MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA SEM ESCOVAS (BRUSHLESS – BLDC)

1. Enquadramento

No cenário de constante evolução tecnológica, as máquinas elétricas desempenham um papel fundamental no fornecimento de energia mecânica para numerosos dispositivos e sistemas que nos rodeiam. Desde máquinas industriais, brinquedos, até propulsão em veículos elétricos, estas máquinas são a força motriz em muitos sistemas do nosso mundo moderno. Entre os diversos tipos de máquinas elétricas, a Máquina de Corrente Contínua sem Escovas, na literatura inglesa *Brushless DC* (BLDC), emerge como uma extraordinária inovação, oferecendo eficiência aprimorada, confiabilidade, robustez e controlo preciso.

Os motores de corrente contínua sem escovas surgiram há muitos anos, no início da década de 1960, na sequência dos avanços no domínio da eletrónica de estado sólido. Atualmente, a utilização de motores CC sem escovas está a crescer rapidamente e a sua utilização é transversal a diferentes sistemas elétricos. Ao contrário de seus equivalentes tradicionais – as máquinas de corrente contínua com escovas, os motores BLDC eliminam a necessidade de escovas e comutador mecânicos, abrindo caminho para uma forma mais eficiente de propulsão elétrica. Este design revolucionário não apenas proporciona vantagens significativas em termos de manutenção e durabilidade, mas também permite níveis de desempenho e versatilidade sem precedentes. Estas diferenças encontram-se ilustradas na Figura 1.

Desde veículos elétricos e robótica até sistemas de energia renovável e eletrodomésticos, os motores BLDC encontraram o seu lugar numa ampla gama de aplicações. A eliminação do comutador e escovas não apenas melhora a vida útil do motor, mas também reduz o atrito mecânico, resultando em maior eficiência e consumo reduzido de energia.

Figura 1 – Motor de corrente contínua – Com escovas e sem escovas (*brushless*)

Além disso, a ausência destes componentes mecânicos permite um funcionamento mais suave, ruído mínimo e maior confiabilidade, tornando os motores BLDC uma escolha ideal para tarefas que requerem precisão e maior eficiência.

O motor de corrente contínua sem escovas – BLDC é um tipo de motor elétrico que não possui escovas e comutador (coletor) mecânicos para a comutação de corrente, em contraste com os motores de corrente contínua (CC) tradicionais.

Em vez disso, esse tipo de motor utiliza comutação eletrónica através de controladores de motor, com ou sem sensores. A alimentação das bobinas do estátor é feita através de um controlador eletrónico seguindo uma sequência específica de acordo com a posição do rótor, onde se encontram os ímanes permanentes.

Os motores BLDC oferecem diversas vantagens em relação aos motores de corrente contínua com escovas. Em primeiro lugar, a ausência de escovas mecânicas elimina a necessidade de manutenção regular e reduz o desgaste causado pelo atrito mecânico. Isso resulta em maior confiabilidade, vida útil prolongada e tempo de inatividade reduzido.

Além disso, os motores BLDC apresentam maior eficiência devido à redução das perdas de energia causadas pelo atrito das escovas. A comutação eletrónica permite um controlo preciso da velocidade, binário e sentido de rotação do motor, tornando-o adequado para aplicações que exigem alto nível de precisão e resposta. A ausência de escovas também resulta numa menor interferência eletromagnética e funcionamento mais silencioso.

Comparativamente com os motores síncronos de ímanes permanentes (MSIP), o BLDC possui um controlo mais simples. Assim, este tipo de motor é mais utilizado em aplicações de baixo custo, alto rendimento, baixa manutenção e tamanhos reduzidos. Um outro aspeto interessante é que os motores sem escovas possuem uma densidade de potência 15% superior a um MSIP, devido ao valor RMS da densidade de fluxo ser maior nos motores BLDC [1].

2. Constituição

O motor *brushless* (BLDC) é constituído por um estátor, que contém as bobinas de fio condutor inseridas num núcleo ferromagnético, e um rótor onde se encontram os ímanes permanentes.

A Figura 2 mostra a constituição do motor de corrente contínua sem escovas, ou motor *brushless*, para a configuração de rótor externo (*outrunner*).

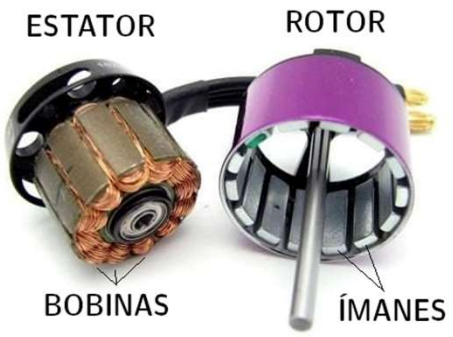

Figura 2 – Constituição do motor de corrente contínua sem escovas (BLDC)

O estátor é a parte que produz uma força magnética variável para fazer girar o rótor. O estátor do motor CC sem escovas é normalmente constituído por peças de aço laminado. Estas são normalmente empilhadas em conjunto para formar um núcleo magnético. Uma bobina de fio é então enrolada à volta do núcleo e ligada ao controlador.

O rotor de um motor BLDC é um íman permanente. Fornece o campo magnético que reage com o do estator e permite um movimento de rotação. São utilizados diferentes materiais para esta peça. Os mais comuns são os materiais de terras raras, como a ferrite, o neodímio, a liga de neodímio, o boro e o samário-cobalto.

Os motores BLDC podem ser de rótor interno (*inrunner*) ou rótor externo (*outrunner*). Um motor sem escovas de rótor interno tem os ímanes permanentes no interior das bobinas, enquanto um motor com rótor externo tem os ímanes permanentes no exterior. Ambos utilizam o mesmo princípio de funcionamento e cada um deles tem os seus próprios pontos fortes e fracos.

A Figura 3 ilustra as duas configurações:

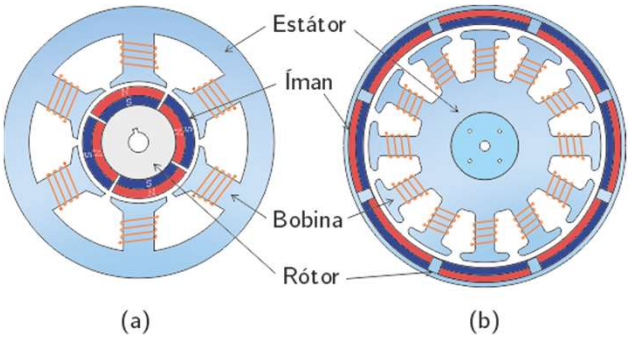

Figura 3 – Tipos de configuração nos motores BLDC: (a) rótor interno (*Inrunner*), (b) rótor externo (*outrunner*)

Normalmente, os motores de rótor externo criam mais binário e rodam mais lentamente do que os motores de rótor interno que, em geral, têm menos binário e rodam significativamente mais rápido. Pelo contrário, as vantagens do motor de rótor interno estão na sua baixa inércia e maior capacidade de dissipação de calor. As duas configurações diferentes são possíveis porque é relativamente fácil conceptualizar como inverter a posição do estator e do rotor dentro do motor, devido ao facto de não ser necessária qualquer comutação mecânica, ao contrário de um motor com escovas.

No que se refere ao número de fases, embora haja aplicações onde são utilizados motores com apenas uma fase, e.g. ventiladores de computadores, a maioria das aplicações utiliza motores com três fases, como o mostrado na Figura 4. O estátor é normalmente composto por 3 enrolamentos diferentes ligados através de uma configuração em estrela ou em triângulo. Devido à disposição das bobinas, a configuração em estrela produz um nível de binário mais elevado a velocidades mais baixas. A configuração em triângulo, em contraste, produz um baixo nível de binário a baixas rotações do motor [2].

Uma ilustração da ligação em estrela está ilustrada na Figura 4b.

Figura 4a – Motor CC sem escovas de 3 fases (*outrunner*)

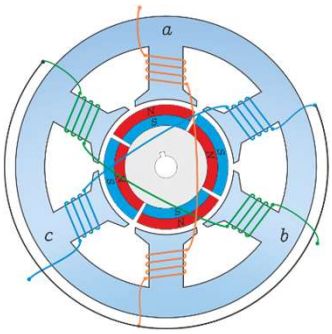

Figura 4b – Esquema de ligação em estrela (*inrunner*).

3. Funcionamento

Como já referido, a diferença principal do motor de corrente contínua sem escovas para o convencional motor com escovas refere-se à ausência de coletor (comutador) e escovas mecânicos, sendo a comutação feita eletronicamente nos primeiros. Neste caso, os enrolamentos estão ligados a um circuito eletrónico que as alimenta de forma a criar um campo magnético rotativo. Consequentemente, os ímanes do rótor têm a tendência de alinhar com o campo magnético rotativo criado, razão pela qual o rótor roda.

O controlo destes motores é realizado aplicando correntes de forma retangular aos enrolamentos, conforme ilustrado na Figura 5, que ilustra os sinais obtidos dos sensores de posição do rótor, as formas ideais para a f.c.e.m., corrente nas fases e binário. Como ilustrado, para uma corrente retangular com 120° elétricos de duração e força contra-eletromotriz (f.c.e.m.) trapezoidal, obtém-se um binário constante. A f.c.e.m. é diretamente proporcional à velocidade do rótor, como em outros motores [3].

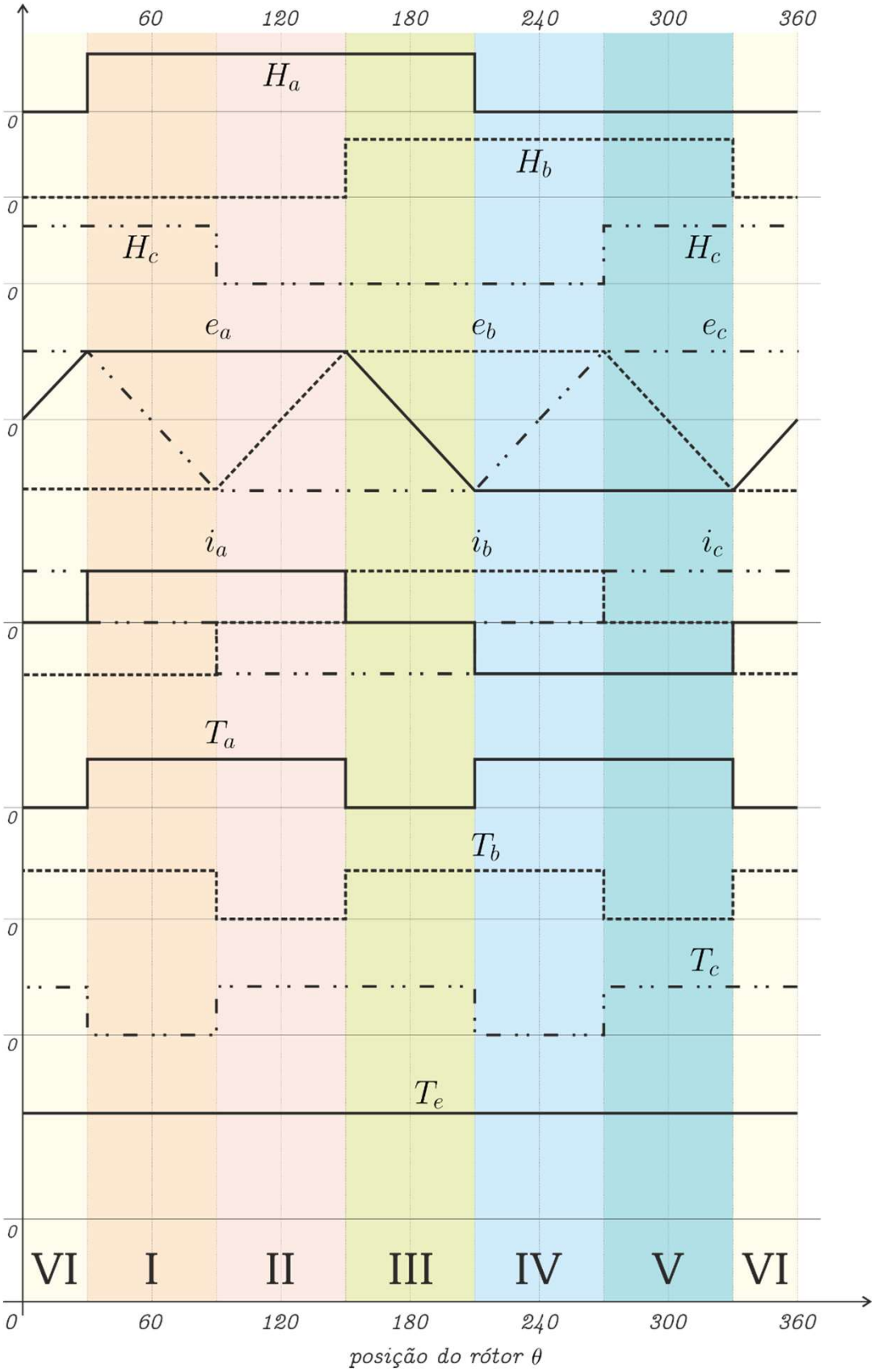

Figura 5 – Formas de onda das f.c.e.m., correntes ideais nas fases do motor e binário (adaptado de [3]).

O controlo deste tipo de motor é normalmente feito com recurso ao controlo trapezoidal, que é o algoritmo mais simples. Neste tipo de controlo, o acionamento é feito de forma que as fases do estátor são alimentadas sequencialmente duas a duas, i.e., há sempre duas fases em condução para qualquer instante. O resultado do somatório do binário em cada fase é a produção de um binário constante ao longo de uma rotação do rótor. O binário eletromagnético é dado pela seguinte equação:

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)/\omega \quad (1)$$

onde ω é a velocidade angular do rótor.

A alimentação das fases do estátor do motor é feita com recurso a um conversor como o ilustrado na Figura 6. Na prática, os interruptores ilustrados na figura serão substituídos por semicondutores, de acordo com a aplicação. Para o correto acionamento dos interruptores do conversor, é necessário o conhecimento da posição angular do rótor. Esta posição é necessária apenas nos pontos de comutação, a cada 60°, para o caso do motor com três fases. Podemos utilizar as seis posições discretas do rótor para o controlo das correntes, como ilustrado na Figura 6.

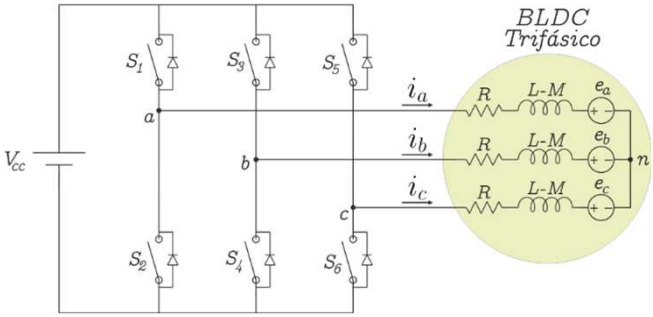

Figura 6 – Modelo do controlador que aciona o motor CC sem escovas (BLDC)

Esta posição do rótor pode ser obtida por meio de sensores (H_a,H_b,H_c) colocados a cada 120° elétricos do estátor. Os sensores podem ser, por exemplo, de efeito de Hall ou óticos. Pode também ser efetuado o controlo sem sensores (sensorless), com a leitura das f.c.e.m. das fases não alimentadas [4].

Os modos de comutação do motor estão resumidos na Tabela 1, onde se pode verificar quais as fases e interruptores ativos e quais os sinais dos sensores de posição do rótor.

Tabela 1 – Modos de funcionamento do motor CC sem escovas

Modo	Posição do rótor	Eq. da corrente	Fases ativas	Fase passiva	Sensores	Interruptores
I	$30° < \theta < 90°$	$i_a + i_b = 0; i_c = 0$	A e B	C	101	S_1 e S_4
II	$90° < \theta < 150°$	$i_a + i_c = 0; i_b = 0$	A e C	B	100	S_1 e S_6
III	$150° < \theta < 210°$	$i_b + i_c = 0; i_a = 0$	B e C	A	110	S_3 e S_6
IV	$210° < \theta < 270°$	$i_a + i_b = 0; i_c = 0$	B e A	C	010	S_3 e S_2
V	$270° < \theta < 330°$	$i_a + i_c = 0; i_b = 0$	C e A	B	011	S_5 e S_2
VI	$-30° < \theta < 30°$	$i_b + i_c = 0; i_a = 0$	C e B	A	001	S_5 e S_4

No controlo trapezoidal, também designado de "*six-step control*" na literatura inglesa, para cada um dos seis modos de comutação, a corrente circula entre duas fases, ficando a terceira em aberto [5].

A Figura 7 ilustra a o modo de comutação I, mostrando as ligações nos enrolamentos do motor (a) e os interruptores ativos do controlador e o caminho da corrente (b). A Figura 7(a) ilustra também a posição dos sensores usados para determinar que fases do motor devem ser alimentadas.

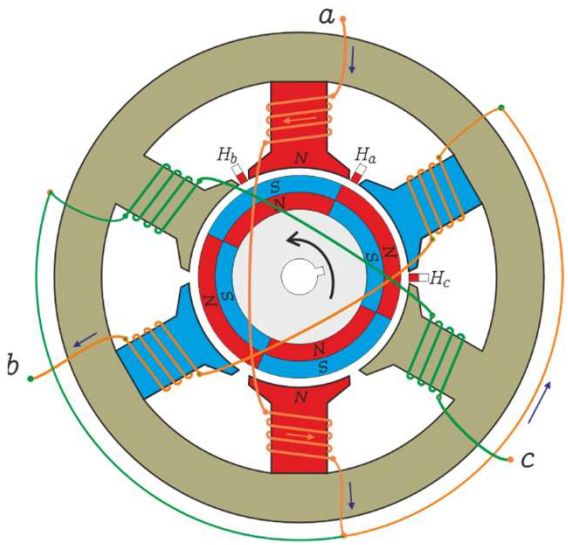

Figura 7a – Modo de controlo I: alimentação das fases a e b: ligações no motor

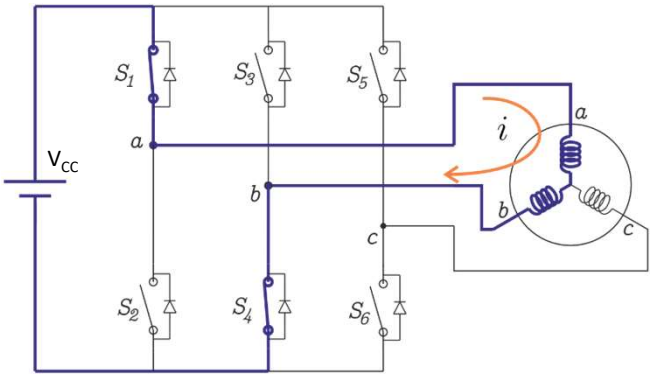

Figura 7b – Modo de controlo I: alimentação das fases a e b: Interruptores ativos e circuito de corrente

Neste tipo de controlo, apenas dois interruptores estão ligados a cada instante, que conduzem durante 120°. A troca de interruptor ativo é feita para um interruptor de outra fase, pelo que não há necessidade de implementação de tempos mortos (*dead-time*) para proteção do conversor [5].

4. Conclusão

Como referido, os motores de corrente contínua sem escovas apresentam inúmeras vantagens face aos tradicionais motores com escovas, nomeadamente melhor eficiência, maior densidade de potência, possibilidade de funcionamento a velocidades elevadas e método de controlo simples. Desta forma, são motores utilizados em aplicações de baixo custo e baixa potência, e.g., em aplicações domésticas, industriais e em veículos ligeiros, como trotinetes e bicicletas.

Referências

[1] R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, CRC Press, 2010.

[2] V. Carev, J. Rohác, S. Tkachenko e K. Alloyarov, "The Electronic Switch of Windings of a Standard BLDC Motor," Applied Sciences MDPI, 2022.

[3] J. R. Hendershot e T. J. E. Miller, Design of Brushless permanent-magnet Machines, Motor Design Books, 2010.

[4] C.-L. Xia, Permanent magnet brushless DC motor drives and controls, Wiley, 2012.

[5] S.-H. Kim, Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors, Elsevier, 2017.