

MOTOR DE TRAÇÃO PARA FORMULA STUDENT: A MELHOR OPÇÃO

Resumo

A escolha de um motor para veículos de tração elétrica é uma das principais tarefas ao projetar um carro de competição elétrico, uma vez que o motor é o elemento que especifica as características dinâmicas do veículo. Neste artigo procede-se a uma análise dos diferentes tipos de motores utilizados atualmente na mobilidade elétrica, sendo que o mais favorável para a implementação no sistema propulsor elétrico do Formula Student é o motor síncrono de ímãs permanentes, o que garante elevada performance do veículo. É desenvolvido o estudo da propulsão elétrica, através do cálculo das forças dinâmicas que atuam num veículo, para se determinar as características mecânicas do motor elétrico e se optar pela tecnologia mais eficiente. É apresentada uma possível solução técnica do motor elétrico a implementar no sistema propulsor, selecionado a partir dos resultados obtidos da propulsão elétrica do Formula Student.

1 Introdução

A utilização de motorização elétrica em veículos, acarreta inúmeras vantagens face aos veículos providos de motores de combustão interna, nomeadamente, a possibilidade inerente aos motores elétricos de produzirem o binário máximo a partir do repouso, os seus tempos de resposta reduzidos, a possibilidade de regenerar a energia produzida durante a travagem, o controlo independente de cada roda e consumo (indireto) de energia disponível em fontes renováveis [1].

A Formula Student é uma competição automóvel entre universidades mundiais, organizada pelo *Institution of Mechanical Engineers*, com parceria da organização mundial *Society of Automotive Engineers*. Refere-se à conceção, desenho e fabrico de um pequeno Formula 1, tal como se pode visualizar na Figura 1, nas categorias de veículo elétrico, híbrido e combustão.

O projeto Formula Student é gerido e realizado integralmente por alunos com o propósito de complementar a formação académica, gerando assim profissionais bem preparados para o futuro, nomeadamente no ramo da indústria automóvel.

Este artigo expõe as diferentes tecnologias de motores passíveis de serem utilizados em veículos elétricos, efetuando-se, de seguida, uma seleção da melhor solução do motor a instalar no sistema propulsor elétrico do Formula Student. É igualmente apresentado o algoritmo da propulsão elétrica do veículo de competição, o que permite determinar as características mecânicas do motor a utilizar, sendo elas: a potência mecânica, a rotação e o binário, com o objetivo de exibir uma possível solução técnica a implementar no sistema propulsor do veículo.



Figura 1 – Formula Student da equipa TU Delft

2 Motores Elétricos: Critérios de Seleção

O motor elétrico é o componente principal num sistema de propulsão elétrica, sendo este um dos elementos com maior ponderação na construção de um veículo elétrico de competição.

É necessário que o motor possua boas características em alguns requisitos típicos de tração, tais como [2] e [3]:

- Alta densidade de binário e potência;

- Binário elevado em baixas velocidades para arranques rápidos e subidas;
- Ampla faixa de velocidades, incluindo regiões de binário constante e de potência constante;
- Alta eficiência na frenagem regenerativa;
- Alta eficiência sobre a ampla faixa de velocidades e binário.

Na Tabela 1, é feita uma comparação entre quatro tipos de motores elétricos, os mais utilizados atualmente na propulsão de veículos de tração elétrica, sendo eles: o motor de corrente contínua (DC), o motor de indução trifásico (IM), o motor de relutância variável trifásico (SRM) e o motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM). São apresentadas na tabela as principais características para seleção do motor a implementar no sistema propulsor elétrico do Formula *Student*. Para cada característica presente na tabela é atribuído um valor entre 1 a 5, sendo que 1 corresponde a “fraco” e 5 a “bom”. Na última linha da tabela é efetuado um somatório de todos os valores atribuídos às características de seleção de cada motor correspondente [2] e [3].

Tabela 1 – Comparação qualitativa dos quatro motores elétricos

Tipos de Motores				
Características	DC	IM	SRM	PMSM
Densidade de Potência	2,5	3,5	3,5	5
Eficiência	2,5	3,5	3,5	5
Controlabilidade	5	5	3	4
Fiabilidade	3	5	5	4
Maturidade da Tecnologia	5	5	4	4
Custo	4	5	4	3
Σ Total	 22	 27	 23	 25

Pela análise da Tabela 1, conclui-se que o PMSM é o motor apropriado para ser implementado no sistema propulsor elétrico do Formula *Student*.

Este motor garante uma elevada performance do veículo, uma vez que, possui uma alta densidade de potência e binário, bem como uma alta eficiência durante o seu funcionamento. Além disso, é um motor de pequenas dimensões e de peso reduzido, o que facilita o acréscimo deste tipo de motores no sistema de propulsão, de forma a obtermos tração dianteira, traseira ou integral [3].

3 Metodologia de Cálculo da Propulsão Elétrica

3.1 Aspectos Teóricos

Uma vez selecionado o tipo de motor a utilizar no sistema propulsor do veículo, passamos ao algoritmo da propulsão elétrica que nos permite determinar as características mecânicas do motor elétrico a implementar no Formula *Student*. Para tal, é necessário realizar os cálculos da potência mecânica, do binário e da rotação do motor [4].

A potência mecânica solicitada ao motor é determinada pela Equação (1):

$$P_{mec} = \frac{n \times T \times 2\pi}{60} \quad (1)$$

O motor deve possuir um binário suficiente para vencer a resistência ao rolamento, o arrasto aerodinâmico, a resistência à aceleração e o declive dos percursos que o veículo se destina. Estas forças que se opõem ao movimento do bólido estão representadas através do esquema da Figura 2, cujas equações se apresentam a seguir [5].

$$F_{tr} = F_{roll} + F_{up} + F_{air} + F_{in} \quad (2)$$

$$F_{tr} = \frac{\eta_{tr} \cdot T \cdot i}{r} \quad (3)$$

$$F_{roll} = f_k \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (4)$$

$$F_{up} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (5)$$

$$F_{air} = 0,5 \cdot c_x \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot V_{max}^2 \quad (6)$$

$$F_{in} = m \cdot a \cdot \sigma_r \quad (7)$$

$$\sigma_r = 1,04 + 0,0025 \cdot i^2 \quad (8)$$

$$f_k = f_0 \cdot (1 + A_f \cdot V_{max}^2) \quad (9)$$

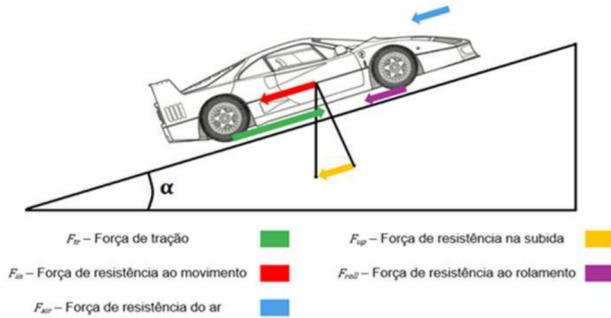


Figura 2 – Esquema das forças que atuam num veículo

Substituindo na Equação (2) pelas Equações (3), (4), (5), (6) e (7), e resolvendo em ordem ao binário, obtém-se o binário máximo do motor elétrico, de acordo com a Equação (10):

$$T = \frac{(f_k \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) + m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + 0,5 \cdot c_x \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot V_{max}^2 + m \cdot a \cdot \sigma_r) \cdot r}{\eta_{tr} \cdot i} \quad (10)$$

Geralmente, os veículos elétricos não têm uma caixa de velocidades porque o motor elétrico debita um elevado binário a baixas rotações. Estes possuem apenas um sistema de transmissão com uma única relação. Para calcular a rotação no eixo do motor utiliza-se a Equação (11):

$$n = \frac{V_{max} \cdot i \cdot 60}{r \cdot 2\pi} \quad (11)$$

A Tabela 2, representa a designação das siglas referentes às equações anteriores, assim como os respetivos valores dos coeficientes [5].

3.2 Cálculo da Propulsão Elétrica

O motor a instalar no sistema propulsor elétrico do Formula Student deve corresponder às especificações pretendidas pelo projetista, sendo elas: a aceleração e a velocidade máxima que o bólido atinge.

Tabela 2 – Tabela de siglas e coeficientes

P_{mec}	Potência mecânica que é solicitada ao motor (W)
n	Rotação no eixo do motor (RPM);
T	Binário no eixo do motor (Nm);
$\eta_{tr} = 0,9$	Rendimento do sistema de transmissão;
i	Relação de transmissão total;
r	Raio efetivo da roda (m);
f_k	Coefficiente de resistência ao rolamento do pneu numa superfície;
$f_0 = 0,015$	Coefficiente para o asfalto liso;
$A_f = 5,1 \times 10^{-4}$	Coefficiente de eficiência da velocidade na força de resistência ao rolamento (s^2/m^2);
m	Massa do carro, incluindo o peso do condutor (kg);
$g = 9,81$	Aceleração da gravidade (m/s^2);
α	Inclinação da pista ($^\circ$);
$c_x = 0,5$	Coefficiente aerodinâmico do veículo;
$\rho_{air} = 1,202$	Densidade do ar sob condições normais (s^2/m^2);
$A = 1,6$	Área frontal do veículo (m^2);
V_{max}	Velocidade máxima do veículo elétrico (m/s);
σ_r	Coefficiente de compensação das massas rotativas.

Sendo assim, é necessário definir previamente alguns valores referentes às características dinâmicas, dimensão da roda e peso do veículo, tais como [3]:

- Aceleração Média 0 aos 100 km/h – 6,17 m/s² (t=4,5 s)
- Velocidade Máxima – 120 km/h
- Raio efetivo da roda – 0,21 m
- Peso do Formula Student (incluindo o condutor) – 300 kg

Posteriormente, será necessário atribuir valores na relação de transmissão, de forma a obter os valores das quantidades desejadas do binário máximo e da rotação máxima no eixo do motor.

3.3 Apresentação da Solução Técnica

De acordo com a metodologia da propulsão elétrica, a Tabela 3 indica os valores nominais das características mecânicas do motor a selecionar para o sistema propulsor elétrico do Formula *Student*, para os parâmetros das características dinâmicas do veículo definidos na secção anterior.

Tabela 3 – Resultado da simulação da propulsão elétrica

Relação de Transmissão Total	Inclinação da Pista (°)	Binário Motor (Nm)	Velocidade Motor (RPM)	Potência Mecânica (W)
1	0	591,25	1515,76	93849,57
1,5	0	395,07	2273,64	94063,90
2	0	297,25	3031,52	94363,97
2,5	0	238,77	3789,40	94749,77
3	0	199,96	4547,28	95221,31
3,5	0	172,40	5305,16	95778,58
3,5	+2	179,25	5305,16	99581,06
3,5	+4	186,08	5305,16	103375,79
3,5	+6	192,88	5305,16	107158,15
3,5	-2	165,55	5305,16	91972,97
3,5	-4	158,70	5305,16	88168,88
3,5	-6	151,87	5305,16	84370,94

Pela análise da Tabela 3, verifica-se que o binário no eixo do motor é desmultiplexado com o aumento do valor da relação de transmissão total. A potência mecânica numa aceleração dos 0 – 100 km/h é aproximadamente 100 kW, visto que varia consoante a inclinação da pista.

A escolha do motor parte da análise dos resultados de simulação da Tabela 3, onde se conclui pelos valores nominais da potência mecânica, rotação e binário do motor.

Perante estes resultados, a melhor opção será implementar o motor EMRAX 228 *Medium Voltage LC*, dado que os valores obtidos para uma relação de transmissão total de 3,5 não excedem os valores das características mecânicas do motor elegido. Os respetivos dados técnicos do EMRAX 228 *Medium Voltage LC* estão indicados na Tabela 4 [6].

O motor síncrono de ímanes permanentes foi a melhor opção para integrar no sistema propulsor deste veículo, apesar de ser um motor de elevado custo quando comparado a outros tipos de motores.

Tabela 4 - Dados técnicos do motor EMRAX 228 *Medium Voltage LC*

EMRAX 228 Medium Voltage LC	
Potência Máxima (kW)	100
Potência 3000 – 5000 RPM (kW)	28 - 42
Binário Máximo (Nm)	240
Binário Contínuo (Nm)	125
Rotação Máxima (RPM)	5500
Eficiência (%)	92 – 98
Tipo de Ligação	Estrela

4 Conclusão

O motor síncrono de ímanes permanentes foi o motor elegido para o sistema propulsor elétrico do Formula *Student*, que apesar do seu custo mais elevado, o investimento é compensado pela sua elevada eficiência e alta densidade de potência e binário, garantindo um elevado desempenho do veículo. O cálculo da propulsão elétrica permite determinar o binário de arranque, ou seja, o binário que resulta no momento da aceleração máxima do veículo que corresponde ao esforço máximo que será imposto ao motor. O binário de arranque deve ser desmultiplexado, sendo assim fez-se um estudo do valor da relação de transmissão que proporciona uma boa relação entre o binário e a velocidade do motor EMRAX 228 *Medium Voltage LC*. O rendimento da transmissão diminui à medida que a relação de transmissão total aumenta, provocando um aumento nas perdas mecânicas.

Bibliografia

- [1] J. Pinto, "Formula Student- Sistema de Tração," 2014.
- [2] M. Zeraouia, "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion study," pp. 1-10, 5 outubro 2010.
- [3] J. Rigor, "Estudo e Desenvolvimento de Sistema Propulsor para Veículo Elétrico," Porto, 2018.
- [4] S. D. Umans, Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley, Porto Alegre: AMGH, 2014.
- [5] O. U. D.S. Korobkov, "Choice of the Traction Motor for the Electric Racing Car "Formula," pp. 1-6, 2016.
- [6] EMRAX, "EMRAX Innovative E-Motors," agosto 2018. [Online]. Available: http://emrax.com/wp-content/uploads/2017/10/user_manual_for_emrax_motors.pdf. [Acedido em 4 dezembro 2018].

BATERIAS DE IÕES DE LÍTIO, A CHAVE DA ELETRIFICAÇÃO AUTOMÓVEL

Resumo

A mobilidade da sociedade do século XXI levanta questões de sustentabilidade energética, tanto a nível da produção de energia como do seu armazenamento. As baterias de iões-lítio são um dos sistemas de armazenamento químico de energia mais relevantes da atualidade com aplicação nos mais diversos dispositivos elétricos e eletrónicos e, recentemente, nos veículos elétricos e híbridos. Comparativamente a outros sistemas, estas baterias destacam-se por serem leves e com elevado potencial elétrico, entre outras características vantajosas que se descrevem. Neste artigo são apresentadas e comparadas 3 tecnologias de baterias de iões de lítio utilizadas na indústria automóvel, com uma reflexão sobre as necessidades tecnológicas a desenvolver nos próximos anos.

Palavras Chave: Veículo Elétrico, Bateria de Iões de Lítio, LFP, NCA, NMC.

1. Introdução

A crescente preocupação com as questões ambientais tem aumentado exponencialmente o interesse na mobilidade elétrica em todo o mercado europeu, assistindo-se a uma gradual substituição dos veículos de combustão pelos veículos elétricos (VEs), como o meio rodoviário do futuro.

A importância que as baterias de iões-lítio têm no futuro da mobilidade elétrica obriga a uma análise das reservas de lítio existentes no planeta. Portugal é o país da União Europeia com as maiores reservas de lítio, e poderá ocupar um lugar destacado a nível desta matéria-prima porque 24% da produção mundial de lítio é consumido na Europa e 2% da produção mundial é atualmente fornecida por pequenas minas em Portugal [1].

A classificação dos veículos elétricos e sua divisão em categorias pode ser ter alguns contornos ligeiramente

distintos entre os autores, segundo a referência [2], os tipos de veículos elétricos existentes organizam-se em 3 categorias: veículo elétrico a baterias – BEV, veículo elétrico híbrido – HEV e veículo elétrico híbrido plug-in – PHEV.

O BEV é um veículo que utiliza um ou mais motores elétricos para se deslocar. Estes são alimentados por energia armazenada nas baterias, que podem ser carregadas através de um ponto de carregamento exterior ou da travagem regenerativa. O HEV combina um motor de combustão com um sistema de propulsão elétrico. A presença do sistema elétrico tem como objetivo obter poupanças de combustível relativamente às de um veículo que só contém um motor de combustão interno. O PHEV é um veículo elétrico híbrido no qual a bateria pode ser recarregada através de um ponto de carregamento exterior.

A tecnologia das baterias de iões-lítio é a escolha principal como fonte de energia para os veículos elétricos e híbridos, dada a sua elevada densidade energética e rápida capacidade de recarga.

Os BEV são compostos por um sistema propulsor, que integra uma ou mais máquinas elétricas primárias acionadas e controladas por um controlador eletrónico, um pack de baterias de tração, um sistema de gestão de baterias (BMS), um sistema diferencial mecânico e uma caixa de velocidades [3], de acordo com a Figura 1 [4].

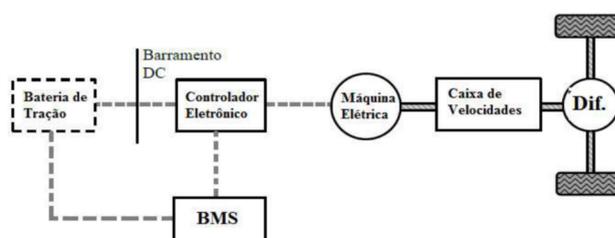


Figura 1- Diagrama do sistema propulsor e de tração elétrico de um BEV