

# Aplicação de Motores Síncronos de Ímanes Permanentes e Motores de Indução em Veículos Elétricos: Comparação e Perspetivas de Evolução.

## Resumo

*Os sistemas de propulsão baseados em motores síncronos de ímanes permanentes (MSIP) têm sido considerados como a opção mais promissora para os veículos híbridos (VH) e elétricos (VE). A situação atual relativa às reservas e custos dos elementos de terras-raras poderá trazer algumas alterações nesta tendência; a opção por motores que prescindem destes elementos poderá trazer um novo estímulo à aplicação dos motores de indução neste domínio.*

*Este artigo procura apresentar uma análise comparativa entre MSIP e motores de indução (MI) num espectro alargado de velocidades de funcionamento, com especial destaque para os seus desempenhos energéticos. Começa-se por abordar as características gerais de comportamento exigidas aos VE, que definem os múltiplos cenários de funcionamento que poderão ser impostos aos motores. Em seguida, são focadas as principais características de ambas as máquinas, procurando realçar as vantagens e desvantagens mais relevantes, no contexto dos VE. Com base nos regimes de funcionamento a que serão submetidos, analisam-se as diferenças dos rendimentos naturais de ambos os motores. Para os MI é também abordado o importante tema dos algoritmos de minimização de perdas, com vista ao aumento dos rendimentos em regimes de carga onde o desempenho destas máquinas é inferior.*

## 1. Introdução

A dependência dos meios de transporte sobre os combustíveis fósseis, aliada à limitação dos impactos ambientais, tem promovido, nos últimos anos, um crescente investimento no desenvolvimento de alternativas mais eficientes e ecológicas. Os VH (sistema de propulsão composto por um motor de combustão interna (MCI), auxiliado por motor elétrico) e os VE (sistema de propulsão composto por motor(es) elétrico(s)) têm surgido como uma alternativa aos veículos convencionais, baseados em MCI –

sobretudo os primeiros. Atualmente, a sua expressão é já bastante significativa: nos últimos anos, os principais fabricantes de automóveis têm vindo a desenvolver e comercializar vários modelos híbridos [1], [2].

Uma questão essencial é a escolha do tipo de motor elétrico, o qual deverá responder a exigentes requisitos impostos por diferentes ciclos de condução. São de destacar: bons desempenhos dinâmicos com elevados níveis de eficiência energética (numa ampla gama de variação de binário-velocidade, incluindo as frenagens), elevadas capacidades de sobrecarga, bem como densidades de potência e fiabilidade, naturalmente com custos que tornem viável a sua implementação [3]. Tais exigências colocam múltiplos desafios ao desenvolvimento e aplicação dos motores elétricos.

Num artigo anterior [4], foram focados os principais tipos de motores atualmente mais promissores:

- MI;
- MSIP;
- Motores de relutância comutada (MRC).

A tecnologia associada aos MI apresenta um nível de maturidade muito elevado, não significando que esteja esgotado o espaço para novos desenvolvimentos. Fundamentalmente, a aplicação de novos materiais e alterações de projeto [5], [6], bem como a implementação de métodos de limitação de perdas [7], apresentam um potencial considerável de desenvolvimento. Por seu lado, os MSIP e os MRC são conceções mais recentes, cujas aplicações para VH e VE têm merecido um enorme interesse da parte da comunidade científica e dos fabricantes: a vasta quantidade de trabalhos publicados nos últimos anos confirma este facto, de que são exemplos as referências [8], [9].

Até ao momento, as opções têm vindo a incidir, fundamentalmente, nos MSIP e MI. Por este motivo, optou-se por analisar principalmente estas máquinas. Em termos comparativos, os primeiros apresentam maior rendimento nominal e densidade de binário, juntamente com excelentes comportamentos dinâmicos.

Como tal, os MSIPs têm sido encarados como a escolha mais promissora para os VH e VE pela generalidade dos fabricantes. São, no entanto, de referir as exceções da General Motors e da Tesla, que optaram pelo MI [2].

As recentes pressões impostas pela China sobre os elementos de terras-raras (*atualmente, este país suporta cerca de 97% da procura mundial destes materiais*), tanto ao nível dos preços, como das quantidades exportadas, começam a colocar em causa a preponderância dos sistemas de propulsão baseados nos MSIP [10].

Com efeito, os ímanes permanentes que apresentam atualmente as maiores densidades de energia são compostos por estes materiais.

Ainda recentemente, a Toyota anunciou que o novo RAV4 EV virá equipado com MI [2].

O presente artigo procura efetuar uma caracterização dos MSIP e MI, realçando as principais vantagens e desvantagens, sobretudo ao nível dos rendimentos.

À luz do contexto atual da exploração e comercialização dos materiais de terras-raras, procura-se referir as tendências que parecem indiciar algumas mudanças no papel que estas máquinas poderão vir a desempenhar no contexto da mobilidade elétrica (VH e VE). Na secção 2 são abordados os desempenhos espectáveis de um VE, focando as exigências impostas aos respetivos motores elétricos.

A secção 3 apresenta alguns aspetos construtivos dos MI e MSIP, bem como vantagens e desvantagens relativas na aplicação em VE. As características dos seus rendimentos são o principal destaque.

Neste sentido, a secção 4 refere uma ferramenta gráfica muito disseminada, com vista à caracterização do rendimento de um motor em toda a sua gama de funcionamento: os mapas de eficiência. Pela sua relevância neste domínio, a secção 5 faz uma breve referência aos algoritmos de minimização de perdas para MI. Por último, na secção 6 são apresentadas algumas conclusões.

## 2 Características de desempenho dos e VE

Em termos gerais, os requisitos comportamentais dos VE caracterizam-se por elevados binários na zona das baixas velocidades, estando a gama das altas velocidades associada a funcionamentos com potência constante (Figura 1).

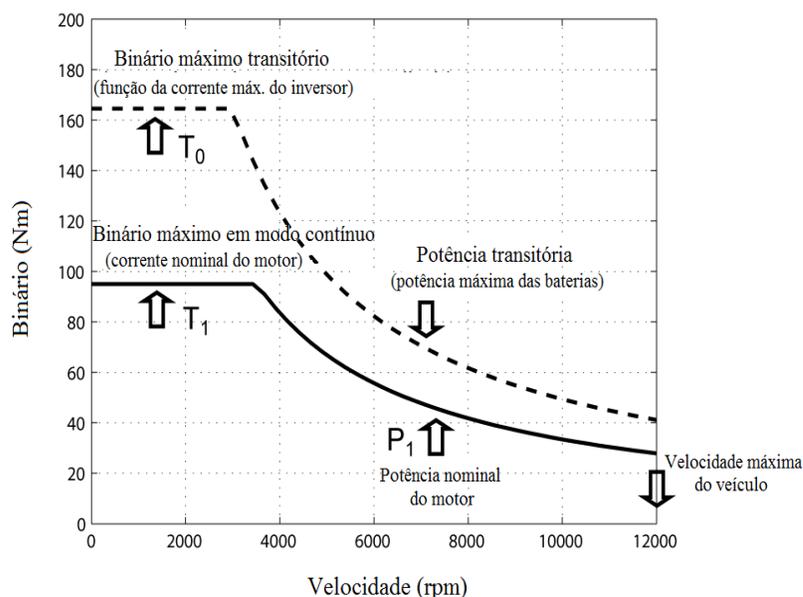


Figura 1 – Requisitos de um Veículo Elétrico [11]

Naturalmente, as características dos percursos previstos (ciclos de condução) são fundamentais na fixação daquelas grandezas: do binário máximo disponível (modo contínuo) dependerá o desempenho do veículo em subidas; em trajetos planos, a velocidade máxima atingida (modo contínuo) é determinada pela potência fixada para a gama de altas velocidades.

A capacidade de funcionamento em sobrecarga dos motores elétricos (por períodos limitados, tanto menores quanto maior o valor da sobrecarga) é uma mais-valia muito relevante sobre os MCI [11]. Com efeito, há a considerar um acréscimo do binário máximo e potência máxima desenvolvidos: o funcionamento em sobrecarga está representado pela característica a tracejado da Figura 1.

Surtem vantagens tanto em modo motor (*possibilidade de desenvolver elevados binários em toda a gama de velocidades  $\Rightarrow$  maiores acelerações, bem como picos de velocidade*), como em modo frenagem (*aumento da capacidade de frenagem eletromagnética do veículo*). É, no entanto, de realçar a extrema importância das características do inversor do motor, bem como das baterias do sistema. Em termos práticos, o acréscimo do binário máximo será limitado pela corrente nominal do inversor; por outro lado, no aumento da potência máxima devem estar presentes as limitações das baterias [11]; embora tenham elevadas densidades de energia (Wh/Kg), apresentam baixas densidades de potência (W/Kg).

### 3 MI e MSIP em VE: Análise Comparativa

#### 3.1 Motores de Indução

Os MI com rotor em gaiola apresentam elevada robustez e simplicidade, aliadas a custos comparativamente mais baixos. Em termos de controlo dinâmico, os sistemas baseados no controlo vetorial por orientação de campo – principalmente, do campo rotórico – encontram-se, atualmente, muito disseminados e com custos bastante atrativos [8].

Os tipos de perdas mais relevantes nestas máquinas são as perdas por efeito de Joule e as magnéticas. Na zona de enfraquecimento de campo (velocidades elevadas), as perdas magnéticas são naturalmente menores. Este é o principal motivo para os valores mais elevados do rendimento se encontrarem em regimes de funcionamento associados a velocidades superiores à nominal; pelo contrário, o rendimento é menor na gama das baixas

velocidades (entre o repouso e a velocidade nominal), em particular com cargas baixas. Nesta gama de velocidades sobressaem as vantagens do MSIP. Atendendo à maior dificuldade em dissipar as elevadas perdas no ferro e por efeito de Joule que podem ocorrer no MI (poderá justificar a inclusão de sistemas de ventilação forçada), a capacidade de sobrecarga do MI aparece limitada, em comparação com o MSIP [3].

No contexto dos VH e VE, este é um aspeto de grande relevância em ambos os modos de funcionamento (motor e frenagem). Estas distribuições de perdas decorrem da regulação convencional do campo magnético, implícita na Figura 1.

É de realçar o facto de, na zona de binário máximo constante, o campo magnético ser mantido no seu valor nominal; voltar-se-á a este aspeto na secção 5.

No caso de ocorrer uma falha na alimentação do motor (problema no inversor), a tensão aos seus terminais é nula (após a extinção dos transitórios eletromagnéticos), uma vez que a máquina fica desmagnetizada. Tal não acontece com os MSIP. Tratando-se de um aspeto diretamente relacionado com a segurança do veículo e seus utilizadores, é, pois, uma vantagem importante dos MI face a estes últimos [8].

#### 3.2 Motores Síncronos de Ímanes Permanentes

Estas máquinas são dotadas de ímanes permanentes no rotor, baseados em terras-raras (*ligas compostas por neodímio (Nd), ferro (Fe) e boro (B)*). Sendo ímanes com elevadas densidades de energia, obtêm-se máquinas mais compactas em relação aos MI e com melhores fatores de potência.

A ausência de enrolamentos rotóricos permite a eliminação das perdas por efeito de Joule no rotor (em regime permanente), sendo possível alcançar elevados rendimentos nominais, superiores aos do MI. Para estes regimes de funcionamento são de realçar os valores consideráveis das perdas no ferro do estator, atendendo às características dos ímanes utilizados [3].

O rendimento é fundamentalmente elevado na vizinhança da velocidade nominal. Com efeito, o enfraquecimento do campo magnético está associado à regulação da componente  $i_d$  da corrente estatórica, responsável pela criação de um campo magnético de reação do induzido que se opõe ao campo indutor desenvolvido pelos ímanes permanentes. Como consequência, a gama de velocidades elevadas (zona de enfraquecimento do campo) é caracterizada por elevados valores de  $i_d$  (*componente longitudinal da corrente do estator*), tanto maiores quanto a velocidade: embora as perdas no ferro do estator diminuam, as perdas por efeito de Joule são agora preponderantes, levando a diminuições do rendimento.

Importa ter presente que elevados valores de  $i_d$  poderão conduzir à desmagnetização dos ímanes; por outro lado, sendo estes muito sensíveis à temperatura, a sua monitorização no interior da máquina é fundamental [3]. Deste modo, as sobrecargas que lhe são impostas deverão ter sempre estes dois aspetos em consideração, sobretudo na gama das altas velocidades.

Contrariamente aos MI, no caso de haver uma falha no inversor, poderá surgir uma sobretensão nos terminais estatóricos da máquina. O valor desta sobretensão depende da velocidade, pelo que na gama das altas velocidades a possibilidade de ocorrência destas falhas representa um sério risco para os ocupantes do veículo, bem como para os respetivos equipamentos. Existem duas configurações distintas, tal como indicado na Figura 2:

- ímanes montados na superfície do rotor (SR);
- ímanes colocados no interior do rotor (IR).

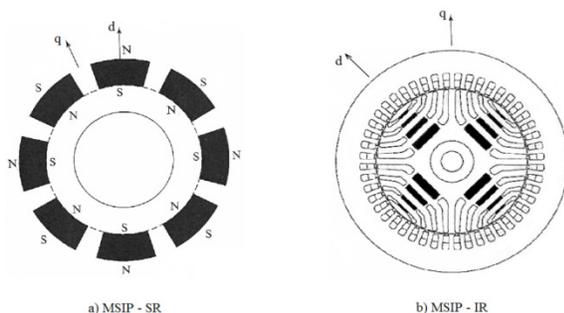


Figura 2 – Variantes Construtivas de MSIP: a) [12], b) [8]

Em termos construtivos, há a salientar a maior vulnerabilidade às forças centrífugas dos ímanes na variante SR (particularmente crítico nas altas velocidades). No caso IR, é necessária a inclusão de barreiras de fluxo (Figura 2-b)), o que introduz uma complexidade superior na sua manufatura [11].

As consequências mais importantes das diferenças construtivas das variantes anteriores são as seguintes [4]:

- O circuito magnético IR apresenta características anisotrópicas ( $L_d \neq L_q$ ) [ $L_d$ -coeficiente de autoindução longitudinal do enrolamento induzido;  $L_q$ -coeficiente de autoindução transversal do enrolamento induzido], mais concretamente, **anisotropia inversa** ( $L_d < L_q$ ), uma vez que a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) dos ímanes é aproximadamente igual à do ar ( $\mu_0$ );
- Como tal, o binário desenvolvido tem duas componentes: uma resultante da interação do campo magnético fixo e do campo de reação do induzido; uma segunda componente resultante do binário de anisotropia  $\Rightarrow$  maior capacidade de sobrecarga mecânica em toda a gama de velocidades, bem como menor influência do aumento de temperatura, uma vez que este ocorre essencialmente no estator [8], [11].

Torna-se claro o maior potencial de aplicação da configuração IR. É também de salientar que as sobretensões associadas a falhas no inversor são menores, comparativamente à configuração SR. Com efeito, o valor do fluxo magnético dos ímanes é menor no caso IR, atendendo à anisotropia da máquina [11].

Tabela 1 – Comparação entre MI e MSIP [3]

	MI	MSIP
Densidade de Potência	Média	Muito Boa
Rendimento Nominal	Bom	Muito Bom
Custos	Muito Bom	Mau
Fiabilidade	Muito Bom	Média
Maturidade Tecnológica	Bom	Média

#### 4 Mapas de Eficiência

Com vista à caracterização do desempenho energético de uma determinada máquina (não necessariamente elétrica), é frequente a utilização de mapas de eficiência. Trata-se de representações bidimensionais (curvas de nível) do rendimento da máquina no plano (binário, velocidade). É importante referir que são representações estáticas, isto é, os valores do rendimento estão associados apenas a regimes permanentes de funcionamento. A título de exemplo, a Figura 3 apresenta um mapa de eficiência de um MI.

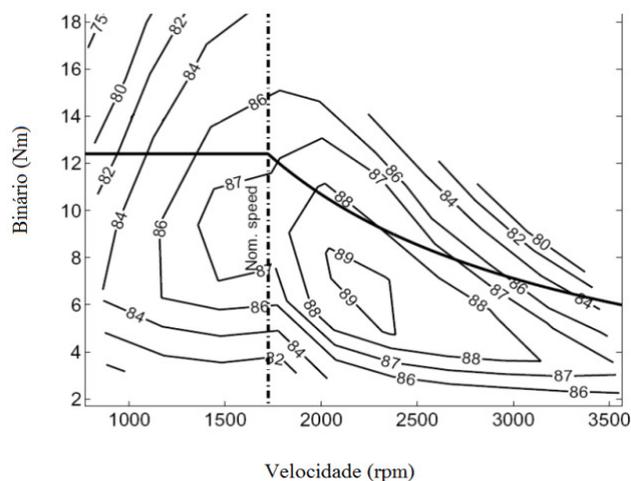


Figura 3 – Mapa de eficiência do motor de Indução com regulação de fluxo convencional [13]

Na Figura 4 estão representadas as zonas de rendimentos elevados (>85%), tipicamente associadas aos MSIP, MI e MRC.

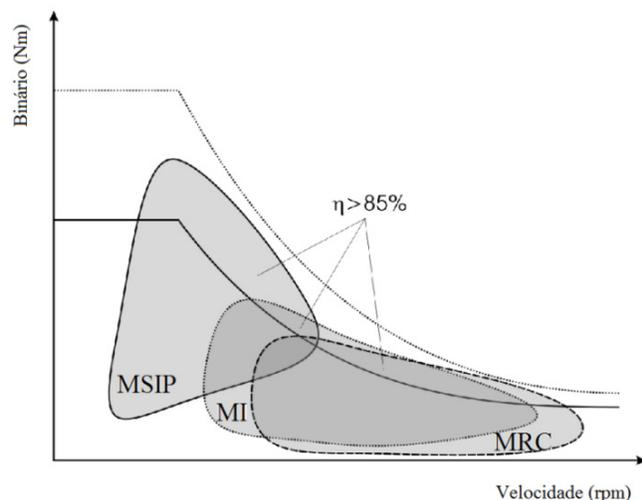


Figura 4 – MSIP, MI e MRC: Zonas de funcionamento com elevados rendimentos [3]

Naturalmente, serão as características do ciclo de condução que delimitam a zona de funcionamento no plano (*binário, velocidade*). No caso do MSIP, é visível que na vizinhança da velocidade nominal e na parte inicial da zona de enfraquecimento de campo estão concentrados os valores de rendimento mais elevados; no caso do MI, os maiores rendimentos situam-se entre as áreas correspondentes ao MSIP e ao MRC (mais próxima deste último), na zona de enfraquecimento de campo. Daqui ressalta que o tipo de percurso em causa (citadino, estrada ou misto) tornará mais favorável a opção por um determinado tipo de motor.

Poder-se-ão considerar algumas formas de contornar as limitações anteriores. Uma hipótese evidente será a de incluir um sistema de engrenagens, possibilitando o funcionamento do motor em regimes de carga com elevados rendimentos, na gama de velocidades pretendida [13]. No caso dos MSIP, há também a vantagem de poder ser eliminada a implementação de algoritmos de enfraquecimento de campo (regulação da componente  $i_d$  da corrente estática), os quais implicam uma maior complexidade em termos de controlo, bem como o perigo de desmagnetização. No entanto, é bem conhecida a influência da massa dos VH e VE sobre as suas características (dinâmicas, autonomia, maior complexidade,...). Como tal, compreendem-se os esforços que têm vindo a ser desenvolvidos na procura de soluções que possam simplificar a estrutura mecânica, sobretudo nos VE [13].

De facto, na literatura especializada há inúmeros exemplos de trabalhos sobre esta temática, desenvolvidos nos últimos anos. A conceção/ novos materiais aplicados nos motores [6] e o desenvolvimento de algoritmos de minimização de perdas [14] enquadram-se nos esforços referidos.

#### 5 Algoritmos de Minimização de Perdas para MI

Embora exista uma grande quantidade de algoritmos de minimização de perdas (AMP) que têm sido desenvolvidos para os MI, MSIP e MRC, este é um assunto que continua a merecer a atenção de vários investigadores – veja-se o elevado número de exemplos referidos em [7] e [14], apenas para MI.

Atendendo ao reforço do interesse dos MI em VE, apresenta-se uma breve referência aos AMP para estas máquinas.

Em termos gerais, os AMP assentam na resolução de problemas de otimização, pelo que, dependendo da formulação matemática, há diversas metodologias que podem ser aplicadas na sua resolução (determinísticas, heurísticas, lógica difusa, “machine learning”, ...). A velocidade de convergência (determinante em aplicações em tempo-real) e precisão da solução, bem como a sensibilidade à variação dos parâmetros do motor são fatores críticos a considerar no desenvolvimento dos AMP [14].

A Figura 5 apresenta uma estrutura relativa à classificação de AMP: são de destacar os métodos “Offline” e “Online”.

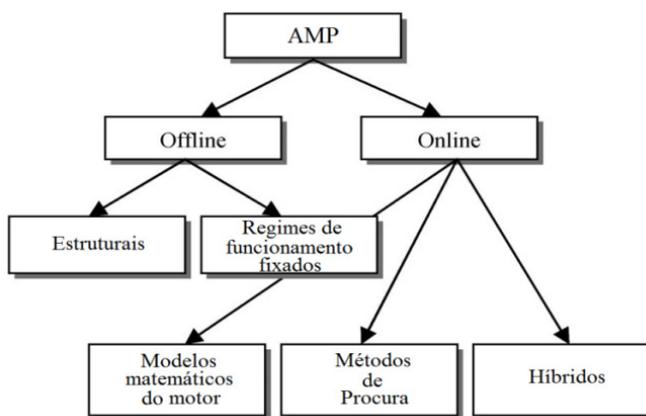


Figura 5 – Categorias de AMP para MI [14]

Os métodos “Offline” assentam na otimização das características da máquina (melhorias no projeto, utilização de materiais de melhor qualidade) ou no conhecimento prévio de regimes de funcionamento previstos para o motor.

Estando a máquina em funcionamento, não é possível qualquer regulação do valor das perdas. Como tal, a eficácia da sua aplicação está dependente da verificação das condições inicialmente previstas, pelo que não são as metodologias convenientes para aplicações em VH e VE.

As metodologias “Online” baseiam-se no conhecimento dos valores instantâneos – *por medição direta ou através de*

*estimadores de estado* – das grandezas físicas que caracterizam o funcionamento do motor (tensões, correntes, fluxos magnéticos, velocidade, ...).

Podem ser agrupadas do seguinte modo [7], [14]:

- Algoritmos baseados em modelos matemáticos do motor (estáticos ou dinâmicos), a partir dos quais se extraem expressões analíticas para as perdas – *funções de custo a minimizar*. A influência das variações dos seus parâmetros é determinante na eficácia destes algoritmos. A monitorização de tais variações representa um desafio complexo (em geral, não sendo possível a sua medição, procura-se obter estimações dessas variações). Como tal, o desenvolvimento de AMP com menor sensibilidade às alterações dos parâmetros reveste-se de grande importância.
- Métodos de procura (*search controllers of minimum losses*). Não dependem de qualquer modelo do motor, pelo que são imunes às variações dos seus parâmetros. Para um determinado valor de carga (definida pelo binário e velocidade), a potência absorvida é reduzida para o valor mínimo que garanta os requisitos impostos pela carga. Em geral, o tempo de convergência da solução é superior ao dos algoritmos anteriores.
- Métodos híbridos (combinações dos anteriores, com vista a reunir as vantagens de ambos).

A zona de baixas velocidades, onde tipicamente o fluxo é mantido no valor nominal, é a que apresenta maior potencial para aumentos do rendimento, tal como é perceptível na figura 4. Em particular, para cargas reduzidas, aquele valor de fluxo é normalmente excessivo, pelo que se torna possível reduções apreciáveis nas perdas no ferro, sem comprometer as condições impostas pela carga.

Com efeito, uma boa parte dos AMP desenvolvidos para MI assenta na otimização do fluxo magnético nas velocidades mais baixas. Deste modo, torna-se possível o funcionamento com elevados níveis de rendimento, numa extensa gama de velocidades.

## 6 Conclusões

As aplicações associadas à tração impõem cenários de funcionamento muito díspares entre si. Independentemente do tipo de motor elétrico selecionado, haverá a considerar necessidades de funcionamento sob múltiplos regimes de carga, incluindo sobrecargas, nos modos motor e frenagem, com rendimentos necessariamente distintos. As condições impostas aos motores nestas aplicações são muito exigentes, a vários níveis (elétricas, térmicas, mecânicas, ambientais, ...).

Até agora, os MSIP têm sido a escolha preferencial para os sistemas de propulsão dos VH e VE, principalmente dos primeiros. As elevadas densidades de potência e binário, bem como os altos rendimentos nominais, estão na base desta opção.

Entre outras opções, os MI possuem uma sólida tecnologia de fabrico, aliada a várias características (simplicidade, robustez e custo) que os tornam sérios candidatos para a propulsão dos VH e VE.

A atual situação relativa ao comércio dos elementos de terras-raras (preços elevados e dificuldade em aceder a estas matérias primas), poderá mudar o posicionamento dos MSIP como primeira escolha para os sistemas de propulsão elétrica. É de prever, a curto e médio prazo, um aumento do interesse por motores que prescindem de terras raras, de que são exemplos os MRC e os MI. Entre vários aspetos, a melhoria dos rendimentos e densidades de potência dos MI (*conjugação da fase de projeto com a utilização de novos materiais*) e a procura de novos AMP (*permitindo aumentar o espectro das velocidades associadas a elevados rendimentos*) poderão ser ainda mais estimulados, com vista a fortalecer a opção pelos MI na propulsão elétrica.

## Bibliografia

- [1] Bucherl, Dominik et al. "Comparison of Electrical Machine Types in Hybrid Drive Trains: Induction Machine vs. Permanent Magnet Synchronous Machine", Proceedings of the 18th International Conference on Electrical Machines, 2008.
- [2] Miller, Peter "xEV market trend and prospect", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012.
- [3] Finken, Thomas et al. "Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles.", Proceedings of the 18th International Conference on Electrical Machines, 2008.
- [4] Melo, Pedro "Características e Tipos de Motores em Veículos Eléctricos", Revista Neutro à Terra, Nº 4, Outubro de 2009.
- [5] Bazzi, Ali M., Krein, Philip T. "Comparative Evaluation of Machines for Electric and Hybrid Vehicles Based on Dynamic Operation and Loss Minimization", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010.
- [6] Morimoto, Masayuki "Rare Earth Free, Traction Motor for Electric Vehicle", IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012.
- [7] Lim, S. and K. Nam "Loss-minimising control scheme for induction motors. IEE Proceedings - Electric Power Applications", Vol.151, No.4, pp. 385-397. 2004.
- [8] Pellegrino, Gianmario et al. "Comparison of Induction and PM Synchronous motor drives for EV application including design examples", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.23, No99, pp. 107-115, 2012.
- [9] Chin, Y.K., Soulard, J. "A Permanent Magnet Synchronous Motor for Traction Applications of Electric Vehicles", IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2003.
- [10] Poole, R., "Rare earth metals in short supply?", IET E&T, Vol. 7 issue 4, 23rd April 2012, <http://eandt.theiet.org/magazine/2012/04/releasingthe-rare-earths.cfm>
- [11] Vagati, A. et al. "Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application", XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010.
- [12] Krishnan, R., "Electric Motor Drives – Modeling, Analysis and Control", Prentice Hall, 2001.
- [13] Amrhein, Marco et al. "Evaluation of a Re-Rated Induction Machine", IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.
- [14] Bazzi, Ali M., Krein, Philip T. "Review of Methods for Real-Time Loss Minimization in Induction Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.46, No.6, pp. 2319-2328, 2010.