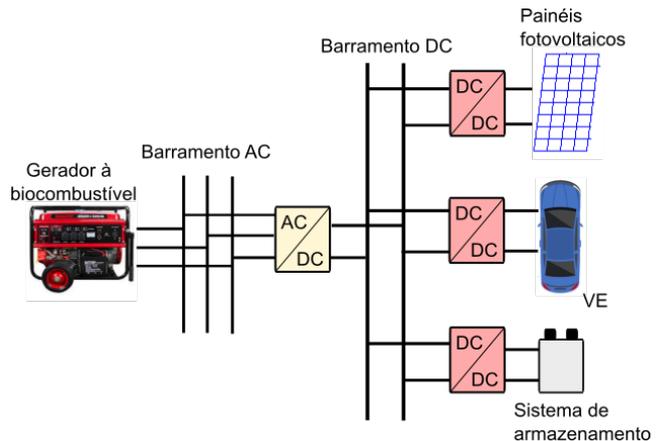


Figura 4. *Microgrid* isolada com acoplamento DC.

conversor DC/DC conta com rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) e o sistema de armazenamento é conectado ao barramento DC por meio de conversor bidirecional DC/DC, que propicia a carga/descarga dos armazenadores (Semenov et al., 2017). O carregador do VE consiste em um conversor DC/DC.

Os moto-geradores a diesel são frequentemente usados como fonte de energia, resultando em desafios ambientais e logísticos. Do ponto de vista ambiental, é sabido que plantas a diesel emitem muitos gases de efeito estufa. Relativamente à logística, o transporte do diesel requer cuidado e planejamento, pois o vazamento via transporte marítimo pode gerar danos irreparáveis ao meio ambiente. Por conseguinte, a inserção de FER tem sido implementadas para combater esses desafios. Contudo, a intermitência oriunda dessas FER, como a solar, pode resultar em problemas de estabilidade.

Em uma *microgrid* DC com integração de fontes de energia, não é necessária sincronização de frequência e fase, como ocorre nos sistemas AC. Neste arranjo, o principal desafio consiste em estabilizar a tensão do barramento DC no valor desejado (Clairand et al., 2020). Estes sistemas tendem a possuir estratégias de controle mais simples e custos mais baixos em relação às demais topologias. As arquiteturas seguintes contam com conexão à rede elétrica.

4.2 Arquitetura 2: Microgrid com Acoplamento AC

Na arquitetura de *microgrid* com acoplamento AC, os painéis fotovoltaicos, o VE e o sistema de armazenamento são conectados ao barramento comum AC com conversores independentes, conforme ilustrado na Figura 5. O sistema de armazenamento é conectado ao barramento AC por meio de um conversor bidirecional AC/DC, que propicia a carga/descarga dos armazenadores (Semenov et al., 2017). O inversor DC/AC dos painéis fotovoltaicos contam com rastreamento do ponto de máxima potência, MPPT, enquanto que os carregadores dos VEs são conversores do tipo AC/DC.

Essa configuração é mais adequada para uso doméstico, devido aos seus padrões e tecnologias bem definidos, o que proporciona maior acessibilidade aos seus produtos no mercado (Falvo et al., 2014). Quanto às FER, como os sistemas fotovoltaicos geram energia em DC, a conversão

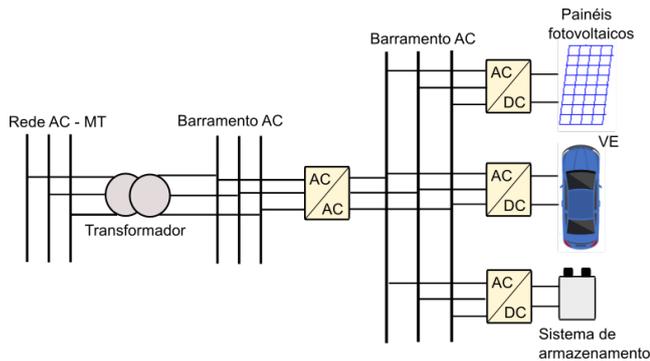


Figura 5. *Microgrid* com acoplamento AC.

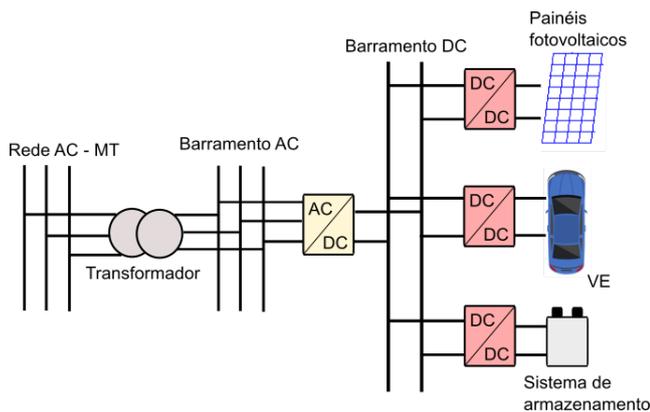


Figura 6. *Microgrid* com acoplamento DC.

de energia devido à sua conexão com um barramento AC acaba aumentando as perdas, tornando o sistema menos eficiente, além de tornar a técnica de controle mais complexa. Ademais, as cargas dominantes na ER também são alimentadas em DC, sendo assim, necessitam de conversores AC/DC independentes. Além de comprometer a eficiência do sistema, essas conversões de potência prejudicam a qualidade da energia, uma vez que contribuem com efeitos harmônicos indesejados na rede elétrica. Por fim, baseado nessas desvantagens, pode-se afirmar que os principais entraves nessa arquitetura estão associados à qualidade de energia e estabilidade de indicadores como tensão no barramento e frequência (Fouad, 2020).

4.3 Arquitetura 3: *Microgrid* com Acoplamento DC

Nesta topologia, todos os componentes do sistema estão conectados a um barramento comum DC, conforme visto na Figura 6. Os painéis estão conectados via conversor DC/DC, para realizar o MPPT, e os armazenadores por meio de um conversor DC/DC bidirecional. O conversor DC/DC dos VEs podem ser unidirecionais ou, caso haja implementação de ação V2G, bidirecionais. Portanto, percebe-se que esta estrutura oferece maior facilidade para a integração de FER, armazenadores e VEs, afinal, por meio do barramento DC comum, é mais fácil usar a potência DC gerada pelos painéis fotovoltaicos para carregar as baterias dos VEs, uma vez que tanto o painel, quanto o VE, não necessitam de estágios de conversão de potência, o mesmo se aplica aos armazenadores de energia.

Por conseguinte, opera-se com alta eficiência, especialmente quando comparada à arquitetura anterior (Mouli

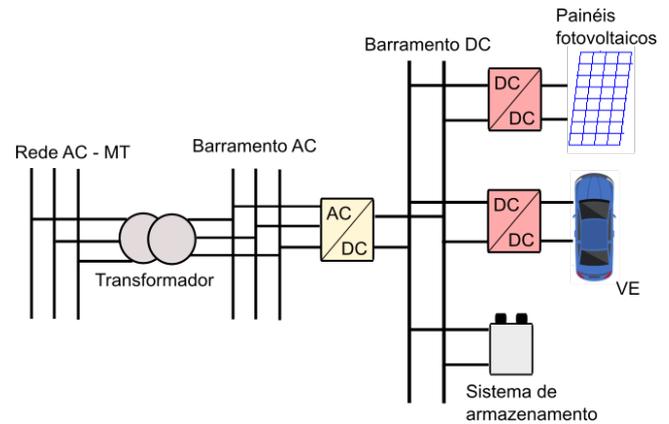


Figura 7. *Microgrid* com acoplamento DC e conexão direta de sistema de armazenamento.

et al., 2015). Ademais, como não há perdas reativas nos sistemas DC, uma capacidade de transmissão de alta potência e menos perdas de energia é alcançada. Todas essas características supracitadas proporcionam altas confiabilidade e densidade de potência. Outra facilidade, se comparada à arquitetura anterior, diz respeito à estratégia de controle, sendo mais fácil implementar uma unidade de controle comum que englobe todas as fontes e cargas DC. Em geral, o desafio do sistema de controle é controlar a tensão do barramento DC de forma que se estabilize no ponto desejado. Nesta topologia não há problemas como controle de potência reativa e frequência do barramento, existentes na configuração anterior.

Esta arquitetura oferece grande flexibilidade operacional, podendo operar em diversos modos, a depender da estratégia de controle proposta. Além da possibilidade de implementar ação V2G, podem ser utilizados carregadores bidirecionais para a operação V2V, na qual a bateria de um VE pode ser utilizada para auxiliar na recarga de outro VE.

Uma desvantagem desta arquitetura é a conversão AC/DC realizada pelo conversor responsável pela integração da rede ao barramento DC, que resulta em mais perdas ao processo. Entretanto, este conversor central que opera ora como inversor, ora como retificador, é indispensável para a implementação de V2G. Outro fator a se considerar é que o aumento da potência nominal deste conversor central pode acarretar danos a rede, especialmente em relação à distorção harmônica geral (Fouad, 2020).

Vale a ressalva que o sistema de armazenamento de energia pode ser conectado diretamente ao barramento DC, conforme ilustrado na Figura 7. Nesta situação é necessário regular a tensão de carregamento. Para controlar o fluxo de potência, é necessária uma comunicação entre o conversor e o inversor, estabelecida por meio de uma estratégia de controle coordenada (Sun et al., 2011).

Segundo Abraham et al. (2021), a *microgrid* com conexões diretas de armazenadores é o tipo mais comum de *microgrid* DC, frequentemente implantado em aplicações industriais. Entretanto, tal arquitetura pode dificultar o controle da tensão no barramento DC, além de poder criar problemas como carregamento desregulado da bateria, o que impossibilita o rápido carregamento/descarregamento

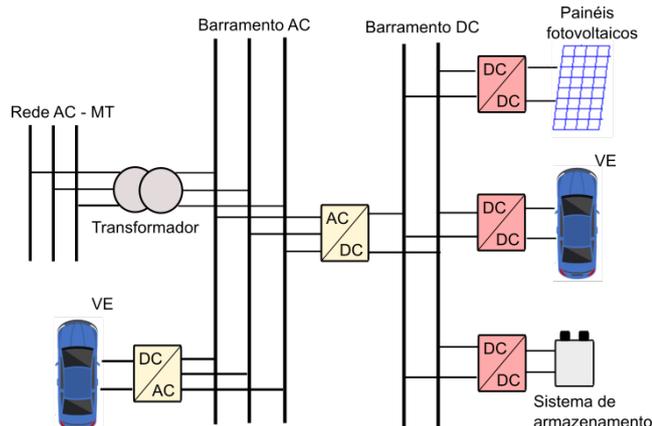


Figura 8. *Microgrid* com acoplamento híbrido AC/DC.

do armazenador, e imperfeições inerentes à medição da tensão do barramento.

4.4 Arquitetura 4: *Microgrid* com Estrutura Híbrida AC/DC

Com o avanço das *smart grids* tornou-se possível uma arquitetura híbrida que possibilita alimentar cargas AC e DC ao mesmo tempo, conforme ilustrado na Figura 8. Neste caso, essa arquitetura oferece as vantagens das *microgrids* AC e DC. Como a FER e o sistema de armazenamento operam em DC, estes são conectados ao barramento DC, via conversores DC/DC. Os VEs podem ser recarregados via barramento AC, sendo necessário conversor AC/DC, ou podem ser recarregados via barramento DC, por meio de conversores DC/DC.

O conversor AC/DC central que conecta os dois barramentos exerce papel preponderante, haja vista que ele deve manter o equilíbrio do fluxo de potência entre os dois lados da *microgrid*. Este conversor pode operar tanto como retificador, quanto como inversor, a depender das necessidades das cargas (Rahman et al., 2016b). Devido a sua estrutura mista, as principais preocupações ao se adotar esse arranjo são com o equilíbrio de potência, a estabilidade do sistema e o controle coordenado de cada componente da *microgrid*.

4.5 Arquitetura 5: *Microgrid* com Conversor Multiportas e Interconexão de Barramento DC

Pode-se utilizar um conversor multiportas em ERs para diferentes tipos de fontes e cargas. Com base nos requisitos, os pontos de conexão são projetados como conversores bidirecionais e/ou unidirecionais, o que propicia conexões de fontes em que o fluxo de potência é unidirecional, como a solar, que só fornece energia para o sistema, bem como de outros componentes nos quais haverá um fluxo bidirecional de potência, como armazenadores de energia e VEs, caso sejam implementadas ações V2G ou V2V (Wang et al., 2018). A Figura 9 apresenta a arquitetura de recarga utilizando conversor multiportas DC/DC para painéis solares, sistema de armazenamento e VEs e conversor DC/AC para a sincronia das grandezas elétricas do sistema com a rede.

Os conversores multiportas são projetados com interconexão DC, facilitando o uso direto de energia DC oriunda

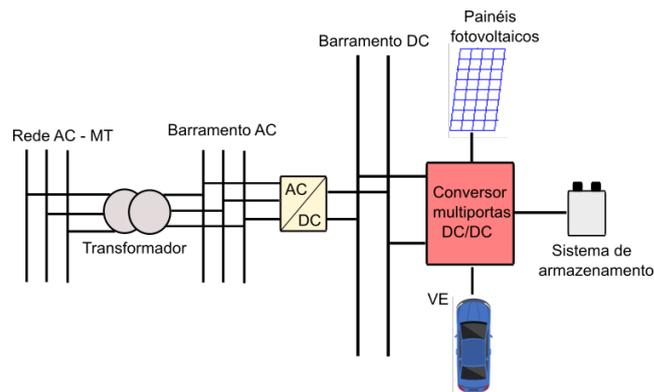


Figura 9. Conversor multiportas em *microgrid* DC.

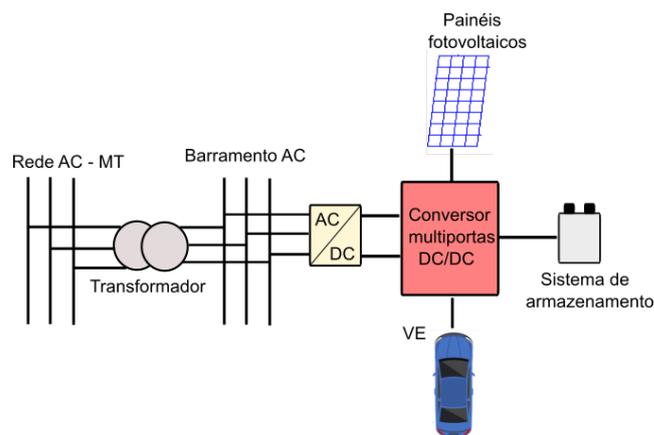


Figura 10. Conversor multiportas em *microgrid* AC.

de fontes DC, para a recarga do VE. Relativamente às desvantagens dessa arquitetura, pode-se citar o estágio de conversão de potência realizado pelo conversor AC/DC, bem como a capacidade limitada de potência dos conversores multiportas (Abraham et al., 2021).

4.6 Arquitetura 6: *Microgrid* com Conversor Multiportas e Interconexão de Barramento AC

A arquitetura representada na Figura 10 utiliza um conversor multiportas conectado a um barramento AC, por meio de um inversor bidirecional. A integração de diferentes fontes e cargas por meio de um conversor multiportas leva a redução da quantidade de componentes e aumento na densidade de potência. Além da capacidade limitada de potência do conversor multiportas, outra desvantagem presente nesta topologia é que quando diferentes conversores multiportas são utilizados, a mesma proporção de conversões AC/DC devem ser feitas.

5. CONCLUSÃO

Este artigo abordou aspectos gerais de arquiteturas de *microgrids* utilizadas como estações de recarga de veículos elétricos. Tal estudo foi motivado pelo cenário atual, que envolve aumento significativo de veículos elétricos no mundo, entretanto, em alguns países, como o Brasil, a falta de infraestrutura para recarga ainda representa um obstáculo para a popularização deste veículo e o aumento do alcance nas vias. Constatou-se o aumento da eficiência,

qualidade, confiabilidade e disponibilidade de energia, a partir da integração de fontes renováveis, rede elétrica, sistema de armazenamento e carregadores de veículos elétricos. Por fim, algumas vantagens e desvantagens de cada arquitetura foram pontuadas, destacando que, quanto menor for a quantidade de conversões AC/DC na *microgrid*, mais eficiente, confiável e menos oneroso será o sistema.

AGRADECIMENTOS

À FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia), pela bolsa na modalidade “Doutorado - Cotas”, e ao suporte financeiro do PPGEE/UFSM - CAPES/PROEX 0600/2021.

REFERÊNCIAS

- Abraham, D.S., Verma, R., Kanagaraj, L., Giri Thulasi Raman, S.R., Rajamanickam, N., Chokkalingam, B., Marimuthu Sekar, K., and Mihet-Popa, L. (2021). Electric vehicles charging stations' architectures, criteria, power converters, and control strategies in microgrids.
- Ahmad, A., Khan, Z.A., Alam, M.S., and Khateeb, S. (2018). A review of the electric vehicle charging techniques, standards, progression and evolution of ev technologies in germany. *Smart Science*, 6(1), 36–53.
- Amoroso, F. (2015). 17 - managing charging of electric vehicles in electricity transmission and distribution networks. In J.L. Bessede (ed.), *Eco-Friendly Innovation in Electricity Transmission and Distribution Networks*, 363–376. Woodhead Publishing, Oxford.
- ANEEL (2018). *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 819, DE 19 DE JUNHO DE 2018*.
- ANEEL (2021). *RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021*.
- BOLSONARO, J.M. (2022). Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Technical report.
- Capasso, C. and Veneri, O. (2015). Experimental study of a dc charging station for full electric and plug in hybrid vehicles. *Applied Energy*, 152, 131–142.
- Clairand, J.M., Álvarez Bel, C., Rodríguez-García, J., and Escrivá-Escrivá, G. (2020). Impact of electric vehicle charging strategy on the long-term planning of an isolated microgrid. *Energies*, 13(13).
- Falvo, M.C., Sbordone, D., Bayram, I.S., and Devetsikiotis, M. (2014). Ev charging stations and modes: International standards. In *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*.
- Fouad, E. (2020). *Charging Station for Electric Vehicles Using Hybrid Sources*. Ph.D. thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- Hansen, M. and Hauge, B. (2017). Scripting, control, and privacy in domestic smart grid technologies: insights from a danish pilot study. *Energy Research Social Science*, 25, 112–123.
- IEA (2020). Global ev outlook 2020. Technical report.
- IEC (2010). *Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements*.
- IEC (2014). *Electric vehicle conductive charging system - Part 23: DC electric vehicle charging station*.
- IEC (2016). *Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories*.
- Jia, L., Zhu, Y., and Wang, Y. (2015). Architecture design for new ac-dc hybrid micro-grid. In *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*.
- Kisacikoglu, M.C., Kesler, M., and Tolbert, L.M. (2015). Single-phase on-board bidirectional pev charger for v2g reactive power operation. *IEEE Transactions on Smart Grid*.
- Lactec (2021). Carros elétricos tiveram recorde de vendas em 2021, tendência deve continuar. Technical report.
- Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D.I., and Han, Z. (2016). Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*.
- Mouli, G.R.C., Bauer, P., and Zeman, M. (2015). Comparison of system architecture and converter topology for a solar powered electric vehicle charging station. In *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*.
- Novoa, L. and Brouwer, J. (2018). Dynamics of an integrated solar photovoltaic and battery storage nanogrid for electric vehicle charging. *Journal of Power Sources*.
- Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., and D'haeseleer, W. (2005). Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 787–798.
- Rahman, I., Vasant, P.M., Singh, B.S.M., Abdullah-Al-Wadud, M., and Adnan, N. (2016a). Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1039–1047.
- Rahman, M.S., Hossain, M.J., Rafi, F.H.M., and Lu, J. (2016b). Ev charging in a commercial hybrid ac/dc microgrid: Configuration, control and impact analysis. In *2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*.
- SAE (2015). *Communication Between Plug-In Vehicles and Off-Board DC Chargers*.
- SAE (2017). *SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler*.
- Sarker, M.R., Pandzic, H., and Ortega-Vazquez, M.A. (2013). Electric vehicle battery swapping station: Business case and optimization model. In *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*.
- Semenov, D., Mirzaeva, G., Townsend, C.D., and Godwin, G.C. (2017). An ac microgrid architecture and control strategy to achieve stability with any type of load. In *2017 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*.
- Sun, K., Zhang, L., Xing, Y., and Guerrero, J.M. (2011). A distributed control strategy based on dc bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Wang, D. (2021). *Microgrid based on photovoltaic energy for charging electric vehicle stations: charging and discharging management strategies in communication with the smart grid*. Ph.D. thesis, Université de Technologie de Compiègne.
- Wang, P., Lu, X., Wang, W., and Xu, D. (2018). Frequency division based coordinated control of three-port converter interfaced hybrid energy storage systems in autonomous dc microgrids. *IEEE Access*.