



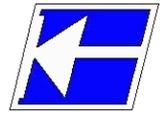
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

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 DE PASSO

MOTORES DE PASSO

Objetivo de Aprendizagem

Estudar motores de passo.

Objetivos parciais

- Conhecer os princípios de funcionamento dos motores de passo;
- Conhecer os principais tipos de motores de passo;
- Conhecer as aplicações dos motores de passo;
- Entender o funcionamento dos circuitos de acionamento dos motores de passo.

Aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado com a aula 09 da disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado o objetivo de aprendizagem 08 relacionado ao acionamento dos motores de corrente contínua.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será o estudo dos motores sem escovas.

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 09);
- Ler este guia de estudo (objetivo de aprendizagem 09).

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 DE PASSO

1 Introdução

Os capítulos anteriores foram dedicados ao estudo e acionamento dos motores de corrente contínua, 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 de passo e seu acionamento.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Princípio de funcionamento dos motores de passo;
- Principais tipos de motores de passo;
- Aplicações dos motores de passo;
- Acionamento de motores de passo.

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 de passo;
- Citar os principais tipos de motores de passo;
- Comentar sobre algumas aplicações dos motores de passo;
- Descrever o funcionamento de circuitos de acionamento de motores de passo.

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

Exemplo de atividade avaliativa:

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

2 Princípio de Funcionamento dos Motores de Passo

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 de passo.

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

2.2 Definição de motor elétrico de passo

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

A principal diferença dos motores de passo para os motores de corrente contínua é o controle preciso da rotação e dos deslocamentos do eixo do motor, permitindo variações angulares discretas e conhecidas.

Assim, os motores de passo são utilizados quando se necessita realizar deslocamentos precisos, como por exemplo em impressoras, braços robóticos, mesas digitalizadoras, dentre outras aplicações.

Importante destacar também que no caso dos motores de passo se tem alto torque sem rotação, ou seja, com o rotor parado, o que permite ao mesmo manter a posição pré-estabelecida sem movimento no seu eixo. Além disso, ao usar motores de passo não se tem por objetivo movimentar cargas indefinidamente, como em veículos elétricos, mas sim, deslocar estas cargas por distâncias bem definidas.

2.3 Símbolo do motor de passo

O símbolo do motor de passo é semelhante ao motor de corrente contínua, como mostrado na Figura 1, podendo se ter variações ou até mesmo representar o motor pelo esquema de ligação de suas bobinas, como será visto posteriormente.

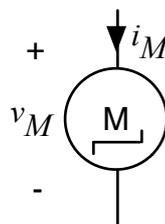


Figura 1 – Símbolo do motor de passo.

2.4 Princípio de funcionamento do motor de passo

O princípio de funcionamento do motor de passo, do mesmo modo que os motores de corrente contínua, se deve ao surgimento de uma força quando uma espira ou bobina estiver imersa em um campo magnético, devido à Força de Lorentz.

A Figura 2 mostra o estator (parte fixa) e o rotor (parte móvel) do motor de passo representados por ímãs permanentes, para simplificar a explicação do princípio de funcionamento do mesmo. Os eletroímãs do estator serão acionados sequencialmente, com posições conforme os ponteiros de um relógio, iniciando por 12 horas, passando por 15 horas, 18 horas e retornando à posição inicial. O ímã permanente que representa o rotor poderá girar livremente em seu eixo de rotação.

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

- Posição inicial – A posição inicial mostrada na Figura 3 apresenta o polo sul do rotor posicionado em frente ao polo norte do ímã permanente do estator, na posição 12 horas. Neste caso, apenas o eletroímã da posição 12 horas está acionado;
- Primeiro passo – A partir da posição inicial, o eletroímã da posição 12 horas é desligado, acionando-se o eletroímã da posição 15 horas, conforme mostra a figura. Neste caso o rotor irá girar por um ângulo de 90° no sentido horário, parando em frente ao eletroímã da posição 15 horas;
- Segundo passo – O eletroímã da posição 15 horas será desligado, acionando-se o eletroímã da posição 18 horas, fazendo com que o rotor gire por mais 90° no sentido horário, conforme mostrado na Figura 4;
- Terceiro passo – A partir do desligamento do eletroímã da posição 15 horas e de novo acionamento do eletroímã da posição 12 horas, se tem o rotor girando novamente por 90° no sentido horário, voltando à posição inicial.

A partir das Figura 3 e Figura 4 pode-se perceber que o acionamento dos eletroímãs do estator ocorreu sequencialmente, conforme se desejava que o rotor girasse, a cada passo em 90° , até completar uma volta completa ao se executarem os quatro passos descritos.

Ao manter o acionamento de determinado eletroímã, se fará com que o rotor permaneça parado em frente a posição deste elemento, permitindo a manutenção da posição desejada.

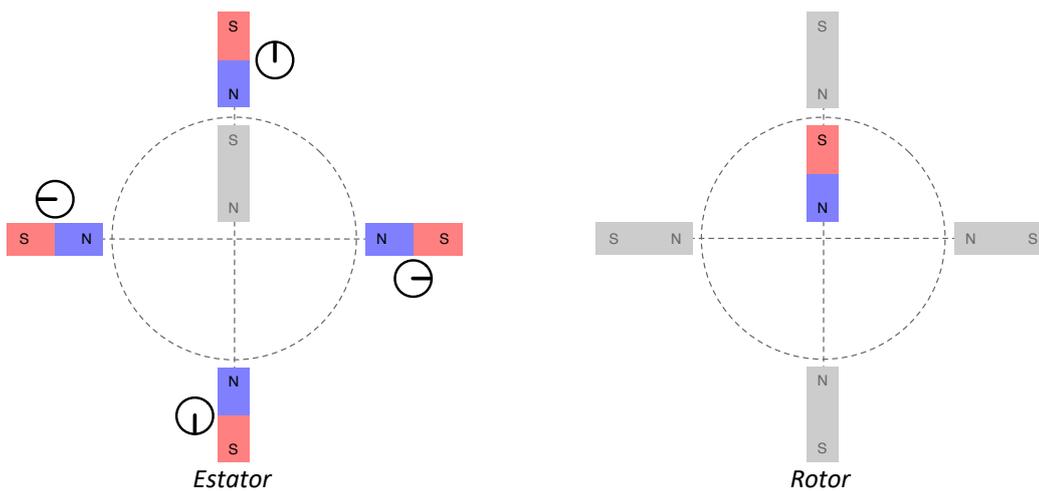


Figura 2 – Esquema simplificado para estudar o funcionamento do motor de passo.

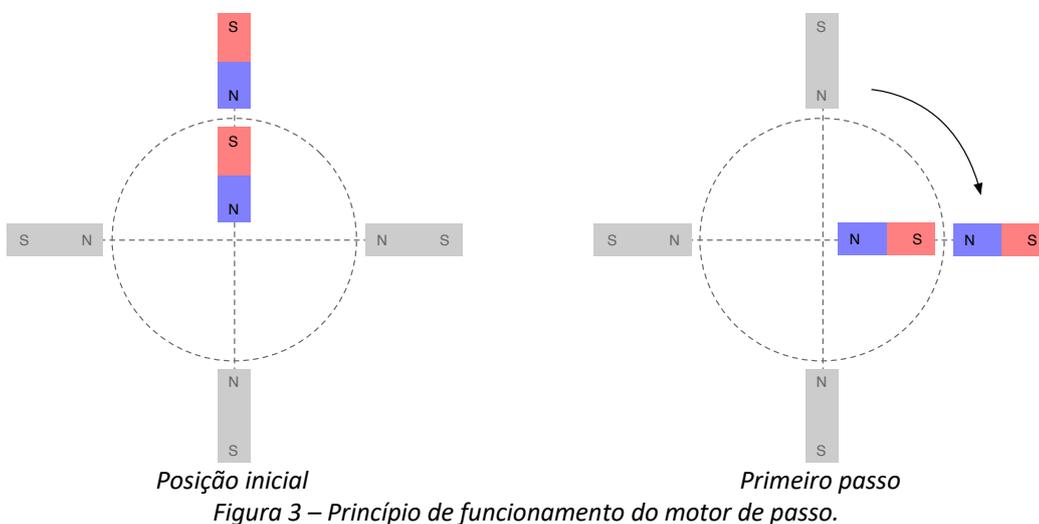


Figura 3 – Princípio de funcionamento do motor de passo.

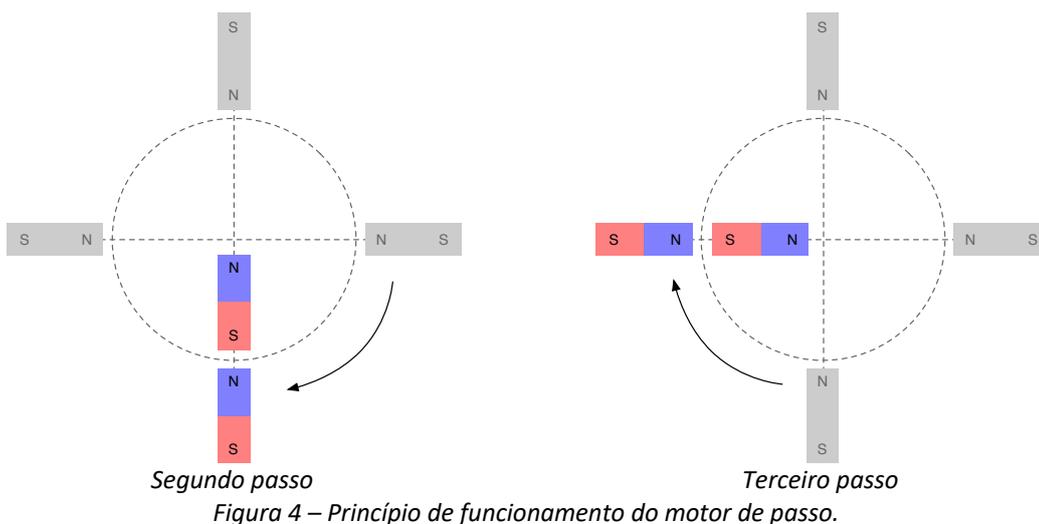


Figura 4 – Princípio de funcionamento do motor de passo.

O princípio de funcionamento descrito a partir de um esquema que representa o motor de passo de maneira mais próxima de sua construção final é apresentado na Figura 5¹. Neste caso, o posicionamento do rotor se dá pelo alinhamento dos dentes da parte móvel com a parte fixa, isto é, as linhas de campo magnético criadas nas bobinas do estator percorrem o material ferromagnético do rotor, fazendo que apareça uma força no sentido de diminuir a relutância do caminho magnético. Assim, os dentes do eletroímã do estator atraem os dentes do material ferromagnético do rotor, no qual ocorre a indução de um campo magnético em oposição ao campo do estator, conforme se estudou nos capítulos anteriores, pelas Leis de Faraday e Lenz.

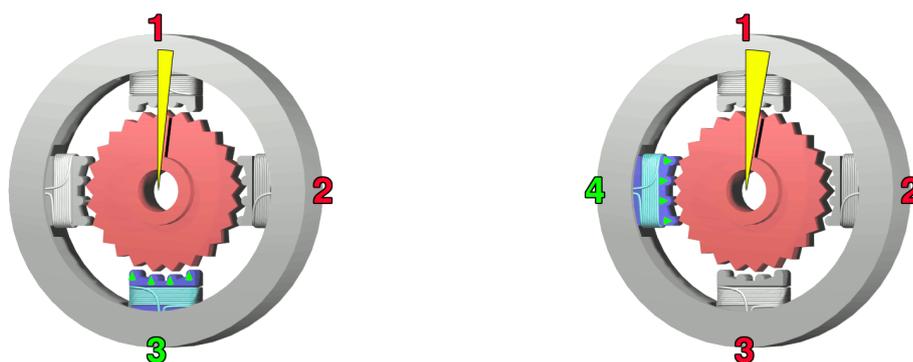
As Figura 5 e Figura 6 mostram os quatro passos para o acionamento das quatro bobinas do estator, provocando o giro do rotor, neste caso, por ângulos dados pela distância entre os dentes do mesmo, que são de $3,6^\circ$ neste exemplo.



Passo 0

Passo 1

Figura 5 – Princípio de funcionamento do motor de passo.



Passo 3

Passo 4

Figura 6 – Princípio de funcionamento do motor de passo.

¹ Wikipédia. Motor de Passo. Disponível em https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_de_passo. Acessado em 28/07/2021.

O rotor apresentado nas figuras apresenta 25 dentes, com uma distância angular entre os mesmos de $3,6^\circ$. Assim, são necessários 100 passos para se percorrer uma volta completa (360°). Em geral, os motores de passo podem ter entre 3 a 72 passos para completar uma volta inteira.

2.5 Principais aplicações dos motores de passo

As principais aplicações dos motores de passo são em impressoras, máquinas de controle numérico (CNC), bombas volumétricas, robótica, câmeras de vídeo, brinquedos, automação industrial, mesas digitalizadoras, fresadoras, injeção eletrônica de automóveis, dentre outras.

A Figura 7 apresenta algumas aplicações de motores de passo, com o aspecto característico do motor aplicado em cada caso.



Figura 7 – Exemplos de motores de passo.

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

2.6 Principais características dos motores de passo

As principais características dos motores de passo estão relacionadas com a precisão dos deslocamentos permitidos em seu eixo, além do torque com o rotor parado. A Tabela 1 apresenta um comparativo levando em conta as principais características para os motores de corrente contínua, motores de passo e servomotores, onde se pode notar que conforme a aplicação se deve escolher o tipo de motor específico, em virtude justamente de seus aspectos funcionais.

Em termos de vantagens em relação aos motores de corrente contínua se tem²:

- Operam por lógica digital – São acionados por pulsos aplicados sequencialmente nas bobinas do motor;
- Posicionamento em alta precisão – Em geral tem erro de posicionamento menor do que 5%;
- Torque estável – Os motores de passo possuem torque com pouca variação;
- Resposta rápida – São motores que possuem excelente resposta para aceleração e desaceleração.

² BRITES, Felipe G. e SANTOS, Vinicius P. de A. Motor de Passo. Universidade Federal Fluminense, 2008. Disponível em <https://www.telecom.uff.br/pet/>. Acessado em 28/07/2021.

Por sua vez, também possuem desvantagens, que são:

- Baixo desempenho em altas velocidades – Aumentando a velocidade de acionamento das bobinas do motor de passo incorre em aumento na velocidade do rotor, mas com perda significativa de desempenho;
- Acionamento complexo – O circuito de acionamento e a lógica empregada devem ser compatíveis com o motor utilizado, sendo mais complexas dos que os circuitos de acionamento dos motores de corrente contínua;
- Ressonância e perda de passos – Em virtude da frequência natural de ressonância da estrutura física do motor, em ocorrendo coincidência entre esta e a frequência de acionamento e seus múltiplos e submúltiplos, podem ocorrer vibrações e rotações incorretas, conhecidas como perda de passos.

Tabela 1 – Comparativo do motor de passo em relação a outros motores.

Característica	Motor de corrente contínua	Motor de passo	Servomotor
Velocidade	Alta	Baixa	Média
Torque rotacional	Alto	Médio	Alto
Torque estacionário	Ausente	Alto	Baixo
Controle	Fácil	Complexo	Complexo
Precisão rotacional	Ausente	Alta	Muito alta
Durabilidade	Média	Alta	Média
Manutenção	Requer	Não requer	Requer

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

3 Tipos de Motores de Passo

3.1 Introdução

Os motores de passo podem ser classificados, em termos de construção, em três tipos, que são: motores de relutância variável, motores de imã permanente e motores híbridos.

Em termos de conexões e acionamento podem ser classificados em unipolares e bipolares, que serão abordados no próximo capítulo quando serão estudados os circuitos elétricos e conexões dos motores de passo.

Este capítulo apresentará os motores em termos de construção, descrevendo-se brevemente seu funcionamento e aspectos característicos.

3.2 Partes do motor de passo

As principais partes de um motor de passo são mostradas na Figura 8, onde se podem notar as partes fixas no estator e as partes móveis no rotor. Neste exemplo o rotor é do tipo

relutância variável, que será descrito na sequência deste capítulo.

Observe pela Figura 8 que o motor de passo não possui rotor bobinado, por isso dispensa o uso de escovas e do coletor, diminuindo a manutenção e reduzindo o custo de fabricação, em comparação com os motores de corrente contínua estudados no capítulo anterior deste curso.

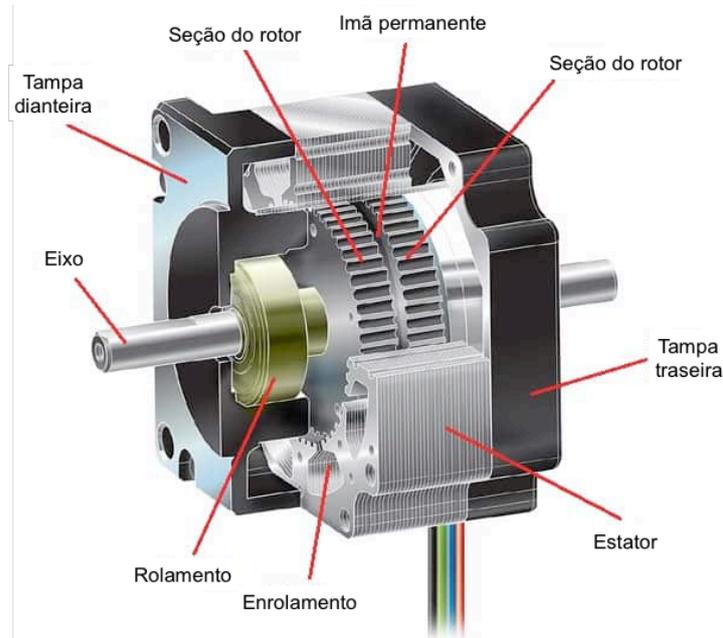


Figura 8 – Partes de um motor de passo.

Fonte: <https://islproducts.com>. Acesso em 28/07/2021.

3.3 Motores de passo de relutância variável

O motor de passo de relutância variável, conforme mostrado na Figura 9, é formado pelo estator contendo os enrolamentos (bobinas) em número de pares, formando os polos do estator, e o rotor de material ferromagnético (ferro, por exemplo), com múltiplos dentes, que serão atraídos pelos eletroímãs formados no estator.

Os enrolamentos A e A' mostrados na Figura 9 foram um par de polos, onde se verifica que o rotor estará alinhado com os mesmos, conforme estas estiverem sendo acionadas, isto é, o circuito aplicar corrente elétrica nestas bobinas. Assim, ao ocorrer o alinhamento dos dentes do rotor com os polos formados pelo estator, tem-se a menor relutância, que será a posição de repouso do rotor, caso não se altere a alimentação dos enrolamentos do estator.

Ao alimentar o conjunto de enrolamentos B e B', o rotor irá girar, para que ocorra o alinhamento entre os dentes do mesmo e os polos formados pelo estator, encontrando-se um novo ponto de equilíbrio (menor relutância) para o circuito.

Em virtude de não se ter um campo magnético permanente, como é o caso do motor de ímãs permanentes, o torque resultante será menor, em relação àquele motor.

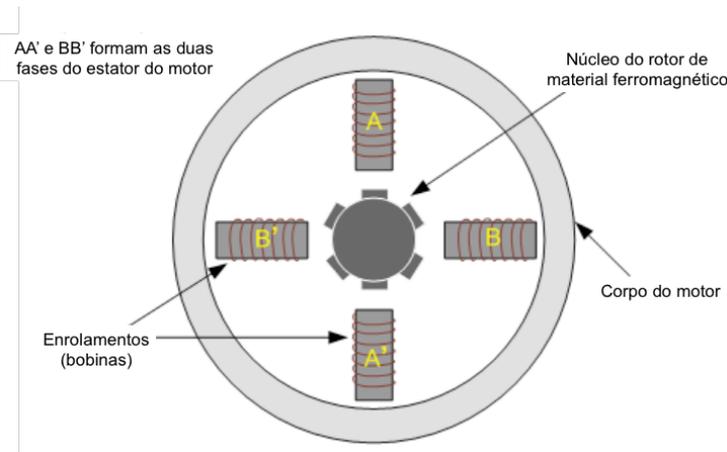
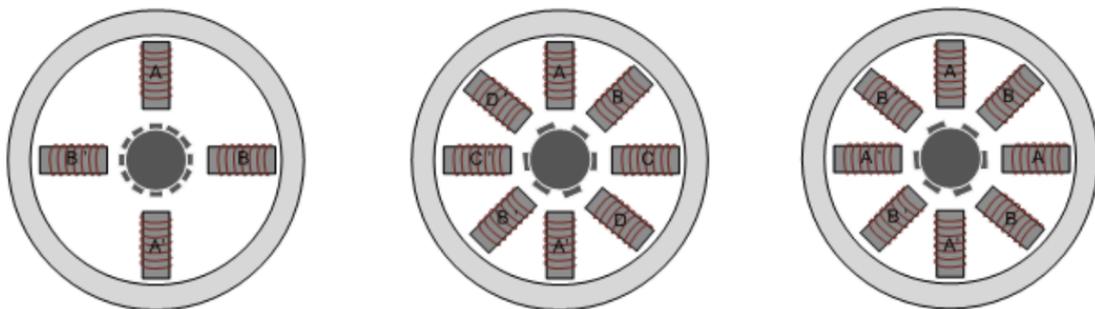


Figura 9 – Motor de passo de relutância variável.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

A resolução do motor de passo de relutância variável depende diretamente do número de polos (enrolamentos) do estator e do número de dentes no rotor. Assim, para se ter resoluções maiores, pode-se aumentar o número de polos no estator, dentes do rotor ou ambos, como mostrado na Figura 10. É comum se chamar de fases os conjuntos de enrolamentos do estator, conforme mostrado na Figura 10.



Aumento do número de dentes do rotor

Aumento do número de fases do estator

Aumento do número de enrolamentos por fase do estator

Figura 10 – Incremento na resolução do motor de relutância variável.

Fonte: <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

3.4 Motores de passo de imã permanente

Os motores de imã permanente, como mostrado na Figura 11, tem baixo custo e menor resolução, sendo simples de serem construídos, onde o rotor possui ímãs permanentes ao invés de material ferromagnético e dentes, como visto anteriormente para o motor de relutância variável. Em geral se tem passos de $7,5^\circ$ a 15° (48 a 24 passos por volta completa) para os motores de imã permanente, que possuem melhores características de torque em comparação com os motores de relutância variável, pois o campo magnético no rotor será mais intenso devido a presença dos ímãs fixos.

O princípio de funcionamento do motor de imã permanente é semelhante ao descrito anteriormente, considerando as Figura 3 e Figura 4, ocorrendo o alinhamento do campo magnético gerado nos enrolamentos do estator (conjuntos A e A', B e B') e os polos presentes no rotor, conforme mostrado na Figura 12.

O aumento da resolução do motor de passo de imã permanente pode ser conseguido pelo aumento do número de polos do estator e do rotor, conforme mostrado na Figura 13.

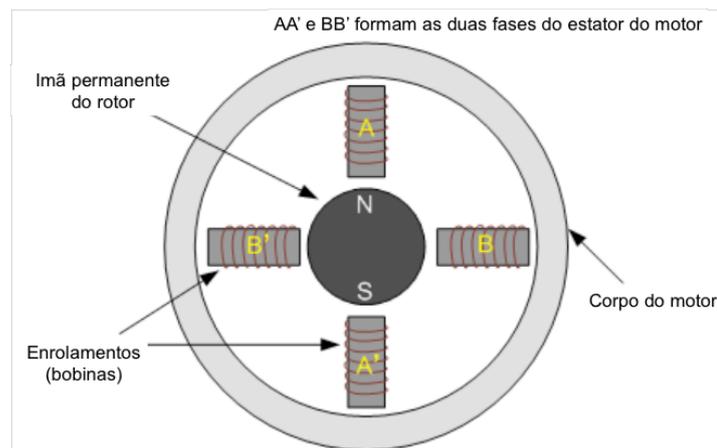


Figura 11 – Motor de passo de ímã permanente.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

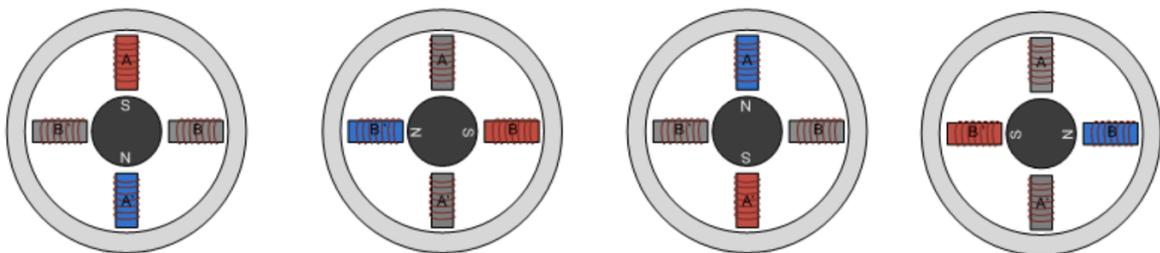
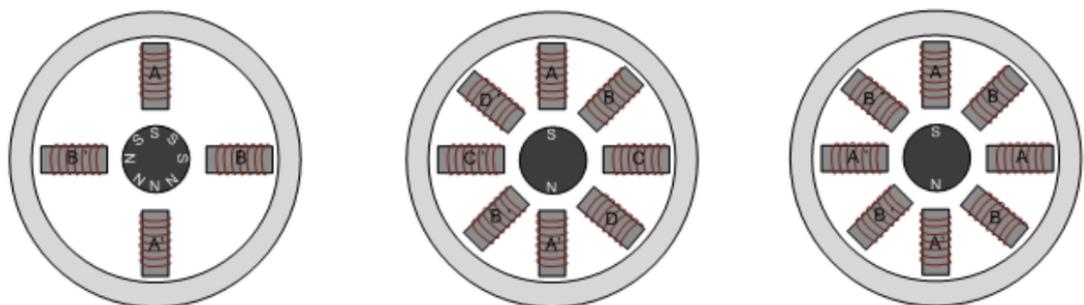


Figura 12 – Funcionamento do motor de passo de ímã permanente.

Fonte: <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.



Aumento do número de polos do rotor

Aumento do número de fases do estator

Aumento do número de enrolamentos por fase do estator

Figura 13 – Incremento na resolução do motor de ímã permanente.

Fonte: <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

3.5 Motores de passo híbrido

Os motores de passo híbridos são uma combinação dos motores de passo de relutância variável com os motores de passo de ímã permanente, combinando características dos dois modelos. Estes motores são mais caros e mais complexos de serem construídos, mas em contrapartida, apresentam boa resolução, torque e velocidade, tendo ângulos de rotação entre $3,6^\circ$ a $0,9^\circ$ (100 a 400 passos por volta completa).

O estator do motor de passo híbrido é semelhante aos estatores dos motores de passo de ímã permanente e de relutância variável. Por sua vez, o rotor possui dentes, como aquele do motor de ímã permanente, e um ímã permanente, como aquele do motor de ímã permanente.

A estrutura de montagem do eixo de um motor de passo híbrido é mostrada na Figura 15 onde se nota a presença dos dentes de material ferromagnético e do ímã permanente, originando a alternância entre os polos norte e sul.

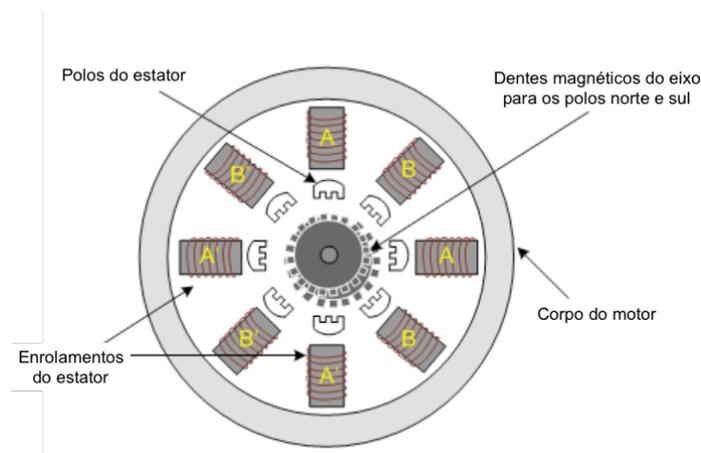


Figura 14 – Motor de passo híbrido.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

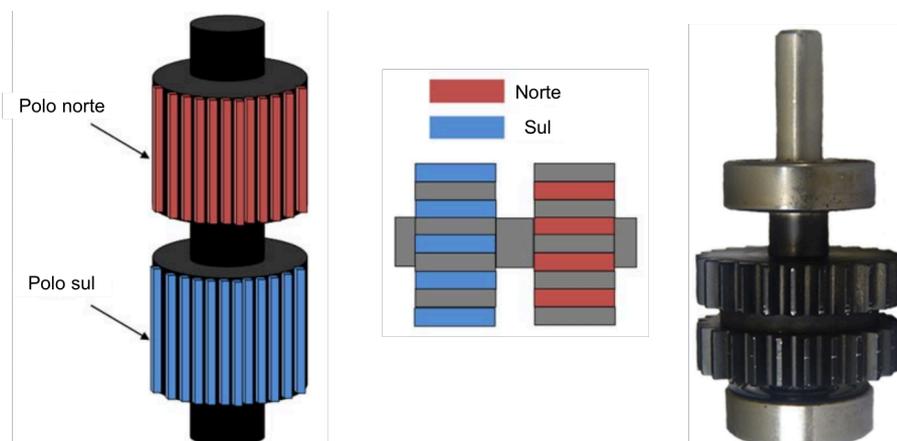


Figura 15 – Eixo do motor de passo híbrido.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

4 Conexões dos Motores de Passo

4.1 Introdução

A seguir serão apresentados aspectos importantes relacionados com o circuito elétrico e as conexões dos motores de passo, diferenciando-se os mesmos conforme o número de fases e forma de conexão dos polos dos mesmos.

4.2 Fases dos motores de passo

A bobina ou enrolamento do estator do motor de passo permite originar um polo magnético, que estará posicionado de frente para o rotor. Assim, conforme o número de enrolamentos se tiver, se terá um correspondente número de polos.

Em geral, para proporcionar maior torque ao motor, os enrolamentos são posicionados mecanicamente no estator com simetria de 180° , gerando polos contrários para cada um. Assim, considerando a Figura 16, se tem um motor com quatro enrolamentos, gerando quatro polos simultaneamente. Como dito, em geral os enrolamentos montados mecanicamente com simetria de 180° são conectados em conjunto, formando um único enrolamento, denominado de fase do motor de passo.

Assim, na Figura 16, a fase A é formada pelos enrolamentos 1 e 3, com seu polo simétrico identificado por A', enquanto a fase B é formada pelos enrolamentos 2 e 4, tendo como polo simétrico B'.

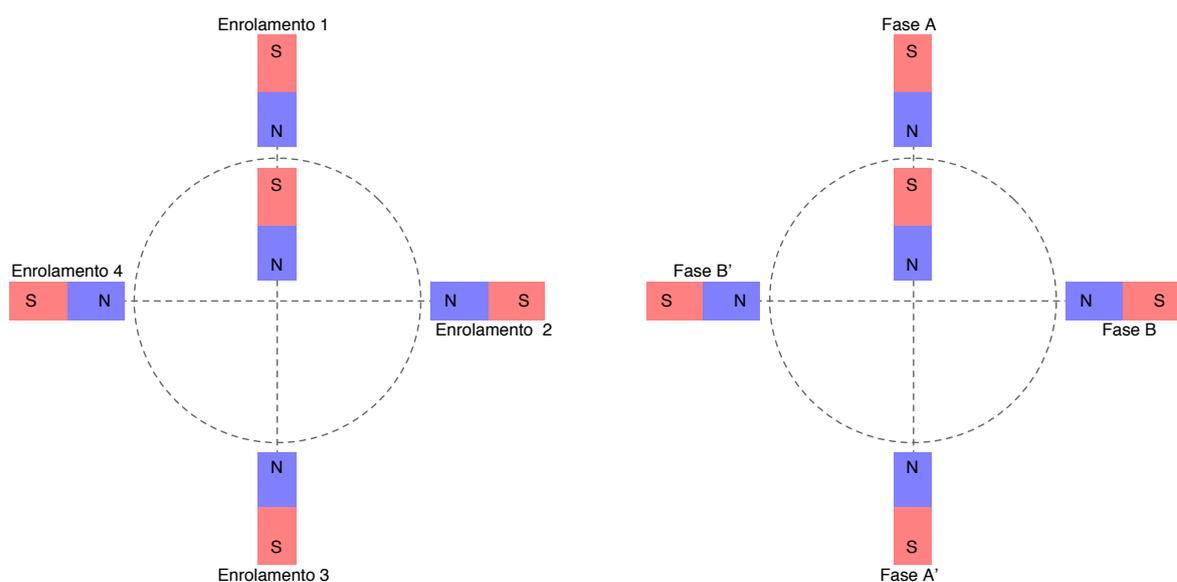


Figura 16 – Enrolamentos e polos do motor de passo.

A Figura 17 mostra as imagens de motores de passo de relutância variável com duas e cinco fases. O motor de 2 fases possui 8 polos magnéticos no estator, ou seja, 8 enrolamentos ou bobinas. Nota-se que no caso do motor de 2 fases, a fase A' está deslocada de 90° em relação a fase principal A. Por sua vez, o motor de 5 fases possui 10 enrolamentos e, portanto, 10 polos magnéticos.

Em termos de desempenho, os motores com maior número de fases implicam em menor vibração em virtude dos ângulos de passo menores, além de terem diferentes ângulos de deslocamento conforme o acionamento dos enrolamentos do estator.

Um motor de 2 fases tem 8 polos, fazendo com que o rotor de 50 dentes, por exemplo, precise se mover de $\frac{1}{4}$ de passo de dente para ocorrer o alinhamento com a próxima fase. Assim, um motor de 2 fases e 50 dentes, precisa de 200 passos para completar uma volta completa, onde o ângulo de deslocamento é de 1,8° por passo.

Em um motor de 5 fases se tem 10 polos, fazendo com que o rotor precise se deslocar de 1/10 de dente para se ter o alinhamento com a próxima fase. O número de passos para uma volta completa será de 500, com ângulo de deslocamento de 0,72° por passo; tendo-se uma resolução maior do que no motor de 2 fases.

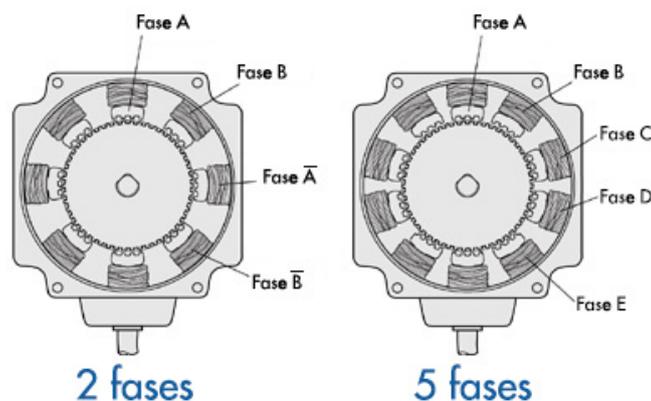


Figura 17 – Exemplo de motor de 2 e 5 fases.

Fonte: <https://www.orientalmotor.com.br>. Acesso em 28/07/2021.

4.3 Tipos de polos de motores de passo

Em relação ao tipo de configuração dos polos dos motores de passo, estes podem ser unipolares ou bipolares, alterando-se a conexão ao circuito externo, conforme cada caso.

4.3.1 Motores de passo unipolares

Os motores de passo unipolares utilizam 2 enrolamentos por fase, tendo em geral, uma conexão comum, resultando em 5, 6 ou 8 fios para conexões externas. Quando a conexão comum é separada por fase, se tem um motor de 6 fios; enquanto nos motores onde a conexão comum é

unida internamente, se terá um motor com 5 fios. A Figura 18 mostra as conexões terminais dos motores de passo unipolares com 5, 6 e 8 fios. As cores dos fios, conforme a Figura 18, podem ser diferentes conforme o fabricante do motor, devendo-se consultar as folhas de dados do motor ao utilizar o mesmo e implementar seu circuito de acionamento.

A Figura 19 mostra um motor unipolar de 2 fases, onde se nota que o terminal 1 é o condutor comum da fase 1, enquanto o terminal 2 é o condutor comum da fase 2. Os enrolamentos (polos) são conectados aos terminais a e b, para cada fase, respectivamente.

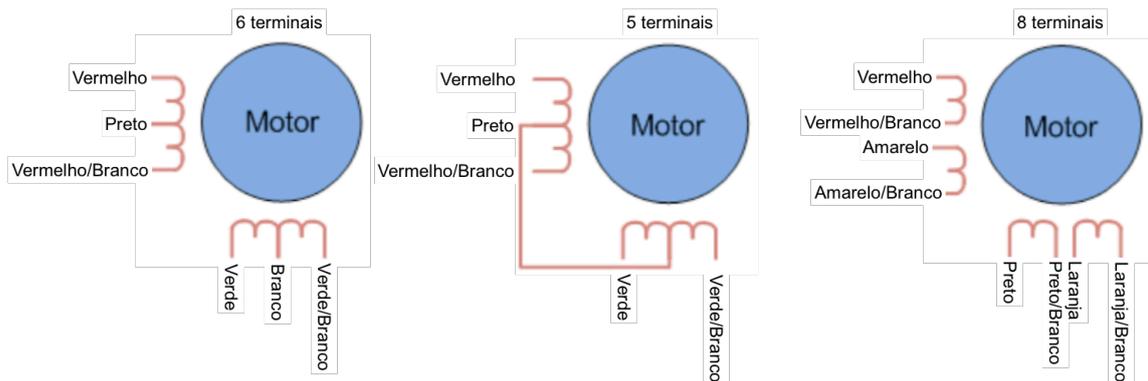


Figura 18 – Conexões do motor unipolar.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

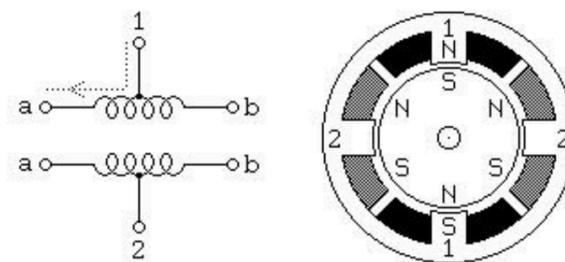


Figura 19 – Conexões do motor unipolar.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

4.3.2 Motores de passo bipolares

Os motores de passo bipolares possuem apenas uma conexão para cada polo (enrolamento), necessitando de circuitos de acionamento que possibilitem a inversão do sentido da corrente, conforme mostrado na Figura 20.

Os terminais de conexão da fase 1 são identificados por 1a e 1b, enquanto a fase 2 é identificada por 2a e 2b, como se observa na Figura 21.

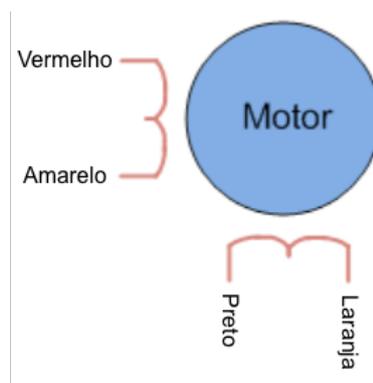


Figura 20 – Conexões do motor bipolar.

Fonte: <https://www.feis.unesp.br> e <https://www.engineersgarage.com>. Acesso em 28/07/2021.

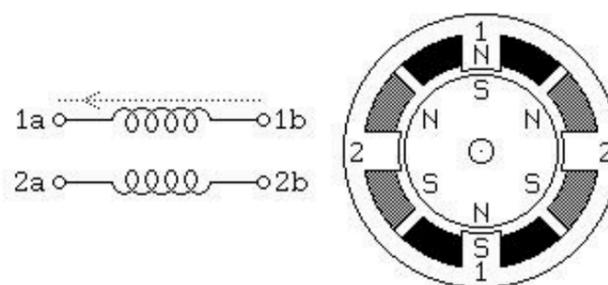


Figura 21 – Conexões do motor bipolar.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

4.3.3 Motores de passo unipolares e bipolares

Em termos práticos, um motor unipolar pode ser conectado como sendo bipolar, utilizando para isso a ligação série dos enrolamentos, ou seja, na Figura 19 se iriam conectar os terminais a e b de cada fase, sem utilizar o condutor comum 1 e 2.

Um exemplo de motor que permite conexão unipolar e bipolar é mostrado na Figura 22. As possibilidades de conexões dependerão da quantidade de terminais de conexão do motor, tendo-se então:

- 4 terminais – Os motores de 4 fios permitem apenas a conexão do tipo bipolar série;
- 6 terminais – Motores de 6 fios podem ser conectados fazendo-se a ligação bipolar série ou unipolar;
- 8 terminais – Os motores de 8 fios podem ser ligados em todos os tipos de conexões mostradas na Figura 22, que são bipolar série, bipolar paralela e unipolar.

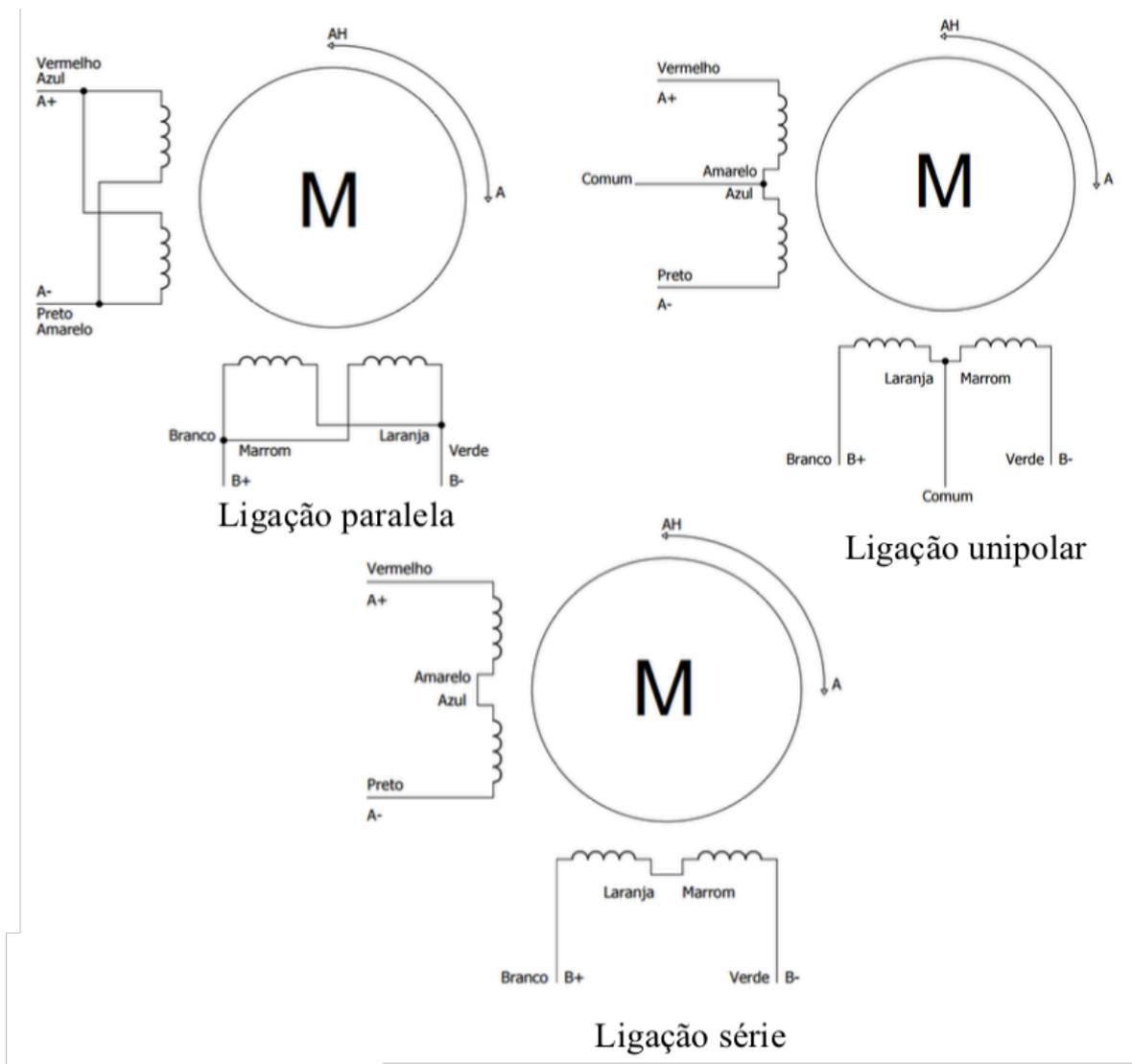


Figura 22 – Diferentes ligações de um motor de passo.

Fonte: <https://www.neomotion.com.br>. Acesso em 28/07/2021.

4.4 Circuito elétrico equivalente do motor de passo

O circuito elétrico equivalente do motor de passo, por fase, é mostrado na Figura 23, onde se tem a resistência do enrolamento (R_a), a indutância do enrolamento (L_a) e a tensão induzida ou força contraeletromotriz (E_a).

Este circuito pode ser adaptado, conforme a ligação das diferentes fases do motor, desde que se tenha os parâmetros fornecidos pelo fabricante.

As tensões terminais nas fases A e B do motor serão dadas por:

$$v_A = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + e_A$$

$$v_B = R_B \cdot i_B + L_B \cdot \frac{di_B}{dt} + e_B$$

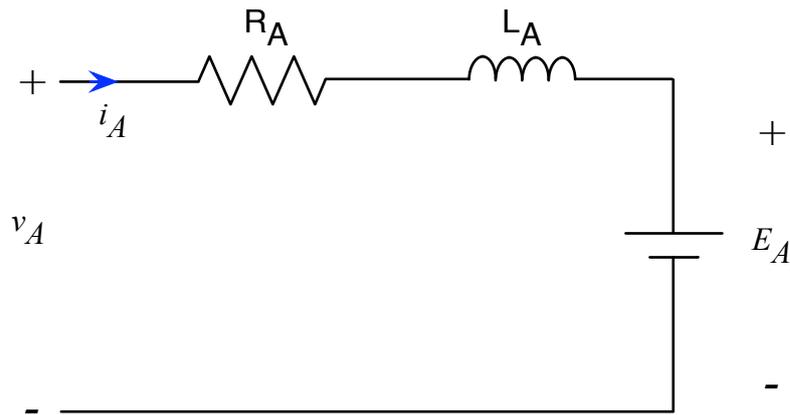


Figura 23 – Circuito elétrico equivalente de uma fase de um motor de passo.

5 Circuitos de Acionamento de Motores de Passo

5.1 Introdução

A seguir serão apresentados alguns circuitos de acionamento de motores de passo, buscando-se mostrar o funcionamento básico dos mesmos e permitir que a partir dos mesmos diferentes soluções e circuitos sejam propostos e implementados.

5.2 Modos de passo

Um motor de passo pode ser acionado de diferentes maneiras para se ter ângulos de deslocamento diferentes conforme a aplicação. Assim, se pode ter os modos de passo, que definem o incremento de giro que será dado ao eixo conforme a técnica de acionamento utilizada, sendo eles:

- Passo completo – O passo completo é realizado energizando ambas as fases (A e B) e alternando-se o sentido de corrente nas mesmas. Por exemplo, para um motor que executa 200 passos completos por rotação, se terá um ângulo de $1,8^\circ$ para cada passo completo ($360^\circ/200$);
- Meio passo – Neste caso o número de passos para uma volta completa será o dobro do modo passo completo, implicando, para um motor de 200 passos completos por rotação, em um deslocamento de $0,9^\circ$ por passo, o que é obtido energizando-se uma fase e em seguida ambas as fases, de maneira alternada. Este modo apresenta um torque menor do que no modo passo completo;
- Micropasso – No modo de acionamento de micropassos, um passo completo é dividido em passos menores, obtido aplicando-se correntes com intensidades variáveis nos enrolamentos do motor. O torque é em torno de 30% menor do que

no modo de passo completo (Fonte: <https://br.omega.com>. Acesso em 29/07/2021.). O movimento neste modo de acionamento é muito suave, sendo utilizado quando se tem necessidade de posicionamentos exatos e grande gama de velocidades para o motor.

Os diferentes modos de acionamento do motor de passo são obtidos por diferentes circuitos de acionamento, implicando em aumento de complexidade para o modo meio passo e micropasso. No entanto, é possível se dividir um passo completo de $1,8^\circ$ em 256 micropassos, obtendo-se em deslocamentos de $0,007^\circ$ por passo e um total de 51200 passos (Fonte: <https://br.omega.com>. Acesso em 29/07/2021.).

A Figura 24 mostra exemplos de circuitos de acionamento (*drive*) de motor de passo, com potências da ordem de algumas dezenas de watts, alimentação na faixa 12 a 40 V, correntes de operação de até 3,5 A e acionamento nos modos passo completo, meio passo e micropasso.



Passo completo e meio passo



Micropassos

Figura 24 – Exemplo de drive de acionamento de motor de passo.

Fonte: <https://br.omega.com>. Acesso em 28/07/2021.

A Figura 25 mostra o funcionamento simplificado de um motor de passo de ímã permanente, do tipo unipolar, com acionamento no modo passo inteiro. Nota-se que, neste exemplo, após 4 passos o motor completa uma volta inteira, sendo que é acionado um enrolamento a cada passo.

O funcionamento do mesmo motor, mas agora com acionamento no modo meio passo é mostrado na Figura 26, onde se tem 8 passos para uma volta completa do rotor.

A Figura 27 apresenta a sequência de passos para o acionamento do motor de passo do tipo bipolar no modo passo inteiro, enquanto a Figura 28 mostra o funcionamento deste motor do exemplo, com acionamento no modo meio passo.

A descrição apresentada nas Figura 25 a Figura 28 tem o intuito de mostrar o posicionamento do rotor e a sequência de passos, não correspondendo fielmente ao modo de conexão dos enrolamentos para motores comerciais, pois neste caso deve-se levar em conta o número de terminais do motor e o diagrama de ligações sugerido pelo fabricante, conforme cada caso e aplicação em particular.

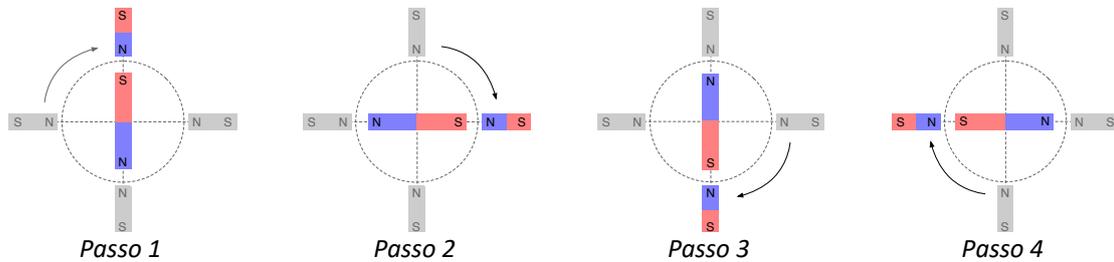


Figura 25 – Acionamento de motor de passo unipolar no modo passo inteiro.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

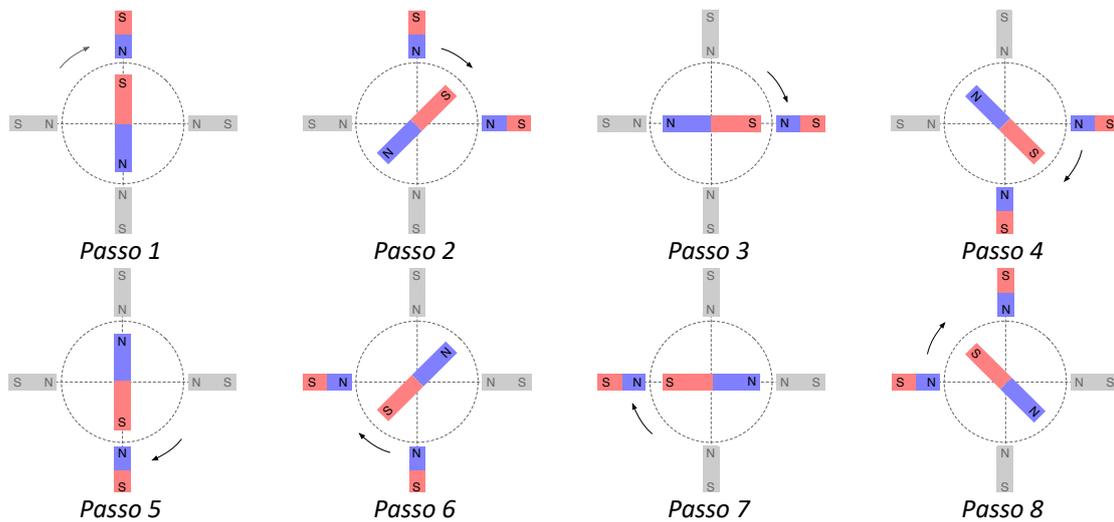


Figura 26 – Acionamento de motor de passo unipolar no modo meio passo.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

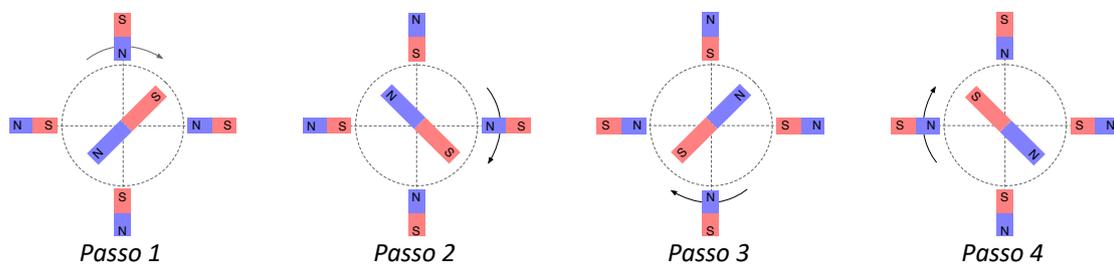


Figura 27 – Acionamento de motor de passo bipolar no modo passo inteiro.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

A título de exemplo, na Figura 29 se mostra uma sequência de acionamentos dos enrolamentos de um motor para operar no modo micropasso. Neste caso, os deslocamentos são menores, tendo-se entre as posições 0° e 45° duas posições intermediárias, conseguidas pela gradação da amplitude da corrente aplicada nos enrolamentos em uso.

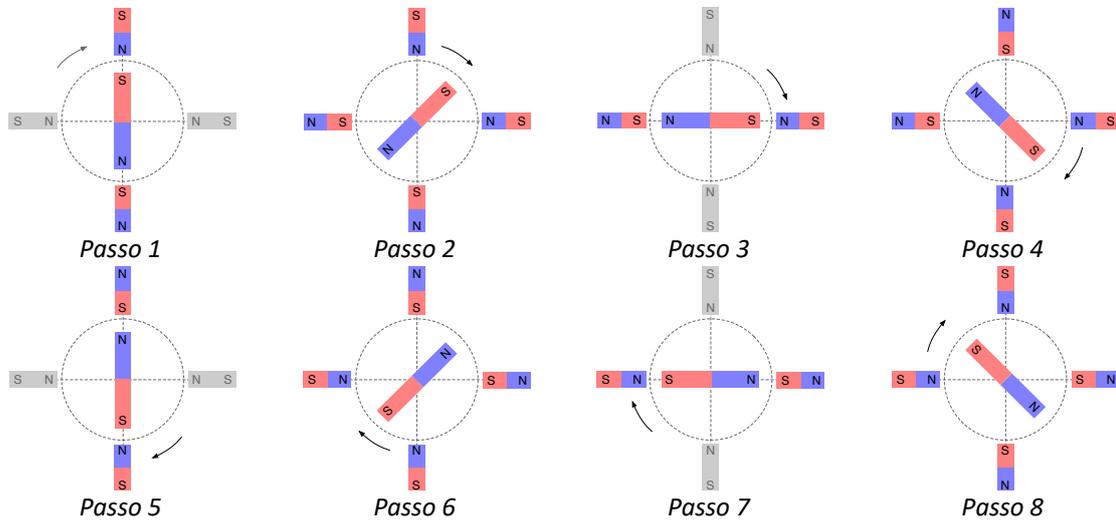


Figura 28 – Acionamento de motor de passo bipolar no modo meio passo.

Fonte: Adaptado de (Brites e Santos, 2008).

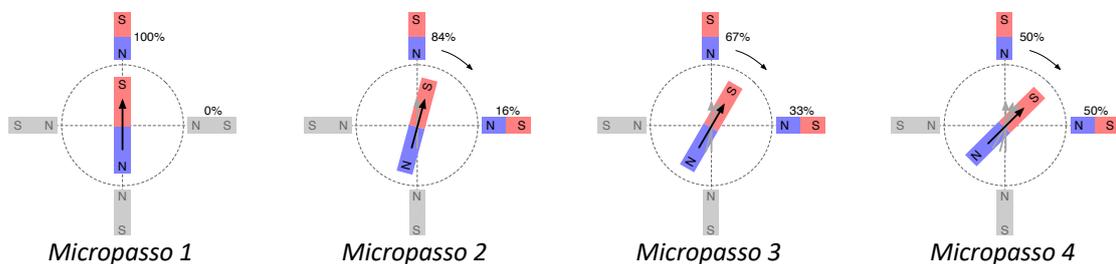


Figura 29 – Acionamento de motor de passo unipolar no modo micropasso.

5.3 Acionamento de motores de passo

Um motor de passo pode ser acionado de diferentes maneiras para se ter ângulos de deslocamento diferentes e operar com modos de passo distintos, conforme estudado anteriormente.

Assim, neste capítulo serão apresentados alguns circuitos para acionamento de motores de passo, não se pretendendo aprofundar em demasia ou exaurir o assunto, mas sim, dar as informações gerais para o desenvolvimento de soluções tecnológicas na área de acionamentos eletrônicos.

É interessante destacar, conforme comentado e mostrado na Figura 24 que existem circuitos e produtos no mercado que permitem diferentes configurações de operação e acionamento de motores em diferentes modos e operação utilizando o mesmo dispositivo para tal.

A Figura 30 mostra um diagrama de blocos exemplificando o acionamento de um motor de passo de 3 fases. Nota-se que as tensões aplicadas em cada fase seguem um padrão sequencial de A para C ou vice-versa, conforme o sentido de rotação desejado.

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 de sinais de comando que determinam a velocidade e a direção de giro do motor, originam a sequência correta dos pulsos de acionamento para as fases A, B e C.

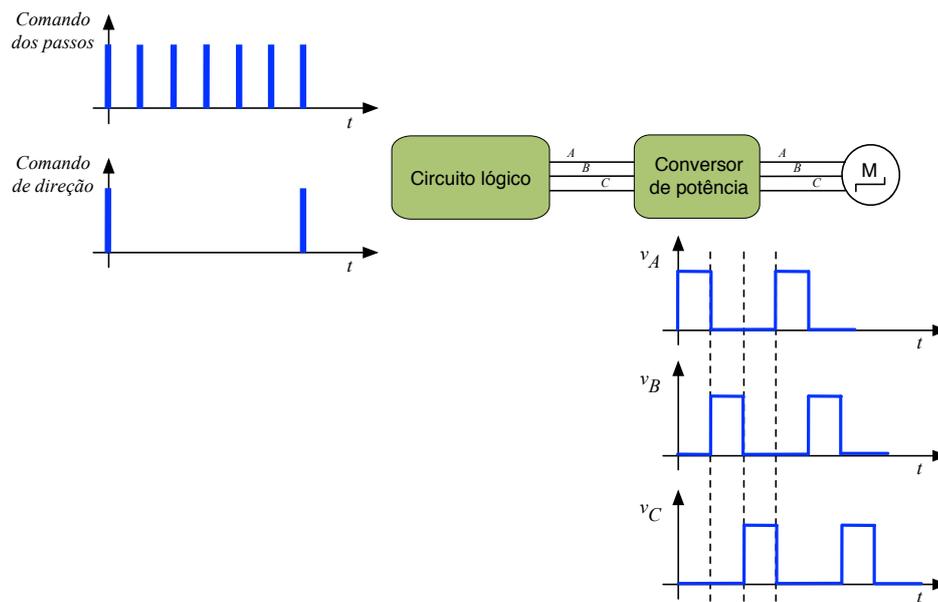


Figura 30 – Circuito de acionamento de motores de passo.

5.4 Acionamento de motor de passo de relutância variável

Os motores de passo de relutância variável podem ser controlados fazendo-se o acionamento de suas fases (enrolamentos) sequencialmente, pois em geral possuem de 3 a 5 bobinas. A sequência de acionamento pode ser no sentido horário ou anti-horário, conforme se desejar que o eixo do motor gire em um sentido ou outro.

A Figura 31 apresenta um circuito simples de acionamento do motor de relutância variável a partir de transistores, sendo que cada fase está sendo controlada por um elemento específico. Em sendo circuitos com características resistiva-indutivas, é necessário utilizar diodos de roda-livre para evitar sobretensões nos elementos do circuito.

Os sinais de comando para determinar a velocidade e sentido de giro do motor, além dos pulsos sequencialmente corretos, serão gerados por um circuito lógico ou microcontrolador, por exemplo, que não está sendo mostrado na figura.

O projeto do circuito mostrado na Figura 31 é realizado de maneira semelhante aos

exemplos mostrados no capítulo anterior sobre motores de corrente contínua, levando-se em conta as tensões e correntes de operação do motor, neste caso, especificamente para cada fase do mesmo.

Por exemplo, para um motor modelo AK23/7.0F8FN1.8 do fabricante Neoyama, a corrente na fase será de 1 A, a tensão para ligação em série será de 5 V, tendo resistência de 2,4 Ω e indutância de 9,2 mH.

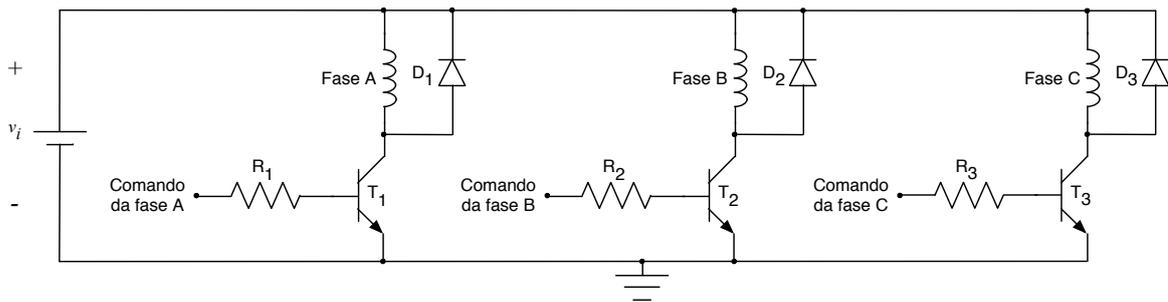


Figura 31 – Circuito de acionamento de motor de passo de relutância variável.

Fonte: Adaptado de <https://www.feis.unesp.br>. Acesso em 28/07/2021.

5.5 Acionamento de motor de passo unipolar

O acionamento de motores de passo unipolares é realizado fazendo-se o acionamento de cada fase, que neste caso possui um terminal comum, a partir de transistores, por exemplo, como mostrado na Figura 32, provendo a circulação de corrente pela metade do enrolamento com um sentido de circulação, e na sequência, fazendo-se o acionamento da outra metade do enrolamento, com sentido de corrente contrário ao anterior.

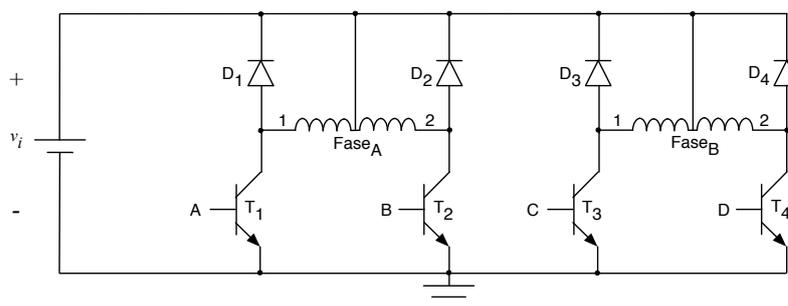


Figura 32 – Circuito de acionamento de motor de passo unipolar.

Fonte: Adaptado de <https://www.feis.unesp.br>. Acesso em 28/07/2021.

No circuito da Figura 32, ao comandar o transistor T_1 , o terminal 1 da fase A será ligado ao polo negativo da fonte de alimentação (v_i), enquanto o terminal comum estará permanentemente ligado ao polo positivo da fonte. O mesmo ocorre se o transistor T_3 for acionado,

neste caso para a fase B.

Por sua vez, se os transistores T_2 e T_4 forem acionados, então os terminais 2 das fases A e B serão conectados ao polo negativo da fonte de alimentação.

5.6 Acionamento de motor de passo bipolar

O acionamento dos motores de passo bipolares exige o uso de circuitos eletrônicos que possam proporcionar a inversão da polaridade da tensão sobre as fases do motor, o que em geral é realizado com conversores do tipo ponte completa (ponte H), como mostrado na Figura 33.

Os transistores S_1 e S_4 são acionados conjuntamente, conectando a fase A à fonte de alimentação, mantendo-se os transistores S_2 e S_3 bloqueados. Para inverter a polaridade da tensão sobre a fase A, acionam-se os transistores S_2 e S_3 , mantendo S_1 e S_4 bloqueados.

A fase B é acionada de maneira semelhante, agora com os transistores S_5 e S_8 e S_6 e S_7 atuando as pares, como descrito para a fase A.

É importante destacar que os interruptores de cada braço dos conversores ponte completa, por exemplo S_1 e S_2 , não podem ser acionados simultaneamente, pois aí se terá um curto-circuito na fonte de alimentação.

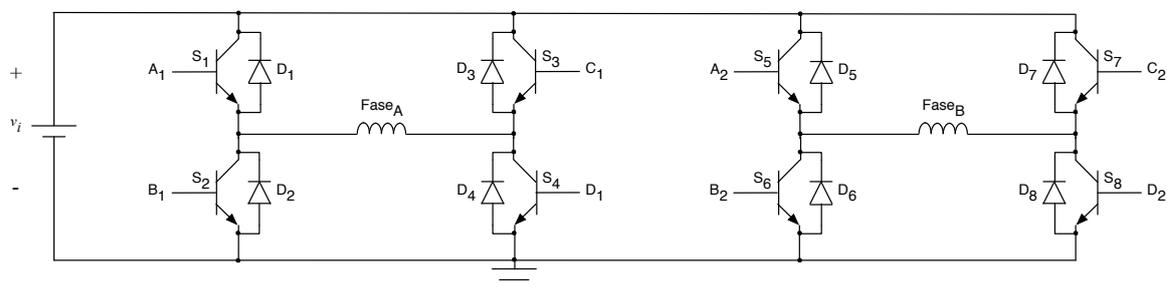


Figura 33 – Circuito de acionamento de motor de passo bipolar.

Fonte: Adaptado de <https://www.feis.unesp.br>. Acesso em 28/07/2021.

5.7 Acionamento de motor de passo com circuitos integrados

Os circuitos de acionamento de motores de passo podem ser implementados utilizando circuitos integrados dedicados, como mostrado em capítulo anterior para motores de corrente contínua.

A Figura 34 mostra uma placa de acionamento de motores que utiliza o circuito integrado L298N, que possui internamente dois conversores ponte completa, permitindo o desenvolvimento de um circuito semelhante ao mostrado na Figura 33 e que possibilita o controle por sinais em nível lógico, que podem ser originados em microcontroladores, como mostrado, em termos práticos, na Figura 35. Este exemplo da Figura 35 utiliza um Arduino para a geração dos sinais lógicos para acionamento do motor de passo, definindo por *software* a velocidade de rotação e sentido de giro.

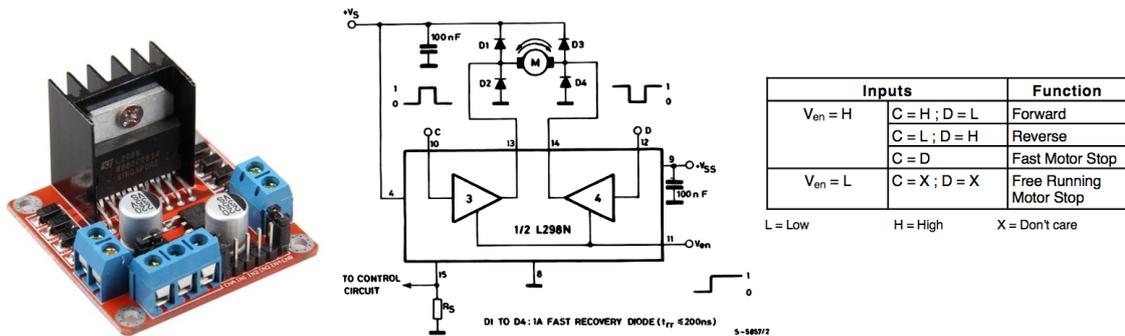


Figura 34 – Exemplo de circuito integrado para acionamento de motor de passo.

Fonte: Adaptado de <https://www.st.com>. Acesso em 28/07/2021.

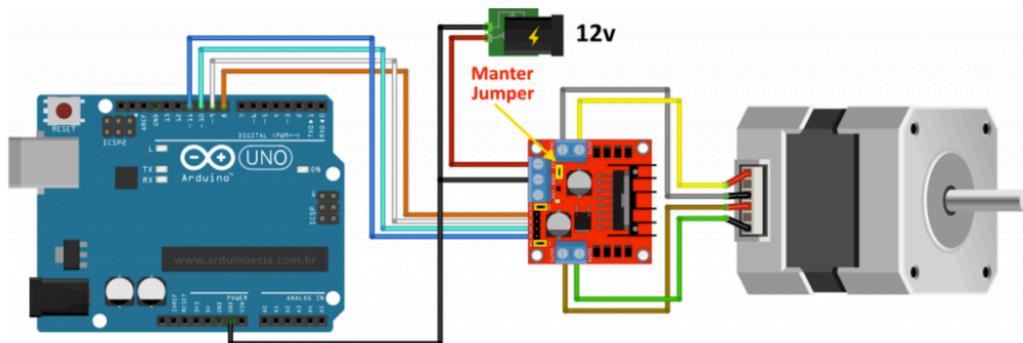


Figura 35 – Circuito de acionamento de motor de passo com circuito integrado.

Fonte: Adaptado de <https://www.arduinoocia.com.br>. Acesso em 28/07/2021.

6 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Comente sobre as aplicações dos motores de passo?

Os motores de passo são utilizados quando se necessita realizar deslocamentos precisos, como em impressoras, braços robóticos, mesas digitalizadoras, fresadoras, etc.

ER 02. Quais os tipos de motores de passo considerando sua estrutura construtiva?

Em relação a estrutura construtiva os motores de passo são de relutância variável, ímã permanente ou híbridos.

ER 03. Comente sobre o acionamento de um motor de passo no modo passo inteiro.

Acionar um motor de passo no modo passo inteiro significa que o rotor irá se deslocar de um polo magnético (enrolamento ou fase) do estator até o próximo, a cada pulso de acionamento aplicado ao motor.

ER 04. Qual a principal diferença dos motores de passo em relação aos motores de corrente contínua quando o rotor estiver parado?

A principal diferença é o torque de manutenção ao alimentar o motor e manter o rotor parado, que nos motores de passo é superior aos motores de corrente contínua.

ER 05. Os motores de passo podem ser alimentados por uma tensão contínua fixa?

Não, pois neste caso o rotor ficará travado. Os motores de passo devem ser alimentados por pulsos de tensão aplicados aos seus enrolamentos.

Exercícios Propostos

EP 01. Cite aplicações para os motores de passo?

EP 02. Quais os tipos de motores de passo levando em conta as conexões de seus enrolamentos?

EP 03. Comente sobre o modo de acionamento de micropassos.

EP 04. Quais as principais partes de um motor de passo?

EP 05. Comente sobre o acionamento de motores de passo de relutância variável.

7 Atividade Avaliativa

7.1 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. Qual o modo de acionamento do motor de passo deve ser usado para se ter deslocamentos de grande precisão?

AA 02. Comente sobre o conversor a ser utilizado para acionar motores de passo bipolares.

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

AA 04. O que significa perda de passo no acionamento de motores de passo?

AA 05. Quais os elementos do circuito equivalente de um motor de passo?

AA 01. Para se ter deslocamentos de grande precisão deve-se utilizar o modo de acionamento por micropassos.

AA 02. O acionamento dos motores de passo bipolares deve ser realizado utilizando conversores ponte completa, pois é necessário inverter a polaridade da tensão sobre as fases.

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

AA 04. Perda de passo significa que o rotor girou incorretamente a partir dos pulsos de acionamento aplicados ao motor, o que pode ocorrer devido a vibração ou pela escolha incorreta da frequência de acionamento do circuito de controle do motor.

AA 05. O circuito equivalente, por fase, de um motor de passo é formado pela resistência do enrolamento, da indutância do enrolamento e da tensão induzida.