



UMA DISCUSSÃO SOBRE MÁQUINAS ELÉTRICAS E ACUMULADORES DE ENERGIA NO CONTEXTO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

André M. Alzamora*¹ e Hélder de Paula¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - Veículos elétricos e híbridos representam uma alternativa promissora para a redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera e para a diminuição da dependência em relação ao uso de combustíveis fósseis. Por tais motivos, a legislação de inúmeros países já estabeleceu a descontinuidade da produção de veículos movidos por propulsores exclusivamente a combustão para os próximos cinco ou dez anos. Alguns fabricantes de automóveis já anunciaram para breve o fim dos investimentos em desenvolvimento de motores a combustão. Diante de tal realidade, inúmeras publicações têm abordado o assunto, embora com enfoque bastante pontuais. Nesse contexto, de forma a contribuir com engenheiros/pesquisadores que estão ingressando nessa linha de pesquisa, o presente trabalho traz uma discussão criteriosa sobre dois tópicos de grande relevância dentro do grande tema “veículos elétricos/híbridos”, abordados aqui de forma totalmente contextualizada no âmbito da aplicação em foco, quais sejam: (i) Máquinas elétricas e (ii) Acumuladores de energia. Por meio de uma ampla revisão bibliográfica e uma densa discussão técnico/científica sobre tais tópicos, o presente artigo tem como objetivo oferecer ao leitor uma rica fonte de consulta e fomentar o interesse de acadêmicos sobre o tema.

Palavras-Chave – Acumuladores de energia, eficiência energética, motores elétricos, veículos elétricos, veículos híbridos.

ADDRESSING ELECTRIC MACHINES AND ENERGY STORAGE SYSTEMS IN THE CONTEXT OF HYBRID ELECTRIC VEHICLES

Abstract – Electric and hybrid vehicles have arisen as a promising alternative for the reduction of pollutant gases emission and the dependency from fossil fuels. The legislation of several countries have already established the suspension of the production of vehicles exclusively powered by combustion engines in the next few years. Some automobile manufacturers have announced for soon the end of investments on research and development of combustion engines. In face of such scenario, many papers have addressed the subject “electric/hybrid vehicles”, but

focusing very specific points/aspects. In this context, in order to bring contributions to the area and help researchers who are giving the first steps into it, this paper presents a comprehensive discussion on two topics of great relevance within the “electric/hybrid vehicles” subject – (i) Electric Machines and (ii) Energy Storage Systems – addressed here strictly in the context of the application in focus. By means of a thorough literature review and a rich discussion on the aimed topics, this paper provides a great compilation of relevant information on this area, helping the newcomer researchers and leveraging the interest of the academy regarding this subject.

Keywords – Energy storage systems, power efficiency, electric motors, electric vehicles, hybrid vehicles.

I. INTRODUÇÃO

O número de veículos do setor de transporte, somado ao do setor automobilístico, é responsável por 32% dos gases poluentes lançados na atmosfera, valor tal que se aproxima dos 34% originados pela indústria [1]. Mediante tais números, observa-se que os veículos se apresentam como candidatos de grande potencial para se aplicar, com êxito, medidas de redução de emissão de gases poluentes. Além disso, a forte dependência do petróleo cria uma situação de fragilidade, visto que tal recurso tem disponibilidade limitada, gerando recorrentes aumentos de preço e conflitos internacionais. Neste contexto, muitas vezes pressionada por legislações cada vez mais restritivas, a própria indústria automobilística tem investido no desenvolvimento de fontes alternativas de energia e dispositivos de maior eficiência energética, através da integração de diferentes tecnologias (elétrica, mecânica, térmica ou fluídica) [2], tais como veículos elétricos híbridos (VEHs), capazes de combinar a larga autonomia dos veículos movidos a motores de combustão interna com a alta eficiência dos motores elétricos [3], além da possibilidade de regeneração de energia em toda ocasião de desaceleração ou frenagem.

Em todo o mundo, programas e legislações específicas estimulando o desenvolvimento de tecnologias de maior eficiência energética e que gerem menor poluição atmosférica têm sido estabelecidas. No âmbito nacional, o decreto brasileiro Inovar Auto [4], lançado em 2012, garantiu a redução do imposto sobre produtos industrializados (IPI) em

*andre.alzamora@outlook.com

veículos com menor consumo de combustível, tendo sido posteriormente substituído pelo programa Rota 2030, vigente no presente momento. Em Paris havia se anunciado a intenção de reduzir a zero a circulação de veículos movidos por motores de combustão a diesel até o final de 2020. Na Noruega foi apresentada uma proposta para proibir, até 2025, a circulação de qualquer veículo que não seja de natureza elétrica, enquanto a Holanda também estuda a possibilidade de proibição, a partir de 2025, de veículos que não sejam movidos a eletricidade [5].

Perante tal cenário, o tema “veículos elétricos” e todos os tópicos de pesquisa relacionados a ele têm sido abundantemente explorados na literatura especializada, disseminados numa infinidade de trabalhos técnicos/científicos, cada qual abordando aspectos específicos e pontuais. Neste contexto, com o propósito de auxiliar os engenheiros/pesquisadores que estão dando os primeiros passos neste tema, o presente artigo traz uma extensa compilação de informações, concentradas num único material, sobre dois tópicos de crucial importância para esta linha de pesquisa: as máquinas elétricas e os acumuladores de energia, no contexto da aplicação em foco. Como resultado de uma ampla revisão bibliográfica, são apresentadas discussões sobre as principais questões técnico-econômicas relacionadas a estes dispositivos, além dos nichos de pesquisa relacionados a ambos que mais merecem atenção. Desta forma, este trabalho agrega valor ao tema por disponibilizar ao leitor uma fonte de informações densa e atualizada, num texto didático e permeado por discussões técnicas, fomentando assim as pesquisas nesta área dentro da esfera acadêmica. Tal é a contribuição do presente trabalho.

II. ASPECTOS GERAIS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

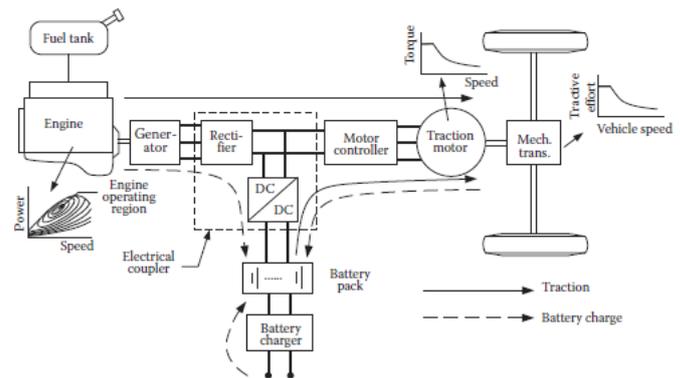
Com o propósito de contextualizar o leitor e proporcionar-lhe um melhor entendimento dos tópicos principais deste trabalho, inicialmente apresentam-se, nesta seção, os conceitos fundamentais relacionados aos veículos elétricos híbridos.

A. Arquitetura do Sistema Motriz

Simplificadamente, a arquitetura de um veículo elétrico híbrido é definida pela forma como os componentes que definem o fluxo/conversão de energia são conectados, existindo dois tipos básicos: arquitetura série e paralela. Há variações desses dois tipos [6], mas, como há controvérsias com relação a esta questão, este artigo abordará somente os dois grupos supracitados.

A figura 1 ilustra esquematicamente a arquitetura série. O ponto chave dessa configuração é que duas máquinas elétricas são conectadas a um conversor, que atua de forma a controlar o fluxo de potência das baterias e gerador elétrico para o motor, ou, na direção reversa, do motor elétrico para as baterias. O tanque de combustível, o motor a combustão e o gerador elétrico constituem a fonte primária de energia, ao passo que as baterias operam como um reservatório dinâmico de absorção ou fornecimento de energia para a máquina elétrica utilizada na tração do veículo.

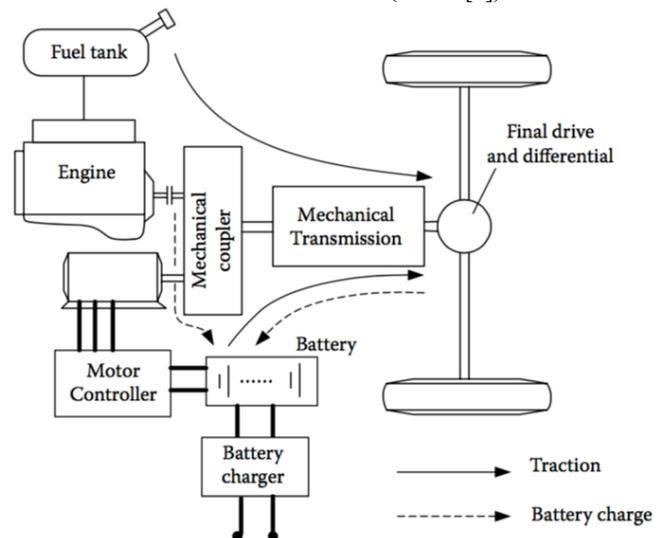
Figura 1: Esquema ilustrativo da arquitetura série de um veículo elétrico híbrido (Fonte: [1]).



A fonte unidirecional de energia é o tanque de combustível, ao passo que o conversor de energia unidirecional é o motor a combustão acoplado ao gerador. A saída do gerador elétrico é conectada ao barramento CC através de um retificador controlado. A fonte bidirecional de energia é o pacote de baterias ligado ao barramento CC através de um conversor CC/CC, controlado e bidirecional. A máquina elétrica utilizada para a tração pode ser controlada de forma a operar como motor ou gerador. O veículo pode contar ou não com a opção de carregamento da bateria pela tomada. A arquitetura série surgiu originalmente do veículo elétrico puro, ao qual foi então adicionado o conjunto motor a combustão/gerador elétrico para aumentar autonomia do veículo, limitada pela reduzida capacidade das baterias.

Por outro lado, no caso da arquitetura híbrida paralela, o motor a combustão fornece potência mecânica diretamente para as rodas do veículo, de maneira similar a um veículo a combustão convencional. Contudo, no presente caso, este motor é também assistido por um motor elétrico ligado mecanicamente ao mesmo eixo, tal como mostrado na Figura 2.

Figura 2: Esquema ilustrativo da arquitetura paralela de um veículo elétrico híbrido (Fonte: [1]).



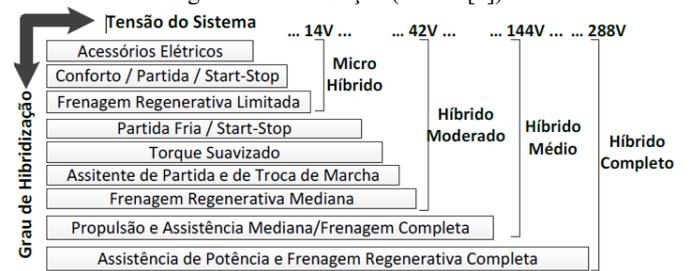
Comparativamente à arquitetura série, a paralela tem a vantagem de ambos os motores (a combustão e elétrico) suprirem, diretamente e de forma combinada, potência às rodas, inclusive com menores perdas elétricas, visto que é eliminado do sistema o processo de conversão de energia relacionado ao acionamento do gerador elétrico por parte do motor a combustão. Além disso, elimina-se o peso e o volume associados à inexistência do gerador e do fato da máquina elétrica relativa à tração ser de potência menor que no caso do veículo série. Como desvantagem da arquitetura paralela, pode-se citar o fato de que o motor a combustão não mais opera de forma constante em seu ponto ótimo de rendimento, mas em toda a sua faixa de rotações (no veículo série, o motor a combustão, sendo auxiliado pela bateria, é colocado para operar exatamente em seu ponto ótimo). Uma outra desvantagem é a maior complexidade da estrutura de controle, por ter que combinar, da melhor forma possível, as contribuições do motor elétrico e do motor a combustão na geração do conjugado para as rodas do veículo, mesmo com o fato de ambos apresentarem características de torque vs. velocidade tão distintas.

Vale ressaltar que, além dos veículos híbridos elétricos, existem outras alternativas de hibridização, ou seja, de se adicionar, junto ao motor a combustão, um dispositivo de outra natureza que permita impulsionar o veículo e que tenha capacidade de recuperação de energia nas desacelerações. Nesse contexto, vários outros sistemas híbridos foram propostos, como o híbrido a ar comprimido, o híbrido com volante de inércia, o híbrido hidráulico e o híbrido com célula de combustível [7]. A capacidade de integrar sistemas de controle e de gestão da energia com o dimensionamento otimizado dos principais componentes do sistema de tração híbrido são áreas que requerem esforços em pesquisa e desenvolvimento [8]. Em 2017, a empresa americana *Lightning Hybrids* disponibilizou, comercialmente, uma solução para hibridização de veículos já existentes (*retrofit*) baseada no sistema hidráulico, o que até então existia operando apenas em protótipos. O sistema foi desenvolvido para veículos de carga e pode ser instalado em apenas um dia. As informações detalhadas deste sistema podem ser obtidas no vídeo disponibilizado em [9]. Detalhes sobre este item de sistema são apresentados na seção IV-B.

B. Grau de Hibridização

A classificação do veículo elétrico quanto ao seu nível de hibridização é determinada, principalmente, pelas suas características operacionais de tração e também em função da forma com a recarga da bateria é realizada durante o processo de desaceleração [10]. Quanto maior o grau de liberdade do modo de operação híbrida, maior a complexidade do sistema, mas também maior é a eficiência energética obtida [5]. Conforme ilustra a Figura 3, a classificação do veículo quanto ao nível de hibridização define quatro graus, quais sejam: micro híbrido, híbrido moderado, híbrido médio e híbrido completo. Para os veículos de arquitetura paralela, o grau de hibridização de um veículo é definido pela relação de potência dos motores de tração, conforme descreve (1) [11].

Figura 3: Classificação de um veículo elétrico quanto ao seu grau de hibridização (Fonte: [5])



$$\text{Grau de hibridização} = \frac{P_{ME}}{P_{ME} + P_{MC}} \quad (1)$$

Onde P_{ME} e P_{MC} são, respectivamente, as potências do motor elétrico e do motor a combustão.

(i) *Veículo micro híbrido*: este grau de hibridização é o menos expressivo, pois não envolve tração elétrica complementar à tração convencional, não demandando, portanto, alterações significativas no veículo. É baseado na inclusão da função *Start/Stop*, que desliga o motor sempre que o veículo estiver parado, como em semáforos ou engarrafamentos. Dessa forma, há redução do consumo de combustível e das emissões de gases poluentes para a atmosfera.

(ii) *Veículo híbrido de moderado a médio*: neste caso, é adicionado ao sistema de tração uma máquina elétrica que, suprida por baterias e/ou supercapacitores, complementa o torque produzido pelo motor a combustão na tarefa de propulsão do veículo. Além disso, possibilita a regeneração de energia nas ocasiões de desaceleração, transferindo aos acumuladores a energia cinética do veículo, ao invés de dissipá-la, na forma de calor, no sistema de freios convencional.

(iii) *Veículo híbrido completo*: neste caso, os sistemas de propulsão pelos motores a combustão e elétrico são desacoplados, de forma que o veículo ganhe capacidade de tração puramente elétrica ou térmica. Contudo, são necessárias modificações mais extensas na arquitetura dos veículos, além um sistema de armazenamento de energia de maior capacidade e um motor elétrico de maior potência.

III. MÁQUINAS ELÉTRICAS PARA APLICAÇÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Como em qualquer outra aplicação de engenharia, questões como custo e confiabilidade de um equipamento/sistema são fundamentais. Contudo, no caso de veículos elétricos, peso, volume e rendimento adquirem uma importância ainda maior que em outras aplicações, pois a máquina elétrica deverá ser embarcada em um veículo (restrições de tamanho e peso) e extrairá sua energia de um acumulador de capacidade limitada, devendo apresentar elevado aproveitamento energético de forma a aumentar a autonomia do veículo.

Neste contexto, inúmeros trabalhos são encontrados na literatura técnica e científica de forma a comparar os diferentes tipos de máquinas e eleger o mais adequado para o seu emprego em veículos elétricos [12 – 15]. É apresentado em [16], um estudo voltado ao projeto de máquinas elétricas,

com vistas ao aprimoramento de seu desempenho, com a finalidade de se otimizar uma certa característica (a ser escolhida como objetivo) em detrimento de outras, como rendimento, custo, volume, densidade de torque/potência, etc.

Na literatura, dentre as máquinas mais consideradas para essa aplicação, encontram-se o motor de indução, o motor síncrono a ímãs permanentes e o motor a relutância chaveado. Vale ressaltar, contudo, que o motor síncrono a ímãs permanentes é o que predomina nos veículos elétricos híbridos em produção atualmente, embora haja um interesse crescente em motores que não utilizem ímãs, em virtude da volatilidade do seu preço no mercado internacional [15].

No que diz respeito ao motor a relutância chaveado, ele ainda é raramente encontrado em veículos comerciais, mostrando-se, na verdade, como uma alternativa teórica para possível uso no futuro. Por fim, no tocante ao motor de indução, pode-se afirmar que, dentro dos limites da pesquisa feita pelos autores do presente artigo, ele foi encontrado em veículos de poucos fabricantes, dentre eles a Tesla, que inclusive produz apenas veículos puramente elétricos, e não híbridos.

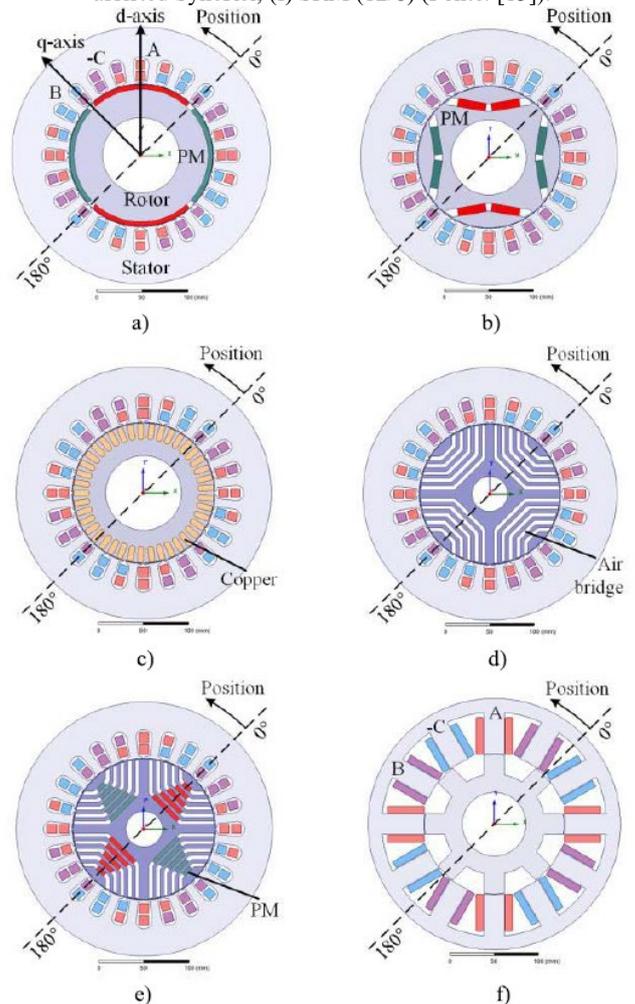
Análises comparativas bastante aprofundadas abrangendo diferentes tipos de máquinas, além de variações de projeto dentro um mesmo tipo, foram realizadas em [12 – 15], avaliando-se o seu desempenho em diversos aspectos. As máquinas avaliadas são citadas na sequência, sendo que uma ilustração da seção transversal de seu estator e rotor é apresentada na Figura 4.

- **SM-PMSM** (*Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine*): Máquina Síncrona a Ímã Permanente Montado na Superfície;
- **IPMSM** (*Interior Permanent Magnet Synchronous Machine*): Máquina Síncrona a Ímã Permanente no Interior (do rotor);
- **IM** (*Induction Machine*): Motor de Indução;
- **SRM** (*Switched Reluctance Machine*): Máquina a Relutância Chaveada;
- **SyncRel** (*Synchronous Reluctance Machine*): Máquina a Relutância Síncrona;
- **Ferrite assisted SyncRel** (*Ferrite Assisted Synchronous Reluctance Machine*): Máquina a Relutância Síncrona incluindo Ímãs de Ferrite;
- **NdFeB assisted SyncRel** (*Neodymium Assisted Synchronous Reluctance Machine*): Máquina a Relutância Síncrona incluindo Ímãs de Neodímio.

Na sequência é apresentada uma compilação das conclusões mais relevantes extraídas destes trabalhos, acerca da comparação dos tipos de máquinas supracitados em relação a diferentes características.

Avaliando o conjugado médio produzido pelos motores, tem-se que a IPMSM é aquele que apresenta o maior valor para esta grandeza, seguida pela SM-PMSM (97%), NdFeB assisted SyncRel (88%), Ferrite-assisted SyncRel (78%), IM (73%) e SyncRel /SRM (ambos com 70%). Tais percentuais são os valores normalizados em relação ao conjugado médio apresentado pela IPMSM.

Figura 4: Representação dos tipos de máquinas elétricas em avaliação: (a) SM-PMSM; (b) IPMSM; (c) IM; (d) SyncRel; (e) PM assisted SyncRel; (f) SRM (12/8) (Fonte: [15]).



Uma das maiores vantagens das máquinas a ímã permanente em relação ao motor de indução diz respeito à produção de campo magnético na máquina sem corrente de excitação (e, portanto, sem perdas Joule). No motor de indução, é necessária uma elevada corrente elétrica, mesmo em vazio, para que nele seja estabelecida uma densidade de fluxo magnético comparável ao presente em uma máquina a ímã permanente. Por essa razão, máquinas a ímã permanente apresentam, inerentemente, maior densidade de conjugado em comparação com máquinas baseadas em campo girante.

No que concerne o fator de potência, tem-se que os maiores valores foram apresentados pelas NdFeB assisted SyncRel, IPMSM e SM-PMSM, próximos entre si e em torno de 0,9. Os menores valores foram apresentados pelas máquinas que não empregam ímãs permanentes, tal como a SRM (0,65) e a SyncRel (0,70). Vale relembrar que máquinas com fator de potência mais elevado resultam em melhor aproveitamento do conversor que as aciona (em outras palavras, exigem conversores de menor dimensionamento para a produção de uma mesma potência mecânica, reduzindo seu custo).

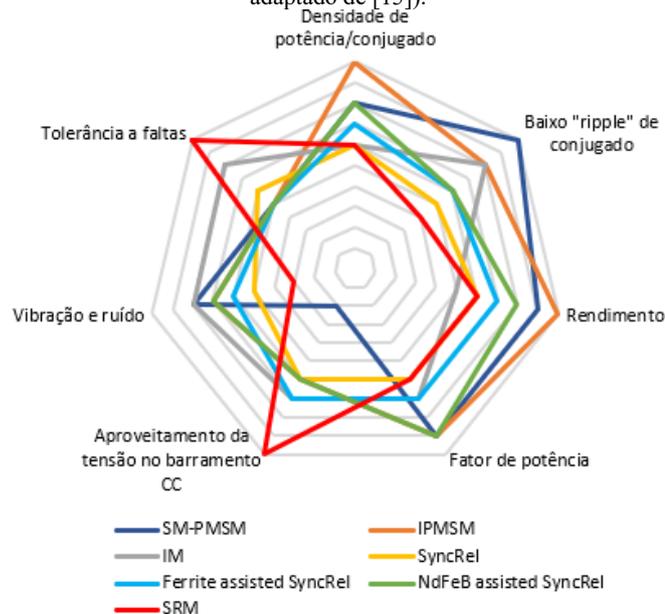
Um outro parâmetro importante de comparação diz respeito às oscilações do conjugado eletromagnético produzido, sempre indesejáveis por resultarem em vibração e ruído e, conseqüentemente, redução do conforto. Neste aspecto, a

SRM apresentou, de longe, o pior resultado (oscilações de conjugado de amplitude igual a 45%), ao passo que, em todas as outras máquinas avaliadas, tal valor situou-se entre 10,5 e 17,8%.

De maneira qualitativa, a Figura 5 ilustra, além das características já mencionadas, outras também relevantes no âmbito da comparação das máquinas para a aplicação veicular. Por exemplo, uma faixa mais ampla de velocidades de operação está diretamente ligada ao maior aproveitamento da tensão do barramento CC. No tocante ao rendimento das máquinas, característica com implicação direta no dimensionamento do banco de baterias (e, consequentemente, na autonomia, peso, volume e custo do veículo), PMSMs, SM-PMSMs, IPMSMs, e SyncRels assistidas por ímãs permanentes apresentam, inerentemente, valores mais elevados de rendimento do que IMs, SyncRels e SRMs, devido à produção de campo magnético sem perdas. Máquinas de indução (IMs) apresentam menor rendimento do que as de relutância, uma vez que a última não apresenta perdas Joule em seu rotor.

Tolerância a faltas é uma característica extremamente importante em veículos, visto que está diretamente associada à segurança de seus passageiros. Máquinas a ímã permanentes apresentam menor tolerância a faltas devido às elevadas tensões induzidas em altas velocidades e possível desmagnetização dos ímãs [17]. Além disso, todas as máquinas convencionais baseadas em campos girantes apresentam enrolamentos sobrepostos, de forma que todas as fases do estator estão acopladas tanto magnética como mecanicamente. Isso reduz a tolerância a faltas da máquina para falhas em uma única fase. Por outro lado, a máquina a relutância é superior no tocante à tolerância a falhas devido à construção modular dos seus enrolamentos, além de um rotor com estrutura mais simples [18].

Figura 5: Comparação, de forma qualitativa, das características mais relevantes das máquinas elétricas na aplicação veicular (Fonte: adaptado de [15]).



IV. ACUMULADORES DE ENERGIA PARA APLICAÇÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Como se sabe, a máquina elétrica opera tanto como motor, extraindo energia de uma fonte e gerando conjugado positivo para a propulsão do veículo, como na forma de gerador, gerando conjugado negativo para a frenagem do veículo, com consequente regeneração de energia. Em ambos os casos, é necessária, portanto, a existência de pelo menos um acumulador de energia que, no caso de híbridos elétricos, normalmente são baterias e supercapacitores. No caso de híbridos hidráulicos, o sistema de armazenamento é um reservatório de fluido sob alta pressão. Assim sendo, em função do seu importante papel nos veículos híbridos, esta seção se destina a discutir os acumuladores de energia no contexto de sua aplicação veicular.

A. Baterias e supercapacitores

Veículos elétricos e híbridos são superiores, do ponto de vista de eficiência energética, aos movidos por motor a combustão por dois motivos, principalmente:

(i) o rendimento de um motor elétrico projetado para esta aplicação apresenta rendimento muito superior ao de um motor a combustão (95–96% contra 33–40%);

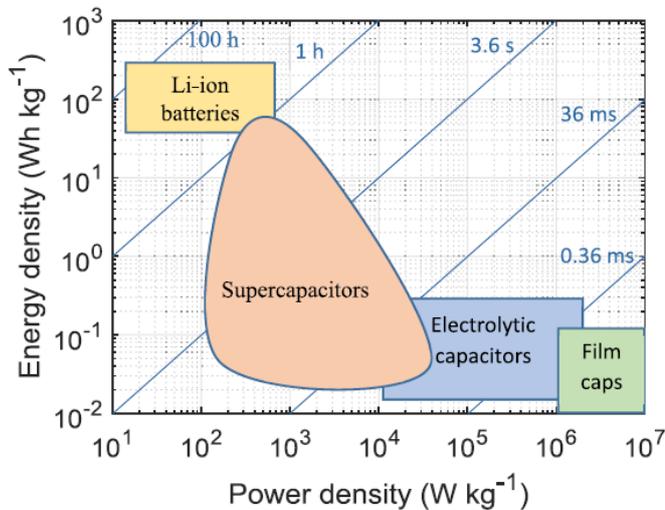
(ii) Recuperação de energia em qualquer ocasião de frenagem (acionamento do pedal de freio) ou simples desaceleração (alívio do pedal do acelerador – freio motor).

No caso da regeneração de energia, a variação da energia cinética associada à redução da velocidade do veículo é armazenada em algum tipo de acumulador de energia, subtraindo as perdas intrínsecas do sistema, tal como ocorre em qualquer processo de conversão de energia. No caso de um veículo convencional, essa energia é dissipada na forma de calor devido ao atrito das partes internas do motor e do câmbio durante o processo de desaceleração, ou, no caso das frenagens, principalmente devido ao atrito entre as partes do freio mecânico.

Dentre os acumuladores de energia utilizados nos veículos elétricos para a recuperação da energia, pode-se citar as baterias (mais comumente utilizadas), supercapacitores (empregados com menor frequência, e quase sempre conjuntamente com as baterias) e armazenadores hidráulicos (solução conceitual que apenas recentemente foi apresentada comercialmente). O sistema hidráulico será abordado na seção seguinte.

No que diz respeito aos acumuladores de energia, duas características importantes são a densidade de potência e densidade de energia. A Figura 6 ilustra tais parâmetros no caso específico de baterias de íons de lítio e capacitores/supercapacitores.

Figura 6: Diagrama ilustrando a densidade de energia e de potência de baterias de íons de lítio, supercapacitores e capacitores (eletrolíticos e de filme) - (Fonte: [25]).



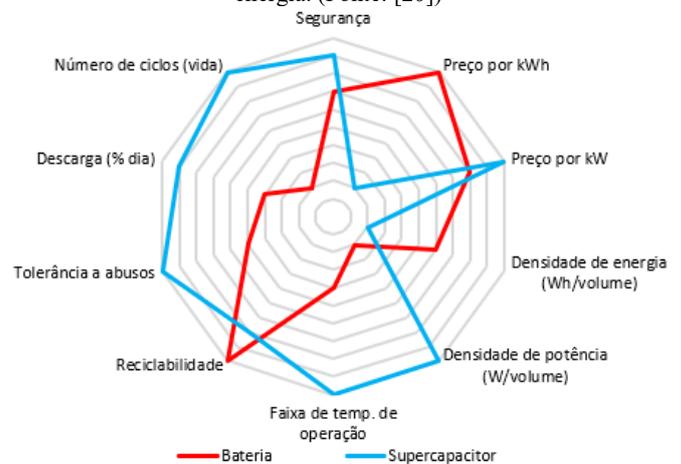
Um dispositivo com elevada densidade de energia é capaz de acumular um grande montante de energia em uma pequena massa, mas não, necessariamente, é capaz de fornecê-la ou absorvê-la rapidamente. Por outro lado, é capaz de proporcionar ao veículo grande autonomia; tal é o caso das baterias. Já os supercapacitores armazenam menos energia por unidade de massa do dispositivo, mas são capazes de absorvê-la ou liberá-la muito mais rapidamente (conceito de potência). Na prática, no caso de uma rápida desaceleração, por exemplo, a bateria não será capaz de absorver toda a energia associada a esse rápido processo, de forma que haverá a necessidade da contribuição dos freios mecânicos, e com consequente menor aproveitamento energético. De forma a recuperar esta parcela de energia, pode-se agregar ao sistema um supercapacitor, que, como foi dito, tem características mais adequadas a picos de potência. Em outras palavras, na etapa de projeto do sistema híbrido do veículo, caso a decisão seja por usar um sistema combinado de acumuladores, a bateria será dimensionada para armazenar a maior parte da energia, sendo responsável mais diretamente por sua autonomia; o supercapacitor será responsável por absorver picos de energia em desacelerações mais críticas ou mesmo absorver/fornecer energia em processos repetitivos de menor intensidade, poupando a bateria, cuja vida útil depende, dentre alguns outros fatores, da quantidade de ciclos de carga e descarga. Na literatura, é mencionado que há necessidade de estudos para o dimensionamento otimizado destes componentes [19], ao passo que há muitos trabalhos sobre estratégias de controle e gerenciamento energético destes/entre estes dispositivos [20 - 22]. Além disso, uma vez que a confiabilidade dos dispositivos é sempre uma questão crítica, tem-se que tal aspecto foi explorado em [23] e [24], para o caso específico dos supercapacitores. Com relação às suas características construtivas, desempenho, modelagem e uma opinião sobre tendências futuras, tais tópicos são abordados com profundidade em [25].

Além da densidade de potência e de energia das baterias e supercapacitores, características já discutidas anteriormente, a Figura 7 [20] apresenta, através de uma comparação

qualitativa, outros parâmetros importantes acerca desses dispositivos. Observa-se que, embora o supercapacitor seja superior às baterias em quase todos os critérios, ele não pode ser empregado como o principal acumulador de energia num veículo, visto que a sua densidade de energia é baixa.

Finalmente, como ocorre em todo projeto de engenharia, a escolha de uma tecnologia envolve inúmeros aspectos. No caso do acumulador, além das questões energéticas óbvias, são também importantes aspectos como custo, segurança, reciclagem, faixa de temperatura de operação, descarga (indesejada) do dispositivo na condição de repouso, tolerância a faltas no sistema elétrico do veículo, etc. Tais características são apresentadas qualitativamente também na Figura 7.

Figura 7: Comparação entre baterias e supercapacitores, em relação a várias características relevantes de um acumulador de energia. (Fonte: [20])



B. Sistema hidráulico

Uma outra alternativa de hibridização de um veículo é o uso de um sistema hidráulico composto por (i) um reservatório onde fica armazenado um fluido sob alta pressão e (ii) uma bomba/motor hidráulico, capaz de elevar a pressão do reservatório nas situações de desaceleração, recuperando/acumulando energia, ou de gerar conjugado para a propulsão do veículo, utilizando a energia armazenada no reservatório de alta pressão. Apesar do princípio físico distinto, tal sistema hidráulico opera de forma análoga ao conjunto formado por uma máquina elétrica e uma bateria ou supercapacitor: regeneração de energia nas frenagens e produção de conjugado positivo para a tração do veículo, seja sozinho, no caso da arquitetura híbrida série, ou combinado com um motor a combustão interna, no caso da arquitetura paralela. A animação apresentada em [26] ilustra, de forma bastante didática, o funcionamento desse sistema.

Tal sistema, até recentemente, era apresentado conceitualmente em protótipos e artigos científicos; contudo, em 2017, a empresa americana *Lightning Hybrids* disponibilizou, comercialmente, uma solução para hibridização de veículos já existentes (*retrofit*). O sistema foi desenvolvido para ser instalado em configuração série em veículos de carga, podendo ser instalado em apenas um dia [9]. A economia de combustível esperada para um veículo de carga, após a instalação desse sistema, é de cerca de 20 a 30% em ciclo urbano, acompanhada de uma redução de 50% de óxido nitroso, emitido por veículos a diesel. Embora o

conceito desse sistema hidráulico para a aplicação em veículos elétricos não seja propriamente novo, a maior dificuldade para torná-lo comercial foi a implementação de um sistema de controle eficaz, o que exigiu bastante investimento em pesquisa e desenvolvimento.

Após esse importante marco (oferta comercial da solução), a expectativa é que sistemas hidráulicos comecem a ser empregados de forma crescente, inicialmente em veículos de carga na arquitetura série e dispensando a máquina elétrica, nos denominados “veículos híbridos hidráulicos” (VHH) e, mais à frente, talvez em veículos de menor porte, na arquitetura paralela combinada ao motor elétrico, com a função análoga ao do supercapacitor, visto que o sistema em discussão também apresenta elevada densidade de potência. Nesse último caso, a hibridização dos veículos seria tanto elétrica como hidráulica, definindo-os como “veículos híbridos elétrico-hidráulicos” (VHEH).

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma rica discussão sobre dois importantes tópicos inseridos no tema “veículos elétricos e híbridos”, quais sejam: (i) Máquinas Elétricas e (ii) Acumuladores de Energia, empregando-se uma abordagem simples e acessível. Uma vez que artigos científicos que versam sobre esse tema geralmente focam em aspectos bastante pontuais, mais voltados para desenvolvimentos específicos para quem já atua na área, este trabalho veio contribuir com os engenheiros/pesquisadores que estão dando os primeiros passos nessa área, e necessitando, portanto, de um embasamento inicial. Nesse sentido, dois tópicos de grande relevância no tocante a veículos elétricos foram escolhidos e explorados, através uma grande compilação de informações, feita através de uma criteriosa revisão bibliográfica. As discussões registradas neste artigo certamente servem como referência e auxílio para pesquisadores interessados em adentrar ao tema, fomentando a sua pesquisa no meio acadêmico.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo e K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, CRC Press, 3ª Edição, Boca Raton, 2008.
- [2] T. P. Barbosa, *Modelagem e Análise de Estratégias de Gerenciamento da Energia em Veículos Elétricos/Hidráulicos Híbridos com Motor Flex Visando Economia de Combustível e o Aumento da Vida Útil da Bateria*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG, 2020.
- [3] K. Rydberg, “Energy Efficient Hydraulic Hybrid Drives”, 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICPF, Linköping, Suécia, 2009.
- [4] Ministério da Economia (2020). *Inovar-Auto*. Acedido em 31 de março de 2020, em: <http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo/inovar-auto>
- [5] R. A. Silva, *Avaliação da Hibridização de um Veículo Nacional Compacto Utilizando a Arquitetura Paralela de Eixos Separados*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG, 2017.
- [6] C. C. Chan e K. T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*, Oxford University Press, Nova Iorque, 2001.
- [7] F. Wasbari, R. A. Bakar; L. M. Gan, M. M. Tahir e A. A. Yusof, “A review of compressed-air hybrid technology in vehicle system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, pp. 935-953, Janeiro 2017.
- [8] J. Ribau, R. Viegas, A. Angelino, A. Moutinho, C. Silva, “A new offline optimization approach for designing a fuel cell hybrid bus”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 42, pp. 14-27, Maio 2014.
- [9] National Instruments, *New Ways to Power Vehicles with Lightning Hybrids*. Youtube, disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ChwLRqKn6hY>>, acesso em: 10 de abril de 2020.
- [10] M. M. Magalhães, *Hibridização de um Smart ForTwo Coupé: Projeto do Método de Gestão dos Modos de Funcionamento do Sistema Híbrido*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.
- [11] J. Larminie, J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, Jhon Wiley & Sons, 2ª Edição, 2003.
- [12] M. Zeraoulia, M. E. H. Benbouzid e D. Diallo, “Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study”, in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 6, pp. 1756-1764, Nov. 2006.
- [13] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown e M. Krishnamurthy, “Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications”, in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 245-254, Oct. 2015.
- [14] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo e P. Guglielmi, “Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application Including Design Examples”, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 6, pp. 2322-2332, Nov.-Dec. 2012.
- [15] E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour e B. Fahimi, “Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study”, in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 58-75, March 2017.
- [16] J. Müller, J. Liebold, T. Schuhmann e M. G. Meyer, “Optimisation of Electric Motors for Traction Drives”, *ATZ worldwide*, Vol. 117, pp. 11-14, Outubro 2015.
- [17] J. Hong et al., “Detection and classification of rotor demagnetization and eccentricity faults for PM synchronous motors”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 3, pp. 923-932, May/June 2012.
- [18] A. G. Jack, B. C. Mecrow, e J. A. Haylock, “A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant applications”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 4, pp. 889-895, Jul. 1996.
- [19] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, J. Deng e D. G. Dorrell, “Multiobjective Optimal Sizing of Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles”, in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 1027-1035, Feb. 2018.
- [20] F. Naseri, E. Farjah e T. Ghanbari, “An Efficient Regenerative Braking System Based on

Battery/Supercapacitor for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles With BLDC Motor", in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 5, pp. 3724-3738, May 2017.

[21] R. Carter, A. Cruden e P. J. Hall, "*Optimizing for Efficiency or Battery Life in a Battery/Supercapacitor Electric Vehicle*", in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 4, pp. 1526-1533, May 2012.

[22] H. Yoo, S. Sul, Y. Park e J. Jeong, "*System Integration and Power-Flow Management for a Series Hybrid Electric Vehicle Using Supercapacitors and Batteries*", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 1, pp. 108-114, Jan.-feb. 2008.

[23] F. Naseri, E. Farjah, M. Allahbakhshi e Z. Kazemi, "*Online condition monitoring and fault detection of large supercapacitor banks in electric vehicle applications*", in IET Electrical Systems in Transportation, vol. 7, no. 4, pp. 318-326, 12 2017.

[24] A. El Mejdoubi, A. Oukaour, H. Chaoui, Y. Slamani, J. Sabor e H. Gualous, "*Online Supercapacitor Diagnosis for Electric Vehicle Applications*", in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 6, pp. 4241-4252, June 2016.

[25] A. Berrueta, A. Ursúa, I. S. Martín, A. Eftekhari e P. Sanchis, "*Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends*", in IEEE Access, vol. 7, pp. 50869-50896, 2019.

[26] U.S. Environmental Protection Agency, How Heavy Duty Series Hydraulic Hybrid Vehicles (HHVs) Work, Youtube, disponível em:

<<https://www.youtube.com/watch?v=FpthKavtSSo>>, acesso em: 10 de abril de 2020.