

# **ANEXOS**

# Introdução teórica aos MOTORES DE PASSO e seu CONTROLO

## 1. Introdução

Os motores de passo são dispositivos que convertem a energia eléctrica, fornecida na forma de um trem de pulsos, em energia mecânica na forma de movimento rotacional discreto (incrementos no deslocamento angular).

Um dos problemas associados aos motores de passo residia no custo dos circuitos de accionamento/controlo. Contudo, com o desenvolvimento da tecnologia dos semicondutores de potência, permitindo interruptores cada vez mais rápidos; da electrónica de controlo, permitindo circuitos integrados específicos para o controlo; e devido ao vasto leque de oferta e reduzido custo dos microcontroladores que permitem obter um controlo digital robusto, o custo dos circuitos de accionamento/controlo são cada vez menores, pelo que a utilização de motores de passo em aplicações industriais e comerciais é cada vez mais vasta.

Os motores de passo são usados numa grande variedade de aplicações de baixa potência, como por exemplo, alguns tipos de máquinas ferramenta, robôs, manipuladores, mesas X-Y, máquinas de costura industriais, *plotters*, impressoras e *drivers* de disquetes e de discos. De entre as suas vantagens destacam-se:

- boa performance para o controlo de velocidade e posição, mesmo para operação em malha aberta;
- actuador para aplicações servo extremamente fiável e sem necessidade de *feedback*;
- respondem directamente a controlo digital;
- amplo ajuste da gama de velocidade (frequência dos passos do rotor é proporcional à frequência do controlo digital);
- velocidade constante, desde que a frequência dos pulsos de controlo seja constante;
- binário elevado com rotor parado (*holding torque*);
- possui binário de residual;
- reduzido tempo de paragem/arranque (resposta rápida);
- vida útil longa;

- não necessitam de manutenção;
- baixo custo, comparado com outros sistemas de accionamento.
- capacidade de realizar sequências de passos em ambos os sentidos de rotação, sem qualquer erro de passo (não há necessidade de realimentação da posição do rotor do motor).

Desvantagens dos motores de passo:

- limitações de desempenho para algumas aplicações, nomeadamente em termos de velocidade máxima e de resolução.

## **2. Motor de Passo de Íman Permanente**

Como o nome indica, neste tipo de motores o rotor é composto por um íman permanente (os motores que se utilizarão nos trabalhos serão deste tipo). O estator tem um conjunto de enrolamentos de campo independentes, que formam pólos magnéticos pelos quais se realiza a alimentação do motor. A partir dos pulsos aplicados aos enrolamentos do estator, o campo magnético resultante do estator pode ser variado tanto em intensidade quanto em posição. A posição do rotor será alterada de forma a alcançar a posição de alinhamento do campo do rotor com o do estator.

O rotor move-se de acordo com um certo ângulo definido a cada pulso de controlo. A frequência dos pulsos de controlo é proporcional à frequência de rotação do rotor. Se a frequência de controlo for elevada, ter-se-á um movimento de rotação virtualmente contínuo.

Na figura 1 representa-se, esquematicamente, um motor de passo deste tipo com 4 enrolamentos estatóricos. Quando a fase A é alimentada, o rotor tende a alinhar os seus pólos com os pólos de polaridade oposta do estator. Mudando a alimentação (ou excitação) da fase A para a fase B o rotor desloca-se rodando  $90^\circ$  no sentido dos ponteiros do relógio, por forma a alinhar, novamente, os seus pólos com os pólos de polaridade oposta do estator. A esta rotação dá-se o nome de passo. Alimentando a fase B com uma polaridade inversa da representada na figura 1, obtém-se um passo de  $90^\circ$  no sentido oposto. Na ausência de alimentação verifica-se a existência de um pequeno binário (binário remanente) que, tipicamente, atinge 10% do binário máximo.

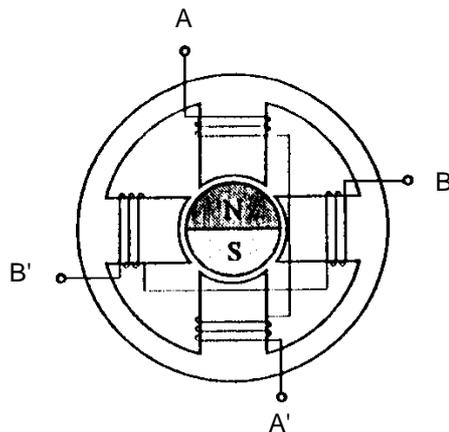


Figura 1 - Representação esquemática de um motor de passo de ímã permanente.

### 3. Modos de Operação (alimentação) do Motor de Passo

As características de funcionamento de um motor de passo dependem não só do seu tipo e do seu número de fases, mas também do modo de operação adoptado e da sequência temporal de excitação.

Os modos de operação mais usados podem classificar-se em:

**Operação Unipolar** - Cada enrolamento do estator deve possuir um ponto médio (*center-tapped* (CT)). Metade do enrolamento é alimentado de cada vez, com um sentido de corrente diferente do que é aplicado à outra metade. Desta forma, quando uma metade é alimentada o campo magnético produzido tem um sentido, tendo o sentido contrário quando é alimentada a outra metade do enrolamento (figura 2). O símbolo de massa, visualizado na figura indica o ponto médio. Na prática este ponto médio liga-se, directamente ou através de uma resistência (limitar a corrente), à massa do circuito de accionamento. De qualquer modo, as tensões de fase aplicadas aos restantes 4 pontos dos enrolamentos, encontram-se ou no estado lógico '1' ou '0'. Na figura 3 representa-se o esquema de um possível circuito de accionamento para este tipo de operação. Este circuito é composto por 4 interruptores de potência com os respectivos díodos de *freewheeling* (díodos de protecção).

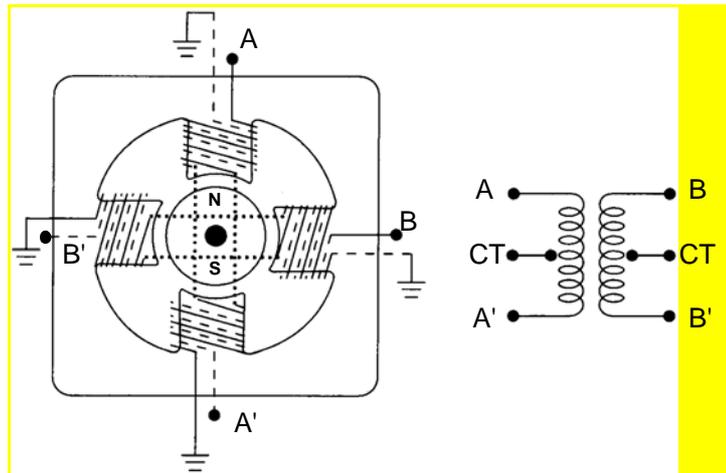


Figura 2 - Motor de passo com operação unipolar.

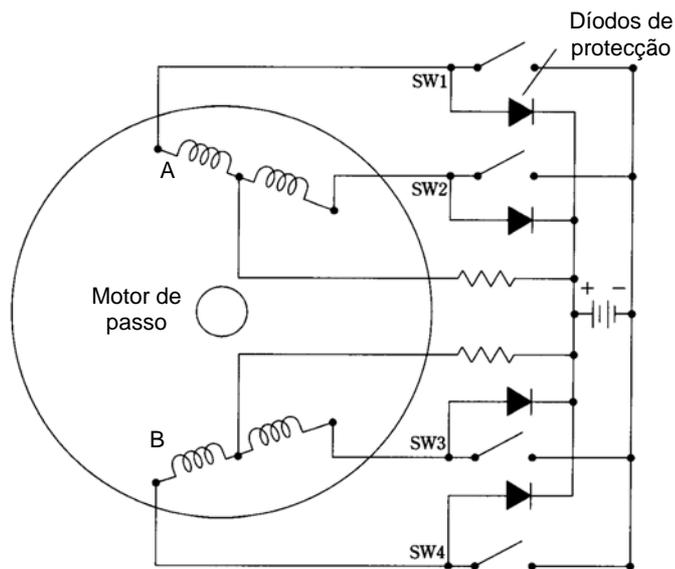


Figura 3 - Circuito de accionamento para operação unipolar

**Operação Bipolar** - Os enrolamentos do estator não necessitam de ter pontos médios. Neste tipo de operação a corrente percorre todo o enrolamento e quando o seu sentido é invertido, o campo magnético produzido por esse enrolamento também é invertido (figura 4). Na figura 5 representa-se o esquema de um possível circuito de accionamento para este tipo de operação. Este circuito é composto por 8 interruptores de potência.

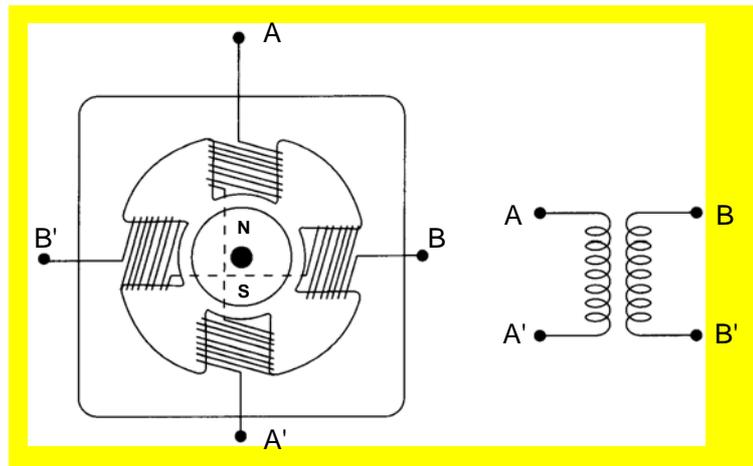


Figura 4 - Motor de passo com operação bipolar.

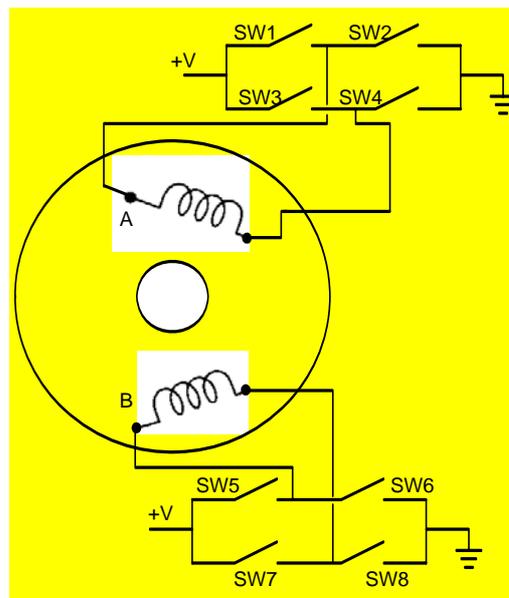


Figura 5 - Circuito de accionamento para operação bipolar.

### Comparação entre operação unipolar e bipolar:

- o motor que permite operação unipolar é mais caro pois necessita de enrolamentos com ponto médio;
- a operação unipolar não utiliza toda a capacidade de performance do motor, devido ao facto de utilizar metade dos enrolamentos de cada vez. Desta forma, o binário para a operação bipolar é cerca de 30% maior do que o binário para a operação unipolar;

- a operação bipolar requer um circuito de accionamento de maior custo do que o necessário para a operação unipolar. Para a operação bipolar são necessários 8 interruptores de potência e além disso deve ter-se cuidado com o projecto do circuito de controlo por forma a que os interruptores do mesmo braço não conduzam simultaneamente, curto-circuitando a fonte de alimentação. Para a operação unipolar são necessários apenas 4 interruptores de potência (ver figuras 3 e 5).

## 4. Sequências Temporais de Accionamento

Para além dos modos de operação apresentados, existem também diferentes sequências temporais de accionamento (excitação) dos enrolamentos. O desempenho de um motor de passo é bastante influenciado pelo método de accionamento empregue. De seguida descrevem-se os principais métodos de accionamento dos enrolamentos.

Os métodos de accionamentos a seguir apresentados são válidos tanto para o modo de operação unipolar como para bipolar. Recorda-se que, quando o motor opera no modo bipolar, o sentido da corrente nos enrolamentos pode ser positivo (produzindo um campo magnético positivo) ou negativo (produzindo um campo magnético negativo). No caso da operação unipolar, ora uma metade do enrolamento conduz corrente (produzindo, por exemplo, um campo magnético positivo), ora conduz a outra metade (produzindo um campo magnético negativo). As indicações de + ou – nos enrolamentos indicam a produção de um campo magnético positivo ou negativo, respectivamente.

### **Accionamento tipo *Wave Excitation* ou sequência de excitação de uma fase:**

Neste tipo de accionamento é fornecida corrente apenas a um enrolamento (ou a meio enrolamento, no caso da operação unipolar) de cada vez (figuras 6 e 7). Com 4 pólos no estator e 2 no rotor tem-se 4 passos por volta (ângulo de passo = 90°). Uma vez que apenas uma bobina é energizada de cada vez, o binário dinâmico e o *holding torque* serão reduzidos de cerca de 30% em relação à operação com os dois enrolamentos energizados simultaneamente. A maior vantagem deste accionamento é a sua grande simplicidade. A tabela 1 mostra a sequência de excitação. Esta tabela é válida quer para operação bipolar quer para unipolar.

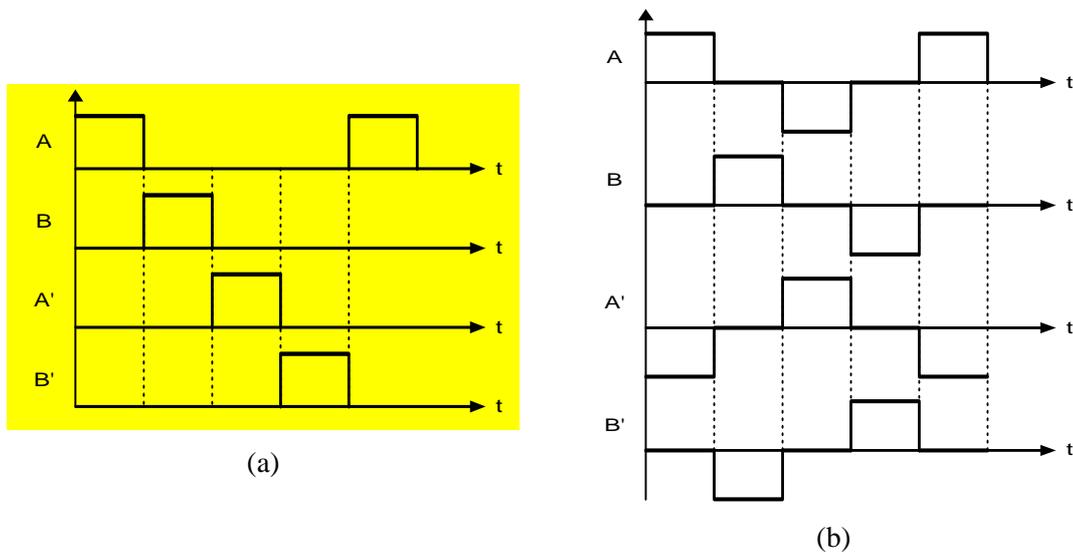


Figura 6 - Accionamento tipo *wave excitation* para operação: a) unipolar; b) bipolar.

Passo	SW1	SW2	SW3	SW4
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	OFF	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	OFF
4	OFF	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	OFF	OFF

Tabela 1 - Sequência de comutação para accionamento tipo *wave excitation*.

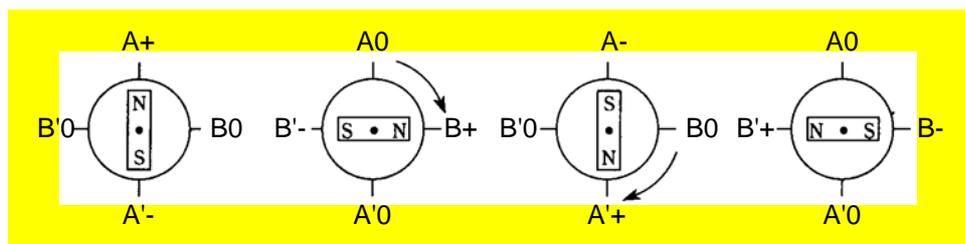


Figura 7 - Posições dos passos do rotor de um motor de íman permanente, para accionamento tipo *wave excitation* e operação bipolar.

### Accionamento tipo *Full Step* ou sequência de excitação de duas fases:

Com esta sequência são alimentadas, simultaneamente, duas fases e a alteração das polaridades nos enrolamentos dá-se num enrolamento de cada vez. As figuras 8 e 9 ilustram este tipo de sequência para os modos de operação unipolar e bipolar. Este é o tipo de accionamento mais usado. A tabela 2 mostra a sequência de excitação deste accionamento. Com 4 pólos no estator e 2 no rotor tem-se 4 passos por volta (ângulo de passo =  $90^\circ$ ). As posições de equilíbrio do rotor distam de meio passo relativamente às

posições de equilíbrio obtidas com a sequência anterior (*wave excitation*). A alimentação simultânea de duas fases implica um aumento do fluxo magnético, o que se traduz por um aumento do binário disponível e por uma melhoria das características de amortecimento das oscilações do rotor. No entanto, as perdas no circuito magnético aumentam, pelo que, relativamente ao accionamento *wave excitation*, a potência solicitada à fonte de alimentação é o dobro e conseqüentemente o rendimento total é inferior.

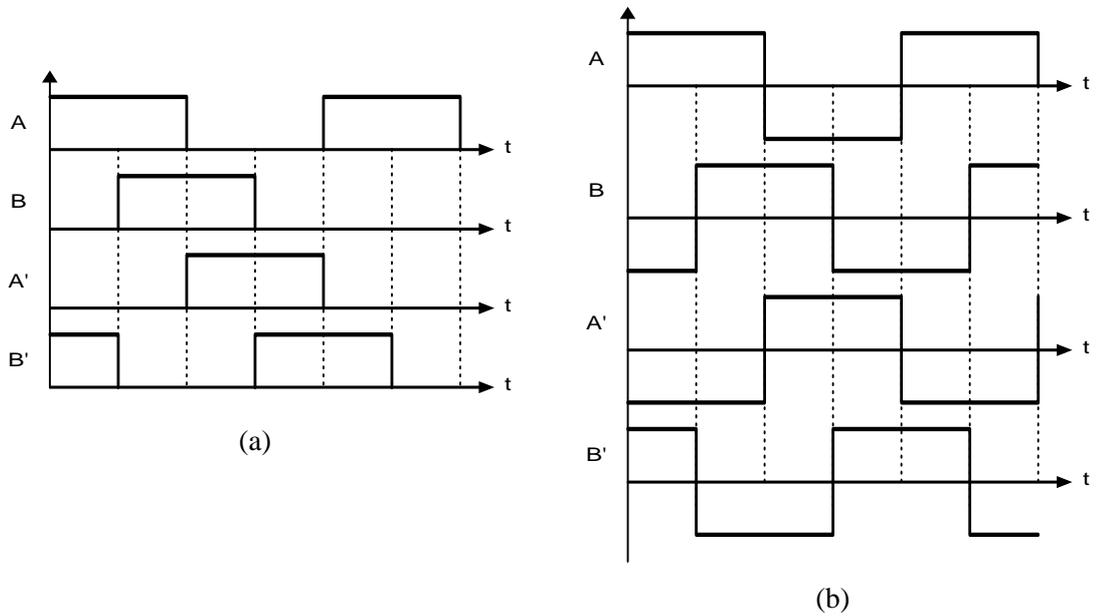


Figura 8 - Accionamento tipo *full step* para operação: a) unipolar; b) bipolar.

Passo	SW1	SW2	SW3	SW4
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	OFF	ON
4	OFF	ON	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF

Tabela 2 - Sequência de comutação para accionamento tipo *full step*.

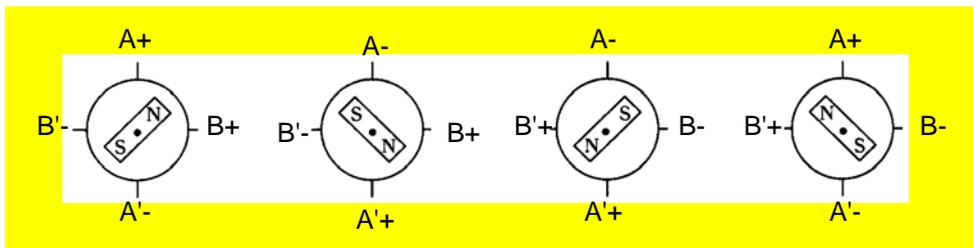


Figura 9 - Posições dos passos do rotor de um motor de íman permanente, para accionamento tipo *full step* e operação bipolar.

### Accionamento tipo *Half Step* ou sequência de excitação de meio passo:

Esta sequência corresponde à alternância entre as 2 sequências apresentadas (figuras 10 e 11). Com 4 pólos no estator e 2 no rotor tem-se 8 passos por volta (ângulo de passo =  $45^\circ$ ). Com este método consegue-se obter passos com metade do deslocamento angular dos passos dos accionamentos anteriores, obtendo-se uma maior resolução e melhorando-se as características de funcionamento no que diz respeito à ocorrência de instabilidades.

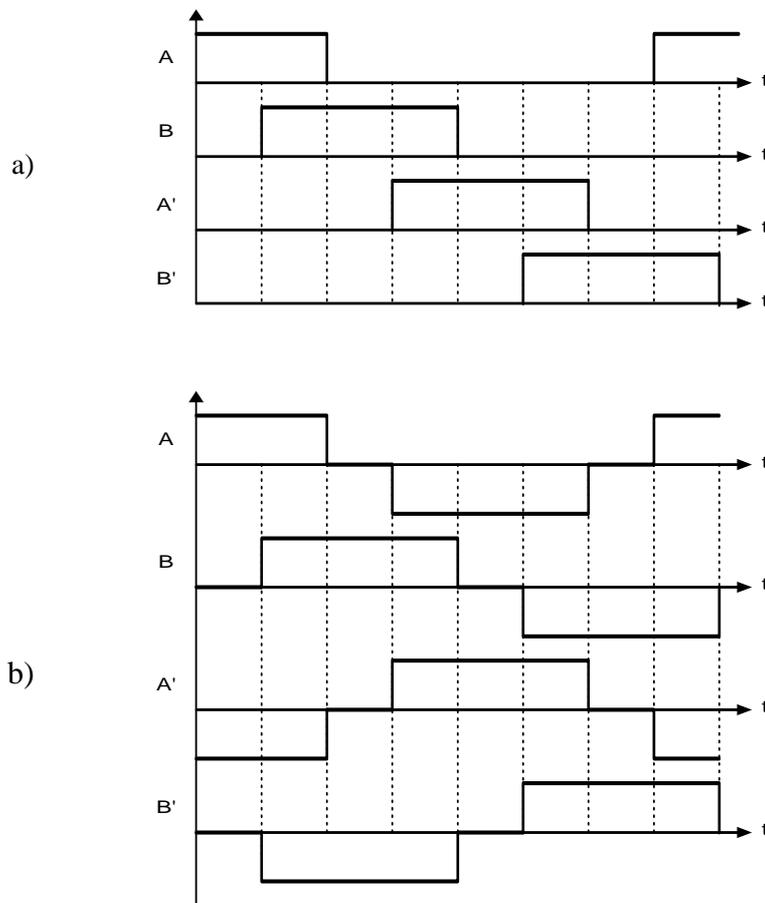


Figura 10 - Accionamento tipo *half step* para operação: a) unipolar; b) bipolar.

Este tipo de accionamento é muito útil uma vez que a construção mecânica de motores com ângulos de passo muito pequenos é bem mais complexa e cara, pelo que, é mais económico usar um motor de 100 passos, por exemplo, numa configuração *half step*, do que um motor de 200 passos em *full step*. Contudo, deve notar-se que o valor do *holding torque* quando se alimenta uma fase é diferente daquele que ocorre quando se alimentam as duas fases (figura 12). Isso ocorre devido ao facto de num passo os dois enrolamentos estarem energizados e no passo seguinte apenas está um, pelo que obtém-

se um *holding torque* mais forte num passo e mais fraco no passo seguinte. Este fenómeno, bem como a existência de desequilíbrios entre as correntes de alimentação quando várias fases são excitadas, pode levar à redução da precisão de posicionamento.

Passo	SW1	SW2	SW3	SW4
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	OFF
3	ON	OFF	OFF	ON
4	OFF	OFF	OFF	ON
5	OFF	ON	OFF	ON
6	OFF	ON	OFF	OFF
7	OFF	ON	ON	OFF
8	OFF	OFF	ON	OFF
1	ON	OFF	ON	OFF

Tabela 3 - Sequência de comutação para accionamento tipo *half step*.

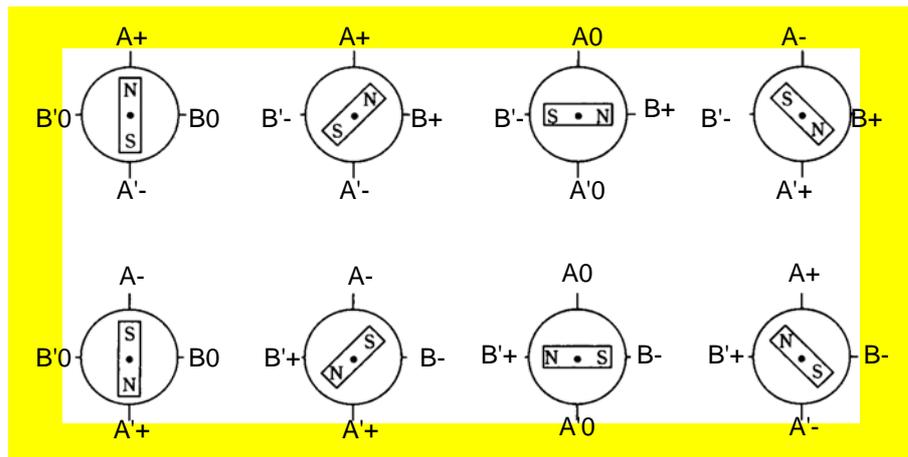
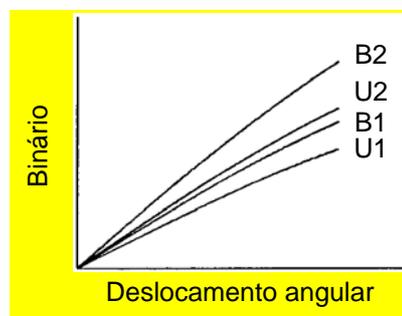


Figura 11 - Posições dos passos do rotor de um motor de ímã permanente, para accionamento tipo *half step* e operação bipolar.



Legenda

Operação:  
 U – Unipolar  
 B – Bipolar

Alimentação:  
 1 – Uma fase  
 2 – Duas fases

Figura 12 – Característica binário motor x deslocamento angular.

**Nota:** Qualquer um dos métodos referidos aumenta de complexidade com o número de fases do motor de passo.

### Accionamento tipo Mini Passo ou sequência de excitação de mini passo:

Os três métodos de accionamento até aqui referidos são os mais utilizados, contudo, o accionamento tipo mini passo permite subdividir o passo básico do motor em pequenas fracções através de uma sequência de excitação mais complexa. Assim, alimentam-se as fases com aproximações digitais de curvas sinusoidais (figura 13) das quais resultam interpolações correspondentes a novas posições de equilíbrio.

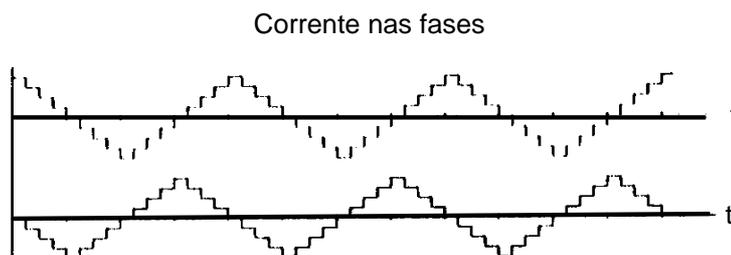


Figura 13 - Accionamento tipo mini passo.

Este método permite obter uma regulação mais eficiente da velocidade do motor de passo em regime permanente e uma elevada precisão de posicionamento. Contudo, necessita de um controlo bem mais complexo.

## 5. Especificações

### Ângulo de passo

É o mínimo deslocamento angular, normalmente dado em graus, que o rotor pode percorrer. Alguns valores típicos são:  $7.5^\circ$  (48 passos por rotação);  $15^\circ$  (24 passos por rotação);  $18^\circ$  (20 passos por rotação); etc.

Exemplo: ângulo de passo =  $15^\circ$

Para dar uma volta ( $360^\circ$ ) o rotor deverá andar  $\frac{360^\circ}{15^\circ} = 24$  passos

### Precisão

É especificada através do erro (não - acumulável) associado a cada passo quando o motor funciona sem carga ou com uma carga constante.

## Binário

O binário produzido por determinado motor de passo depende de 3 factores:

- frequência de passos;
- corrente fornecida aos enrolamentos;
- qualidade dos circuitos de alimentação.

### Binário de retenção (*holding torque*)

Quando o motor está parado (para zero passos por segundo e para a corrente nominal), o binário necessário para deslocar o veio o equivalente a um passo é o **binário de retenção**; este binário (estático) é normalmente superior ao binário dinâmico.

Para que o rotor fique parado com os enrolamentos do estator energizados, é necessário aplicar uma corrente contínua a esses enrolamentos, em vez dos pulsos periódicos que se aplicam para que o rotor do motor se mova. No instante em que se pretende que o rotor fique parado, é necessário manter os interruptores de potência que estavam a conduzir (nesse instante) no estado de condução permanente, durante todo o tempo em que se pretende que o rotor fique parado nessa posição. Deste modo, os enrolamentos produzem um campo magnético constante em amplitude e posição.

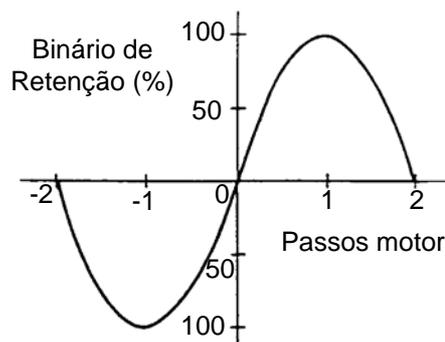


Figura 14

### Binário dinâmico

É o binário obtido a partir do gráfico Binário  $\times$  Velocidade. Para o motor de passo normalmente são definidas 2 curvas de binário:

- A curva ***pull-in***: mostra o binário disponível no modo paragem/arranque sem que haja perda de passos.
- A curva ***pull-out***: mostra o binário disponível quando o motor é acelerado lentamente até à velocidade final. Este é o binário dinâmico total produzido pelo motor. Por forma ao motor ser acelerado lentamente é necessário que, inicialmente, a frequência dos pulsos aplicados aos enrolamentos seja baixa e vá aumentando lentamente até à frequência desejada.

A diferença entre a curva *pull-in* e a *pull-out* dá o binário necessário para acelerar a inércia do rotor do motor.

**Nota:** O binário produzido por um motor de passo depende da velocidade do rotor, ou seja, depende da frequência dos pulsos de controlo aplicados aos enrolamentos do estator (figura 15). Quanto maior for a velocidade, menor será o binário produzido pelo motor. Contudo, o binário depende também da intensidade da corrente fornecida aos enrolamentos do estator, que é função do projecto do circuito de accionamento do motor.

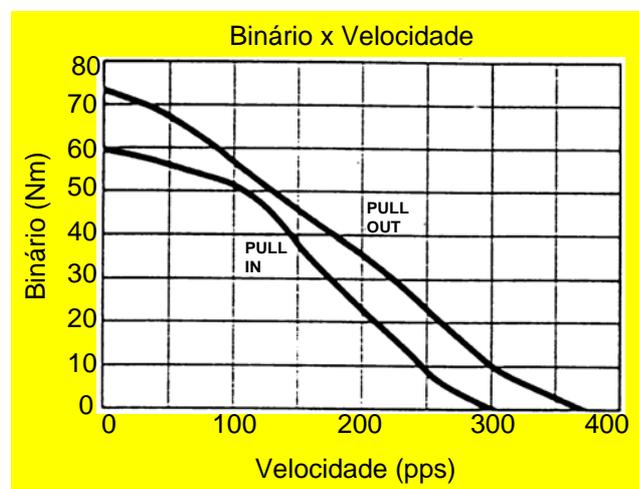


Figura 15 - Gráfico com as curvas (*pull in* e *pull out*) do binário dinâmico.

## Binário residual

Binário disponível sem alimentação (aproximadamente 1/10 do binário do motor, só para motores de passo de íman permanente).

## 6. Circuitos de Accionamento

O circuito de accionamento tem uma grande influência sobre o desempenho do motor, nomeadamente sobre as características de amortecimento e binário, pelo que deve ser tomado um cuidado especial na sua aplicação.

Num motor de passo cada enrolamento constitui um circuito com uma indutância  $L$  em série com uma resistência  $R$ . Assim, a alimentação do motor a frequências de comutação elevadas requer a adopção de técnicas especiais. De facto, a presença da indutância impede a injeção ou a drenagem de corrente em tempo nulo. Assim, ao ser aplicado um pulso de tensão com forma de onda quadrada, a corrente nos enrolamentos terá a forma da onda da figura 16. A corrente máxima nos enrolamentos dependerá da constante de tempo  $\tau = LR^{-1}$ .

**Exemplo:** Dado que  $LR^{-1} = 10$  ms, qual deve ser o tempo de duração do pulso de tensão aplicado aos enrolamentos do estator de um motor de passo, para que a corrente nesses enrolamentos alcance 95% do valor que teria se fosse aplicada uma tensão constante?

**Resposta:** O valor da corrente em regime permanente é dado por  $V/R$ , em que  $V$  é o valor da amplitude da tensão aplicada aos enrolamentos. Com pulsos de onda quadrada a corrente alcançará 95% do seu valor em regime permanente após  $3\tau$ , ou seja 30 ms.

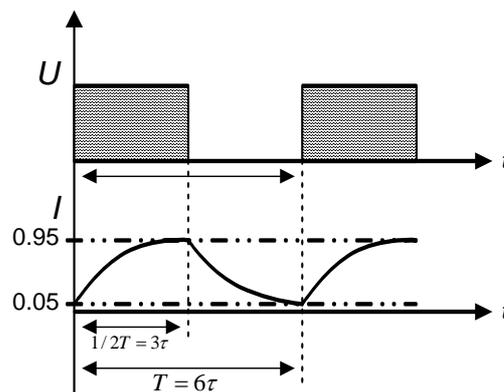


Figura 16 - Formas de onda do pulso de tensão e corrente num enrolamento de um MP.

Caso se deseje diminuir o tempo do pulso de controlo aplicado aos enrolamentos (aumento da frequência de passo), por forma a aumentar a velocidade de rotação do motor, ter-se-á o valor máximo da corrente nos enrolamentos diminuído, ocorrendo assim um decréscimo do binário produzido pelo motor de passo.

Para se obterem boas características de funcionamento a altas velocidades, já que a baixas velocidades os fenómenos transitórios têm um peso pouco significativo, é necessário minimizar o tempo correspondente a esses fenómenos (figura 17). De facto a existência de alguma corrente na fase alimentada anteriormente origina um binário que tende a manter o rotor na posição que lhe corresponde, isto é, origina um binário que se opõe à sequência de passos rotóricos. Por outro lado, a injeção rápida da corrente permite um melhor factor de utilização dos enrolamentos, ou seja, permite o aumento da energia fornecida e o correspondente incremento do binário motor disponível.

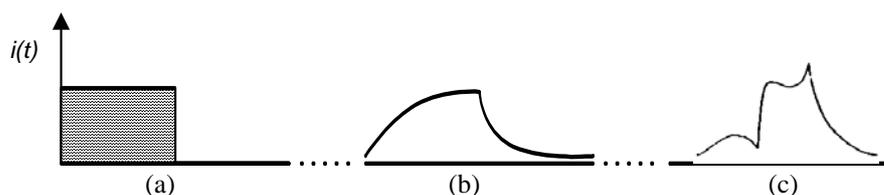


Figura 17 - Formas de onda típicas da corrente num enrolamento de um motor de passo para velocidades: a) baixas; b) médias; c) altas.

A seguir apresentam-se vários circuitos de alimentação que visam melhorar os fenómenos transitórios de drenagem e de injeção da corrente nos enrolamentos, bem como o seu efeito nas características e no rendimento do sistema.

## 6.1 Circuitos de Supressão da Corrente

Os enrolamentos do motor constituem um circuito indutivo. Assim, quando há uma comutação da alimentação são necessários circuitos alternativos, capazes de dissipar a energia magnética armazenada nos enrolamentos, sob a pena de ocorrerem sobretensões com a conseqüente destruição do circuito de alimentação. A figura 18 mostra vários circuitos que permitem a supressão da corrente nos enrolamentos após a comutação da alimentação. O circuito mais simples (figura 18a) consiste na adopção de um diodo de 'roda livre' (*freewheeling*). Neste caso, a energia dissipa-se, essencialmente, na resistência interna do enrolamento. Todavia, a supressão da corrente leva um tempo considerável, pelo que, uma supressão mais rápida requer a adopção de uma solução mais elaborada. Neste sentido, os restantes circuitos apresentados na figura 18, aceleram a supressão da corrente através da inserção de um ou mais componentes electrónicos capazes de dissiparem a energia. Na figura 19 apresenta-se a evolução temporal da corrente nos enrolamentos ( $i(t)$ ) para os circuitos de supressão referidos.

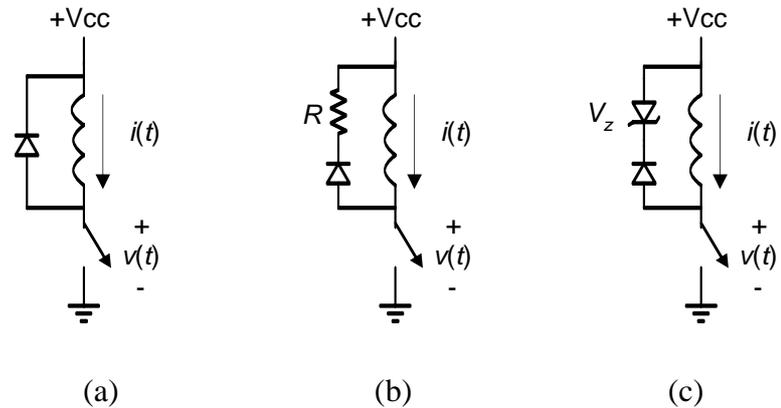


Figura 18 - Circuitos de supressão da corrente nos enrolamentos de um motor de passo: a) díodo; b) díodo e resistência; c) díodo e díodo zener.

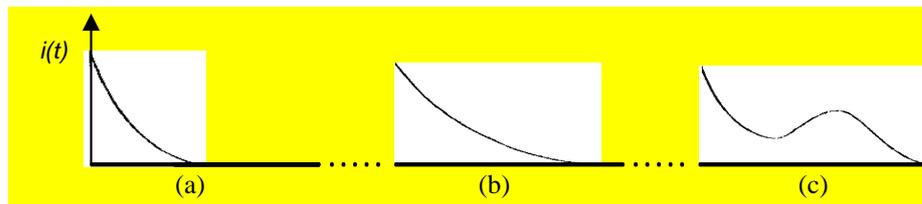


Figura 19 - Evolução temporal da corrente nos enrolamentos de um motor de passo a altas velocidades, para os circuitos de supressão: a) díodo; b) díodo e resistência; c) díodo e díodo zener.

Contudo, a adoção desses circuitos torna necessário o estudo das tensões no circuito de alimentação a fim de definir as tensões máximas a suportar pelos interruptores de potência. A figura 20 mostra a evolução temporal da tensão  $v(t)$  para os quatro circuitos de supressão da corrente apresentados anteriormente. Como se verifica, os circuitos mais sofisticados levam ao aparecimento de maiores tensões o que corresponde à necessidade de um sobredimensionamento dos interruptores de potência. Resta ainda referir que nos circuitos de supressão de corrente apresentados a energia magnética é dissipada sob a forma de calor.

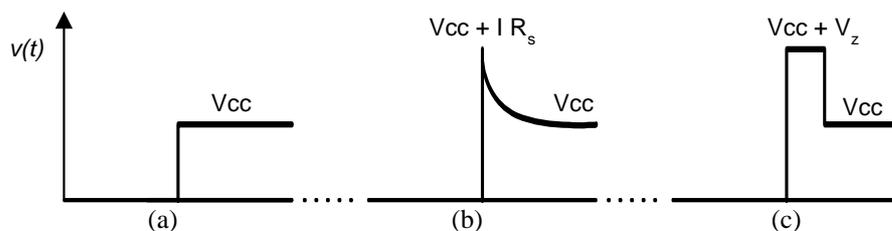


Figura 20 - Evolução temporal da tensão aos terminais do interruptor de potência para os circuitos de supressão da corrente através de: a) díodo; b) díodo e resistência; c) díodo e díodo zener.

## 6.2 Métodos Usados para Aumentar a Velocidade de Rotação sem Diminuir a Corrente nos Enrolamentos

### 6.2.1 Circuito de alimentação resistivo

Para forçar a injeção de corrente nos enrolamentos de um motor de passo, a solução mais simples consiste em colocar resistências em série de modo a diminuir a constante de tempo. A inserção desta resistência leva a que seja necessário aumentar a tensão de alimentação para manter a corrente de alimentação em regime permanente. Assim, para um enrolamento com resistência e indutância internas  $R$  e  $L$  e um circuito de alimentação com uma resistência em série  $R_s$ , a constante de tempo é reduzida de  $\tau = LR^{-1}$  para  $\tau = L(R + R_s)^{-1}$ . Por outro lado, a manutenção do mesmo valor da corrente em regime permanente requer a mudança da tensão de alimentação de  $V_{cc}$  para  $V_{cc}(R + R_s)R^{-1}$ .

**Exemplo:** Um motor de passo tem os seguintes valores nominais para os seus enrolamentos do estator:

$$U = 5 \text{ V}; R = 2 \text{ } \Omega; L = 20 \text{ mH}$$

$$I = 2.5 \text{ A} \text{ (Nota: O valor de } I \text{ em regime permanente é dado por } U/R)$$

$$\tau = LR^{-1} = 10 \text{ ms}$$

Ao ser inserida uma resistência em série com o enrolamento do estator de  $R_s = 2 \text{ } \Omega$  (ficando assim a  $R_{total} = 2+2 = 4 \text{ } \Omega$ ) é necessário de igual modo aumentar a tensão de alimentação de 5 V para 10 V por forma a manter o mesmo valor da corrente em regime permanente, ou seja:

$$I = \frac{U}{R + R_s} = \frac{10}{2 + 2} = 2.5 \text{ A}$$

Tal como é desejável, este valor mantém-se constante. Relembre-se que quando se pretende que o rotor fique parado numa dada posição com *holding torque*, é necessário que os enrolamentos se mantenham energizados e nesta ocasião conduziram o valor da corrente nominal. Caso essa corrente tenha valor superior ao nominal os enrolamentos aquecerão, caso contrário o *holding torque* será inferior ao nominal.

$$\tau = \frac{L}{R + R_s} = \frac{20}{2 + 2} = 5 \text{ ms}$$

A constante de tempo foi reduzida para metade, logo pode-se diminuir o intervalo de tempo do pulso de tensão aplicado aos enrolamentos para metade (mantendo o mesmo valor de corrente máximo) o que se traduz num aumento para o dobro da frequência dos passos. Assim a velocidade do motor será duplicada.

A figura 21 mostra vários tipos de circuitos de alimentação resistivos. A versão bipolar (figura 21b)) é mais eficiente que a unipolar mas requer a existência de uma fonte de alimentação dupla. Esta exigência pode ser ultrapassada à custa de um circuito com uma só fonte, mas com o dobro do número de interruptores de comutação (figura 21c)). Em qualquer dos casos, a eficiência energética do circuito de alimentação deste tipo é baixa devido às perdas na resistência colocada em série, pelo que a sua utilização se limita a aplicações de pequena potência.

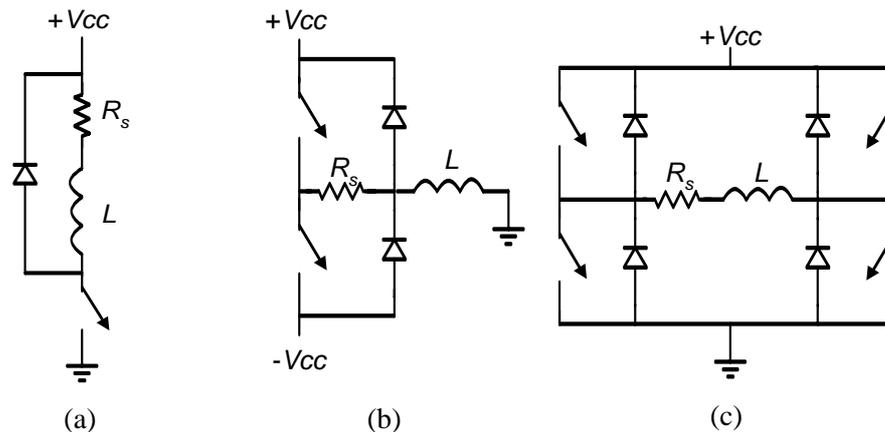


Figura 21 - Circuitos de alimentação resistivos do tipo: a) unipolar; b) bipolar com alimentação dupla; c) bipolar com alimentação simples.

## 6.2.2 Circuito de alimentação com dois níveis de tensão

No tipo de circuito representado na figura 22 são adoptados dois níveis de tensão de alimentação: no início do pulso um nível alto de tensão por forma a conseguir-se uma subida rápida da corrente nos enrolamentos; depois, a amplitude diminui para o valor nominal por forma a manter o valor em regime permanente da corrente nos enrolamentos. Assim, consegue-se um valor máximo de corrente num intervalo de tempo menor, podendo aumentar-se a frequência de passo do motor. Um circuito de alimentação deste tipo tem a vantagem de ter um funcionamento simples e um bom rendimento.

## 6.2.3 Circuito de alimentação *Chopper*

O circuito de alimentação *chopper* é uma solução que permite obter desempenhos elevados. Para este tipo de circuito é possível conceber estruturas unipolares e bipolares. Os *choppers* devem ter realimentação das correntes dos

enrolamentos de modo a manter essas correntes em valores próximos dos nominais durante o intervalo de tempo de duração dos pulsos de controle.

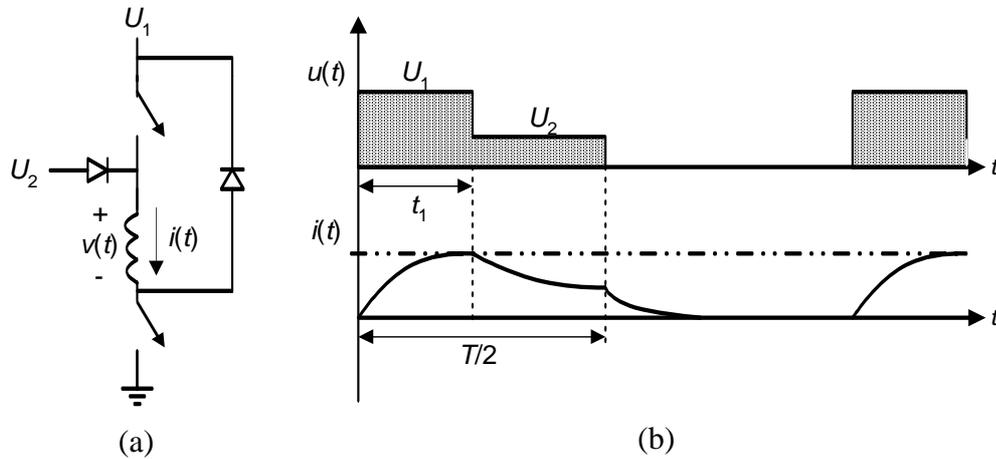


Figura 22 - a) Circuito de alimentação com dois níveis de tensão; b) evolução temporal da corrente e da tensão num enrolamento.

Num circuito *chopper* unipolar (figura 23) a tensão de alimentação  $V_{cc}$  é aplicada ao enrolamento através da condução dos interruptores de potência  $I_1$  e  $I_2$  e mantida até a corrente atingir o limite superior. Quando se atinge o nível superior da corrente (a), o interruptor  $I_2$  deixa de conduzir passando a corrente a circular por  $I_1$  e  $D_1$ . Devido à ausência de tensão de alimentação a corrente decresce suavemente com uma constante de tempo elevada. Quando se atinge o limite inferior da corrente (b), a tensão de alimentação é aplicada de novo através da entrada em condução de  $I_2$ , o que força a corrente a subir rapidamente. Para comutar a corrente no enrolamento, os interruptores  $I_1$  e  $I_2$  são bloqueados passando a corrente a circular pelos díodos  $D_1$  e  $D_2$ , até se anular. Neste ponto a corrente é forçada a anular-se rapidamente devido à tensão de alimentação ter polaridade invertida. Neste circuito o sensor de corrente é representado pela resistência  $R$  a qual deve tomar valores baixos para minimizar a potência nela dissipada.

A alimentação com um circuito *chopper* pode também adoptar uma versão bipolar conforme está representado na figura 24. O modo de funcionamento descrito corresponde a uma frequência de comutação livre. Contudo, é possível conceber um modo de funcionamento com uma frequência fixa e com controlo da corrente através da modulação de largura de impulso (PWM). O circuito de alimentação *chopper* tem um funcionamento mais complexo que os outros circuitos apresentados anteriormente mas, em contrapartida, exhibe desempenhos elevados e permite sequências de accionamento sofisticadas, como por exemplo, a sequência de mini passo.

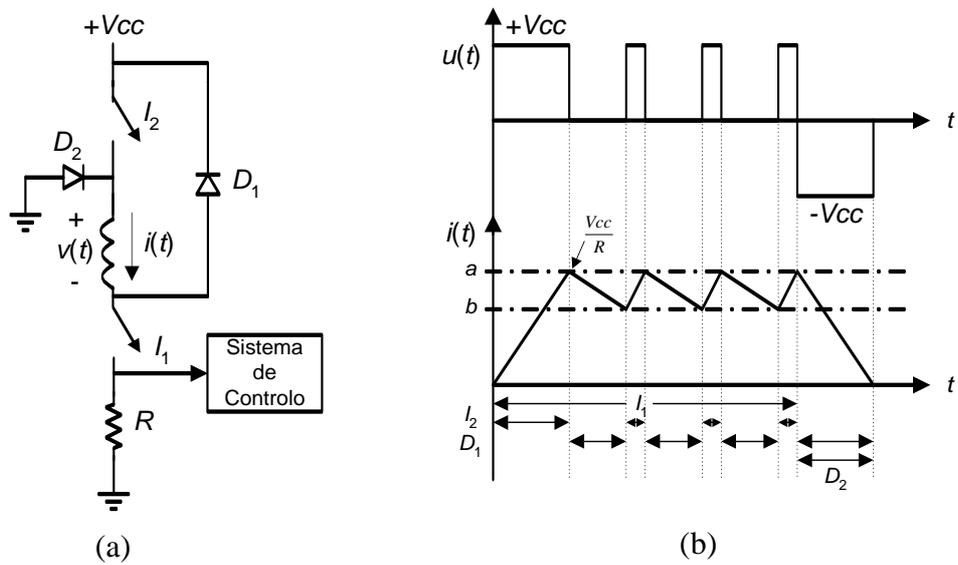


Figura 23 - a) Circuito de alimentação *chopper* unipolar; b) evolução temporal da tensão e corrente num enrolamento.

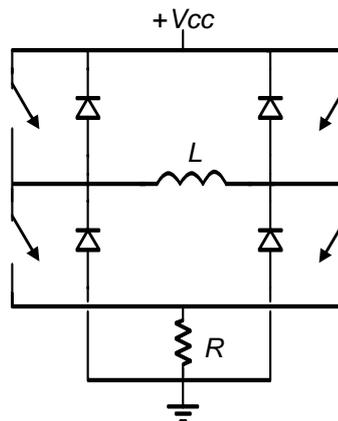


Figura 24 - a) Circuito de alimentação *chopper* bipolar

## 7. Bibliografia

- Machado, J.A. *Motores de Passo: Controlo e modo de funcionamento*. Publindústria; 1ª edição; Porto, 1994.
- Gottlieb, I.M. *Electric Motors and Control Techniques*. McGraw-Hill; 2ª edição; New York, 1994.
- Apontamentos da disciplina de Máquinas Eléctricas e Actuadores.
- Manual do motor de passo, *Stepper Motors Series N82100*.

**ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE  
ALGUNS COMPONENTES  
UTILIZADOS**