

Veículos Eléctricos

Características e Tipos de Motores

RESUMO

Os impactos ambientais e económicos dos combustíveis fósseis têm uma forte proveniência do sector dos transportes. Este facto tem motivado, nas últimas décadas, um aumento do desenvolvimento dos veículos eléctricos, principalmente, das soluções híbridas. Tais desenvolvimentos resultam da integração de diversos domínios da engenharia, sendo de destacar os novos materiais e concepções de motores eléctricos, a electrónica de potência, os sistemas de controlo e os sistemas de armazenamento de energia.

Neste artigo procura-se apresentar as principais características dos sistemas de propulsão eléctrica actuais. Começa-se fazer uma comparação entre os veículos eléctricos e os convencionais, baseados nos motores térmicos de combustão interna. Pela sua importância, é feita uma referência sucinta aos sistemas de armazenamento de energia.

São comparadas as características da propulsão eléctrica e térmica, sob a perspectiva das exigências dos sistemas de tracção. São referidos os principais tipos de sistemas de propulsão eléctrica (motor, conversor e controlador), vantagens e desvantagens relativas.

Por último, uma abordagem acerca das tendências futuras dos veículos eléctricos.

1. INTRODUÇÃO

Embora o tema dos veículos eléctricos tenha conhecido uma divulgação alargada, sobretudo nas duas últimas décadas, não se trata de uma novidade propriamente dita. No final do século XIX eram relativamente populares e, até finais da década de 1910, as suas vendas tiveram alguma expressão. Somente a partir da década de 30, os veículos eléctricos desapareceram, devido aos desenvolvimentos

obtidos no motor de combustão interna – maiores potências e mais baratos, com menores custos de produção [1].

As sucessivas crises energéticas nos finais do século XX, as crescentes preocupações ambientais e a tomada de consciência dos limites das reservas de combustíveis fósseis colocaram em evidência os veículos eléctricos como alternativa aos transportes convencionais. Paralelamente, o sector dos transportes é responsável por enormes quantidades de energia consumida, cujos valores aumentam consideravelmente todos os anos.

Em particular, nos meios urbanos, a substituição dos meios de transporte actuais por veículos eléctricos trará enormes reduções nos níveis de poluição atmosférica, bem como nos índices de ruído.

Também em termos gerais, as emissões das centrais eléctricas, baseadas em combustíveis fósseis, associadas à generalização dos veículos eléctricos serão muito inferiores ao somatório das emissões dos motores de combustão interna, actualmente em circulação.

As razões assentam nos rendimentos muito superiores dos motores eléctricos, bem como na capacidade de efectuarem frenagens regenerativas.

Neste cenário, é de referir também o contributo das fontes renováveis de energia eléctrica na redução das emissões de poluentes para a atmosfera.

A tabela 1 apresenta uma comparação entre veículos eléctricos e convencionais (baseados em motores térmicos) [2].

A proliferação dos veículos eléctricos será ditada pela aceitação dos utilizadores dos actuais meios de transportes (nos designados países desenvolvidos trata-se da generalidade dos seus cidadãos).

Tabela 1 – Características de Veículos Eléctricos e Convencionais

	Veículos Eléctricos	Veículos c/ Motores Térmicos
Tipo de Motor	Motor Eléctrico	Motor de Combustão Interna
Fonte de Energia	Baterias, super condensadores, células de combustível	Gasolina e Gasóleo
Peso Próprio	Elevado (fundamentalmente, devido às baterias)	Leves, em termos comparativos
Transmissão de Potência	Pode prescindir de caixa de velocidades	Sistema de Engrenagens (caixa de velocidades)
Frenagem	Regenerativa	Dissipativa
Rendimento	Elevado	Baixo
Impactos Ambientais	Reduzidos	Elevados
Custo Inicial	Elevado	Médio
Custos de Manutenção	Reduzidos	Muito Elevados

Tal significa que, no mínimo, os veículos eléctricos têm de apresentar características semelhantes às dos actuais, baseados em motores térmicos, tais como: segurança, conforto, fiabilidade, robustez e desempenhos, com preços competitivos.

Para tal, muito têm contribuído os progressos obtidos, nos últimos anos, nos seguintes domínios: electrónica de potência (novas arquiteturas de conversores), máquinas eléctricas (novas concepções de motores e evolução dos materiais), sistemas de controlo (gestão optimizada dos fluxos de energia, com bons desempenhos na tracção) e sistemas de armazenamento de energia.

2. CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS ELÉCTRICOS

Em termos básicos, um veículo eléctrico assenta na integração dos seguintes componentes (Figura 1):

- sistema de gestão de energia;
- sistema de armazenamento de energia;
- sistema de propulsão eléctrica.

2.1. Sistema de Gestão de Energia

O sistema de gestão de energia (implementado pelo controlador) assume importância fundamental, uma vez que o fluxo de energia, quer no “modo motor” – *baterias* → *motor*, quer no “modo regenerativo” – *motor* → *baterias*, deverá ter sempre associado elevados rendimentos.

No funcionamento em modo regenerativo (períodos de desaceleração do veículo), a diminuição da energia cinética do veículo não se traduz em dissipação, mas antes em armazenamento de energia.

2.2. Sistema de Armazenamento de Energia

Actualmente, na questão da autonomia dos veículos eléctricos reside o seu principal ponto fraco.

Este facto explica a razão da generalidade dos fabricantes de automóveis disponibilizarem apenas veículos híbridos (motor térmico + motor(es) eléctrico(s)).

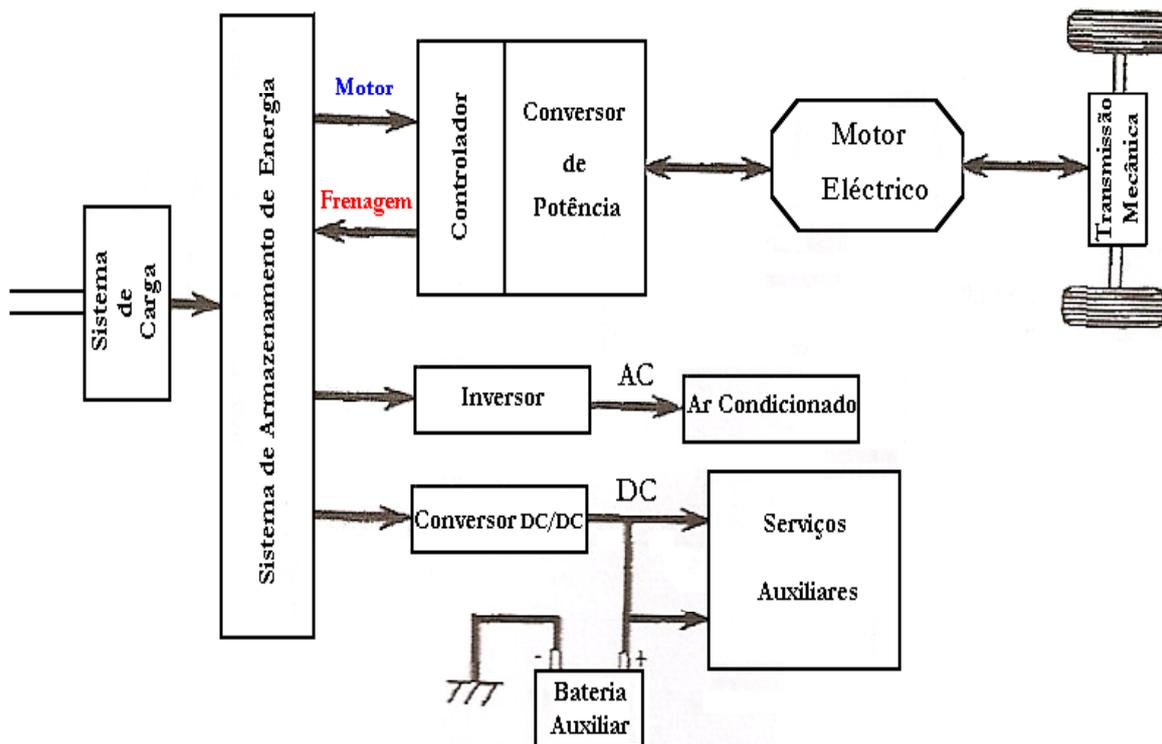


Figura 1 – Estrutura de um Veículo Eléctrico (baseado em [3])

Não obstante a necessidade de grandes melhorias nas características dos sistemas de armazenamento de energia, há a registar evoluções importantes nos últimos anos.

Embora se afaste do tema principal a tratar neste artigo, é feita, em seguida, uma breve referência ao estado actual daqueles sistemas [2], [4].

As principais características destes sistemas são:

- energia específica (Wh/Kg);
- potência específica (W/Kg);
- densidade de energia (Wh/volume);
- densidade de potência (W/volume);
- vida útil (nº de ciclos);
- temperatura de funcionamento ;
- custo.

a) Baterias

Têm valores de energia específica superiores aos super condensadores e inferiores às células de combustível.

No que se refere à potência específica, são inferiores aos

primeiros mas têm valores superiores aos das células de combustível.

São de referir os desenvolvimentos nas baterias baseadas em níquel (Ni) e iões de lítio (Li), principalmente nestas últimas (elevada densidade de energia).

b) Super Condensadores

Apresentam valores muito elevados de potência específica., no entanto, têm valores baixos de energia específica, pelo que são usados como complemento das baterias ou células de combustível.

Têm tempos de carga muito curtos.

Possuem características importantes para permitir bons comportamentos dinâmicos (potência suficiente para as acelerações e capacidade de recuperação de energia nas frenagens).

Têm ciclos de funcionamento mais elevados do que as baterias.

c) Células de Combustível

Estes sistemas produzem energia eléctrica, através da reacção química do hidrogénio e oxigénio, sendo o vapor de água o único produto da reacção.

O seu impacto ambiental é nulo, apresentando rendimentos elevados. Têm elevados valores de energia específica (superiores aos das baterias e super condensadores), mas baixos valores de potência específica (inferiores aos daqueles).

Continuam a ser alvo de pesquisas, com vista a melhorar as suas características e custos.

2.3. Sistema de Propulsão Eléctrica

Os sistemas de propulsão eléctrica (“drives”) apresentam estruturas semelhantes às das “drives” industriais, em uso há já vários anos. No entanto, atendendo às especificidades dos veículos eléctricos – arranques e paragens sucessivas, regimes de carga e condições ambientais distintas, etc. –, as suas características são, em geral, muito diferentes das “drives” industriais [5]. É sobre este sistema que se procurará incidir com mais detalhe.

A Figura 2 ilustra a sua constituição:

- motor eléctrico;
- conversor de potência;
- controlador;
- sistema de transmissão mecânica.

As exigências impostas pelos veículos eléctricos implicam motores com características particulares, sendo de destacar: elevadas densidades de potência e de binário, rendimentos altos em diferentes regimes de carga (não apenas o nominal) e custos moderados.

O sistema de propulsão eléctrica deverá permitir dispor de elevadas potências instantâneas, com bons rendimentos, em todos os modos de funcionamento [3], [5].

Na Figura 3 estão representadas as características mecânica ($T_{el}(n_r)$) e de potência ($P_{el}(n_r)$) típicas dos sistemas de propulsão eléctrica.

Está também incluída a característica mecânica típica de um motor térmico (tracejado).

É visível a excelente adaptação dos sistemas eléctricos aos requisitos de qualquer veículo de tracção.

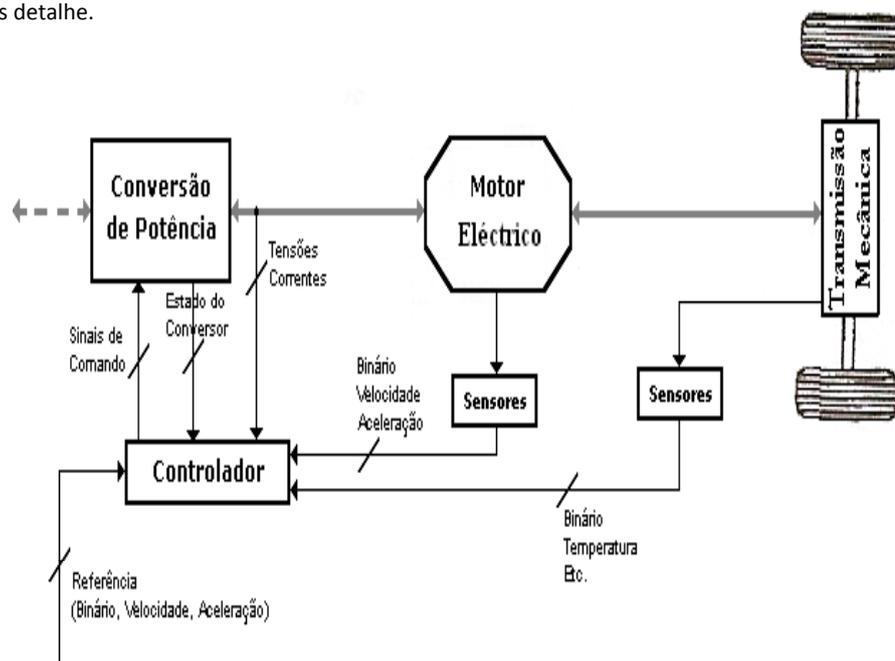


Figura 2 – Estrutura Básica do Sistema de Propulsão Eléctrica (setas a cinzento: fluxo de energia)

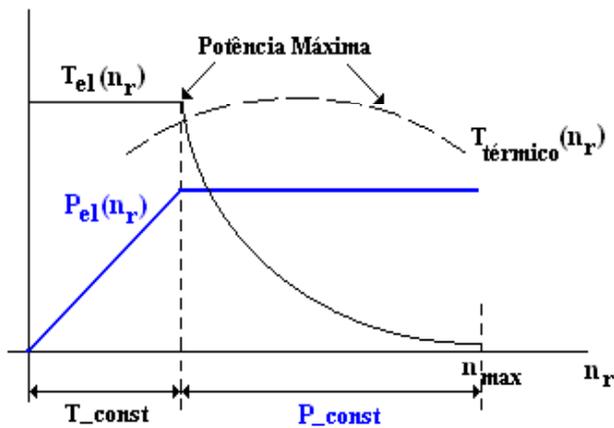


Figura 3 – Características de Veículos Eléctricos e Convencionais

No sistema eléctrico são obtidos elevados binários nas baixas velocidades; normalmente, acima da velocidade nominal do motor, o binário desenvolvido decresce, mantendo-se aproximadamente constante a potência desenvolvida. Esta zona de funcionamento – zona de enfraquecimento do campo – é crucial em termos da gama de velocidades permitida. É, pois, uma zona importante do funcionamento dos motores eléctricos dos sistemas de propulsão [3].

Comparando com a característica de um motor de combustão, há a salientar que o binário desenvolvido no arranque é inferior neste último.

A zona de funcionamento com potência constante é conseguida, no caso dos motores térmicos, somente com a inclusão de um sistema de transmissão múltipla, não sendo necessário nos sistemas eléctricos.

De notar também que o valor nominal da potência do motor de combustão é necessariamente mais elevado, ou seja, um veículo eléctrico cujo funcionamento está circunscrito à zona das baixas velocidades, terá associado um motor com menor potência nominal [6].

3. TIPOS DE SISTEMAS DE PROPULSÃO ELÉCTRICA

Os sistemas de propulsão eléctrica são caracterizados pelo tipo de motor associado.

Actualmente, as principais escolhas são as seguintes:

- Motor de Corrente Contínua (DC);
- Motor de Indução Trifásico;
- Motor Síncrono de Ímanes de Permanentes;
- Motor “Brushless” DC;
- Motor de Relutância Comutada.

3.1. Motor de Corrente Contínua (DC)

Historicamente, o início da tracção eléctrica esteve intimamente associado ao motor série (DC).

As razões prendem-se com a sua característica mecânica, vocacionada para as exigências inerentes aos sistemas de tracção, e com a simplicidade dos respectivos sistemas de controlo e da sua implementação (controlo independente do campo magnético e do binário).

São também de referir a utilização de outras variantes clássicas de motores DC: excitação independente e “shunt”.

No entanto, os motores de corrente contínua convencionais apresentam rendimentos relativamente baixos, bem como baixas densidades de potência, para além de exigirem elevados níveis de manutenção (fiabilidade reduzida). Para tal, muito contribui a existência do sistema colector/escovas, o qual impõe também limites nas velocidades.

Em certos casos, são usados motores DC de ímanes permanentes (não têm enrolamento de excitação, este é substituído por ímanes permanentes).

Embora apresentem melhores rendimentos, não eliminam os inconvenientes do comutador mecânico (colector), para além das limitações de potência e preço, associados aos ímanes permanentes. A título de exemplo [7]: carro de golfe, sem controlo no modo de enfraquecimento de campo (apenas baixas velocidades).

Normalmente, ambos os enrolamentos dos motores DC são equipados com conversores de potência – “Choppers” baseados em MOSFET’s (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) –, permitindo o funcionamento em modo regenerativo (conversor ligado à armadura) e na zona de enfraquecimento de campo (conversor ligado à excitação) [7].

Os avanços verificados na electrónica de potência (principalmente, a partir da década de 80 do século passado), permitiram a implementação de sistemas de controlo para máquinas de corrente alternada (AC), embora mais complexos do que no caso DC.

Uma vez que são motores com concepções mais simples e robustas (menor manutenção e preço), com maiores densidades de potência e rendimentos, tornaram-se preferenciais aos tradicionais sistemas DC.

3.2. Motor de Indução Trifásico

São muito utilizados, atendendo à sua simplicidade construtiva e robustez, principalmente a variante em gaiola de esquilo, apresentando rendimentos mais elevados relativamente aos motores DC.

Embora não possuam características naturais para a tracção eléctrica, a implementação de sistemas baseados no controlo vectorial – controlo por orientação de campo – permitiram melhorar os desempenhos dinâmicos deste tipo de motores, possibilitando o funcionamento nas duas zonas indicadas na Figura 3: binário constante e potência constante.

O controlo por orientação de campo assenta numa filosofia semelhante à dos motores DC (controlo independente do fluxo e do binário). No entanto, a sua implementação é muito mais complexa, uma vez que, no motor de indução trifásico não existe um circuito próprio para a excitação – ausência de “desacoplamento” natural das grandezas físicas (correntes) que controlam o campo magnético e o binário.

A capacidade de processamento necessária à implementação dos sistemas de controlo por orientação de campo é elevada, uma vez que estes se baseiam em modelos dinâmicos do motor, fortemente não lineares, expressos em referenciais distintos. Também a variação dos parâmetros do motor (em particular, a resistência rotórica) tem importância determinante na eficácia destes sistemas de controlo.

Os conversores de potência mais utilizados baseiam-se em IGBT’s (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), sendo as tensões aplicadas ao motor obtidas por modulação de largura de impulsos (PWM).

Os sistemas de controlo são actualmente baseados em processadores digitais de sinal (DSP).

A Figura 4 apresenta a estrutura dos inversores mais comuns.

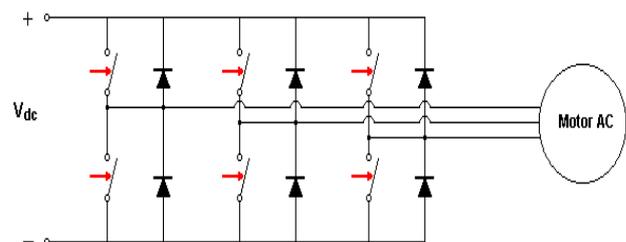


Figura 4 – Inversor de Motor de Indução Trifásico
(setas a vermelho: semicondutores de potência controlados)

Como referido, aos comportamentos dinâmicos exigidos, acresce também os elevados rendimentos associados aos fluxos de energia – modo motor e frenagem regenerativa.

São características fundamentais a garantir pelos sistemas de controlo, que continuam a ser alvo de investigação.

3.3. Motor Síncron de Ímanes de Permanentes

Estes motores, designados na literatura anglo-saxónica por “*permanent magnet brushless AC motors*”, apresentam uma configuração estatórica semelhante à das máquinas AC polifásicas convencionais.

A principal diferença reside no rotor, onde o enrolamento de excitação não existe, bem como o sistema de anéis e escovas, sendo substituído por ímanes permanentes com elevadas densidades de energia, em resultado dos progressos obtidos nas últimas décadas neste domínio.

Actualmente, são de destacar os ímanes baseados em elementos de terras raras, em particular, ligas de neodímio, ferro e boro (Nd-Fe-B).

Relativamente aos motores síncronos convencionais, têm maiores densidades de potência (redução de peso e volume), melhores rendimentos (eliminação das perdas rotóricas), maior robustez e fiabilidade (ausência de anéis e escovas).

Em relação a estas últimas, estão ao nível dos motores de indução trifásicos, tendo ainda melhores rendimentos e maiores densidades de potência [8].

A Figura 5 apresenta dois cortes seccionais de configurações destes motores.

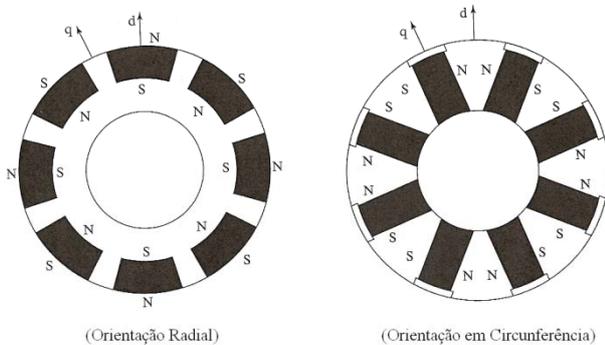


Figura 5 – Motor Síncrono de Ímanes Permanentes [8]

Os ímanes são colocados no interior da estrutura rotórica.

Por um lado, torna possíveis velocidades mais elevadas, uma vez que a fixação dos ímanes permite suportar forças centrífugas mais elevadas; por outro lado, esta configuração dota este tipo de motores de características anisotrópicas ($L_d \neq L_q$), mais concretamente, anisotropia inversa ($L_d < L_q$).

Onde:

L_d coeficiente de auto-indução longitudinal do enrolamento induzido;

L_q coeficiente de auto-indução transversal do enrolamento induzido.

Deste modo, o binário desenvolvido tem duas componentes: uma resultante da interacção do campo magnético fixo e do campo de reacção do induzido; uma segunda componente resultante do binário de anisotropia.

Assim, na zona de funcionamento com binário constante (baixas velocidades) – Figura 3 – são obtidos elevados valores de binários.

Estes são motores com elevadas densidades de binário.

Os conversores de potência mais usuais assemelham-se aos anteriores, com tensões de alimentação reguladas pela tecnologia PWM.

Os sistemas de controlo são baseados no controlo vectorial – controlo do ângulo de binário.

A presença do campo constante do rotor não torna possível o funcionamento no modo de enfraquecimento de campo, através dos sistemas de controlo usuais nas máquinas síncronas convencionais. Assim, o funcionamento na zona de velocidades elevadas (Figura 3) implica controlar a componente desmagnetizante do campo de reacção do induzido, em fase com a posição do campo rotórico (componente longitudinal – eixo d).

O desenvolvimento de novas estratégias de controlo das componentes da reacção do induzido – eixos d, q – (por ex., com maior imunidade às variações dos parâmetros do motor), que podem incluir novas configurações de máquinas de ímanes permanentes, continua a ser alvo de interesse da investigação, com vista a melhorar as suas características [8].

Tal como os motores “brushless” DC, caracterizam-se por distribuições de campo no espaço rectangulares. São máquinas anisotrópicas, cujo princípio de funcionamento assenta no desenvolvimento de um binário de relutância.

Apresentam excelentes características para a tracção – binários muito elevados nas baixas velocidades e zona de funcionamento com potência constante caracterizada por intervalos alargados de velocidades.

Os conversores de potência utilizados apresentam características próprias: usualmente, existem dois semicondutores de potência por fase (por ex., IGBT’s, MOSFET’s), o que poderá implicar um elevado número de semicondutores no conversor, no caso de motores com elevado número de fases. No entanto, como as correntes do estator têm forma rectangular (trapezoidal), as perdas de comutação nestes conversores são bastante inferiores às que ocorrem nos motores de indução e síncronos de ímanes permanentes. Isto permite a utilização de semicondutores com valores nominais mais baixos, podendo compensar o acréscimo do número.

Os sistemas de controlo são bastante complexos, atendendo aos níveis de saturação que ocorrem no circuito magnético, particularmente, nas extremidades dos pólos do estator.

O binário desenvolvido não é constante; existe uma componente alternada (“ripple”), principalmente nas velocidades baixas, que tende a diminuir com o número de fases do motor. Uma outra desvantagem é o ruído acústico. Aqui, as componentes mecânicas do motor têm também um papel importante na sua diminuição [10].

3.6. Análise Comparativa dos Diferentes Sistemas

Pelas razões já apresentadas, a utilização dos motores DC convencionais nos veículos eléctricos encontra-se cada vez mais limitada, praticamente nas aplicações de pequena potência.

Como tal, far-se-á em seguida, uma síntese das características dos sistemas baseados em motores AC, anteriormente apresentados.

a) Robustez e simplicidade

Os sistemas com motores de indução trifásico e de relutância comutada apresentam maior robustez e fiabilidade, com menor necessidade de operações de manutenção.

b) Rendimento, densidade de Potência e binário

Os motores de ímanes permanentes têm os melhores rendimentos, bem como densidades de potência e binário, em particular, o motor “brushless” DC. De destacar também o motor de relutância comutada em termos de densidade de binário.

c) Custo

Os motores de ímanes permanentes são os mais caros, essencialmente, devido ao custo dos ímanes permanentes.

d) Conversores de potência e sistema de controlo

Os conversores dos motores de indução trifásicos e dos motores síncronos de ímanes permanentes apresentam estruturas semelhantes; os seus sistemas de controlo assentam no controlo vectorial, embora nos primeiros (controlo por orientação de campo) a sua implementação seja mais complexa, atendendo à influência que a variação dos parâmetros do motor tem na sua eficácia. Nos motores de ímanes permanentes, o funcionamento no modo de enfraquecimento de campo implica a utilização de estratégias próprias.

Os conversores dos motores de relutância comutada incluem, normalmente, um maior número de semicondutores de potência (interruptores controlados), considerando o mesmo número de fases. Atendendo às não linearidades do circuito magnético destes motores, os sistemas de controlo são bastante complexos.

e) Desempenhos

Os motores DC “brushless” e os motores de relutância comutada desenvolvem binários mais elevados nas baixas velocidades, com grandes intervalos de velocidade no

funcionamento com potência constante. Apresentam excelentes desempenhos dinâmicos, podendo prescindir da caixa de velocidades.

Como foi referido, a classificação dos sistemas DC, com base nos critérios apresentados, é muito inferior à dos sistemas AC, com excepção para os custos e conversores de potência.

4. CONCLUSÕES

Os constrangimentos energéticos presentes nas últimas décadas, quer ao nível da limitação de recursos, quer pelos impactos ambientais associados às fontes convencionais, tornam as alternativas de transportes baseadas na propulsão eléctrica cada vez mais consistentes.

Os motores DC foram os primeiros a ser aplicados na tracção eléctrica, devido às suas características naturais e simplicidade dos sistemas de controlo. Os elevados níveis de manutenção exigidos, densidades de potência e rendimentos relativamente baixos, a par da evolução dos conversores de potência e sistemas de controlo de motores AC, conduziram à preferência por estes últimos.

O motor de indução trifásico, amplamente utilizado no sector industrial pela sua robustez, fiabilidade e custo, é também uma opção clara para a tracção, atendendo aos bons desempenhos dinâmicos conseguidos através do controlo vectorial.

Os motores de ímanes permanentes e de relutância comutada têm vindo a ganhar terreno em relação ao motor de indução trifásico. Com efeito, aliam a fiabilidade deste a melhores rendimentos, densidades de potência e binário, e elevadas gamas de velocidade de funcionamento. Como desvantagens, o custo (motores de ímanes permanentes) e sistemas de controlo complexos (motores de relutância comutada). Os sistemas baseados nestes motores apresentam, actualmente, o maior potencial de desenvolvimento e de aplicações futuras.

A aceitação e proliferação dos veículos eléctricos dependerão de múltiplos factores, sendo de destacar os sociais, ambientais, económicos e tecnológicos. O papel dos estados de cada país (por ex., através de incentivos fiscais para aquisição de veículos eléctricos) e dos fabricantes de automóveis (segurança, fiabilidade, conforto, desempenhos) assumirá importância crucial.

A revitalização dos veículos eléctricos implica necessidades de desenvolvimentos em múltiplos domínios científicos e tecnológicos, tais como: autonomia de alimentação, electrónica de potência, máquinas eléctricas e sistemas de controlo.

O desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia com maior autonomia será determinante para a proliferação, a curto prazo, dos veículos híbridos e, a médio/longo prazo, dos veículos puramente eléctricos.

Bibliografia

- [1] Situ, Lixin, "Electric Vehicle Development: The Past, Present & Future", 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2009.
- [2] Gulhane, Mr. Vidyadhar , et al., "A Scope for the Research and Development Activities on Electric Vehicle Technology in Pune City", IEEE, 2006.
- [3] Chan, C.C., "An Overview of Electric Vehicle Technology", Proceedings of the IEEE, Vol. 81, Nº9, September 1993.
- [4] Chan, C.C., "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles", Proceedings of the IEEE, Vol. 95, Nº4, April 2007.
- [5] Nanda, Gaurav, Kar, Narayan, "A Survey and Comparison of Characteristics of Motor Drives Used in Electric Vehicles", IEEE, 2006.
- [6] Naunin, Dietrich, "Electric Vehicles", IEEE, 1996.
- [7] Weiss, Helmut, "Revitalization, Performance Measurement, and Improvement of Electric Vehicles", IEEE, 2008.
- [8] Krishnan, R., "Electric Motor Drives – Modeling, Analysis and Control", Prentice Hall, 2001.
- [9] Chan, C.C, et al., "Novel Permanent Magnet Motor Drives for Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.43, nº2, April 1996.
- [10] Bill Drury, "The Control Techniques Drives and Control Handbook", The Institution of Electrical Engineers, 2001.