

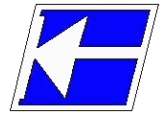
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA INDUSTRIAL

Acionamentos Eletrônicos



GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MOTORES SEM ESCOVAS

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2021.

MOTORES SEM ESCOVAS

Objetivo de Aprendizagem

Estudar motores sem escovas (*brushless*).

Objetivos parciais

- Conhecer os princípios de funcionamento dos motores sem escovas;
- Identificar os tipos de motores sem escovas;
- Conhecer as aplicações dos motores sem escovas;
- Entender o funcionamento dos circuitos de acionamento dos motores sem escovas.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 10 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 09 relacionado aos motores de passo.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo dos motores de indução.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou consultar os livros texto indicados para esta disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Acionamentos Eletrônicos – 2021/1.
Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 10);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 10).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - MOTORES SEM ESCOVAS

1 Introdução

Os capítulos anteriores foram dedicados ao estudo e acionamento dos motores de corrente contínua e motores de passo, onde se estudaram os tipos, funcionamento, aplicações e circuitos para acionamento destas máquinas de corrente contínua.

Este capítulo terá como objetivo principal o estudo dos motores sem escovas (brushless) e seu acionamento.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos motores sem escovas;
- Tipos de motores sem escovas;
- Aplicações dos motores sem escovas;
- Acionamento de motores sem escovas.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever o funcionamento de um motor sem escovas;
- Identificar os tipos de motores sem escovas;
- Comentar sobre algumas aplicações dos motores sem escovas;
- Descrever os circuitos de acionamento de motores sem escovas.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em perguntar ao estudante para descrever o funcionamento de um circuito de acionamento de um motor sem escovas, por exemplo.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar com suas palavras o funcionamento de um motor sem escovas;
2. Citar aplicações dos motores sem escovas;
3. Comentar os tipos de motores sem escovas;
4. Explicar o funcionamento de circuitos de acionamento de motores sem escovas;
5. Citar características de motores sem escovas.

2 Princípio de Funcionamento dos Motores Sem Escovas

2.1 Introdução

Os motores elétricos de corrente contínua podem ser de diferentes tipos, conforme estudado nos capítulos anteriores, tendo-se, dentre eles, os motores sem escovas (*brushless*).

Este capítulo irá apresentar o princípio de funcionamento dos motores sem escovas e sua classificação, para na sequência se apresentar os tipos e os circuitos de acionamento dos mesmos.

2.2 Definição de motor elétrico sem escovas

O motor elétrico sem escovas é uma máquina elétrica rotativa de corrente contínua, que converte energia elétrica em movimento.

A principal diferença dos motores sem escovas para os motores de passo é a velocidade de rotação e suas aplicações, pois os últimos são motores de baixa velocidade, enquanto os primeiros podem operar com altas velocidades.

Os motores sem escovas, também conhecidos por motores síncronos para corrente contínua, são denominados de BLDC ou BLDM (*brushless direct current motor* – motor de corrente contínua sem escovas).

2.3 Símbolo do motor sem escovas

O símbolo do motor sem escovas é semelhante ao motor de corrente contínua, como mostrado na Figura 1, mas em geral possui 3 fases, tendo então 3 ou 4 fios de conexão.

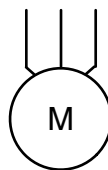


Figura 1 – Símbolo do motor sem escovas.

2.4 Princípio de funcionamento do motor sem escovas

O princípio de funcionamento do motor sem escovas é semelhante ao funcionamento do motor de passos, com a distinção que agora se objetiva que o rotor gire continuamente com velocidade fixa.

Assim, o campo magnético gerado no estator deve originar um campo magnético girante, que exercerá uma força sobre os ímãs permanentes do rotor, fazendo com que o eixo da máquina

gire permanentemente enquanto esta estiver conectada à fonte de alimentação e acionada apropriadamente por um circuito de controle.

A Figura 2 mostra o estator (parte fixa) e o rotor (parte móvel) do motor sem escovas representados por ímãs permanentes, para simplificar a explicação do princípio de funcionamento do mesmo. Os eletroímãs do estator serão acionados sequencialmente, com posições conforme o sentido de giro desejado, seja no sentido horário ou anti-horário. O ímã permanente que representa o rotor poderá girar livremente em seu eixo de rotação.

Note que o estator é formado por 3 fases, tendo 6 enrolamentos ou polos magnéticos. A primeira fase foi identificada como A e seu polo oposto como A', enquanto a segunda fase foi identificada como B e seu oposto como B', sendo a terceira fase a C com oposto C'.

As posições que o rotor irá ocupar conforme o acionamento dos eletroímãs do estator são descritas como:

- Primeiro pulso – A fase A foi acionada, juntamente com seu polo oposto A'. O rotor está girando no sentido horário, vindo da posição 300° até a posição 0° ou 360°;
- Segundo pulso – A fase B é acionada, com seu polo oposto B'. O rotor gira da posição 0° até a posição 60°;
- Terceiro pulso – A fase C passa a ser acionada, com seu polo oposto C'. O rotor gira da posição 60° até a posição 120°;
- Quarto pulso – A fase A' é acionada, agora com seu polo oposto A. O rotor continua girando no sentido horário, vindo da posição 120° até a posição 180°;
- Quinto pulso – A fase B' é acionada, com seu polo oposto B. O rotor gira da posição 180° até a posição 240°;
- Sexto pulso – A fase C' passa a ser acionada, com seu polo oposto C. O rotor gira da posição 240° até a posição 360° ou 0°, fechando um ciclo completo, ou seja, uma volta completa.

As Figura 3, Figura 4 e Figura 5 mostram a sequência de pulsos de acionamento aplicados ao motor sem escovas, fazendo seu rotor girar em passos de 60°, desde 0° até 360°. Nota-se a semelhança com o funcionamento do motor de passo, estudado no capítulo anterior.

Este motor com 3 fases e 6 enrolamentos, terá deslocamentos de 60 em 60 graus, sendo possível subdividir as fases em mais enrolamentos para se ter passos menores e um giro mais suave, isto é, com menos variação no torque e diminuição da vibração da máquina de corrente contínua.

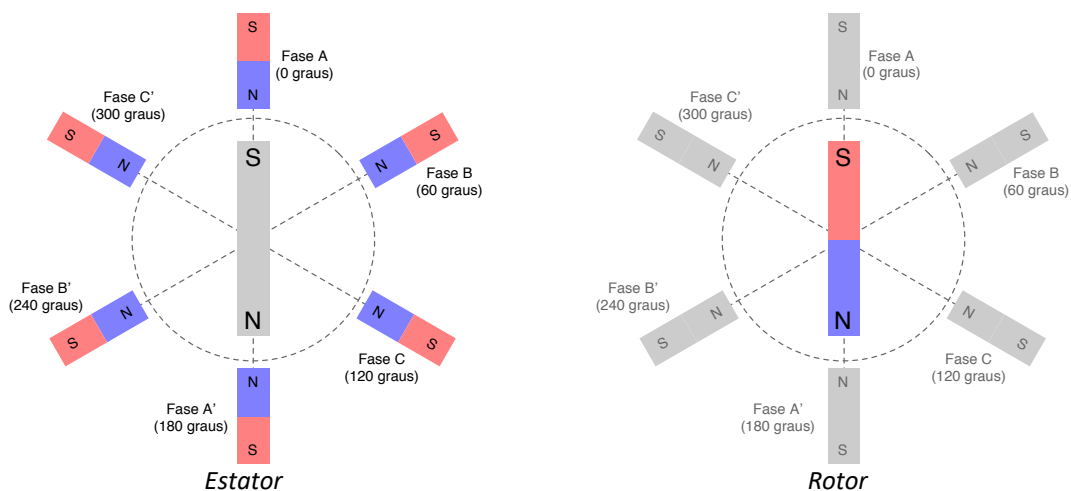


Figura 2 – Esquema simplificado para estudar o funcionamento do motor sem escovas.

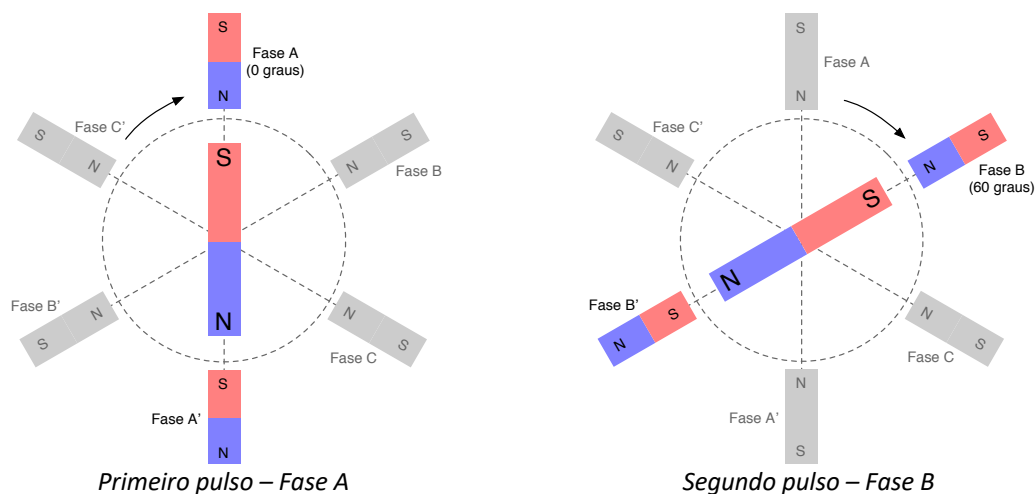


Figura 3 – Princípio de funcionamento do motor sem escovas.

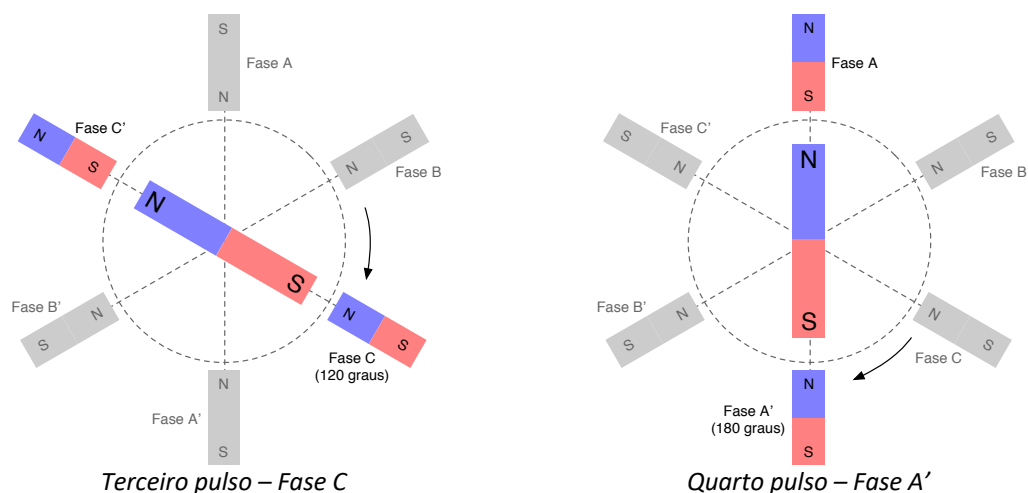
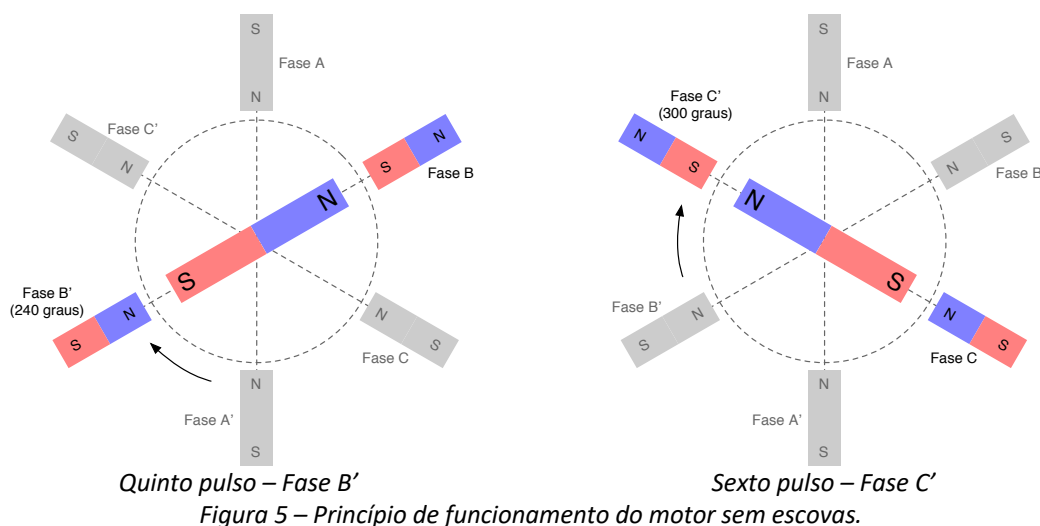


Figura 4 – Princípio de funcionamento do motor sem escovas.



2.5 Principais aplicações dos motores sem escovas

As principais aplicações dos motores sem escovas são drones, aeromodelos, ferramentas elétricas, instrumentação, robótica, veículos elétricos, empilhadeiras, máquinas de costura, informática, dentre outras.

A Figura 6 apresenta algumas aplicações de motores sem escovas, com o aspecto característico do motor aplicado em cada caso.

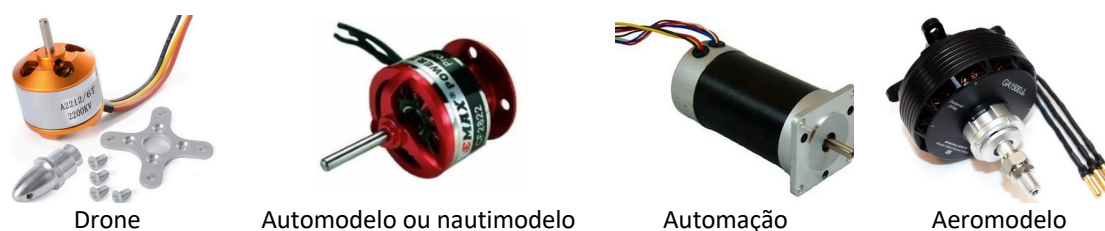


Figura 6 – Exemplos de motores sem escovas.

Fonte: <https://www.americanas.com.br> e <https://www.tekkno.com.br>. Acesso em 08/07/2021.

2.6 Principais características dos motores sem escovas

As principais características dos motores sem escovas estão relacionadas com as altas velocidades de rotação que podem atingir e pouca manutenção dispensada aos mesmos.

Em termos de vantagens em relação aos motores de corrente contínua estudados anteriormente se tem¹:

- Operação em alta velocidade – Os motores sem escovas podem operar com elevado conjugado para altas velocidades de operação, superiores a 10000 rotações por minuto (RPM), por exemplo;

¹ LENZ, André Luiz. Motores BLDC. Disponível em <https://automoveiseletricos.blogspot.com>. Acessado em 05/08/2021.

- Baixa manutenção – Em sendo motores sem escovas e sem coletor, não exigem manutenção frequente como os motores de corrente contínua ou universais;
- Alta densidade de potência – Os motores sem escovas são compactos, com alta relação de potência versus volume construtivo;
- Alta eficiência – Em relação aos motores com escovas (motores de corrente contínua e universais) possuem menores perdas e mais simples de resfriar;
- Aceleração rápida – São motores com resposta rápida, permitindo acelerações e alterações no sentido de rotação rapidamente e com pouca inércia no rotor.

Por sua vez, também possuem desvantagens, que são:

- Acionamento complexo – O circuito de acionamento dos motores sem escovas deve ser específico, envolvendo conversores cc-ca e interruptores rápidos;
- Necessidade de sensores de posição – Para operar com altas velocidades e com velocidade constante, os motores sem escovas necessitam de sensores para identificar a posição exata do rotor, visando se aplicar os pulsos de acionamento corretamente;
- Dificuldade para alterar a velocidade – A velocidade do motor pode ser alterada modificando-se o intervalo de aplicação dos pulsos de acionamento, o que deve ser feito no comando do circuito de potência, envolvendo eletrônica de potência, não sendo possível apenas alterar a amplitude da tensão de alimentação como é feito no motor de corrente contínua.

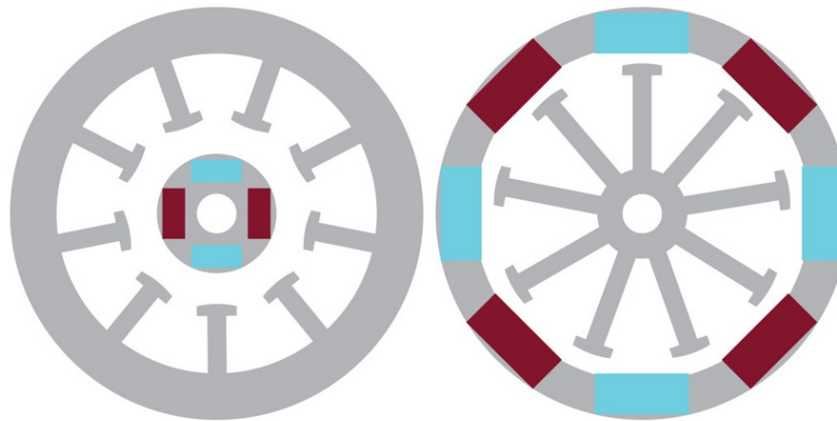
3 Tipos de Motores de Sem Escovas

3.1 Introdução

Os motores sem escovas podem ser de dois tipos levando em conta suas partes fixa e estacionária, sendo denominados de rotor interno (*inrunner*) ou rotor externo (*outrunner*), conforme mostrado na Figura 7.

O aspecto típico de um motor sem escovas é mostrado na Figura 8, onde se notam os enrolamentos do estator e a presença dos sensores de posição. Este motor possui 3 condutores para sua alimentação, 1 para cada fase, além dos condutores de sinal, que informam a posição do rotor, por meio dos sensores de posição.

O exemplo de motor mostrado na Figura 8 é do tipo rotor interno (*inrunner*), sendo estes os mais comuns encontrados comercialmente e nas mais diversas aplicações.



Rotor interno (inrunner)

Rotor externo (outrunner)

Figura 7 – Tipos de motores sem escovas.

Fonte: <https://www.analog.com>. Acesso em 05/08/2021.



Figura 8 – Aspecto típico de um motor sem escovas.

Fonte: <https://www.amazon.com>. Acesso em 05/08/2021.

3.2 Partes do motor sem escovas

As principais partes de um motor sem escovas são mostradas na Figura 9, onde se podem notar as partes fixas no estator e as partes móveis no rotor. Neste exemplo o rotor é interno (*inrunner*).

Observe pela Figura 9 que o motor sem escovas possui os enrolamentos do estator formados por barras de fio, para se ter maior capacidade de corrente. O rotor é com ímãs permanentes.

Os motores sem escovas, como aquele apresentado na Figura 9, podem ser utilizados em competições esportivas, como a Fórmula E, para veículos elétricos, no estilo da Fórmula 1. Neste caso, os motores possuem potência da ordem de 120 kW, como é o caso do E-Motor da equipe McLaren.

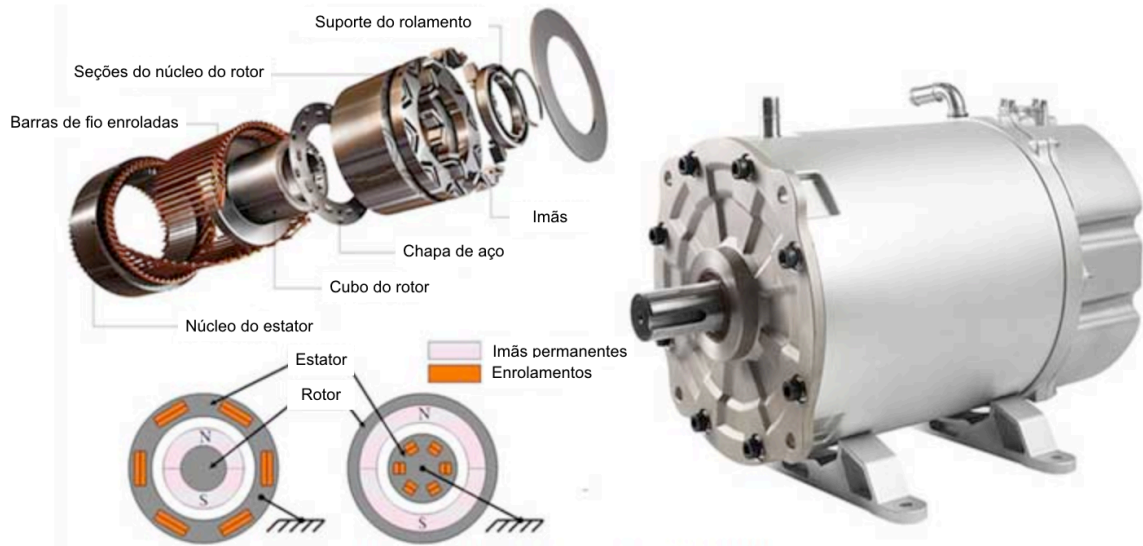


Figura 9 – Partes de um motor sem escovas.

Fonte: <https://www.autoracing.com.br>. Acesso em 05/08/2021.

3.3 Motores sem escovas com rotor interno (*inrunner*)

A Figura 10 mostra exemplos de motores sem escovas de rotor interno. Este tipo de montagem para o motor sem escovas tem como vantagens a facilidade para refrigeração do estator, onde ocorrem as perdas por efeito joule nos enrolamentos. Além disso, o rotor interno tem menor inércia, o que facilita as paradas e acelerações do motor.

As aplicações para o motor sem escovas de rotor interno são diversas, como ventiladores, pequenos veículos elétricos, máquinas e ferramentas elétricas, dentre outras; sendo utilizado sempre que o eixo do motor estiver acoplado a parte girante da carga.

Em termos de torque, os motores com rotor interno tem valores menores do que os motores com rotor externo, sendo que estes últimos também tem vibração menor do que os primeiros, o que podem ser características interessantes em determinadas aplicações para estes motores alimentados em corrente contínua e sem escovas.

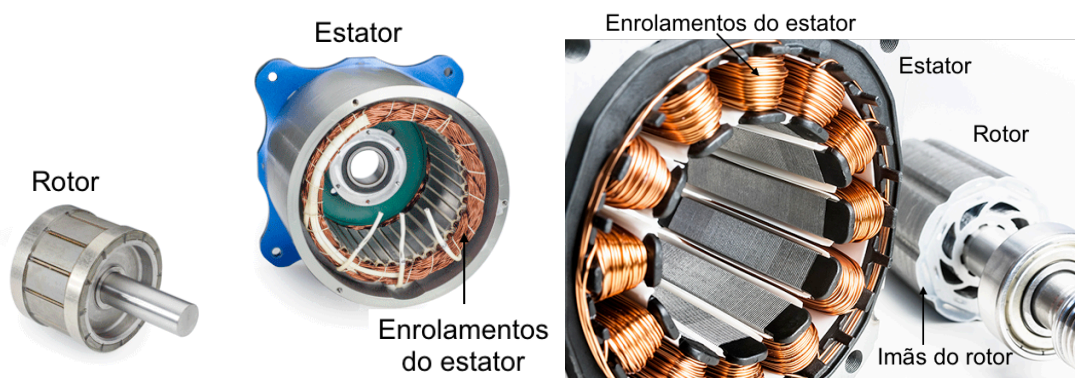


Figura 10 – Exemplos de motores sem escovas de rotor interno.

Fonte: <https://duryeatechnologies.com> e <https://www.automate.org>. Acesso em 28/07/2021.

3.4 Motores sem escovas de rotor externo (*outrunner*)

A Figura 11 mostra um exemplo de motor sem escovas e rotor externo. Nota-se que neste caso os ímãs permanentes do rotor são montados externamente ao estator com seus enrolamentos.

A ventilação e retirada de calor do estator, em virtude do aquecimento produzido nos fios do mesmo, é mais difícil neste tipo de montagem, dificultando o processo de refrigeração do motor.

Estes motores são tipicamente utilizados quando se tem a montagem de maneira tal que a parte girante fica externa à parte fixa, como em elementos que tenham hélices, como aviões, drones, dentre outros.

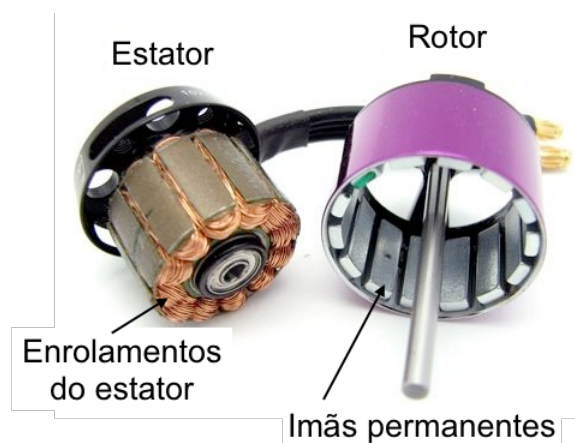


Figura 11 – Motor sem escovas de rotor externo.

Fonte: <https://www.researchgate.net>. Acesso em 28/07/2021.

4 Circuitos de Acionamento de Motores Sem Escovas

4.1 Introdução

A seguir será apresentado o circuito básico de acionamento de motores sem escovas, que consistem em um inversor de tensão, ou seja, um conversor cc-ca operando em alta frequência.

4.1 Circuito elétrico equivalente do motor sem escovas

O circuito elétrico equivalente do motor sem escovas é mostrado na Figura 12, onde se tem a representação das 3 fases do motor e seus elementos, quais sejam:

- Tensões e correntes nas fases – As tensões e correntes nas 3 fases do motor são representadas por v_A , v_B , v_C , i_A , i_B e i_C , para a fase A, B e C, respectivamente;
- Resistências dos enrolamentos – As resistências dos enrolamentos do estator são representadas por R_A , R_B e R_C , para cada fase respectivamente;

- Indutâncias equivalentes – As indutâncias equivalentes do motor são representadas por L_A , L_B e L_C ;
- Tensões induzidas – As tensões induzidas ou forças contra eletromotrizes são representadas por E_A , E_B e E_C .

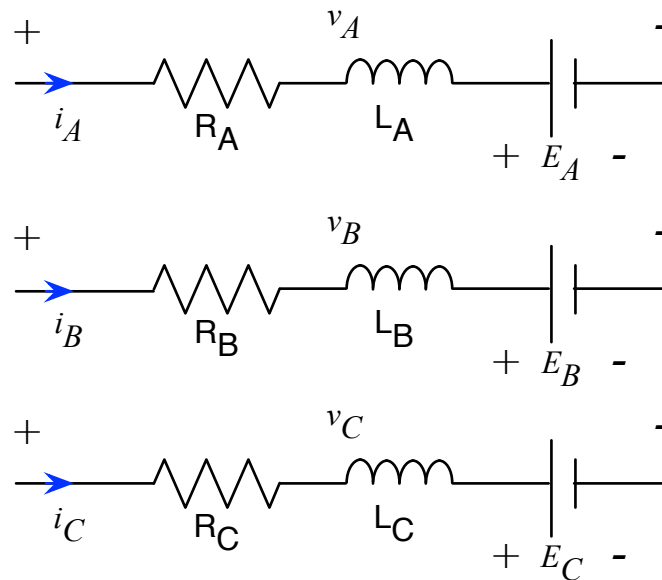


Figura 12 – Circuito equivalente de motor sem escovas.

Em geral o motor sem escovas possui 3 fios de conexão, 1 para cada fase, sendo que internamente pode ser realizada a conexão estrela ou triângulo, conforme mostrado na Figura 13.

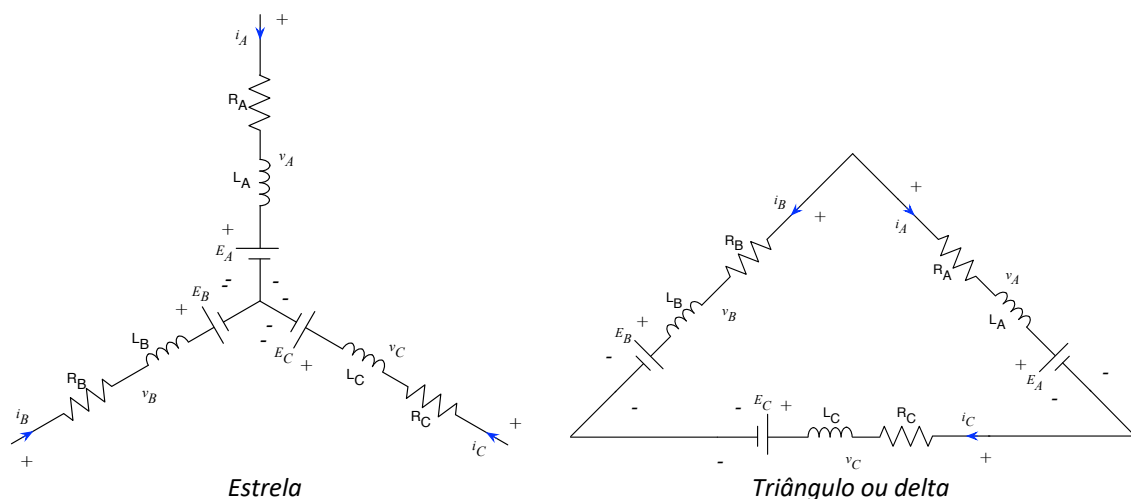


Figura 13 – Conexões estrela e triângulo das fases do motor sem escovas.

4.2 Acionamento de motores sem escovas

Os motores sem escovas são acionados por circuitos específicos de potência, pois seu funcionamento é diferente do motor de corrente contínua e do motor de passos, estudado anteriormente.

A Figura 14 mostra um diagrama de blocos exemplificando o acionamento de um motor sem escovas trifásico, ou seja, de 3 fases. As formas de onda mostradas são para os enrolamentos principais, das fases A, B e C, enquanto os enrolamentos dos polos opostos, A', B' e C', são alimentados por tensões em oposição de fase em relação aos sinais principais.

O circuito de potência tem por finalidade prover as amplitudes de tensão e de corrente adequadas para o funcionamento do motor, conforme suas especificações técnicas. Já o circuito lógico, a partir dos sinais dos sensores de posição e da velocidade e sentido de rotação desejados, gera os sinais de comando para o conversor de potência implementar o acionamento do motor.

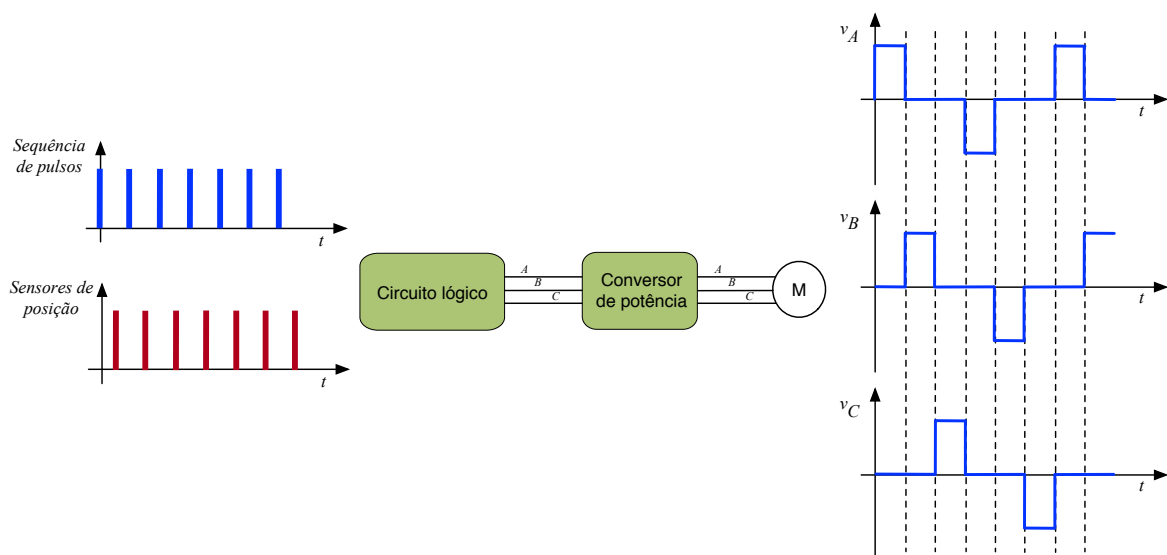


Figura 14 – Circuito de acionamento de motores sem escovas.

4.3 Conversor cc-ca para acionamento de motor sem escovas

A Figura 15 mostra um circuito de acionamento de motor sem escovas com 3 fases, isto é, trifásico. Este conversor é conhecido como ponte completa trifásico, com 6 transistores de potência com seus diodos de roda-livre, também em número de 6.

Os sinais de disparo dos transistores, ou seja, os sinais dos gatilhos dos mesmos, serão originados pelo circuito de acionamento dos mesmos, como mostrado na Figura 14 pelo bloco denominado de circuito lógico.

O detalhamento e projeto do conversor mostrado na Figura 15 não será apresentado aqui pela sua complexidade e por estar além do escopo deste Curso Básico de Acionamentos Eletrônicos.

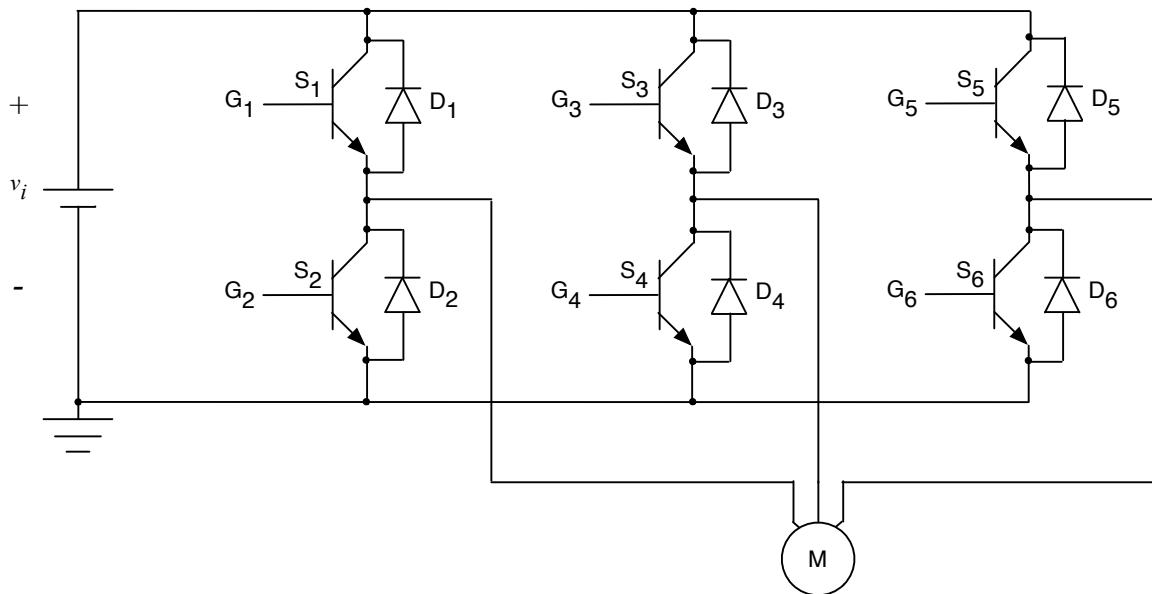


Figura 15 – Circuito de acionamento de motor sem escovas trifásico.

4.4 Acionamento de motor sem escovas com circuitos dedicados

A Figura 16 mostra um exemplo de diagrama de blocos com circuitos dedicados para acionamento de motores sem escova, englobando desde os elementos de potência, sensores e proteção.

Por sua vez, a Figura 17 um circuito com sua placa implementada, também para acionamento de motor sem escovas, para operar com tensões de entrada da rede de energia elétrica monofásica, com amplitude de 220 V, potência de 250 W, e controle com microcontrolador; destacando também os circuitos integrados para acionamento dos transistores de potência, sensores e proteção.

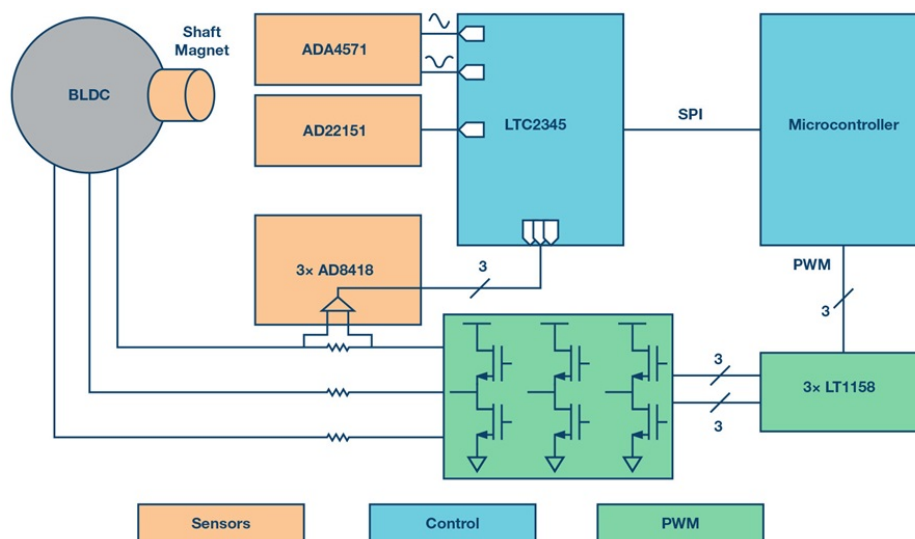


Figura 16 – Exemplo de diagrama de blocos com circuitos dedicados.

Fonte: Adaptado de <https://www.analog.com>. Acesso em 05/08/2021.

É interessante destacar que em ambos os circuitos e diagramas de blocos apresentados se utilizam microcontroladores, em função de sua flexibilidade para diferentes configurações e controle dos motores sem escovas, considerando que é necessário gerar um padrão sequencial de sinais para o comando do conversor de potência e posterior alimentação do motor.

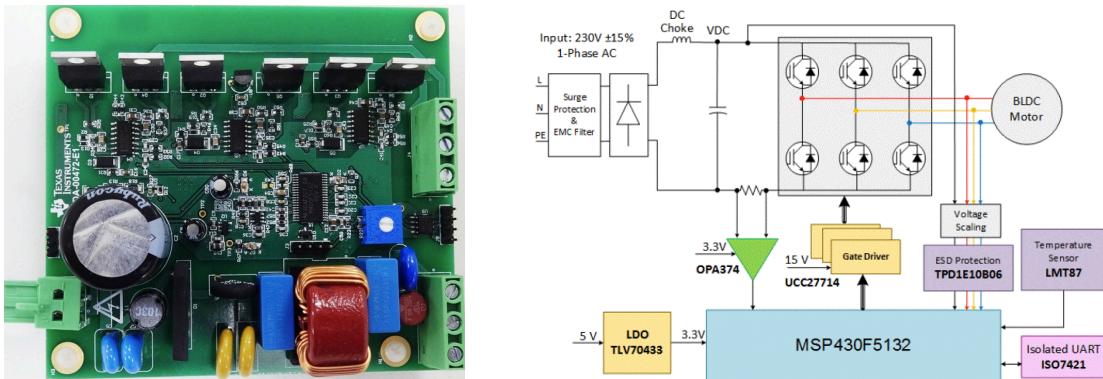


Figura 17 – Exemplo de drive de acionamento de motor sem escovas.

Fonte: Adaptado de <https://www.ti.com>. Acesso em 05/08/2021.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Comente sobre as aplicações dos motores sem escovas?

Os motores sem escovas são utilizados quando se desejam altas e constantes velocidades, em aplicações como drones, aeromodelos, ferramentas elétricas, instrumentação, robótica, veículos elétricos, empilhadeiras, máquinas de costura, informática, dentre outras.

ER 02. Quais os tipos de motores de motores sem escovas?

Os motores sem escovas podem ser de 2 tipos: rotor interno (*inrunner*) e rotor externo (*outrunner*).

ER 03. Comente sobre o acionamento de motores sem escovas.

O acionamento de motores sem escovas é realizado por circuitos eletrônicos específicos, utilizando conversores de potência.

ER 04. Comente sobre algumas diferenças dos motores sem escovas em relação aos motores de corrente contínua?

As diferenças dos motores sem escovas em relação aos motores de corrente contínua são em termos de construção onde os primeiros não tem escovas, enquanto os últimos tem escovas e coletor comutador, velocidade de rotação e circuito de acionamento.

ER 05. Os motores sem escovas podem ser alimentados por uma tensão contínua fixa?

Não, pois neste caso o rotor ficará travado. Os motores sem escovas devem ser alimentados por pulsos de tensão aplicados aos seus enrolamentos, do mesmo modo que é feito nos motores de passo, mas agora sempre em sequência e utilizando como referência os sinais dos sensores de posição.

Exercícios Propostos

EP 01. Cite aplicações para os motores sem escovas?

EP 02. Comente sobre algumas características dos motores sem escovas.

EP 03. Em geral, quantas fases possuem os motores sem escovas?

EP 04. Quais as principais partes de um motor sem escovas?

EP 05. Comente sobre o acionamento de motores sem escovas.

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar o exercício e fixar bem o conteúdo.

AA 01. Cite algumas aplicações onde são utilizados os motores sem escovas.

AA 02. Comente sobre o conversor a ser utilizado para acionar motores sem escovas.

AA 03. Compare os motores sem escovas em relação aos motores de corrente contínua, em termos de manutenção.

AA 04. Qual a finalidade de se utilizar sensores de posição nos motores sem escovas?

AA 05. Como se altera a velocidade de um motor sem escovas?

AA 01. Os motores sem escovas são aplicados em drones, aeromodelos, ferramentas elétricas, instrumentação, robótica, veículos elétricos, empilhadeiras, máquinas de costura, informática, dentre outras utilizações.

AA 02. O conversor para acionamento dos motores sem escovas, em geral, é um conversor cc-ca (inversor de tensão), trifásico, utilizando semicondutores de potência como transistores e diodos.

AA 03. A manutenção dos motores sem escovas é mais simples do que nos motores de corrente contínua, pois estes não possuem escovas e coletor comutador.

AA 04. Os sensores de posição são utilizados para que os pulsos aplicados nos enrolamentos do motor tenham fase e largura adequada para manter a velocidade do motor constante.

AA 05. A velocidade do motor sem escovas é alterada modificando-se a frequência do sinal de comando dos interruptores, isto é, o tempo entre um pulso e outro, que são aplicados nos enrolamentos do motor.