

CONEXÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS À REDE DE ENERGIA ELÉTRICA PARA RECARGA DE BATERIAS: UMA VISÃO GERAL

Márcio do C. B. P. Rodrigues^{*,‡}, Janaína G. Oliveira^{*}, André A. Ferreira^{*},
Pedro G. Barbosa^{*}, Henrique A. C. Braga^{*}

^{*}Universidade Federal de Juiz de Fora, Núcleo de Automação e Eletrônica de Potência
Juiz de Fora, MG, 36.036-900, Brasil

[‡]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais
Juiz de Fora, MG, 36.080-001, Brasil

e-mails: marcio.carmo@ifsudestemg.edu.br, henrique.braga@ufjf.edu.br

Resumo — Este artigo apresenta uma compilação, de natureza tutorial, de informações relacionadas às atuais formas de conexão de veículos elétricos ao sistema de distribuição de energia elétrica para recarga de baterias. São discutidos conceitos gerais e específicos, abordando as características das baterias atualmente utilizadas em veículos elétricos, formas de recarga, tipos de carregadores e padrões de recarga. Além disso, é apresentado um sistema experimental para avaliação de estratégias de integração de veículos elétricos à rede de energia elétrica que vem sendo desenvolvido pelos autores.

Palavras-Chave — Carregadores de Bateria para Veículos Elétricos, Veículos Elétricos.

GRID CONNECTION OF ELECTRIC VEHICLES FOR BATTERY CHARGING: A SURVEY

Abstract — This paper presents a survey of the current ways for grid connection of electric vehicles, focusing on battery charging technologies. General and specific concepts are addressed. Characteristics of electric vehicle batteries, charge methods, types of battery chargers and charging standards are within the scope of this paper. Furthermore, an experimental setup for the evaluation of different electric vehicle grid integration strategies, which is currently under development, is presented.

Keywords — Electric Vehicles, Electric Vehicle Battery Chargers.

I. INTRODUÇÃO

O atual modelo do setor de transportes, não sustentável e baseado na utilização de combustíveis fósseis como principal fonte de energia, está intimamente ligado a problemas ambientais relacionados ao aquecimento global e às mudanças climáticas, além da degradação da qualidade de vida nos centros urbanos [1], [2]. As emissões de alguns gases de efeito estufa, tais como dióxido de carbono (CO₂), devidas aos veículos de transporte rodoviário (automóveis, ônibus, caminhões, etc.) podem ser maiores que as relacionadas a todo o setor industrial em certas regiões, conforme ilustrado na Figura 1, que traz dados registrados no estado de São

Paulo, Brasil [3]. No caso em questão, tal categoria de veículos é responsável por 81% das emissões de CO₂ do setor de transportes, o que corresponde a cerca de 46% do total das emissões de CO₂ registradas em tal estado da federação. Neste contexto, uma gradativa substituição da atual frota de veículos a motor de combustão interna por veículos elétricos (VEs) pode ser vista como um importante fator para a melhoria das condições ambientais nos centros urbanos, uma vez que possibilita a redução das emissões de poluentes atmosféricos nocivos à saúde humana, além de contribuir para drásticas reduções na dependência mundial em relação ao petróleo e uso mais eficiente das fontes de energia disponíveis [1], [4]–[8]. Cabe ressaltar que a redução das emissões de poluentes atmosféricos deve ser considerada de forma global, desde a geração da energia até a tração do veículo, conceito comumente denominado como “well-to-wheel” ou “source-to-wheel” [7], [9], [10]. No caso da geração de energia elétrica a partir de fontes não renováveis, tais como gás natural e carvão mineral (situação típica de vários países), a efetiva contribuição dos VEs na redução de emissões de gases de efeito estufa, apesar de menor, é ainda significativa. Neste caso, um VE pode proporcionar redução de emissões atmosféricas entre 20 e 55%, quando comparado com um automóvel convencional [10].

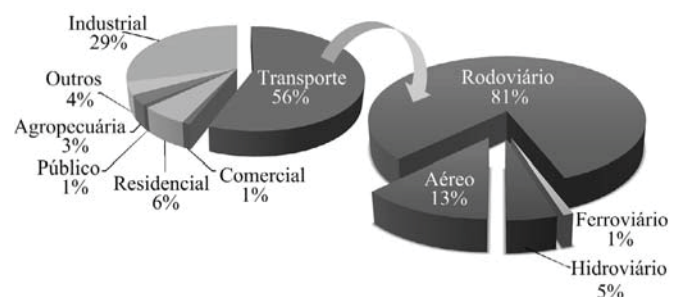


Fig. 1. Contribuição do setor de transporte rodoviário nas emissões de dióxido de carbono no Estado de São Paulo em 2005 (adaptado de [3]).

Um veículo elétrico pode ser definido como aquele cuja potência de propulsão é proporcionada, de forma total ou parcial, por meio do uso de energia elétrica [11], [12]. Dentre os diferentes tipos de VEs existentes, destacam-se os veículos

Artigo submetido em 17/02/2014. Primeira revisão em 16/04/2014, segunda revisão em 27/05/2014. Aceito para publicação em 27/05/2014, por recomendação do Editor Cassiano Rech.

elétricos a bateria (VEB) e os veículos elétricos híbridos conectáveis à rede (tipo *plug-in*, VEHP) pois utilizam a rede de energia elétrica como principal fonte de energia de reabastecimento, o que abre um nicho de oportunidades para o desenvolvimento de pesquisa e tecnologia, particularmente na área de Eletrônica de Potência [13], [14]. A interface entre um VE e a rede elétrica é realizada por meio de um carregador de baterias, que é o dispositivo responsável por retirar energia do sistema elétrico e convenientemente armazená-la no banco de baterias eletroquímicas usualmente embarcado no veículo. A conexão de um VE à rede elétrica traz a possibilidade do uso da estrutura responsável pela recarga do banco de baterias do VE na execução de tarefas adicionais, tais como geração de energia elétrica, compensação de reativos, regulação de tensão e compensação de harmônicos em instalações elétricas, além da operação integrada a fontes de energia renovável de natureza intermitente (tais como fotovoltaica e eólica). Para a execução destas tarefas adicionais é necessário que o carregador de baterias do VE seja bidirecional em corrente, permitindo fluxo de energia entre a rede elétrica e o banco de baterias do VE e vice-versa. Tal tipo de carregador de baterias é algumas vezes denominado “carregador avançado” [13], [15]. É importante observar que os tipos de interação entre a eletrônica embarcada em um VE e a rede elétrica para serviços auxiliares que envolvam armazenamento de energia ou geração de energia elétrica podem comprometer a vida útil das baterias do veículo, uma vez que são submetidas a ciclos de carga e descarga não associados a sua finalidade primária (tração elétrica). Ainda assim, a utilização dos VEs para realização destes serviços auxiliares pode trazer benefícios tanto para a concessionária de energia quanto para os proprietários de VEs (retorno financeiro), particularmente no contexto das redes inteligentes de energia elétrica (*smart grids*) [1], [2], [11], [16]–[19]. No caso do uso dos conversores estáticos embarcados no VE para compensação de reativos e/ou de harmônicos em instalações elétricas não há influência sobre a vida útil do banco de baterias, pois tal tipo de operação é realizada apenas com o conversor de interface entre VE e rede, sem envolver as baterias eletroquímicas [20], [21]. Ressalta-se, também, que a atual geração de veículos elétricos comerciais não apresenta suporte a tais serviços auxiliares, tendo sua conexão à rede limitada à recarga do banco de baterias. Acredita-se que, com a consolidação e evolução da tecnologia veicular elétrica, estes atributos estejam disponíveis nos VEs comerciais vendidos nos Estados Unidos da América, Europa e Japão no intervalo de 10 a 15 anos [22], [23].

Este artigo apresenta uma visão geral, de natureza tutorial, em relação à situação atual da conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica para reabastecimento. São abordadas as formas de recarga de bateria, os tipos de carregadores e padrões de recarga atualmente utilizados em veículos elétricos. Outros trabalhos similares, em geral, abordam apenas um destes padrões. Como diferencial desta revisão, é realizada a descrição de tais padrões, apresentando circuitos de conexão típicos, além das características nominais especificadas aos métodos de recarga e conectores. Além disso, o artigo trata da situação específica relacionada ao Brasil ao abordar os padrões recentemente adotados neste país. Espera-se, com

este artigo, proporcionar aos pesquisadores e profissionais que desejam desenvolver produtos e/ou protótipos de VEs uma boa referência para o início de novos trabalhos, uma vez que estes requisitos influenciam na escolha da topologia e dimensionamento dos conversores estáticos e demais elementos a serem utilizados. Adicionalmente, é apresentado um sistema experimental para avaliação de estratégias de conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica que está sendo desenvolvido pelos autores deste trabalho.

II. RECARGA DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

A recarga do banco de baterias de um VE é um processo que varia com o tipo de bateria utilizado e com a capacidade de disponibilização de energia pela rede elétrica. O tempo e a forma de reabastecimento do VE devem ser compatíveis com o tipo de bateria existente no VE, garantindo a segurança do processo de recarga e evitando que seu banco de baterias tenha sua vida útil reduzida. Diversos tipos de baterias podem ser utilizados em aplicações veiculares. Logo, diferentes requisitos podem ser exigidos do carregador de baterias de um VE. Na Figura 2 é feita uma comparação gráfica entre energia específica e taxa de carga¹ típicas de alguns tipos de baterias utilizados em veículos elétricos.

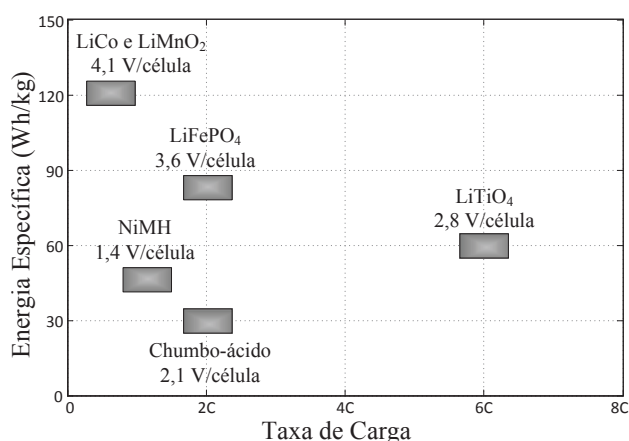


Fig. 2. Diferentes tipos de bateria utilizados em VEs: Energia específica versus taxa de carga (adaptado de [24]).

Os primeiros veículos elétricos da era moderna utilizavam baterias de chumbo ácido, que posteriormente passaram a ser substituídas por baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH). Apesar deste último tipo de bateria ainda ser utilizado em alguns VEs, atualmente observa-se uma tendência no uso de baterias de íons de lítio, o que se deve principalmente pela maior energia específica e maior taxa de carga suportada por tal tipo de bateria, além do fato de não apresentar efeito de memória [24], [25]. As baterias de íons de lítio “formato padrão”, lítio-cobalto (LiCo) e lítio-dióxido de manganês (LiMnO₂, comumente designadas apenas por baterias de

¹A taxa de carga (ou de descarga) de uma bateria é geralmente expressa como “taxa C”. Uma taxa de carga de “1C” significa carga completa de uma bateria em 1 hora. Assim, por exemplo, uma taxa de carga “C/2” indica carga completa realizada em 2 horas, enquanto uma taxa de carga “6C” denota carga completa em 10 minutos (1/6 de hora).

“lítio-manganês”), como as utilizadas em laptops e em telefones celulares, estão entre as baterias que possuem maior energia específica atualmente. Além disso, apresentam os menores custos entre as baterias de íons de lítio, uma vez que são produzidas em larga escala em países da Ásia. Apesar das baterias “formato padrão” já terem sido utilizadas em um carro conceito (BMW - *Mini Cooper*), não apresentam grande aplicação em VEs, pois sua recarga, devido a questões de segurança e preservação de vida útil, deve ser realizada com taxas inferiores a “1C” (desempenho muito pior que o alcançado com baterias de NiMH) [24].

As baterias de fosfato ferroso de lítio (LiFePO₄, usualmente referidas como baterias de “lítio-ferro”) são as mais utilizadas em VEs. Este tipo de bateria é fabricado por diversas empresas no mundo todo e, devido ao seu amplo uso em ferramentas portáteis (tais como furadeiras e lixadeiras), é uma tecnologia com boa credibilidade no mercado de acumuladores de energia [24]. Apesar de apresentarem menor energia específica que as baterias de íons de lítio “formato padrão”, podem ser recarregadas mais rapidamente, aceitando taxas de até “3C”. Outra tecnologia de baterias de íons de lítio é a promissora bateria de lítio-óxido de titânio (LiTiO₄), também designada “nano-lítio-titanato” (nLTO), capaz de suportar recarga em até “6C” sem reduzir de forma significativa sua vida útil, que pode ser superior a 10 mil ciclos de carga [26]. Apesar do alto custo de uma bateria nLTO, que chega a ser quase três vezes maior que o de uma bateria de lítio-ferro [27], encontra-se, na literatura técnica, aplicações deste tipo de bateria em ônibus elétricos híbridos [28], [29]. Além das tecnologias de baterias de lítio citados, outros tipos de baterias vem sendo desenvolvidos, dentre os quais destacam-se as baterias de lítio-enxofre por apresentarem possibilidade de aplicação no armazenamento de energia em veículos elétricos dada a alta energia específica obtida em protótipos de laboratório [30], [31].

Atualmente, a pesquisa de novas tecnologias de baterias é intensiva, buscando o desenvolvimento de baterias capazes de suportar recarga em “10C” [32]. Além disso, tais baterias devem apresentar vida útil estendida, compatível com as necessidades dos VEs comerciais que, hoje em dia, utilizam baterias com garantia de oito anos (ou 100 mil milhas rodadas) fornecida pelos seus fabricantes [33]. Outra questão importante é a disponibilidade limitada dos recursos naturais utilizados na fabricação de baterias, o que traz certa preocupação em relação ao desenvolvimento da tecnologia de veículos elétricos baseada em baterias de lítio. Deste modo, a construção de baterias eletroquímicas com outros elementos, tais como sódio e enxofre (mais abundantes na crosta terrestre que o lítio), vem sendo investigada. Baterias baseadas em sódio têm uma alta densidade de energia, ciclo de vida longo e podem operar em ambientes agressivos. As baterias de sódio são três vezes mais leves do que as baterias de chumbo e são mais adequadas do que as baterias de lítio para países de clima tropical, como o Brasil, devido a maior faixa de temperatura de operação [34]. As baterias de sal fundido recarregáveis, como a bateria ZEBRA (utilizada no Palio Elétrico - Itaipu/KWO/Fiat), e de iodeto metálico de sódio (utilizada em veículo de mineração, fabricada pela *General Electric*), além das baterias de sódio-enxofre e de íons de

sódio, são tipos de baterias com promissora aplicação em veículos elétricos [35]–[38].

Independente do tipo de bateria eletroquímica considerado, para garantir uma recarga segura e que sua vida útil seja preservada é necessário que corrente e tensão sejam convenientemente controladas em suas células durante os processos de carga e descarga. O perfil de recarga típico de uma célula de bateria de lítio-ferro é apresentado na Figura 3 [39], em que pode ser observada a divisão da recarga em duas etapas: uma etapa de corrente constante, com duração de cerca de 75% do tempo de recarga, e uma etapa de tensão constante, complementando a recarga. Além disso, a tensão das células da bateria deve ser monitorada durante todo o processo de recarga, de modo que não exceda o valor máximo recomendado pelo fabricante, o que causaria sérios danos ao produto. Este monitoramento de tensão, bem como o da temperatura e da corrente nas células de uma bateria e o controle do carregador de baterias, é realizado por um BMS (do inglês *battery management system*) [40], [41], que é fundamental para a operação segura de sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias de íons de lítio [42]–[44]. Além disso, para tal tipo de bateria, também é importante a existência de circuitos auxiliares de equalização de carga entre as células da bateria de modo a garantir ótima operação do sistema de armazenamento de energia [45], [46]. Para veículos elétricos, esta equalização de carga deve ser realizada após a etapa de recarga em corrente constante (equalização pelo topo - “*top balancing*”) [41].

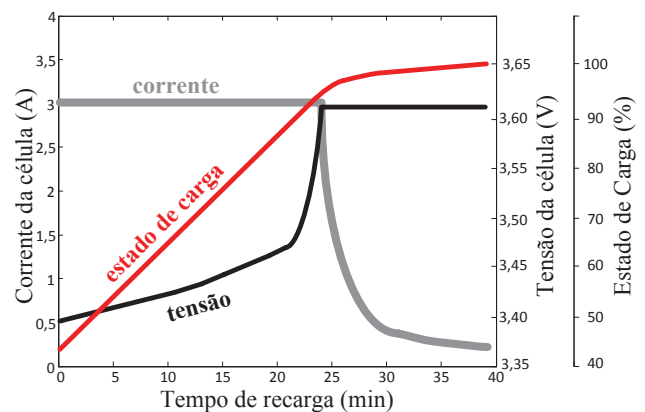


Fig. 3. Perfil de recarga de uma bateria de lítio-ferro (adaptado de [39]).

O tempo de recarga do banco de baterias de um VE é dependente não só da taxa de carga suportada pelo tipo de bateria utilizado, mas também da capacidade e do estado de carga do banco de baterias, além da potência disponível nos alimentadores da rede que fornece energia ao VE. Há diversas classificações do tipo de recarga quanto à sua duração, entretanto, de forma geral, pode-se classificar a recarga de um VE como “carga lenta” ou “carga rápida” [16], [24], [32], [33], [47], [48]. Muitas vezes a carga lenta é designada por “recarga em Nível 1” e/ou “recarga em Nível 2”, enquanto a carga rápida é citada como “recarga em Nível 3”, referenciando aos métodos de recarga definidos nas primeiras versões da prática recomendada SAE J1772 [49].

A carga lenta (ou carga normal) pode ser definida como a recarga completa do banco de baterias de um VE cujo tempo de duração é superior a 6 horas² [24], [48]. Este tipo de recarga é geralmente associado à recarga noturna (residencial) e à recarga de oportunidade de um VE (durante o período de estacionamento do veículo em pontos de recarga disponíveis no local de trabalho do proprietário do automóvel ou em um *shopping center*, por exemplo). A carga lenta é geralmente realizada com a conexão do VE à rede elétrica, com alimentação em corrente alternada (monofásica ou bifásica) e potência aparente entre 1 kVA e 6,6 kVA [16], [24], [48]. Como exemplo, pode ser citada a carga lenta de um VE como o *Nissan Leaf* que, com o uso de um carregador de baterias de 3,3 kVA alimentado em 240 V, tem seu banco de baterias, cuja capacidade de armazenamento é de 24 kWh [50], totalmente recarregado em cerca de 7 horas.

Apesar de haver autores que classificam como carga rápida “qualquer esquema de recarga que não se enquadre como carga lenta” [24], pode-se definir carga rápida como a recarga completa do banco de baterias de um VE com duração igual ou inferior a 20 minutos [17]. A “*California Air Resources Board*” em seu programa “*Zero Emissions Vehicle*”, que obriga drásticas reduções de emissões atmosféricas no estado da Califórnia (EUA), define carga rápida como uma recarga de 10 minutos capaz de garantir que o VE trafegue 100 milhas (160,9 km) [24]. De forma geral, a carga rápida é realizada com a conexão do VE a uma alimentação em corrente contínua, com energia fornecida por rede trifásica por meio de retificadores, com potência na faixa de 50 kW a 400 kW [16], [24], [48]. A carga rápida é geralmente associada às estações (ou postos) de recarga, similares aos postos de gasolina [17], [51]–[53]. Para efetuar a carga rápida de um VE como o *Nissan Leaf*, com recarga completa em 15 minutos, seria necessário fornecer ao carregador uma potência de 96 kW (sem levar em consideração as perdas envolvidas). A despeito da energia fornecida pela rede elétrica ser relativamente pequena (no caso, 24 kWh), a potência demandada pode ser significativa, particularmente se houver vários veículos sendo recarregados simultaneamente. Deste modo, se tal tipo de recarga não for devidamente gerenciado, poderá haver considerável aumento de carga no sistema elétrico, trazendo problemas ao sistema de energia elétrica como aumento de perdas e degradação de seus componentes [16], [17], [48]. Outra preocupação em relação à carga rápida é que seu uso recorrente pode reduzir significativamente a vida útil das baterias de íons de lítio atualmente utilizadas em VEs disponíveis para comercialização [33], [54].

Uma forma alternativa para rápido reabastecimento da energia armazenada a bordo de um VE é a troca de seu banco de baterias. Este tipo de procedimento foi inicialmente proposto pela empresa israelense *Better Place* (que teve sua falência decretada em meados de 2013 [55]) e vem sendo adotado pelo fabricante de veículos elétricos norte-americano *Tesla Motors* [56]. Neste caso, em pouco mais de um minuto é possível efetuar a troca do banco de baterias sem carga por outro totalmente carregado, o que é feito de forma

²Tipicamente, com duração entre 6 e 8 horas. Cabe ressaltar que há, na literatura técnica, esquemas classificados como carga lenta com duração inferior a 6 horas.

automatizada.

Estudos realizados pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) sugerem que a maior parte dos VEs serão recarregados em residências durante a noite [57]. Isto faz da carga lenta a forma primária de recarga de baterias de veículos elétricos [16], [24], [33], [58]. A infraestrutura de recarga é um dos pontos fundamentais para a popularização dos veículos elétricos e deve ser capaz de se comparar à conveniência e interoperabilidade oferecida pela atual estrutura de reabastecimento de veículos a motor de combustão interna [10], [54]. De fato, a disponibilização de pontos de recarga contribui para a melhoria da autonomia dos veículos elétricos de forma mais econômica e efetiva que o incremento na capacidade de armazenamento do banco de baterias de um VE [33]. Além das residências, pontos de recarga devem estar disponíveis em locais públicos e privados (estacionamentos), possibilitando que o banco de baterias possa ser recarregado sempre que o VE estiver estacionado, de modo que sempre haja energia armazenada suficiente para vencer o próximo trajeto a ser cumprido e reduzindo, assim, a necessidade de realização de carga rápida. Entretanto, há a necessidade da disponibilização de estações de recarga (carga rápida) que, apesar de não tornarem os veículos elétricos automóveis de autonomia estendida [33], são uma boa opção para lidar com o fenômeno psicológico conhecido como “*range anxiety*” [16], [17], [24], [33], que pode ser entendido como o receio do motorista ter seu VE parado por falta de energia elétrica. Um caso emblemático que ilustra este fenômeno é o ocorrido no Japão, em função da adoção de veículos elétricos na frota da companhia de energia elétrica de Tóquio (TEPCO, *Tokyo Electric Power Company*), muito bem descrito em [24], [59], [60], que permite concluir que a simples presença de uma melhor infraestrutura de recarga, particularmente de carga rápida, dá suporte para que o motorista utilize de forma melhor e mais eficiente os recursos disponíveis (baterias) em seu veículo elétrico [59].

A. Carregadores de Baterias para Veículos Elétricos

Há várias possibilidades para a caracterização dos carregadores de baterias para VEs, mas, de forma geral, pode-se classificá-los como “embarcados” (ou “*on-board*”, localizados a bordo do veículo) e “externos” (ou “*off-board*”, localizados fora do veículo) [16]. Carregadores embarcados são associados à recarga noturna ou de oportunidade, enquanto os do tipo externo são relacionados às estações de recarga rápida [51]. Uma vez que um carregador do tipo embarcado é sempre levado a bordo do VE, peso e volume são atributos que devem ser minimizados, o que restringe a aplicação deste tipo de carregador em potências elevadas [16], [51]. Os carregadores embarcados podem ser implementados com a inclusão de circuitos dedicados ao controle de carga das baterias a bordo do VE [61] (situação típica dos modelos atualmente disponíveis no mercado [62], [63]) ou integrados aos conversores estáticos que compõem seu sistema de propulsão [15], [51], [64]–[66]. O isolamento galvânico, que é uma característica importante de um carregador de baterias por razões de segurança do usuário, muitas vezes não é implementado em carregadores

embarcados devido ao seu impacto no custo do sistema [51]. Tanto os carregadores embarcados quanto os externos podem permitir fluxo de potência bidirecional entre a rede elétrica e o banco de baterias do VE, ou seja, podem operar como carregadores avançados. Os circuitos eletrônicos utilizados nos carregadores de baterias para VEs são tipicamente compostos por um conversor CA-CC, conectado à rede por meio de um filtro de eliminação de harmônicos de comutação e um conversor CC-CC, conforme ilustrado na Figura 4 [61]. Em geral, carregadores embarcados utilizam alimentação monofásica ou bifásica (Figura 4(a)) e carregadores externos são alimentados por tensões trifásicas (Figura 4(b)). No caso de carregadores avançados, ambos os conversores estáticos (CA-CC e CC-CC) devem ser bidirecionais em corrente. Entre as diversas topologias propostas na literatura para a realização do módulo de conversão CA-CC destacam-se os conversores bidirecionais tipo fonte de tensão mostrados na Figura 5 [16], [61]. Considerando-se a realização de um carregador unidirecional, os interruptores estáticos destes conversores podem ser substituídos por diodos, resultando em uma estrutura de custo reduzido [2]. Entretanto, de qualquer forma, é interessante que o carregador consuma corrente praticamente senoidal da rede elétrica, operando em conformidade com os limites de distorção harmônica definidos em padrões internacionais como, por exemplo, o IEEE 519 [67]. Além disso, é desejável a possibilidade de variação do ângulo de fase entre tensão e corrente de entrada do carregador a fim de proporcionar controle da potência reativa consumida pelo sistema de recarga de baterias [16]. Outra possibilidade, esta associada aos carregadores avançados, é o uso do conversor estático (CA-CC) existente para realizar a compensação de harmônicos de corrente em instalações elétricas, adicionalmente à compensação de potência reativa [68]. Neste caso, a corrente CA consumida para a recarga do banco de baterias do VE transportaria não só a energia a ser armazenada, mas também o conteúdo harmônico e reativo que permitisse a compensação da instalação elétrica à qual o VE estiver conectado para sua recarga. Assim, esta instalação elétrica, como um todo, se comportaria como uma carga linear e de fator de potência próximo da unidade.

Já em relação ao módulo de conversão CC-CC, uma opção interessante, se desejado fluxo bidirecional de potência, é o conversor CC-CC *buck/boost* bidirecional (conversor CC-CC meia-ponte ou *half-bridge*), cujo circuito é apresentado na Figura 6, dada sua estrutura simples, de alta eficiência, baixo custo e alta confiabilidade [69].

Outras topologias de conversores CA-CC e CC-CC aplicadas a carregadores de baterias de VEs, não apresentadas neste artigo, são encontradas na literatura técnica. As seguintes referências são sugeridas pelos autores como fonte de consulta: [15], [51], [61], [69].

As considerações descritas nos parágrafos anteriores se referem a carregadores condutivos, nos quais o fluxo de energia elétrica é realizado por meio do contato elétrico entre o conector existente no veículo e os terminais do plugue do cabo de conexão à rede elétrica (carregador embarcado) ou ou carregador de baterias (carregador externo) [16], [51]. A grande desvantagem do uso de recarga condutiva é o fato da necessidade do motorista efetuar a conexão do cabo ao

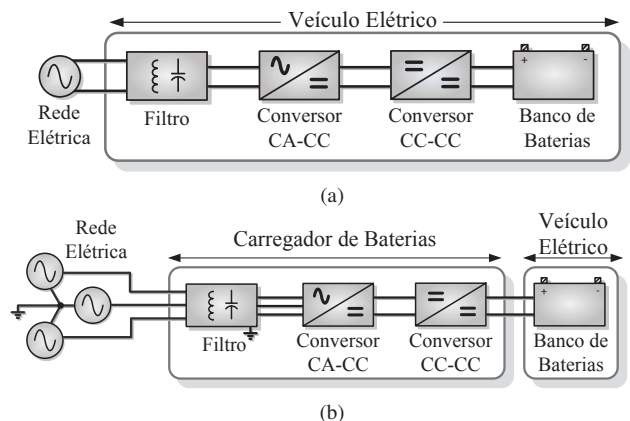


Fig. 4. Carregadores de baterias para VEs - diagrama de blocos (circuitos típicos): (a) carregador embarcado; (b) carregador externo.

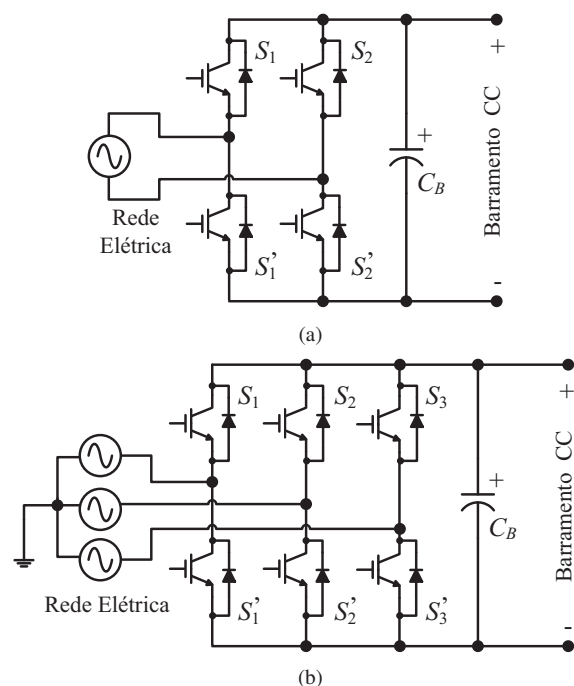


Fig. 5. Topologias de circuitos para o conversor CA-CC de carregadores avançados de baterias para VEs: (a) Monofásico em ponte completa (carregador embarcado); (b) trifásico (carregador externo).

conector existente no VE, o que faz com que seja preciso levar em consideração uma série de questões relacionadas à segurança do sistema e do usuário, geralmente tratadas com o uso de dispositivos de manobra, de proteção contra sobrecarga e de proteção diferencial-residual nos circuitos associados à recarga das baterias de um VE [70], [71]. Há, também, os carregadores indutivos, nos quais o fluxo de potência entre a rede elétrica e o banco de baterias do VE é realizado magneticamente [51], [72], [73]. Este tipo de carregador tipicamente opera em carga lenta [16], sendo que há a possibilidade da recarga indutiva ser realizada com o VE estacionado [74]–[77] ou em movimento (carregador dinâmico) [78]–[81]. Entre as principais vantagens do uso da recarga indutiva cita-se a segurança do usuário (não necessita de conectores elétricos) e flexibilidade do sistema de recarga [80] e, como desvantagens, a complexidade de

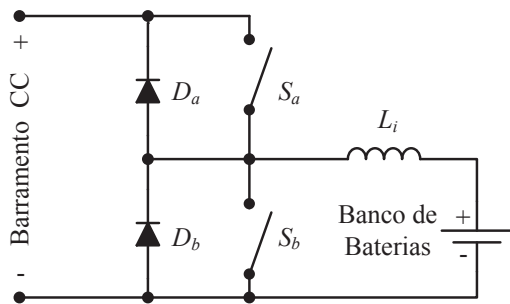


Fig. 6. Módulo de conversão CC-CC típico para carregadores avançados de baterias para VEs (conversor *buck/boost* bidirecional).

fabricação, volume e custo [16], além dos possíveis riscos à saúde humana, em longo prazo, devido à exposição a fortes campos magnéticos [72]. Apesar da aplicação de recarga indutiva em alguns VEs comerciais da década de 1990, atualmente a recarga condutiva é o tipo de recarga utilizado em praticamente todos os modelos disponíveis no mercado [16], [24], [50].

Finalizando a discussão desta seção, é apresentado na Figura 7, um diagrama representando uma possível forma de classificação dos carregadores de baterias para veículos elétricos que resume os conceitos abordados.

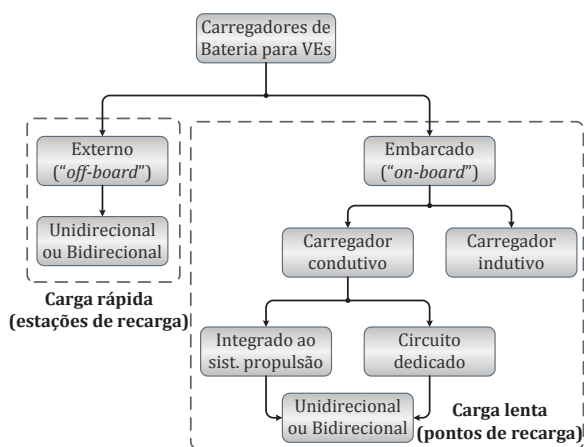


Fig. 7. Classificação dos carregadores de baterias atualmente utilizados em veículos elétricos.

B. Padrões de Recarga de Baterias de Veículos Elétricos

A padronização dos processos e conectores utilizados na recarga de baterias de VEs é importante para a popularização e consolidação da tecnologia veicular elétrica no mercado automobilístico. Assim como ocorre no caso dos veículos a motor de combustão interna, que podem ser reabastecidos em qualquer lugar, pois o bico da bomba de combustível é compatível com o bocal do tanque de todo tipo de automóvel, espera-se que haja o estabelecimento de padrões internacionais únicos, ou ao menos compatíveis entre si, também para os veículos elétricos. Atualmente, há três padrões

importantes de conectores e formas de recarga condutiva que vem sendo internacionalmente estabelecidos e utilizados por montadoras de automóveis [82]. Nos Estados Unidos da América, o padrão utilizado é definido pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), sob o nome J1772 [70]. Na Europa, há os padrões IEC (*International Electrotechnic Commission*) 61851 [83] e 62196 [84], recentemente adotados no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) [71], [85]. Já no Japão, vem sendo utilizado o padrão comumente denominado por CHAdeMO [86]. Os padrões SAE J1772 e CHAdeMO não são compatíveis entre si. Já o padrão IEC 61851, mais abrangente, apresenta compatibilidade com os padrões norte-americano e japonês. Há veículos elétricos comerciais que trazem mais de um tipo de conector para recarga, como por exemplo, o *Nissan Leaf*, cujo detalhe na Figura 8 mostra a existência de um conector SAE J1772 para recarga lenta com alimentação em corrente alternada e um conector CHAdeMO (ou conector TEPCO) para recarga rápida em corrente contínua. As empresas montadoras de automóveis dos EUA e dos países da Europa, em 2012, realizaram opção de utilização do novo conector do padrão SAE J1772 (conhecido como conector “combo”), que permite recarga lenta com alimentação CA e recarga rápida CC, em seus novos veículos [87], [88]. Além disso, espera-se que as montadoras japonesas também venham adotar este novo tipo de conector [33]. Nesta seção serão descritos os principais padrões de conectores e formas de recarga de veículos elétricos atualmente comercializados.



Fig. 8. Utilização de mais de um tipo de conector para recarga (*Nissan Leaf*, em adaptação de foto retirada de www.bendbulletin.com).

1) *SAE J1772*: A prática recomendada para veículos de superfície “SAE J1772 - *Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler*” [70] traz especificações dos conectores (plugue e tomada) utilizados na recarga condutiva de veículos elétricos, além de definir diferentes níveis para a execução de tal tipo de recarga de baterias. Na sua versão do ano de 2010, a SAE J1772 cobre apenas a carga lenta com alimentação em corrente alternada. Em 2012, esta prática recomendada recebeu atualização incorporando a recarga com alimentação em corrente contínua (lenta e rápida). Os métodos de recarga definidos pela SAE J1772 são apresentados na Tabela I. Os métodos de recarga “CA Nível 1” e “CA Nível 2” são baseados na conexão do VE à rede em corrente alternada, com alimentação tipicamente monofásica. A SAE J1772 não cobre recarga baseada em alimentação trifásica, pois não é um tipo de fornecimento de energia comumente disponível aos consumidores norte-americanos [82]. Já a alimentação bifásica, apesar de não ser citada explicitamente na definição dos métodos de recarga estabe-

TABELA I

Métodos de recarga de baterias para VEs (SAE J1772)

Método de Recarga	Característica/Aplicação	Tensão	Corrente
CA Nível 1	· Carga lenta (alimentação CA monofásica) · Recarga em tomada residencial de uso geral	120 V	12–16 A
CA Nível 2	· Carga lenta (alimentação CA monofásica ou bifásica) · Ponto de recarga (residencial/público)	208–240 V	≤80 A
CC Nível 1	· Carga lenta (alimentação CC) · Ponto de recarga (residencial/público)	200–500 V	≤80 A
CC Nível 2	· Carga rápida (alimentação CC) · Estações de recarga	200–500 V	≤200 A

lecidos pelo padrão, é suportada pelo conector SAE J1772 (métodos de recarga “CA Nível 1” e “CA Nível 2”) dadas as funções atribuídas a seus terminais e os diagramas elétricos de conexão à rede apresentados em tal padrão [70]. O método de recarga “CA Nível 1” permite realizar a recarga de um VE utilizando uma tomada residencial comum, à qual deve ser conectada o equipamento de interface compatível com “CA Nível 1” (cabo “Nível 1”), que já pode vir embarcado no veículo elétrico [16]. Já o método de recarga “CA Nível 2”, que é considerado a forma de recarga mais importante para pontos de recarga públicos e privados (incluindo os residenciais), não é compatível com tomadas residenciais comuns e necessita de equipamento especial dedicado, comumente designado por EVSE (do inglês *electric vehicle supply equipment*) ou, em português, SAVE (sistema de alimentação para veículo elétrico, seguindo a nomenclatura adotada pela ABNT [71]). É importante observar que um ponto de recarga compatível com os métodos de recarga “CA Nível 1” e “CA Nível 2” não é um carregador que faz conexão direta ao banco de baterias do VE, mas sim uma interface de conexão entre o carregador embarcado no veículo e a rede elétrica. Essencialmente, tal tipo de ponto de recarga é um conector inteligente que é responsável não apenas pela conexão do VE à rede, mas também apresenta características obrigatórias de controle e proteção estabelecidas pela própria SAE e outros órgãos de normatização [47]. A título de ilustração, na Figura 9, é apresentado o circuito de conexão de um SAVE padrão SAE J1772 “CA Nível 2”, onde é possível observar, além dos terminais de alimentação, a existência de terminais de detecção de proximidade e de controle (piloto), utilizados para garantir a operação adequada da conexão do VE ao SAVE.

Os métodos de recarga “CC Nível 1” e “CC Nível 2” (este similar ao método de recarga “Nível 3” definido nas versões anteriores da SAE J1772) são aplicados, respectivamente, a pontos de recarga e a estações de recarga comerciais (com carga rápida em corrente contínua). Nos dois casos, o carregador de baterias é externo ao VE, sendo diretamente conectado ao banco de baterias do veículo.

Tratando-se do acoplamento entre a rede elétrica e o VE para recarga de baterias, existem dois tipos de conectores

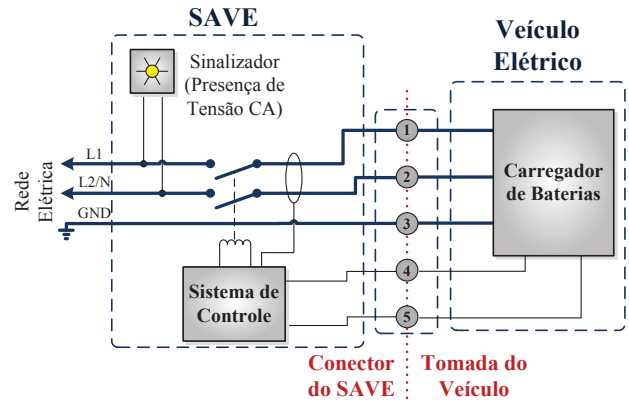
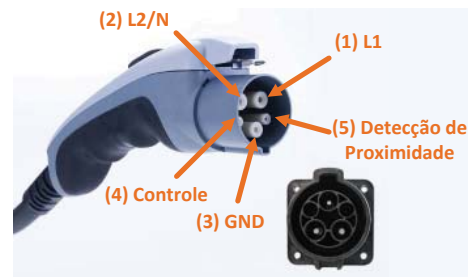


Fig. 9. Circuito típico de um SAVE padrão SAE J1772 “CA Nível 2” (pinagem definida na Figura 10(a)).

padrão SAE J1772. O primeiro é o conector estabelecido nas versões até 2010 desta prática recomendada, que suporta os métodos de recarga “CA Nível 1” e “CA Nível 2”, sendo também utilizado para recarga “CC Nível 1”. Além deste, há também o novo conector “combo”, definido na versão de 2012 de tal padrão, que suporta recarga “CC Nível 2” adicionalmente aos outros métodos de recarga. Na Figura 10 são mostradas fotos do par plugue-tomada destes dois tipos de acoplamento do padrão SAE J1772.



(a)



(b)

Fig. 10. Conectores padrão SAE J1772: (a) Métodos de recarga “CA Nível 1”, “CA Nível 2” e “CC Nível 1” (adaptação de foto retirada de www.carstations.com); (b) “Combo”: suporta todos os métodos de recarga (foto retirada de ev.sae.org/article/10128).

2) IEC 61851 (NBR/IEC 61851) e IEC 62196 (NBR/IEC 62196): Há dois padrões definidos pela IEC relacionados à recarga condutiva de baterias de veículos elétricos [82], [89]: IEC 61851 e IEC 62196. O padrão IEC 61851, “*Electric Vehicle Conductive Charging System*”, trata dos equipamentos

para recarga de VEs em corrente alternada e em corrente contínua. Já a IEC 62196, “Plugs, Sockets Outlets, Vehicle Coupler and Vehicles Inlets - Conductive Charging of Electric Vehicles” aborda os requisitos dos conectores utilizados na recarga de VEs. Estes padrões foram recentemente adotados pela ABNT sob os nomes “NBR/IEC 61851 - Sistema de Recarga Condutiva para Veículos Elétricos” e “NBR/IEC 62196 - Plugues, Tomadas, Tomadas Móveis para Veículo Elétrico e Plugues Fixos de Veículos Elétricos - Recarga Condutiva para Veículos Elétricos”. São definidos, na “Parte 1” do padrão IEC 61851 (NBR/IEC 61851), quatro modos de recarga condutiva para veículos elétricos, descritos de forma resumida Tabela II. No “Modo 1” é utilizada uma tomada residencial comum para efetuar a recarga do VE. A segurança é uma questão que merece atenção especial para este modo de recarga, pois é totalmente dependente das características da instalação elétrica à qual o VE está conectado [90], [91]. Se esta não utilizar dispositivos de proteção diferencial-residual (DR), como é o caso de instalações antigas, que não seguem as normas atuais (como a NBR 5410 [92]), há potencial risco de acidente na ocorrência de algum defeito no sistema de recarga. O “Modo 2” também é aplicado a tomadas residenciais, mas traz proteção incorporada ao cabo de conexão ao VE, eliminando as preocupações relacionadas a proteção existentes no “Modo 1”. O “Modo 3” se refere a pontos de recarga com o uso de SAVE dedicado, e é compatível com o método de recarga “CA Nível 2” da SAE J1772. Já o “Modo 4”, que engloba a recarga CC de veículos elétricos (carga rápida) encontra-se atualmente em desenvolvimento [82]. A “Parte 1” da IEC 61851 (NBR/IEC 61851) define, ainda, três casos de conexão para recarga de VEs. No “Caso A”, o cabo de conexão é fixado no VE, tendo que ser conectado ao ponto de recarga (tomada ou SAVE). Já no “Caso B”, o cabo é solto (as conexões devem ser feitas tanto no VE quanto no ponto de recarga) e, no “Caso C”, o cabo é fixado no ponto de recarga. O circuito da Figura 9 (referente à SAE J1772) é idêntico ao de um SAVE padrão NBR/IEC 61851 “Modo 3” - “Caso C” e será considerado como exemplo.

Quanto aos conectores, são definidos três tipos pela Parte 2 da IEC 62196, mostrados na Figura 11. O conector de interface “Tipo 1” é equivalente ao conector SAE J1772 “CA Nível 1” e “CA Nível 2” e é utilizado para alimentação monofásica em corrente alternada de até 250 V/32 A (podendo chegar até a 80 A, para compatibilidade com o padrão norte-americano). O conector “Tipo 2” é utilizado para alimentação CA monofásica (até 250 V/70 A) ou trifásica (380 V–480 V/63 A). Para o conector “Tipo 3”, que apresenta características nominais semelhantes às do conector “Tipo 2”, há uma capa de proteção que realiza a cobertura de seus contatos quando desconectado da tomada (requisito de segurança existente em alguns países europeus) [82].

3) CHAdeMO: O método de recarga rápida em corrente contínua mais importante atualmente é chamado CHAdeMO³, definido por uma associação de mesmo nome

³CHAdeMO é a contração da frase em francês “Charge de move”, que pode ser traduzida para o português como “Carregue e siga”, além de ser um trocadilho com a frase em japonês “O cha demo ikaga desuka”, que significa “Vamos tomar um chá durante a carga” (em tradução livre).

TABELA II
Modos de recarga de baterias para VEs
(IEC 61851-1 e NBR/IEC 61851-1)

Modo de Recarga	Característica/Aplicação	Tensão	Corrente ^a
Modo 1	· Carga lenta (alimentação CA monofásica ou trifásica) · Recarga em tomada residencial de uso geral	≤250 V (1φ) ≤480 V (3φ)	16 A
Modo 2	· Carga lenta (alimentação CA monofásica ou trifásica) · Recarga em tomada residencial de uso específico (proteção e controle-piloto incorporados ao cabo ou ao conector do VE)	≤250 V (1φ) ≤480 V (3φ)	32 A
Modo 3	· Carga lenta (alimentação CA monofásica ou trifásica) utilizando SAVE dedicado · Ponto de recarga (residencial/público)	≤250 V (1φ) ≤480 V (3φ)	32 A
Modo 4^b	· Carga rápida (alimentação CC) · Estações de recarga	—	—

^aMaiores valores de corrente são permitidos para os Modos 2 e 3, desde que suportados pelos elementos do sistema de recarga;

^bEm desenvolvimento.

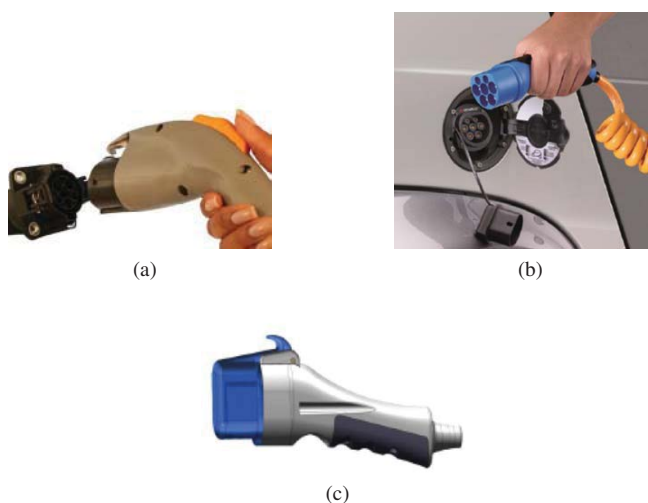


Fig. 11. Conectores padrão IEC 62196-2 (fotos retiradas de [82]). (a) “Tipo 1” (fabricante: Yazaki); (b) “Tipo 2” (fabricante: Mennekes); (c) “Tipo 3” (fabricante: SCAME)

composta por diversas empresas dos setores automotivo, de energia e de equipamentos elétricos de vários países do mundo, liderada por montadoras de automóveis japonesas e francesas (Nissan/Renault, Mitsubishi, Fuji Heavy Industries/Subaru e Toyota) e pela empresa de energia de Tóquio (TEPCO) [82]. O sistema de recarga CC CHAdeMO está incluído no rascunho da IEC 61851-23 [86]. Consequentemente, deve também ser adotado no Brasil, em futuras versões da NBR/IEC 61851. O conector utilizado é definido pelo “Japan Electric Vehicle Standard (JEVS)” G105-1993, publicado pelo Instituto Japonês de Pesquisa Automotiva, sendo frequentemente denominado como “conector TEPCO” (pois foi desenvolvido pela TEPCO em conjunto com empre-

sas do setor automotivo japonês). Este conector, com versões de diferentes fabricantes mostradas na Figura 12, permite a recarga CC em até 500 V/125 A [82], [93]. A interface de conexão do método de recarga CHAdeMO é mostrada na Figura 13 [93].



Fig. 12. Conectores TEPCO de diferentes fabricantes (fotos retiradas de www.chademo.com/items): (a) Yazaki; (b) Fujikura; (c) DYDEN8.

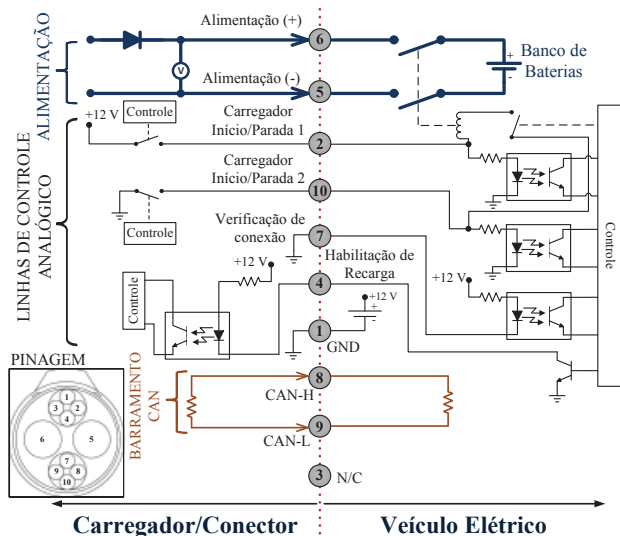


Fig. 13. Circuito elétrico simplificado da interface de conexão para recarga - conector TEPCO/protocolo CHAdeMO (adaptado de [93]).

III. EXEMPLO DE APLICAÇÃO: CONEXÃO DE KART CROSS ELÉTRICO À REDE DE ENERGIA ELÉTRICA

Exemplificando os conceitos descritos nas seções anteriores, é apresentado um caso de conexão de um Kart Cross Elétrico (protótipo de veículo elétrico em escala reduzida que está sendo atualmente desenvolvido no Núcleo de Automação

e Eletrônica de Potência da UFJF) à rede de energia elétrica. Este VE, cuja fotografia é apresentada na Figura 14, possui banco de baterias de 4,8 kWh (duas baterias de LiFePO_4 de 100 Ah/24 V) e motor síncrono de ímãs permanentes de 5 kW. Um banco de supercapacitores composto de seis módulos de 58 F/16,2 V também é utilizado no sistema de armazenamento de energia deste VE.

Uma vez que os níveis de tensão utilizados neste Kart Cross Elétrico são menores que os existentes em veículos elétricos comerciais (que tipicamente apresentam banco de baterias com tensão nominal da ordem de 200 a 360 V e acionamento do motor elétrico em até 600 V) o sistema experimental implementado para realização da conexão deste VE à rede de energia elétrica apresenta escala de tensão reduzida. A atual versão do sistema experimental reproduz a conexão de um VE a uma rede monofásica que emula uma instalação elétrica residencial (também em pequena escala e composta por cargas lineares e não lineares). O diagrama esquemático simplificado e principais especificações deste protótipo são apresentados na Figura 15 e na Tabela III, respectivamente. Na implementação deste sistema em escala reduzida foram utilizados alguns recursos já disponíveis em laboratório como, por exemplo, um transformador abaixador de 3,75 kVA, de relação de transformação 1:4 (levando a alimentação monofásica de 127 V para 31,75 V). A corrente nominal do sistema foi definida como 64 A devido à limitação de recursos de laboratório. A conexão do Kart Cross Elétrico à rede foi realizada por meio de tomada industrial tripolar (futuras versões do protótipo utilizarão conector padrão SAE J1772 para alimentação em corrente alternada).

Neste sistema experimental, há a integração de um carregador avançado aos conversores estáticos componentes do sistema de propulsão do Kart Cross Elétrico. Desta forma, conforme discutido na Introdução e na Seção II, é possível que haja fluxo bidirecional potência entre o VE e a rede de energia elétrica, o que permite que sejam realizadas funções adicionais, tais como geração de energia elétrica, compensação de reativos e harmônicos de corrente das cargas da instalação elétrica, além da recarga do banco de baterias embarcado (função primária da conexão de um VE à rede elétrica). A fim de reduzir a carga extra a bordo do Kart Cross Elétrico, o indutor de filtragem L_f , parte do carregador avançado integrado ao sistema de propulsão do VE, é inserido



Fig. 14. Kart Cross Elétrico (em desenvolvimento no Núcleo de Automação e Eletrônica de Potência da UFJF).

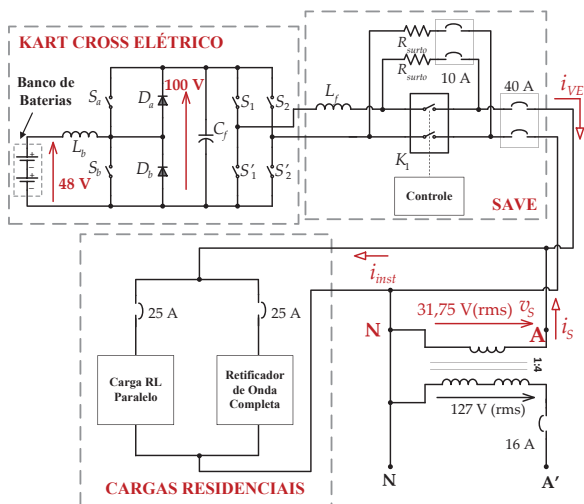


Fig. 15. Conexão do Kart Cross Elétrico à rede de energia elétrica.

TABELA III
Características do sistema experimental

Instalação Elétrica Residencial em Escala Reduzida	
Tensão de alimentação	31,75 V/60Hz
Corrente nominal	64 A(rms)
Potência aparente nominal	2,032 kVA
Cargas residenciais	
Linear (RL paralelo)	$R = 3 \Omega$; $L = 20 \text{ mH}$
Não linear (retificador de onda completa monofásico)	Capacitor de saída: 1,65 mF Resistor de carga: 9,6 Ω
SAVE	
L_f	0,2 mH
R_{surto}	22 Ω

como componente do SAVE, como exibido na Figura 15. Adicionalmente aos dispositivos de proteção e manobra típicos de um SAVE, o sistema experimental implementado apresenta proteção contra surtos de corrente, que é utilizada em testes nos quais o barramento CC do Kart Cross Elétrico apresenta condição inicial de tensão inferior à tensão de pico da rede monofásica. Os níveis de corrente suportados, bem como as proteções existentes no SAVE desenvolvido, são compatíveis com os requisitos definidos nos padrões SAE J1772 e NBR/IEC 61851.

O sistema de controle dos conversores estáticos do Kart Cross Elétrico foi implementado digitalmente utilizando o DSC *TMS320F28335*, da *Texas Instruments*. Já o monitoramento da tensão e da temperatura de cada célula do banco de baterias embarcado, bem como de sua corrente, é realizado por um BMS implementado com o microcontrolador *TIVA C Series TM4C123G*, do mesmo fabricante.

Ilustrando a potencialidade existente na integração de VEs à rede de energia elétrica apresenta-se alguns casos de conexão do Kart Cross Elétrico ao sistema experimental descrito, nos quais avalia-se a possibilidade da utilização do carregador avançado integrado ao VE para realização de serviços auxiliares à rede de distribuição de energia

elétrica. É verificada a utilização dos conversores estáticos, componentes do sistema de propulsão do Kart Cross Elétrico, na compensação de harmônicos de corrente e da potência reativa das cargas de uma instalação elétrica monofásica hipotética realizada de forma simultânea à recarga do banco de baterias do VE. A forma de onda de corrente consumida pelas cargas que emulam esta instalação elétrica é típica de uma instalação elétrica residencial composta por cargas lineares e não lineares [94]. Tal forma de onda é exibida na Figura 16 e apresenta $DHT = 36,52\%$ (operação das cargas residenciais com fator de potência (fp) igual a 0,8975, com atraso de $26,17^\circ$ entre as componentes fundamentais de tensão de alimentação e corrente). Na Figura 17 são apresentados resultados experimentais que ilustram uma situação de recarga lenta (modo de corrente constante) do banco de baterias do Kart Cross Elétrico, com corrente CA de recarga de aproximadamente 15 A(rms), realizada simultaneamente à compensação dos harmônicos de corrente e da potência reativa das cargas residenciais. Neste caso, a corrente consumida da rede, Figura 17(a), passa a ser praticamente senoidal, apresentando $DHT = 1,14\%$ (em fase com a componente fundamental da tensão de alimentação), levando a uma operação com $fp = 0,995$. A corrente sintetizada pelo VE para recarga de baterias simultânea à compensação das cargas residenciais é exibida na Figura 17(b).

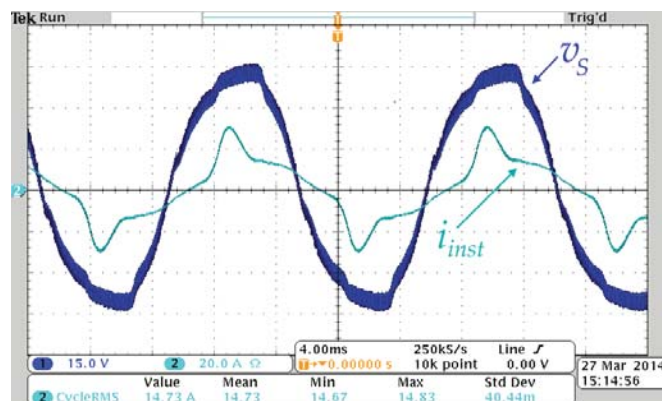
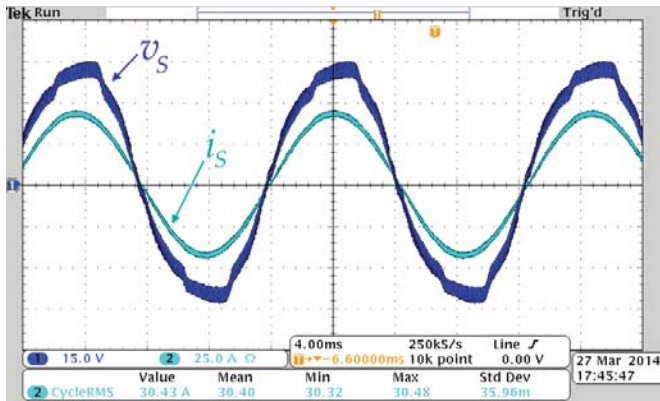


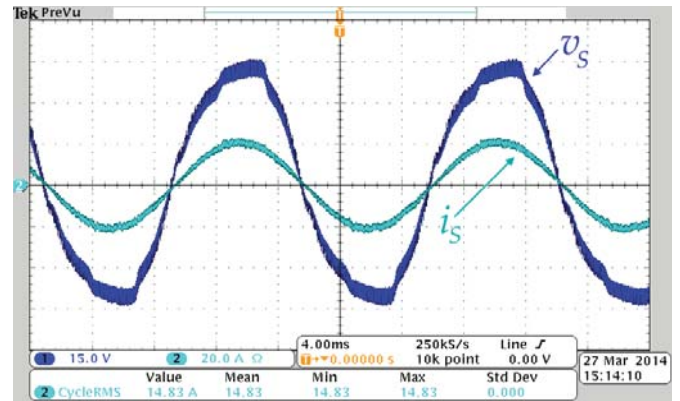
Fig. 16. Tensão da rede elétrica (azul escuro, 15 V/div) e corrente consumida pelas cargas residenciais, (ciano, 20 A/div).

Na segunda situação analisada, considera-se que o Kart Cross Elétrico continua conectado à rede após a recarga completa de seu banco de baterias, com os conversores estáticos componentes de seu sistema de propulsão ainda sendo utilizados na compensação de harmônicos de corrente e da potência reativa das cargas residenciais (operação como filtro ativo de potência). Neste caso, com o carregador avançado integrado ao sistema de propulsão do Kart Cross Elétrico realizando a compensação dos harmônicos de corrente e da potência reativa destas cargas, a corrente consumida da rede elétrica, apresentada na Figura 18(a), passa a apresentar DHT igual a 2,14 % (também em fase com a componente fundamental da tensão de alimentação) e o sistema, como um todo, apresenta $fp = 0,9883$. A corrente sintetizada pelo VE para a compensação das cargas residenciais para esta segunda situação analisada é apresentada na Figura 18(b).

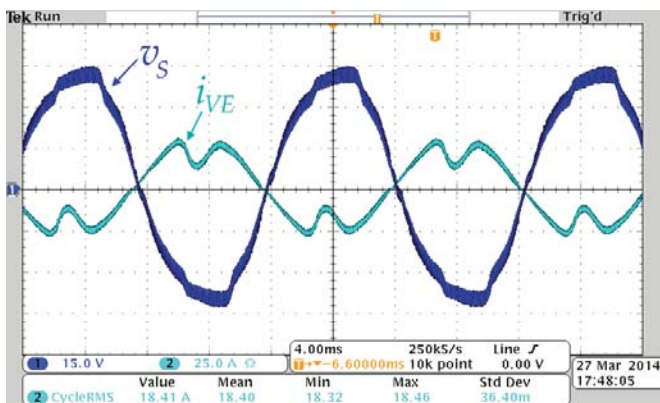
Nos dois casos apresentados, foi possível realizar a com-



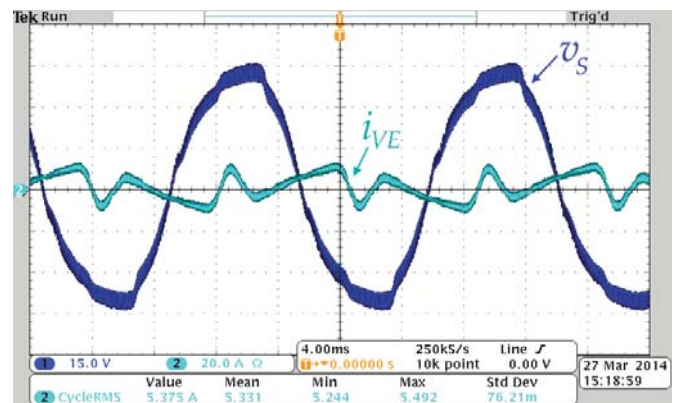
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 17. Carregador avançado integrado ao Kart Cross Elétrico atuando na recarga do banco de baterias de simultânea à compensação de cargas residenciais: (a) tensão da rede elétrica (azul escuro, 15 V/div) e corrente compensada (drenada da rede, em ciano, 25 A/div); (b) tensão da rede elétrica (azul escuro, 15 V/div) e corrente sintetizada pelo VE para recarga de baterias simultânea à operação como compensador estático (ciano, 25 A/div).

Fig. 18. Carregador avançado integrado ao Kart Cross Elétrico atuando como filtro ativo de potência: (a) tensão da rede elétrica (azul escuro, 15 V/div) e corrente compensada (drenada da rede, em ciano, 20 A/div); (b) tensão da rede elétrica (azul escuro, 15 V/div) e corrente sintetizada pelo VE operando como filtro de potência (ciano, 20 A/div).

penção das cargas da instalação elétrica mesmo com a alta distorção harmônica existente na tensão de alimentação do sistema experimental ($DHT = 9,3 \%$, com o VE desconectado). Este tipo de operação integrada à eletrônica de potência embarcada em um VE não afeta a vida útil de seu banco de baterias, uma vez que este não é utilizado para funções não relacionadas à tração elétrica (a sua recarga, realizada de forma lenta, dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante, é necessária para o uso primário do VE, podendo ter sua influência na vida útil do banco de baterias desconsiderada para os casos apresentados). Um detalhamento da integração dos modos de operação apresentados nesta seção ao sistema de propulsão do protótipo de Kart Cross Elétrico é descrito em [20], [95]. A avaliação da operação do sistema experimental desenvolvido em diferentes situações, tais como geração de energia elétrica, integração à fontes de energia renovável, entre outras, suas vantagens e desvantagens, bem como o detalhamento dos processos de recarga e do BMS serão apresentados em trabalhos futuros dos autores.

IV. CONCLUSÕES

As possíveis formas de conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica para reabastecimento foram abordadas

neste trabalho. Foram discutidas as características dos métodos de recarga de baterias, apontando a recarga noturna como forma primária de reabastecimento para os VEs. Os diversos tipos de carregadores de bateria, bem como os padrões de recarga atualmente utilizados também foram classificados e detalhados, inclusive os padrões NBR/IEC 61851 e NBR/IEC 62196, recentemente adotados pela ABNT. A escolha destes padrões para o sistema de recarga condutiva para o Brasil é acertada, uma vez que apresentam compatibilidade com os padrões SAE J1772 e CHAdeMO, que são atualmente utilizados pelos fabricantes norte-americanos, europeus e japoneses. Adicionalmente, foi apresentada a estrutura de um sistema experimental para a avaliação de estratégias de conexão de VEs à rede de energia elétrica, atualmente em desenvolvimento no Núcleo de Automação e Eletrônica de Potência da UFJF.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos seguintes órgãos de fomento e instituições pelo suporte financeiro destinado ao desenvolvimento deste trabalho: FAPEMIG, CNPq, INERGE (INCT/Energia Elétrica), UFJF e IF Sudeste MG. Registram, também, agradecimento às empresas Semikron e Trancil pela

doação de componentes utilizados no sistema experimental e aos alunos do curso de Engenharia Elétrica da UFJF Igor D. N. Souza e Thaís A. Peres pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Emadi, "Transportation 2.0," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 18–29, Julho 2011.
- [2] M. Yilmaz e P. Krein, "Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5673–5689, Dez. 2013.
- [3] Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), "Primeiro inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos," Rel. Técnico, 2011.
- [4] G. Maggetto e J. Van Mierlo, "Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey," in *IEE Seminar on Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles (Ref. No. 2000/050)*, pp. 1/1–111, 2000.
- [5] J. F. Queiroz, "Introdução do veículo híbrido no Brasil: Evolução tecnológica aliada à qualidade de vida," Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2006.
- [6] L. A. P. Peres, L. C. R. Rodrigues, S. F. Q. A. Rocha, e W. Costa, "Níveis quantitativos de eficiência e emissões de sistemas de propulsão veicular," in *Anais do IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética (CBEE'2011)*, 2011.
- [7] S. Wirasingha, R. Gremban, e A. Emadi, "Source-to-wheel (STW) analysis of plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 316–331, Mar. 2012.
- [8] B. Castro e T. Ferreira, "Veículos elétricos: Aspectos básicos, perspectivas e oportunidades," *Revista BNDES Setorial*, Setembro 2010.
- [9] J. Larminie e J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons, 2003.
- [10] G. Pistoia, *Electric and Hybrid Vehicles - Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. Elsevier, 2010.
- [11] M. Ferdowsi, "Plug-in hybrid vehicles - a vision for the future," in *Proceedings of the IEEE Vehicle Power Propulsion Conference (VPPC'2007)*, pp. 457–462, 2007.
- [12] C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, Fev. 2002.
- [13] M. Kisacikoglu, B. Ozpineci, L. Tolbert, e F. Wang, "Single-phase inverter design for V2G reactive power compensation," in *Proceedings of the Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 808–814, Março 2011.
- [14] R. Jayabalan, B. Fahimi, A. Koenig, e S. Pekarek, "Applications of power electronics-based systems in vehicular technology: state-of-the-art and future trends," in *Proc. of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, vol. 3, pp. 1887–1894, Jun. 2004.
- [15] Y.-J. Lee, A. Khaligh, e A. Emadi, "Advanced integrated bidirectional AC/DC and DC/DC converter for plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3970–3980, Out. 2009.
- [16] M. Yilmaz e P. Krein, "Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2151–2169, Maio 2013.
- [17] X. Yu, Y. Xue, S. Sirouspour, e A. Emadi, "Microgrid and transportation electrification: A review," in *Proc. of the 2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, pp. 1–6, Jun. 2012.
- [18] G. Arnold, "Challenges and opportunities in smart grid: A position article," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 922–927, Jun. 2011.
- [19] W. Kempton e J. Tomic, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue," *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 268 – 279, 2005. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305000352> (Acesso em: 28/05/2014).
- [20] M. Rodrigues, H. Schettino, A. Ferreira, P. Barbosa, e H. Braga, "Active power filter operation of an electric vehicle applied to single-phase networks," in *Proc. of the 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON2012)*, pp. 1–8, Nov. 2012.
- [21] M. Kisacikoglu, B. Ozpineci, e L. Tolbert, "Effects of V2G reactive power compensation on the component selection in an EV or PHEV bidirectional charger," in *Proc. of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2010)*, pp. 870–876, Set. 2010.
- [22] D. Tuttle e R. Baldick, "The evolution of plug-in electric vehicle-grid interactions," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 500–505, Mar. 2012.
- [23] C. Pang, P. Dutta, e M. Kezunovic, "BEVs/PHEVs as dispersed energy storage for V2B uses in the smart grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 473–482, Mar. 2012.
- [24] C. Botsford e A. Szczepanek, "Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles," in *Proc. of the 24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS24)*, pp. 1–9, 2009.
- [25] W. Jiayuan, S. Zechang, e W. Xuezhe, "Performance and characteristic research in LiFePO4 battery for electric vehicle applications," in *Proc. of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC2009)*, pp. 1657–1661, Set. 2009.
- [26] V. E. House e F. Ross, "How to build a battery that lasts longer than a car," 2007. [Online]. Disponível em: <http://www.eetimes.com/design/power-management-design/4012188/How-to-build-a-battery-that-lasts-longer-than-a-car> (Acesso em: 16/04/2014).
- [27] P. Erber, "Veículos elétricos," 2009. [Online]. Disponível em: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/PietroErber_ABOVE_1256219666.pdf (Acesso em: 16/04/2014).
- [28] R. Bedell, "A practical, 70-90% electric bus without

- overhead wires,” in *Proc. of the 24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS24)*, Maio 2009.
- [29] R. Bedell, B. Westerlund, e P. Åstrand, “First results from field testing of fast charged hybrid buses in Umea, Sweden,” in *Proc. of the European Electric Vehicle Conference (EEVC)*, Out. 2011.
- [30] D. Jonhson, “Nanomaterials keep pushing lithium-sulfur battery capabilities for EVs,” Abril 2014. [Online]. Disponível em: <http://spectrum.ieee.org/nanoclast/transportation/advanced-cars/nanomaterials-keep-pushing-lithiumsulfur-battery-capabilities> (Acesso em: 23/04/2014).
- [31] J. Zheng, J. Tian, D. Wu, M. Gu, W. Xu, C. Wang, F. Gao, M. H. Engelhard, J.-G. Zhang, J. Liu, e J. Xiao, “Lewis acid-base interactions between polysulfides and metal organic framework in lithium sulfur batteries,” *Nano Letters*, 2014. [Online]. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl404721h> (Acesso em: 23/04/2014).
- [32] H. Makkonen, J. Partanen, e P. Silventoinen, “Concept of battery charging and discharging in automotive applications,” in *Proc. of the 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp. 1664–1669, Jun. 2010.
- [33] L. Ulrich, “State of charge,” *IEEE Spectrum*, vol. 49, no. 1, pp. 56–59, Janeiro 2012.
- [34] Itaipu Binacional, “Visão geral do programa veículo elétrico,” Diretoria Geral - Assesoria de Mobilidade Elétrica Sustentável, Rel. Técnico, Junho 2013.
- [35] T. O’Sullivan, C. Bingham, e R. Clark, “Zebra battery technologies for all electric smart car,” in *Proc. of the 2006 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2006)*, Maio 2006.
- [36] General Electric, “GE energy storage,” 2014. [Online]. Disponível em: <http://geenergystorage.com/> (Acesso em: 24/04/2014).
- [37] K. Bullis, “Sodium-ion cells for cheap energy storage,” *Technology Review (Published by MIT)*, Dez. 2009.
- [38] The Energy Blog, “About sodium-sulfur (NaS) batteries,” 2006. [Online]. Disponível em: http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2006/01/sodiumsulfur_na.html (Acesso em: 16/04/2014).
- [39] M. Kisacikoglu, B. Ozpineci, e L. Tolbert, “Reactive power operation analysis of a single-phase EV/PHEV bidirectional battery charger,” in *Proc. of the IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE ECCE)*, pp. 585–592, Maio 2011.
- [40] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*. Norwood: Artech House, 2010.
- [41] Elithion Co., “Li-ion BMS,” Jan. 2013. [Online]. Disponível em: http://liionbms.com/php/white_papers.php (Acesso em: 19/04/2014).
- [42] T. Phung, J. Crebier, e Y. Lembeye, “Voltage balancing converter network for series-connected battery stack,” in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3007–3013, Out. 2012.
- [43] H. Maleki e J. N. Howard, “Effects of overdischarge on performance and thermal stability of a Li-ion cell,” *Journal of Power Sources*, vol. 160, no. 2, pp. 1395–1402, Out. 2006.
- [44] W. Rößler, “Boost battery performance with active charge-balancing,” *EE Times-Asia*, Jul. 2008. [Online]. Disponível em: http://www.eetasia.com/STATIC/PDF/200807/EEOL_2008JUL16_POW_CTRLD_TA_01.pdf (Acesso em: 23/04/2014).
- [45] S. Moore e P. Schneider, “A review of cell equalization methods for lithium ion and lithium polymer battery systems,” 2001, SAE Technical Paper 2001-01-0959.
- [46] B. Kuhn, G. Pitel, e P. Krein, “Electrical properties and equalization of lithium-ion cells in automotive applications,” in *Proc. of the 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Set. 2005.
- [47] G. Fox, “Getting ready for electric vehicle charging stations,” in *Proc. of the 2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, pp. 1–7, Out. 2011.
- [48] P. Bauer, Y. Zhou, J. Doppler, e N. Stemberge, “Charging of EVs and impact on grid,” in *13th International Symposium on Mechatronics (MECHATRONIKA’2010)*, 2010.
- [49] SAE, “SAE std. J1772 - SAE electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler,” 2010.
- [50] Nissan, “Nissan zero emission website,” 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.nissan-zeroemission.com/EN/LEAF/specs.html> (Acesso em: 19/04/2014).
- [51] S. Haghbin, K. Khan, S. Lundmark, M. Alaküla, O. Carlson, M. Leksell, e O. Wallmark, “Integrated chargers for EV’s and PHEV’s: examples and new solutions,” in *Proc. of the XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM2010)*, pp. 1–6, Set. 2010.
- [52] S. Dusmez e A. Khaligh, “Cost effective solutions to level 3 on-board battery chargers,” in *Proc. of the Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC2012)*, pp. 2121–2127, Fev. 2012.
- [53] C. Toepfer, “Charge! EVs power up for the long haul,” *IEEE Spectrum*, vol. 35, no. 11, pp. 41–47, Nov. 1998.
- [54] A. Boulanger, A. Chu, S. Maxx, e D. Waltz, “Vehicle electrification: Status and issues,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1116–1138, Jun. 2011.
- [55] F. Calmon, “Falência de projeto mostra que frota 100% elétrica é sonho distante,” Maio 2013. [Online]. Disponível em: <http://carros.uol.com.br/noticias/redacao/2013/05/28/falencia-de-projeto-mostra-que-frota-100-eletrica-e-sonho-distante.htm> (Acesso em: 24/04/2014).
- [56] Tesla Motors, “Battery swap,” 2014. [Online]. Disponível em: http://www.teslamotors.com/battery_swap (Acesso em: 23/04/2014).
- [57] M. Duvall, “Charging infrastructure update,” Electric Power Research Institute (EPRI), Março 2010. [Online]. Disponível em: <http://www.epri.com/Products/Reports/00592EDE->

- 7FA1-4C64-907B-CC1A6BEE5BF5/0/EPRICarging InfrastructureUpdate.pdf (Acesso em: 21/04/2014).
- [58] X. Li, J. M. Ogden, e K. S. Kurani, "An overview of automotive home and neighborhood refueling," *World Electric Vehicle Journal*, 2009.
- [59] T. Anegawa, "Development of the most suitable infrastructure for commuter electric vehicles," 2008, TEPCO R&D Center.
- [60] —, "Development of quick charging system for electric vehicle," in *Proc. World Energy Congress*, 2010.
- [61] D. Erb, O. Onar, e A. Khaligh, "Bi-directional charging topologies for plug-in hybrid electric vehicles," in *Proc. of the Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2010)*, pp. 2066–2072, Fev. 2010.
- [62] L. E. Hall, "2012 toyota prius plug-in hybrid review," August 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.hybridcars.com/toyota-prius-plug> (Acesso em: 25/04/2014).
- [63] Nissan Motors, "Nissan leaf - how to charge?" 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.nissan.co.uk/GB/en/vehicle/electric-vehicles/leaf/charging-and-battery/charging-nissan-leaf-and-battery.html> (Acesso em: 25/04/2014).
- [64] G. Pellegrino, E. Armando, e P. Guglielmi, "An integral battery charger with power factor correction for electric scooter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 3, pp. 751–759, Mar. 2010.
- [65] L. Solero, "Nonconventional on-board charger for electric vehicle propulsion batteries," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 144–149, Jan. 2001.
- [66] F. Lacressonniere e B. Cassoret, "Converter used as a battery charger and a motor speed controller in an industrial truck," in *Proc. of the 2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005.
- [67] "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems," *IEEE Std 519-1992*, pp. 1–112, Abr. 1993.
- [68] M. Rodrigues, I. Souza, A. Ferreira, P. Barbosa, e H. Braga, "Simultaneous active power filter and G2V (or V2G) operation of EV on-board power electronics," in *Proc. of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, pp. 4684–4689, Nov. 2013.
- [69] Y. Du, X. Zhou, S. Bai, S. Lukic, e A. Huang, "Review of non-isolated bi-directional dc-dc converters for plug-in hybrid electric vehicle charge station application at municipal parking decks," in *Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2010)*, pp. 1145–1151, Fev. 2010.
- [70] SAE, "SAE std. J1772 - SAE electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler," Out. 2012.
- [71] ABNT, "NBR/IEC 61851 - Sistema de Recarga Condu-tiva para Veículos Elétricos," Junho 2013.
- [72] S. Lukic e Z. Pantic, "Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 57–64, Set. 2013.
- [73] N. Kar, K. Iyer, A. Labak, X. Lu, C. Lai, A. Balamurali, B. Esteban, e M. Sid-Ahmed, "Courting and sparking: Wooing consumers? Interest in the EV market," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 21–31, Set. 2013.
- [74] K. Throngnumchai, T. Kai, e Y. Minagawa, "A study on receiver circuit topology of a cordless battery charger for electric vehicles," in *Proc. of the 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 843–850, Set. 2011.
- [75] Nissan Motor Co., "Non-contact charging." [Online]. Disponível em: <http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/charging.html> (Acesso em: 21/04/2014).
- [76] —, "Wireless charging system." [Online]. Disponível em: <http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/wcs.html> (Acesso em: 21/04/2014).
- [77] N. Liu e T. Habetler, "A study of designing a universal inductive charger for electric vehicles," in *Proc. of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, pp. 4528–4533, Nov. 2013.
- [78] P. Sergeant e A. Van den Bossche, "Inductive coupler for contactless power transmission," *IET Electric Power Applications*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2008.
- [79] G. Covic, J. Boys, M. Budhia, e C. Y. Huang, "Electric vehicles - personal transportations for the future," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 4, pp. 693–703, 2010.
- [80] O. C. Onar, B. Ozpineci, e J. M. a. Miller, "Sistema sem fio de transferência de potência do laboratório nacional de Oak Ridge (USA) para carga de veículos elétricos," *Newsletter da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência*, vol. I, no. 3, pp. 2–3, Maio 2013, (tradução: E. S. Lima Júnior).
- [81] G. Nagendra, J. Boys, G. Covic, B. Riar, e A. Sondhi, "Design of a double coupled IPT EV highway," in *Proc. of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, pp. 4606–4611, Nov. 2013.
- [82] Society of Motor Manufacturers and Traders (SMMT), "Report on the current situation and future direction of electric vehicle charger standards," Rel. Técnico, 2010.
- [83] IEC, "IEC 61851 - Electric Vehicle Conductive Charging System," 2010.
- [84] —, "IEC 62196 - Plugs, Sockets Outlets, Vehicle Coupler and Vehicles Inlets - Conductive Charging of Electric Vehicles," 2011.
- [85] ABNT, "NBR/IEC 62196 - Plugues, tomadas, tomadas móveis para veículo elétrico e Plugues fixos de veículos elétricos - Recarga condutiva para veículos elétricos," Julho/Novembro 2013.
- [86] CHAdEMO, "Chademo (long brochure)," 2013. [Online]. Disponível em: http://www.chademo.com/wp/wp-content/uploads/2013/09/20130925_brochure_long.pdf (Acesso em: 21/04/2014).
- [87] P. Ponticel, "J1772 "combo connector" shown at the 2012 Electric Vehicle Symposium," Maio 2012.

- [Online]. Disponível em: <http://articles.sae.org/11005/> (Acesso em: 21/04/2014).
- [88] ABVE, “J1772 “combo connector” shown at the 2012 Electric Vehicle Symposium,” Julho 2012. [Online]. Disponível em: <http://www.abve.org.br/destaques/2012/destaque12020.asp> (Acesso em: 21/04/2014).
- [89] B. Rarbarch, “Presente e futuro da tecnologia de veículos elétricos,” *Eletricidade Moderna*, Junho 2011.
- [90] P. Van den Bossche, “Conductive charging standardisation issues,” in *Proceedings of the 17th Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS17)*, 2000.
- [91] J. Driesen, “Electric vehicle charging integration,” Vienna, November 2013, tutorial presented on the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2013).
- [92] ABNT, “NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão,” 2004.
- [93] T. Anegawa, “Safety design of CHAdeMO quick charger and its impact on power grid,” 2010. [Online]. Disponível em: <http://www.ev-charging-infrastructure.com/media/downloads/inline/takafumi-anegawa-tepeco-11-20.1290790915.pdf> (Acesso em: 21/04/2014).
- [94] I. A. Pires, “*Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica*,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2006.
- [95] M. C. Rodrigues, I. Souza, A. A. Ferreira, P. G. Barbosa, e H. A. Braga, “Integrated bidirectional single-phase vehicle-to-grid interface with active power filter capability,” in *Proc. of the 12th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP 2013)*, pp. 993–1000, Out. 2013.

DADOS BIOGRÁFICOS

Márcio do Carmo Barbosa Poncilio Rodrigues, nascido em 1978, é engenheiro eletricitista (2002) e mestre em Engenharia Elétrica (2004) pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Foi professor dos cursos de Engenharia de Controle e Automação e Técnico em Eletrotécnica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Câmpus Leopoldina, entre 2006 e 2009. Atualmente, desenvolve seu trabalho de doutorado em Engenharia Elétrica na UFJF e atua como professor dos cursos de Engenharia Mecatrônica e Técnico em Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais, Câmpus Juiz de Fora. Veículos elétricos, sistemas de energia renovável, controle de conversores estáticos e filtros ativos de potência podem ser citados entre suas principais áreas de interesse.

Janaina Gonçalves de Oliveira nasceu em 1983 em Juiz de Fora, MG. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2007) e doutorado em tecnologia pela Universidade de Uppsala, na Suécia (2011). Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em controle de sistemas e eletrônica de potência aplicados ao armazenamento de energia e energias renováveis. Trabalhou

como pesquisadora no Centro de Pesquisas da GE no Rio de Janeiro, e atualmente é professora adjunta na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais.

André Augusto Ferreira possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2000), mestrado (2002), doutorado (2007) e pós-doutorado (2008) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. Foi professor adjunto do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa (junho de 2008), em que exerceu a função de coordenador do curso de Engenharia Elétrica de setembro de 2008 a junho de 2009. Desde novembro de 2009 é professor adjunto do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora e atualmente é o coordenador do Laboratório Solar Fotovoltaico da UFJF. Suas principais áreas de interesse são supercapacitores, estratégias de gestão de energia, veículos elétricos, energia solar fotovoltaica e qualidade de energia elétrica.

Pedro Gomes Barbosa recebeu o grau de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, Brasil, em 1986 e os graus de mestre e doutor, também em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, em 1994 e 2000, respectivamente. Atualmente é professor associado da Universidade Federal de Juiz de Fora. De 1987 a 1992 atuou como engenheiro da Marinha do Brasil no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ). Desde 1999 ele está com Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, onde leciona Eletrônica de Potência e Máquinas Elétricas para cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica. Suas áreas de interesse envolvem conversores multínivel, integração de fontes de energia renováveis, veículos elétricos, modelagem e controle de filtros ativos de potência e compensadores estáticos.

Henrique Antônio Carvalho Braga graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 1982. É professor dessa mesma universidade desde 1985. Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica, subárea Eletrônica de Potência, na COPPE/UFRJ em 1988. Em 1996 concluiu o curso de doutoramento, na mesma área do mestrado, pela Universidade Federal de Santa Catarina, INEP-UFSC. Atualmente é professor nos cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFJF, lecionando disciplinas na área de Eletrônica Básica e Eletrônica de Potência. Como pesquisador e consultor, o Prof. Henrique está envolvido em atividades relacionadas com a Eletrônica de Potência em geral, Interação de Veículos Elétricos à Rede de Energia, Iluminação Eletrônica Eficiente e Conversores Aplicados a Fontes Renováveis de Energia.