

# Motor de Passo

# Introdução

Os motores de passo preenchem um nicho único no mundo dos motores controlados. Estes motores são usualmente empregados em aplicações de medição e de controle.

## Aplicações

Aplicações destes motores são encontrados em impressoras de jato de tinta, máquinas com controle numérico (CNC) e bombas volumétricas.

## Características

1. **Inexistência de escovas** – os motores de passo não possuem escovas. Os comutadores e escovas dos motores convencionais são os componentes que apresentam a maioria das falhas e ainda podem criar arcos que são indesejáveis e perigosos em alguns ambientes.
2. **Independência da carga** – os motores de passo giram com uma dada velocidade independentemente da carga, desde que a carga não exceda o torque do motor.

3. **Posicionamento em malha aberta** – Os motores de passo se movem com incrementos ou passos que podem ser quantificados. Desde que o motor funcione com o torque especificado, a posição do eixo é conhecida a todo tempo sem necessidade de um mecanismo de realimentação.

4. **Torque Estacionário** – Os motores de passo são capazes de manter o eixo estacionário, desde que o seu torque seja respeitado.

5. Excelente resposta a partida, parada e a reversão de movimento.

# Tipos de Motores de Passo

Há três tipos básicos de motores de passo: ímã permanente, relutância variável e híbrido. Estes tipos de motores serão descritos a seguir.

## 1) Os motores de ímã permanente

Os motores de ímã permanente possuem um rotor magnetizado ou de ímã permanente Fig.1

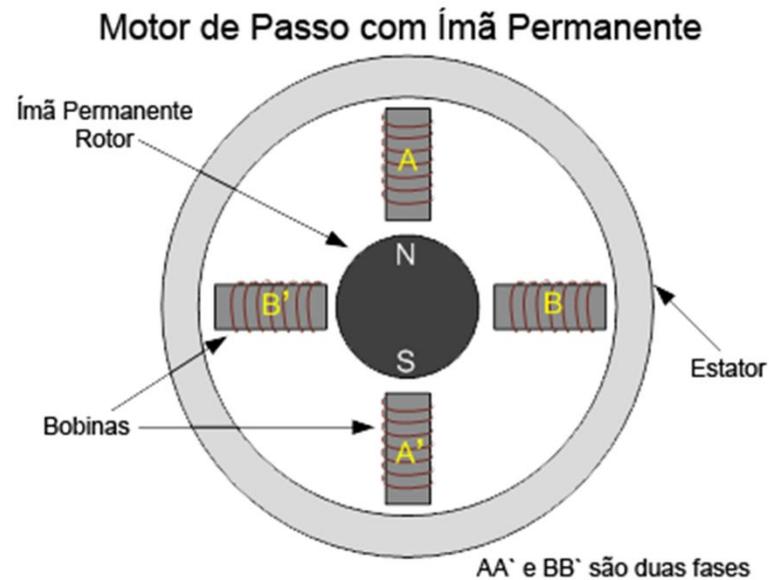


Fig. 1 – Motor de ímã permanente de duas fases

# Tipos de Motores de Passo

Este tipo de motor tem um ímã permanente em um eixo liso, gerando uma mecânica mais simples e barata. A vantagem desse tipo de motor é o fato dele ter um campo magnético permanente que se soma ao campo magnético das bobinas, dando uma potência, ou torque, maior na partida. A desvantagem desse tipo de motor é o fato deles terem um passo maior, com menor precisão.

Quando uma bobina do estator é ativada, o eixo se alinha com o campo magnético até o estator ser desligado e o estator seguinte ligado Fig.2.

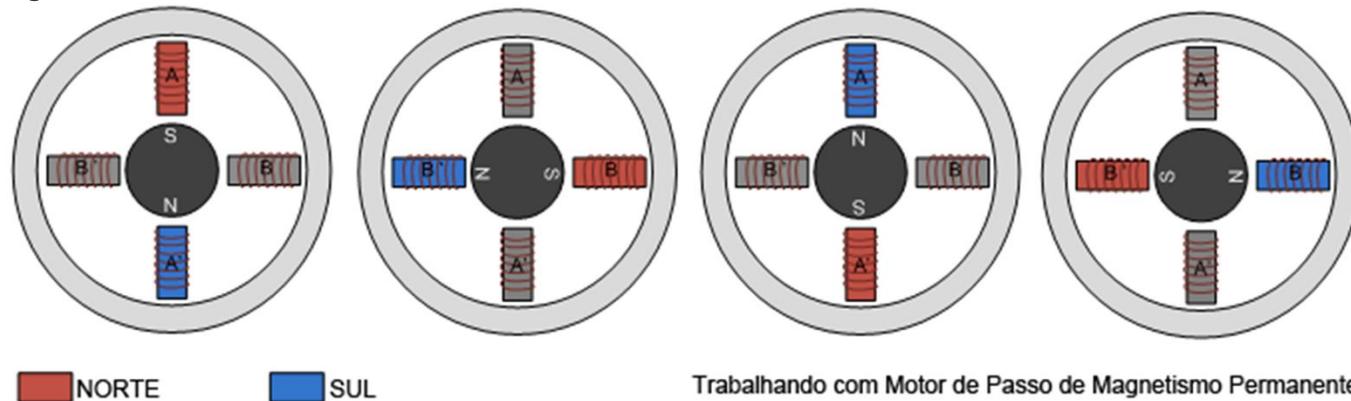


Fig. 2 Princípio de Funcionamento do Motor de Passo com Imã Permanente

A resolução do motor de passo com imã permanente pode ser aumentada através do aumento do número de polos no rotor ou aumento do número de fases Fig. 3.

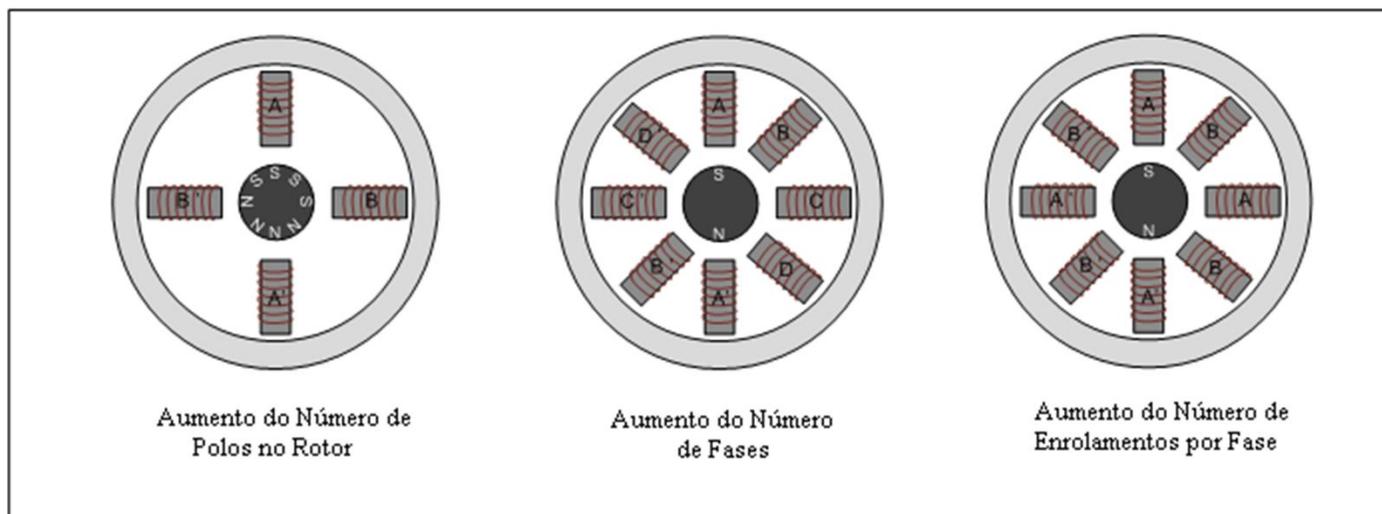


Fig. 3 Métodos para aumentar a resolução do motor de passo.

## 2) Motor de Relutância Variável

Os motores de relutância variável ( também chamado de motores de relutância variável chaveada) possuem de 3 a 5 bobinas conectadas a um terminal comum. A Fig. 4 mostra um corte de um motor com 2 bobinas, com 90 graus por passo.

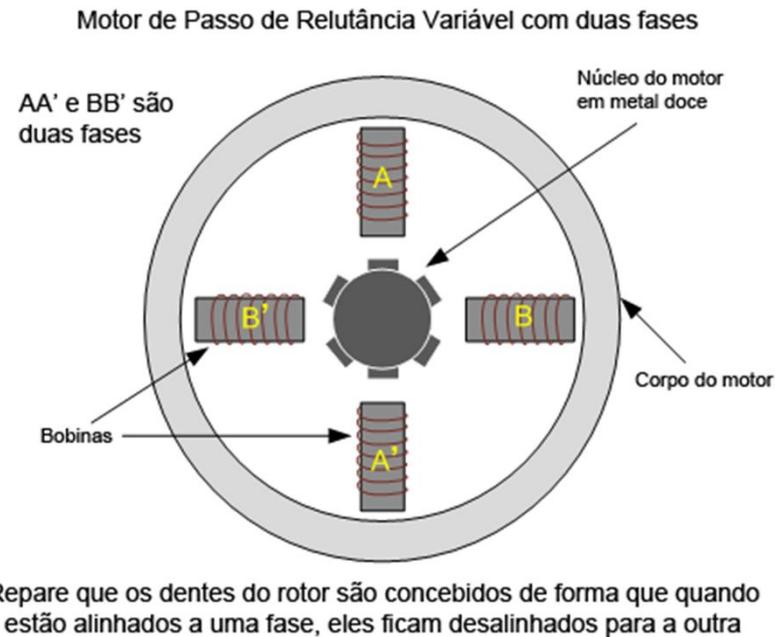


Fig. 4 Motor de Relutância Variável.

O eixo do motor é feito de ferro, e não contém um ímã, onde o campo magnético é formado pela energização das bobinas para alinhar o eixo. A grande diferença desse tipo de motor é fato de não haver um campo magnético permanente fazendo ele ter um torque, ou força, menor na saída.

Os dentes do eixo são alinhados com os dentes de um estator e desalinhados com relação ao outro, em seguida, o próximo grupos de bobinas é ligado alinhado o eixo ao outro estator e desalinhando do estator anterior, fazendo o eixo girar em passos Fig.5.

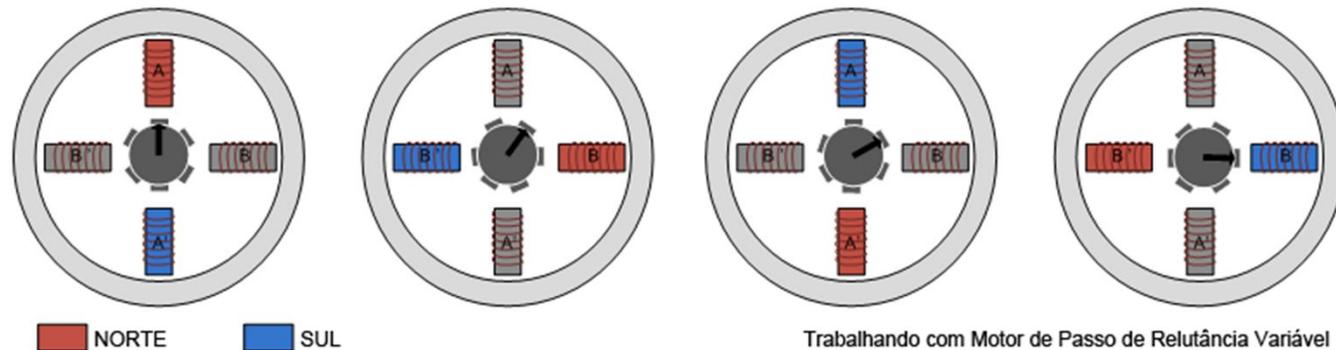


Fig. 5 Princípio de Funcionamento do Motor de Relutância Variável.

A resolução do motor de passo de relutância variável pode ser aumentado através do aumento dos dentes no rotor e através do aumento do número de fases Fig. 6.

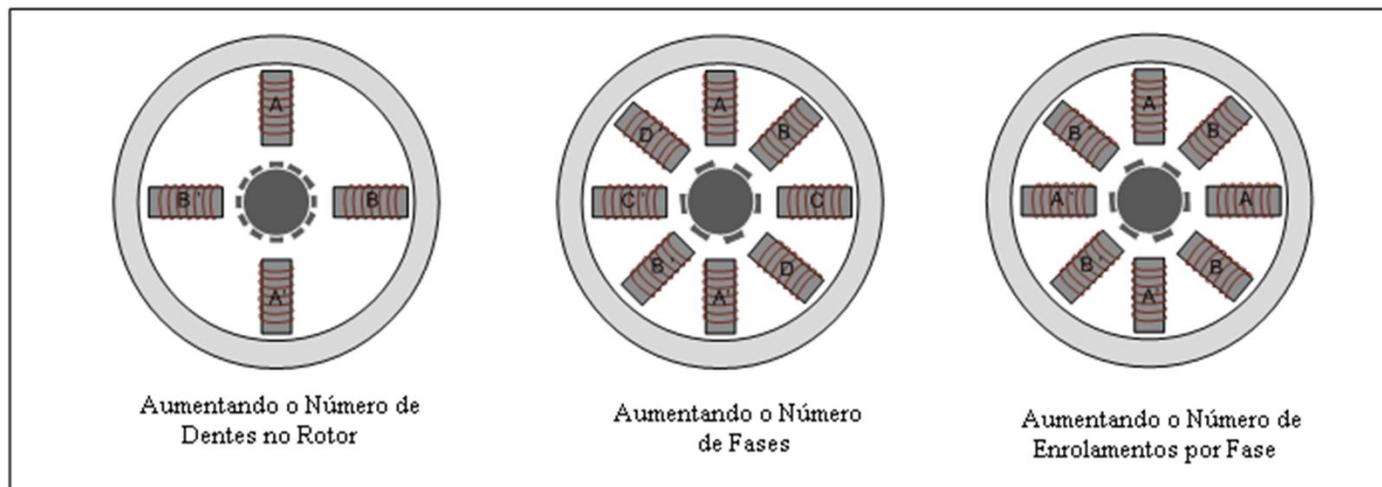


Fig. 6 Aumento de Resolução de um Motor de Relutância Variável.

### 3) Motor Híbrido

Este tipo de motor mistura a mecânica mais sofisticada do motor de Relutância Variável com a potência do ímã permanente no eixo, dando um torque maior com maior precisão nos passos, que podem variar entre  $3,6^\circ$  e  $0,9^\circ$  graus, contra  $7,5^\circ$  a  $15^\circ$  graus para o de ímã permanente Fig.7.

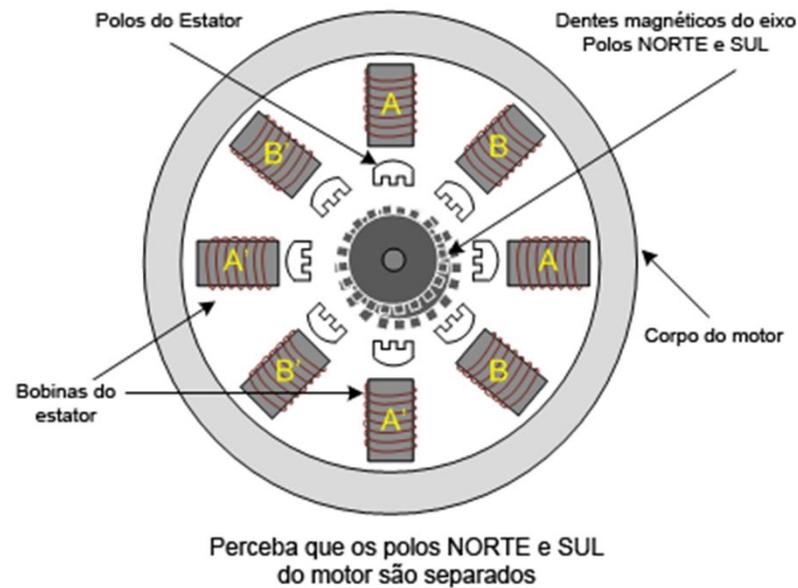


Fig. 7 Motor Híbrido.

O eixo do motor é construído com dois grupos de dentes, um com o POLO SUL saliente e o outro com o POLO NORTE, de modo que os dentes fiquem alternados Fig.8.

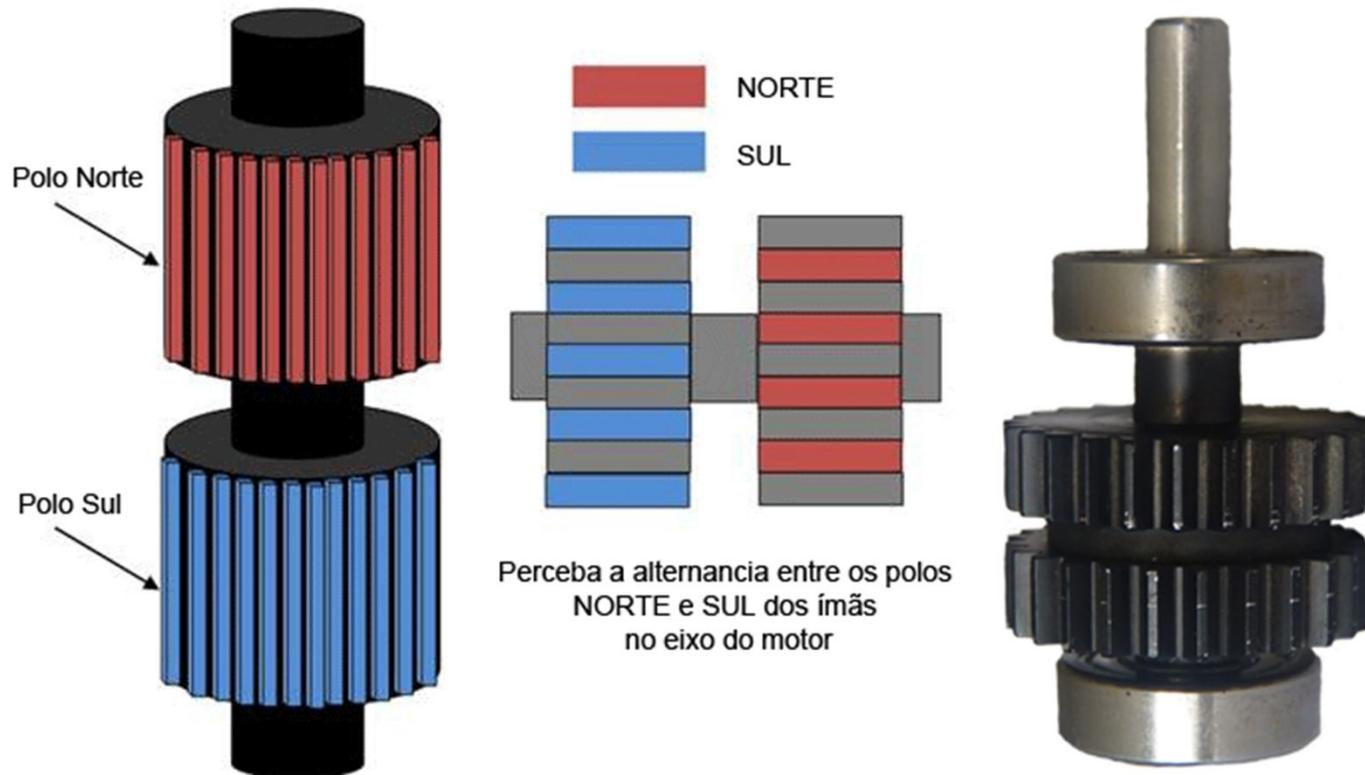


Fig. 8 Eixo de um Motor Híbrido.

De forma semelhante aos tipos anteriores, as bobinas devem ser ligadas em sequência para o eixo poder girar Fig. 9.

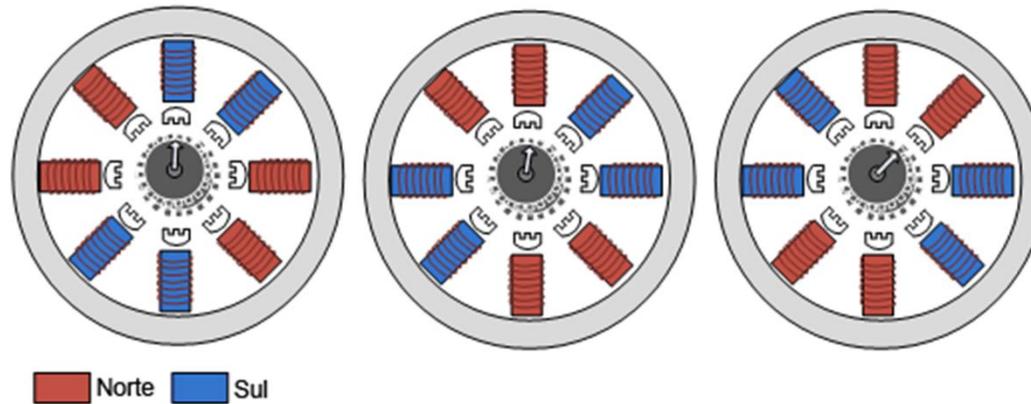


Fig. 9 Funcionamento de um Motor Híbrido.

## Tipos de Polos

Motores de passo, geralmente têm duas fases e podem ser **unipolar** ou **bipolar**.

Nos **motores de passo unipolares** são usados dois enrolamentos por fase e costumam ter um contato em comum, resultando em cinco, seis ou oito conexões. Nos modelos onde a conexão comum dos dois pólos é separada, são seis conexões externas e nos modelos onde a conexão comum é soldada internamente, são cinco conexões externas. Os de oito conexões externas contêm a conexão em comum dos dois pólos separada e facilitam a ligação em série ou paralela das bobinas. Eles são chamados de unipolares e facilitam o projeto por não necessitar de ligação reversa nos pólos. Os modelos com cinco ou seis conexões têm as bobinas ligadas em série e necessitam da capacidade de reverter as ligações entre as bobinas Fig.10 .

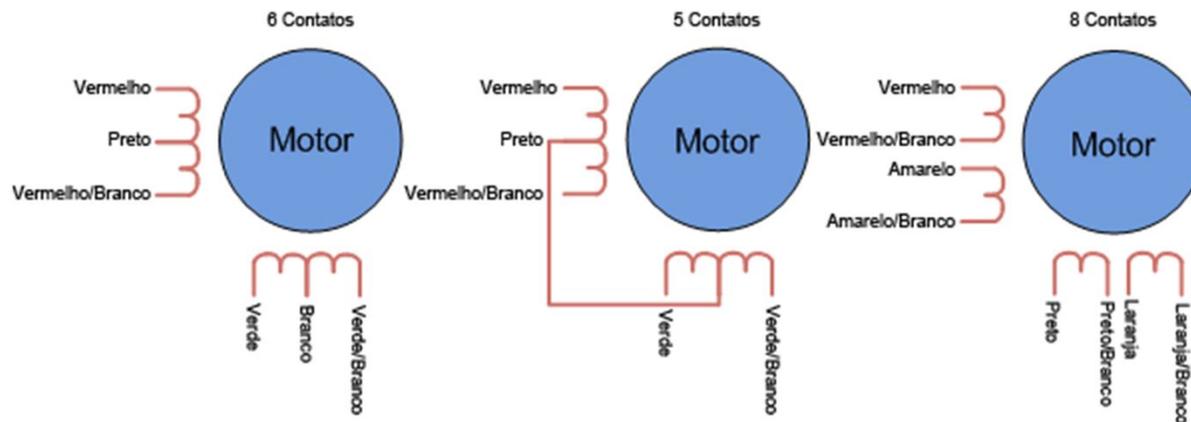


Fig. 10 Motor de Passo Unipolar.

Ligação reversa é um tipo de ligação muito comum entre motores onde os polos A e B da bobinas podem ser ligados ao positivo e negativo respectivamente, ou invertida, negativo e positivo respectivamente.

Os **Motor de Passo Bipolar** usam uma ligação por pólo e necessitam que o circuito de controle possa reverter o sentido da corrente para acionar as bobinas de forma correta Fig.11.

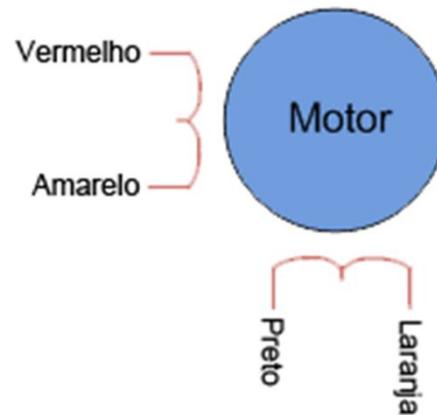
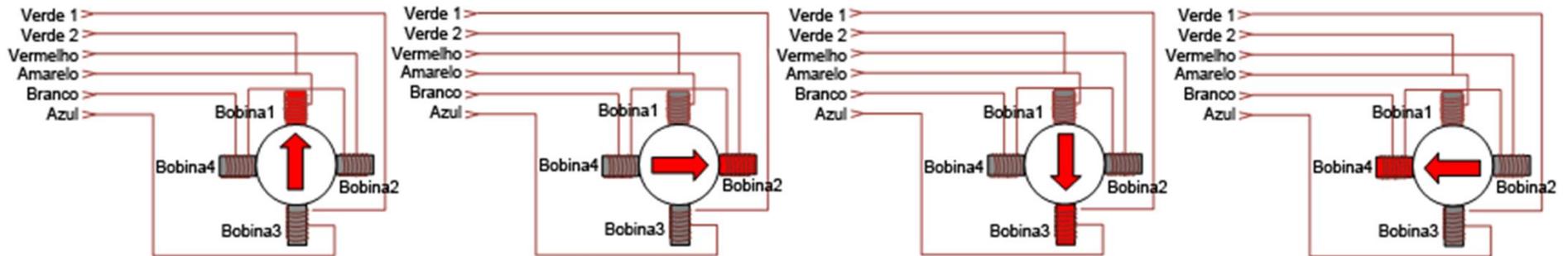


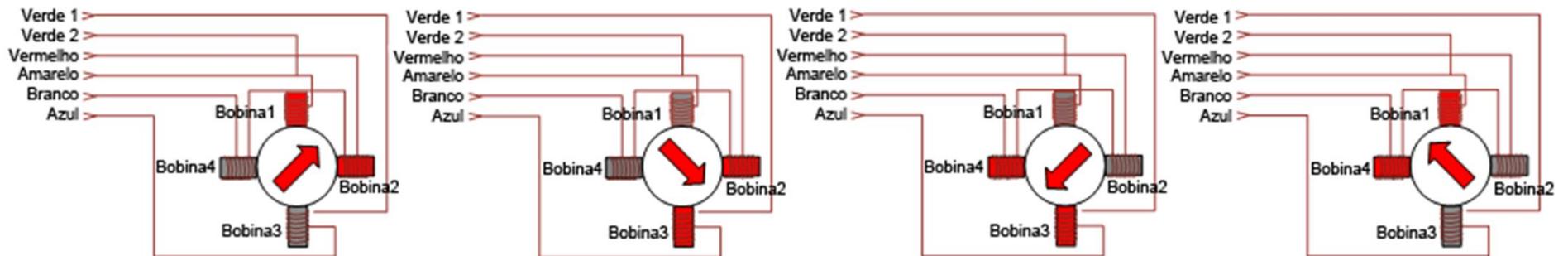
Fig. 11 Motor de Passo Bipolar

## Tipos de Ligações

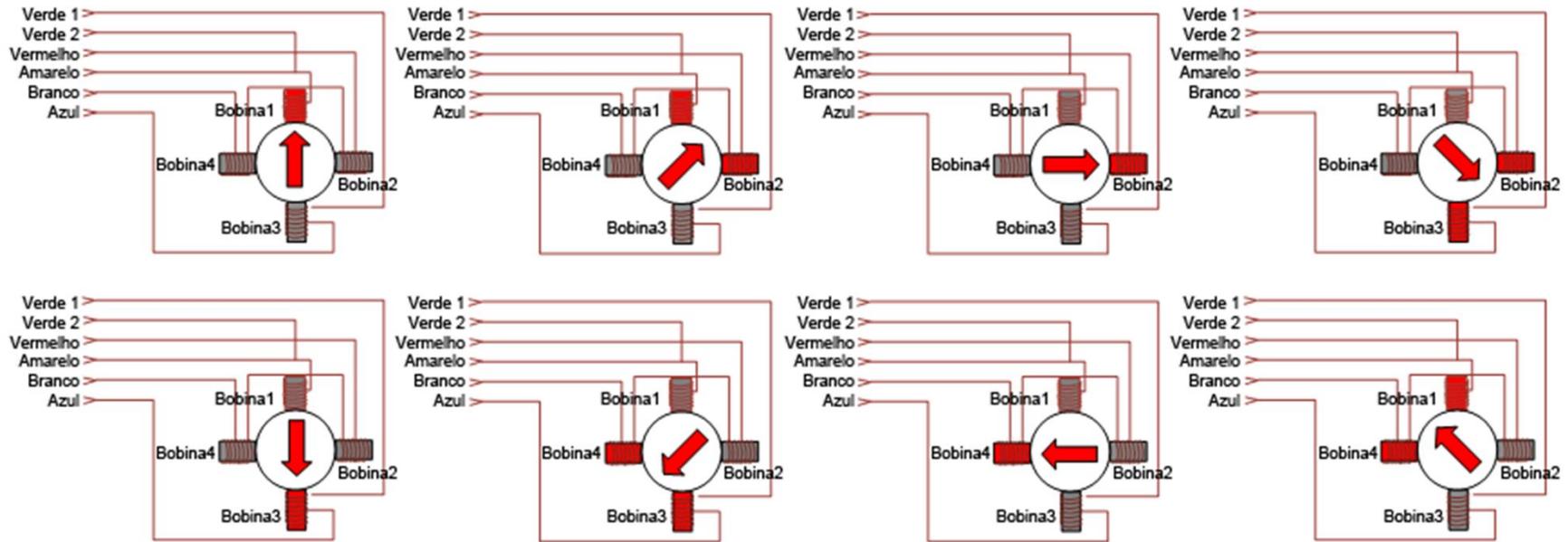
**Wave Drive** - Liga uma bobina por vez, com menor consumo de energia, porém, com menor torque.



**Full Drive** - Liga duas bobinas por vez, com maior consumo de energia e maior torque.



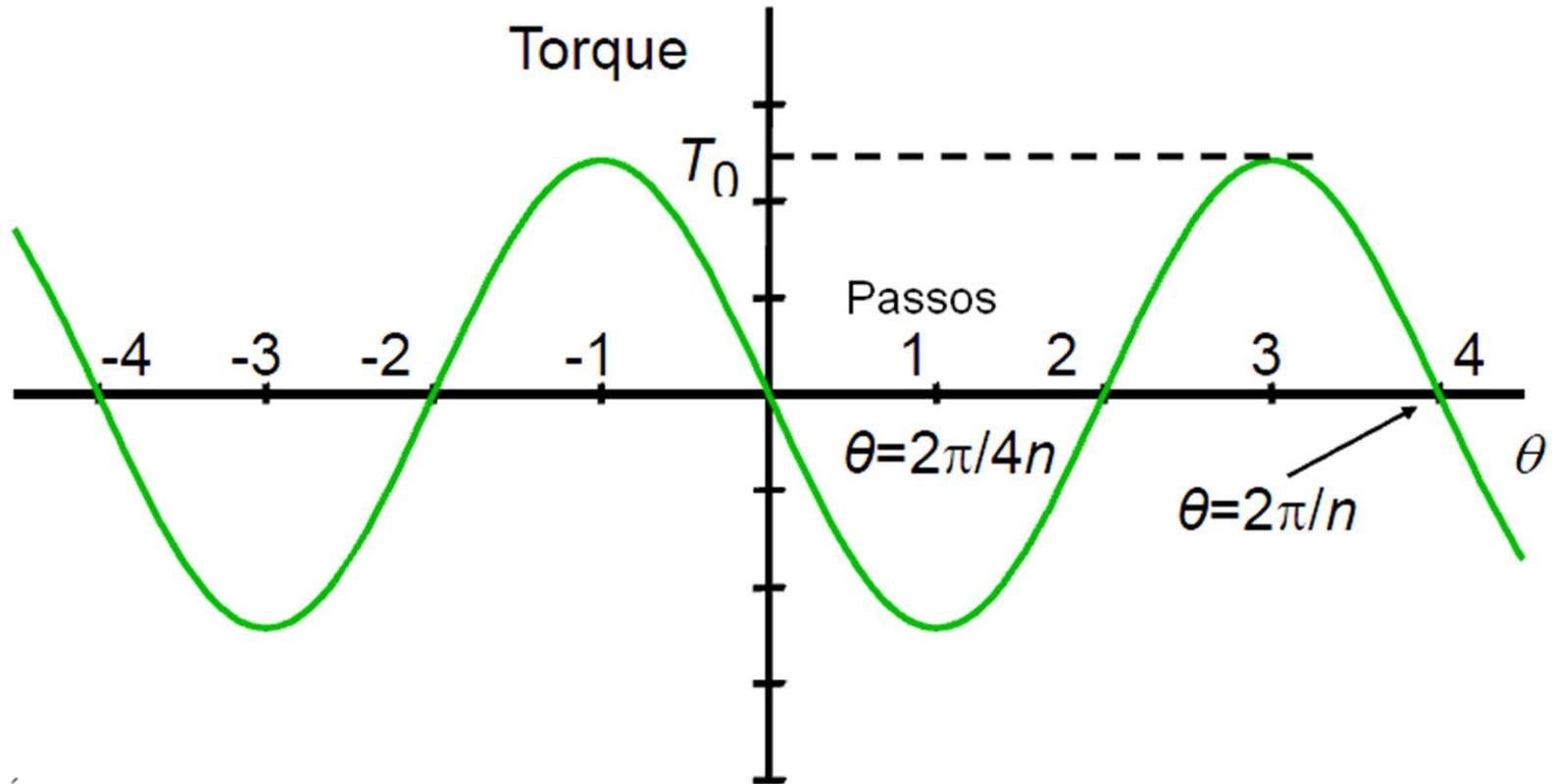
**Half Drive** - Alterna a ligação de uma e duas bobinas por vez, dobrando a quantidade de passos necessários para o motor girar 360°, porém, é menos veloz.



# Ressonância

Os motores de passo possuem uma frequência de ressonância natural uma vez que pode ser modelado como um conjunto massa-mola. Quando se acionamento está próximo desta frequência pode ocorrer uma mudança audível no seu ruído bem como um aumento na sua vibração. Este ponto de ressonância varia com a aplicação e a carga, mas ocorre entre 70 a 120 passo por segundo. Em casos severos o motor pode perder passos nesta frequência. A forma de evitar este problema é evitar esta faixa de frequência. O acionamento por meio passo (half stepping) e micro passos reduzem este tipo de problema. Em aceleração da velocidade, a zona de ressonância deve ser ultrapassada o mais rapidamente possível.

## Características do Torque Estático



$$T = -T_0 \sin n\theta$$

onde  $n$  é o número de dentes no rotor e  $\theta$  é o ângulo do rotor

O torque do motor é dado por

$$T = -T_0 \sin n\theta$$

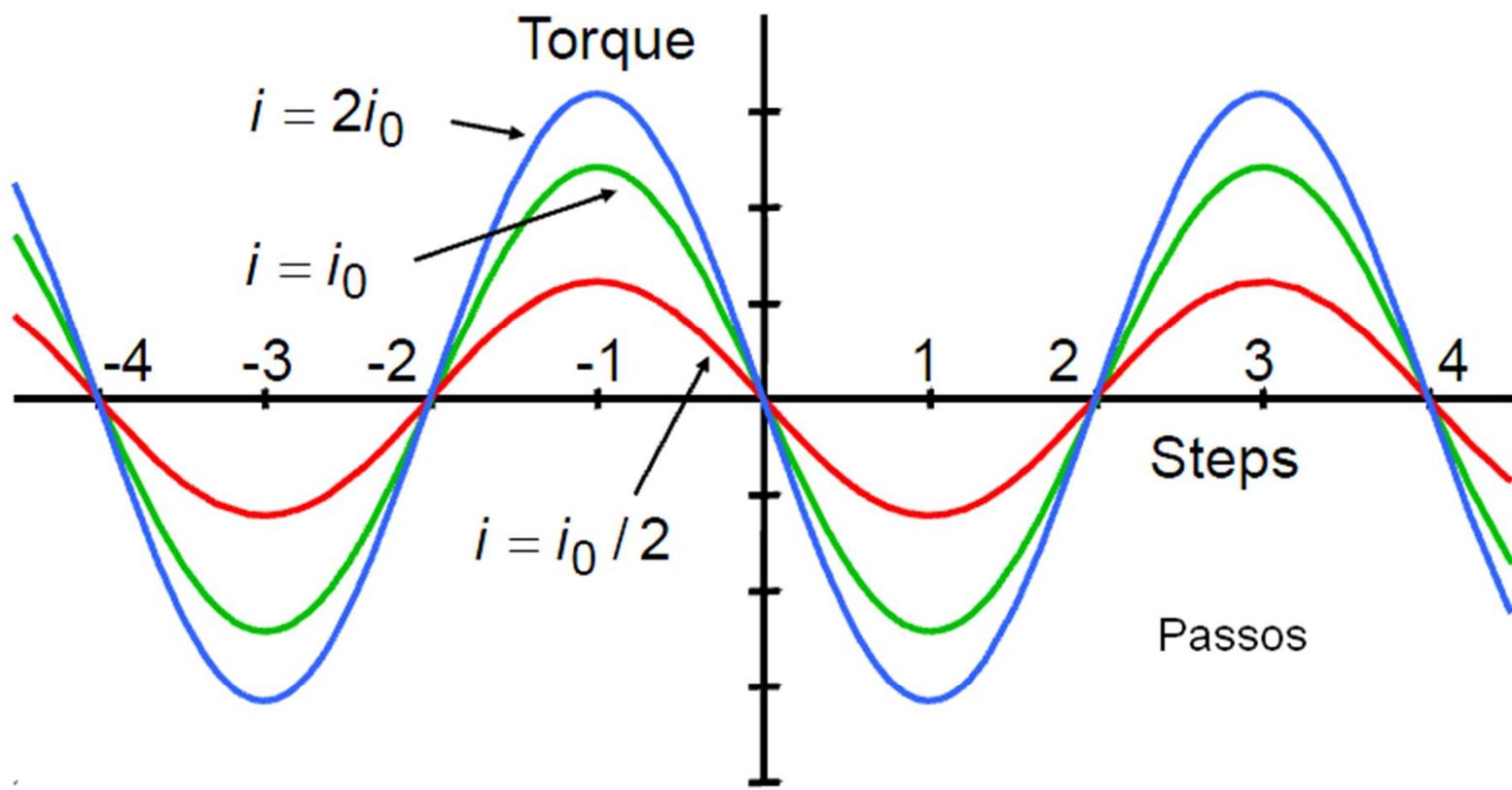
Se uma carga com torque  $T_L$  é aplicada ao motor então o rotor irá ser deslocado por um ângulo  $\theta_e$  onde:

$$T_L = -T_0 \sin n\theta$$

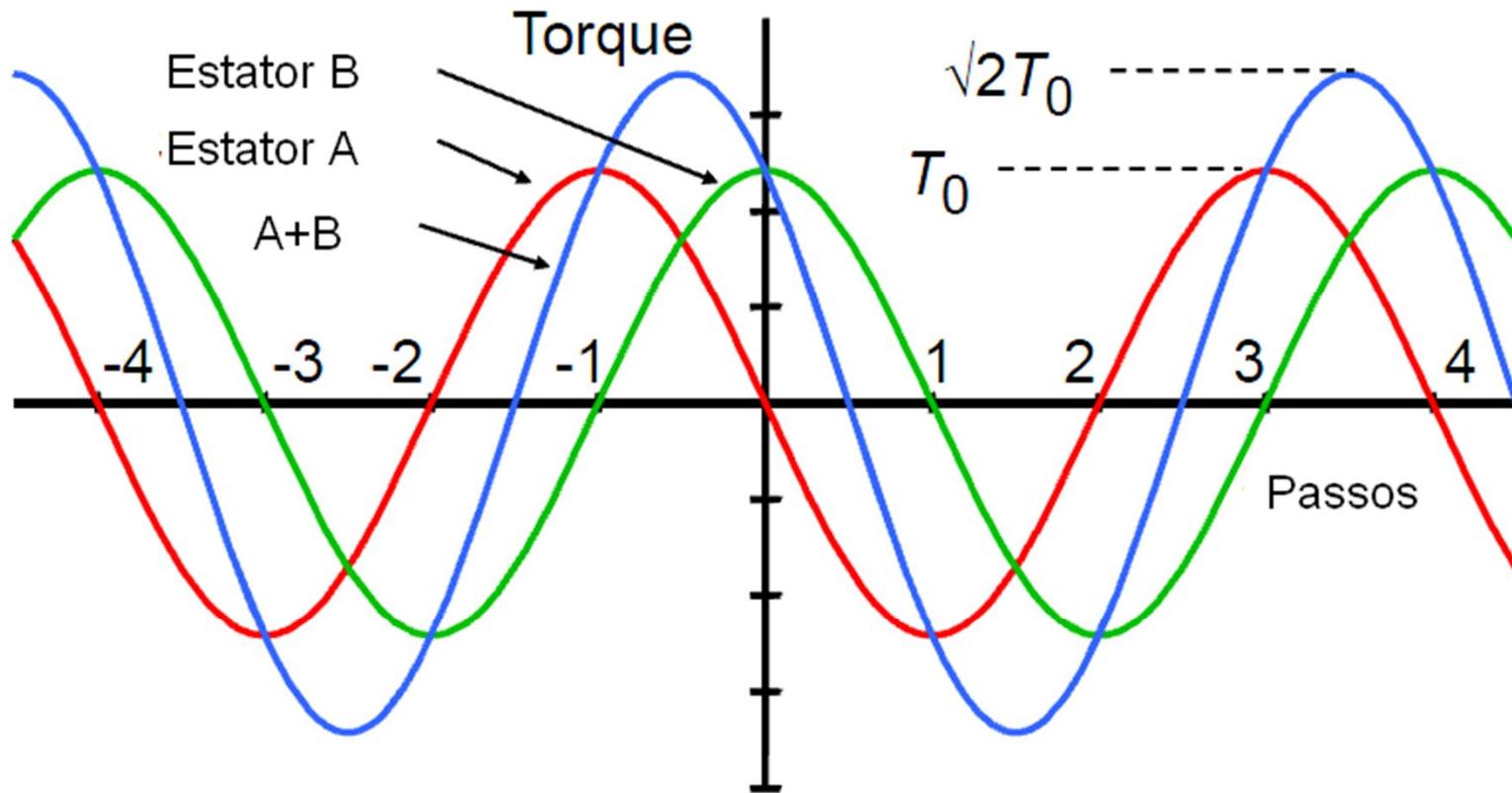
$$\theta_e = \frac{\sin^{-1}(-T_L / T_0)}{n}$$

Esta fórmula é válida se  $|T_L| < T_0$

Se  $|T_L|$  excede  $T_0$  então a sincronização é perdida.

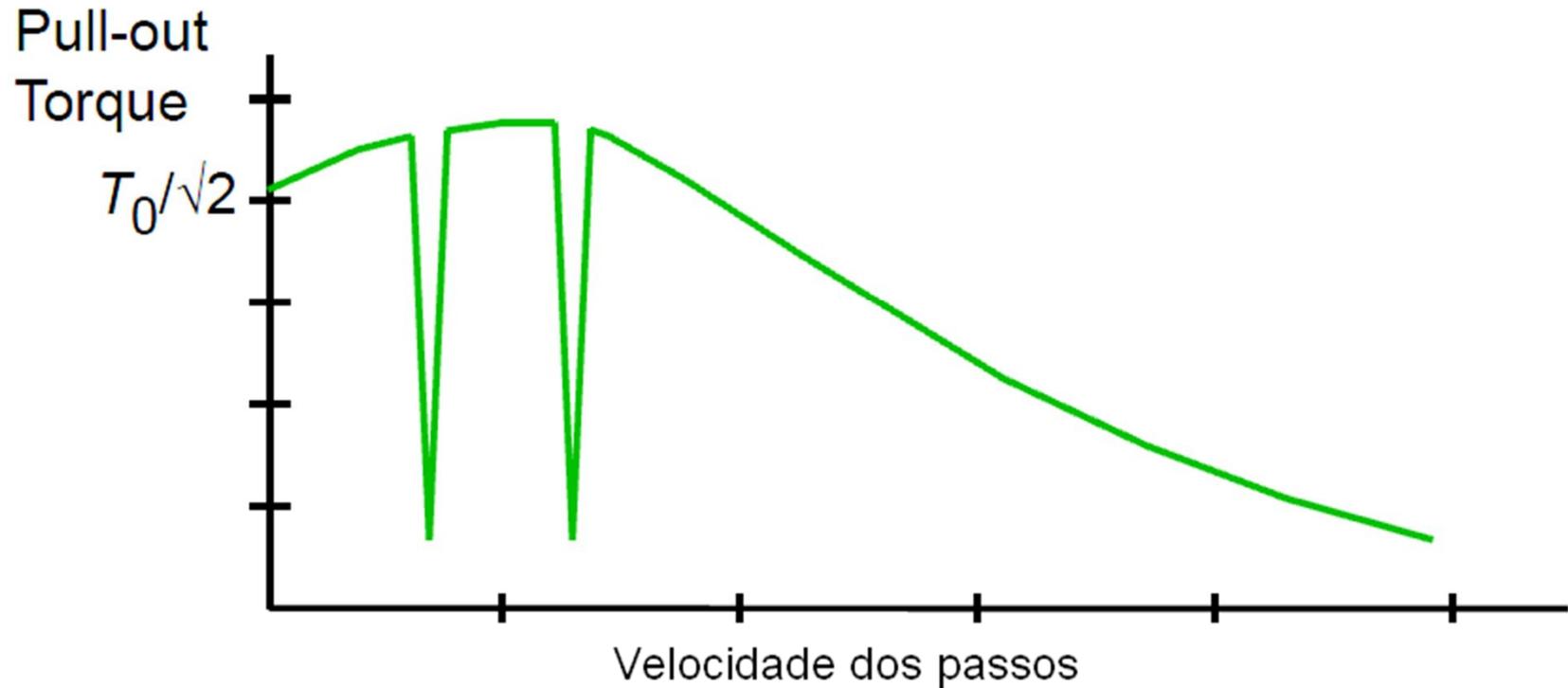


O estator fica aproximadamente saturado com a corrente nominal  $i_0$ , de modo que ao dobrar a corrente, o torque não é dobrado.



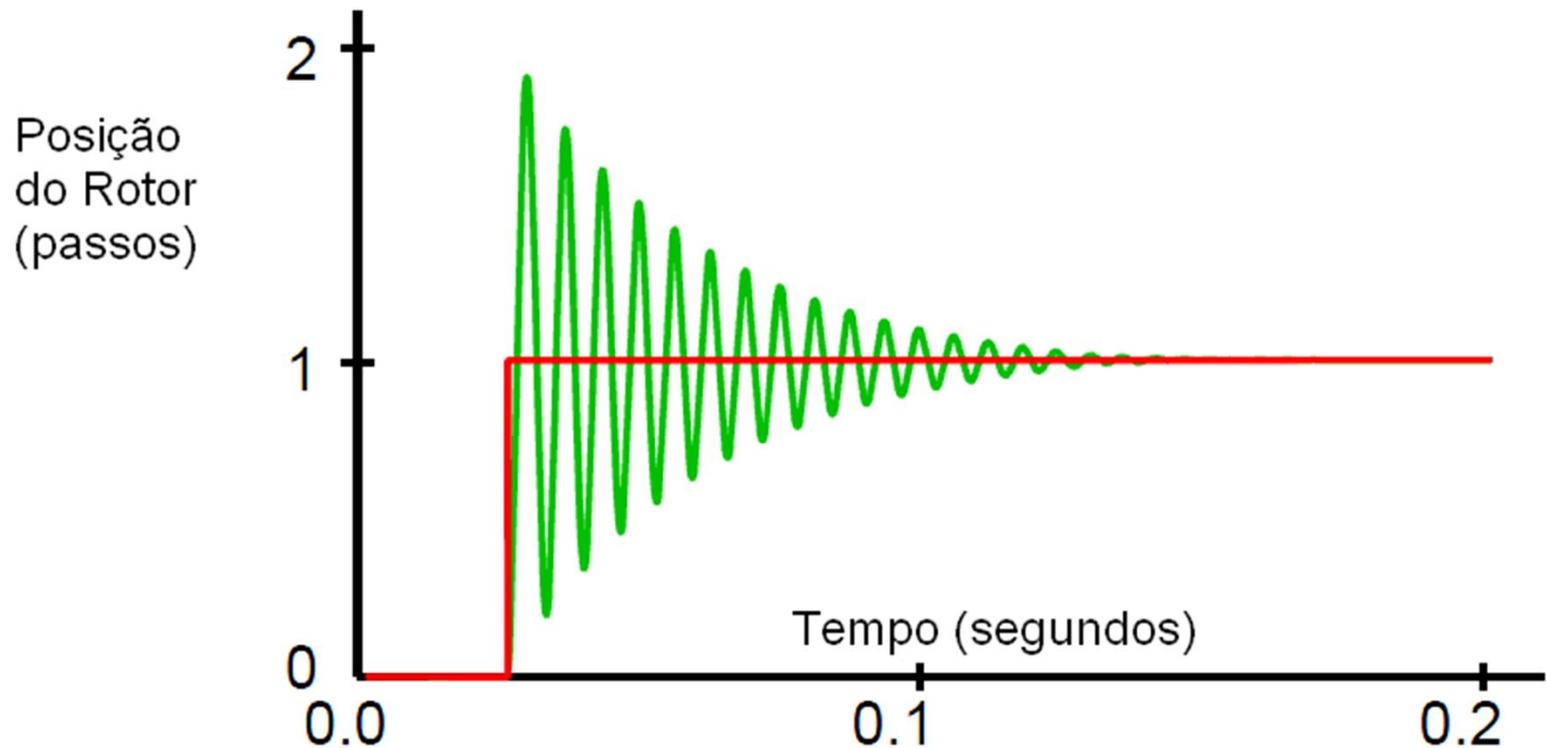
Excitando dois enrolamentos do estator, o torque aumenta de  $T_0$  para  $\sqrt{2}T_0$

## Característica de Torque e Velocidade



Pull-out torque é o torque que o motor pode gerar a uma dada velocidade de passos: se o torque da carga exceder este limite então o motor perde a sincronização

## Um passo: Resposta Dinâmica (1)



A figura mostra a posição do rotor após o acionamento de A+ para B+ (1 passo).

## Um passo: Resposta Dinâmica (2)

Na ausência de torque de carga tem-se:

$$J_r \frac{d^2\theta}{dt^2} + D_r \frac{d\theta}{dt} = -T_0 \sin n\theta$$

onde  $J_r$  é a inércia do motor e  $D_r$  é o coeficiente viscoso de amortecimento.

Para pequenos deslocamentos em torno do ponto de equilíbrio tem-se

$$J_r \frac{d^2\theta}{dt^2} + D_r \frac{d\theta}{dt} \cong -T_0 n\theta$$

Esta é a equação de um movimento simples amortecido com  
Frequência de ressonância dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{nT_0 / J_r}$$

### Um passo: Resposta Dinâmica (3)

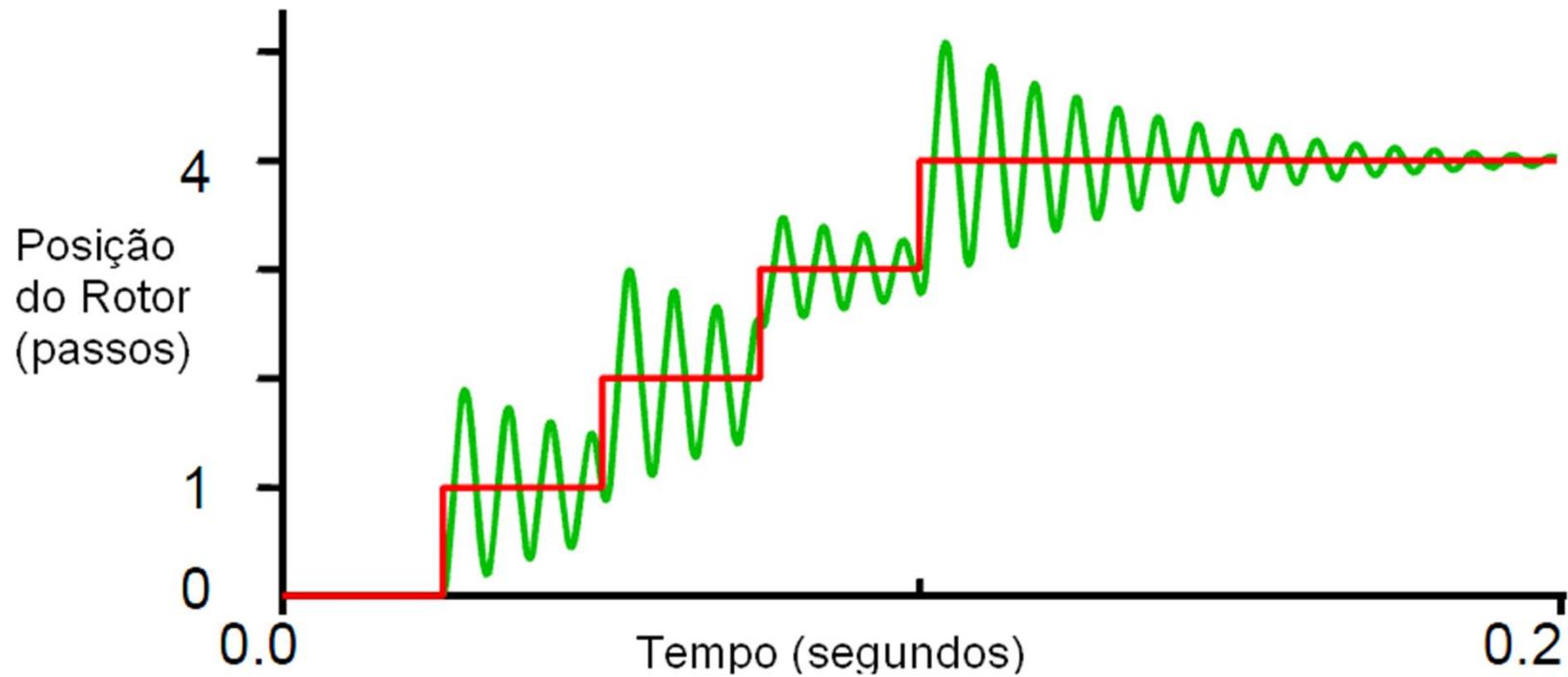
Para um motor de passo com os seguintes parâmetros

Number of rotor poles:  $N_r = 50$   
Rotor inertia:  $J_r = 1.16 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$   
Peak torque:  $T_0 = 0.242 \text{ N m}$

$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{nT_0 / J_r}$$
$$= 162 \text{ Hz}$$

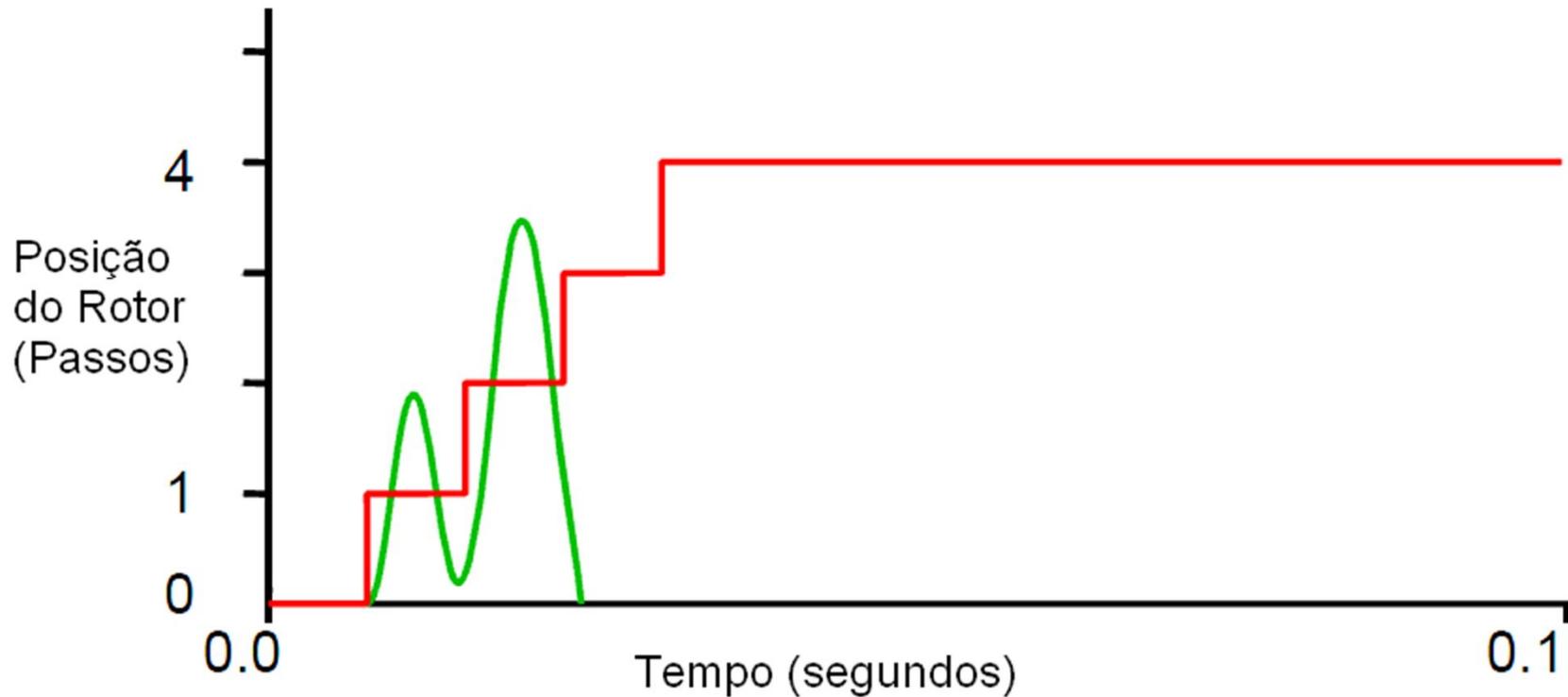
Na frequência de ressonância mais de um passo podem causar a perda da sincronização.

## Passo Múltiplos: Resposta Dinâmica (1)



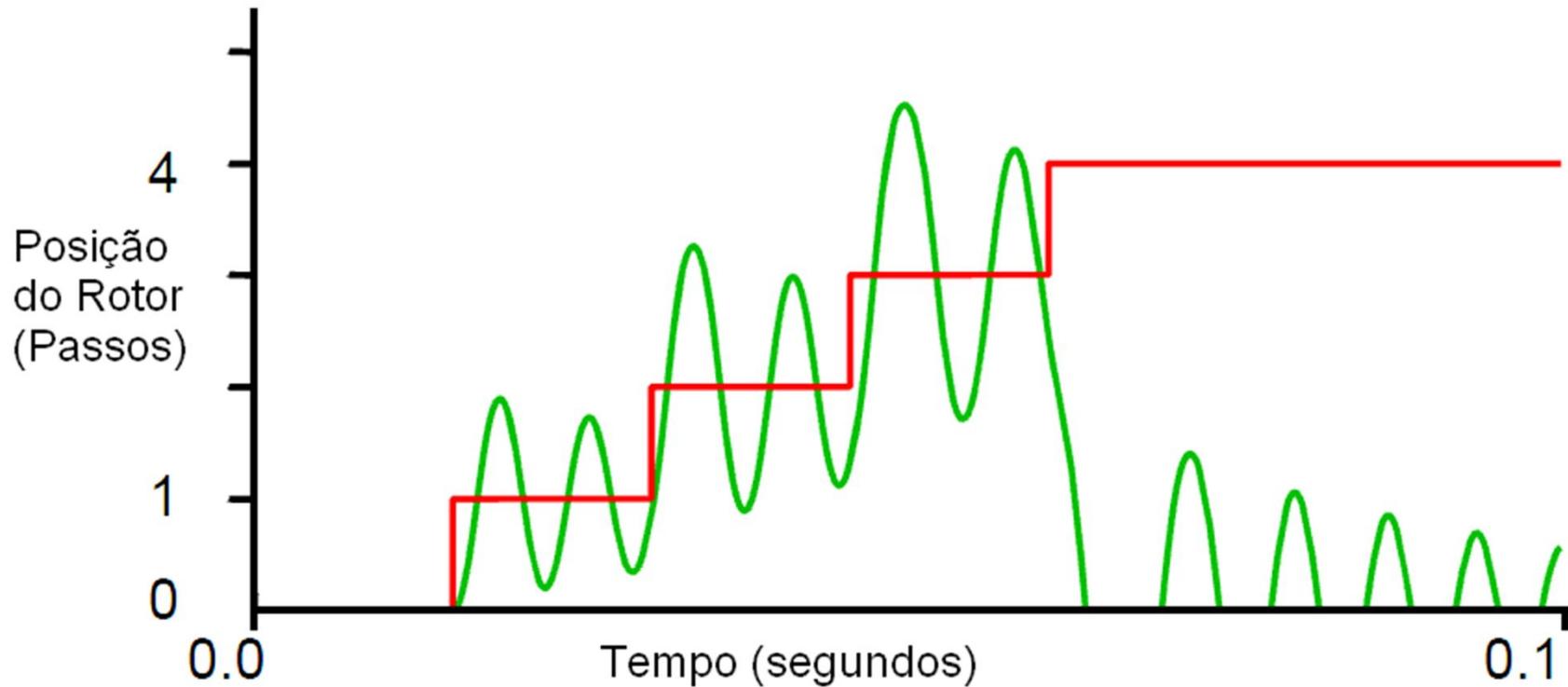
A figura mostra 4 passos na frequência de 40 passos/s.

## Passo Múltiplos: Resposta Dinâmica (2)



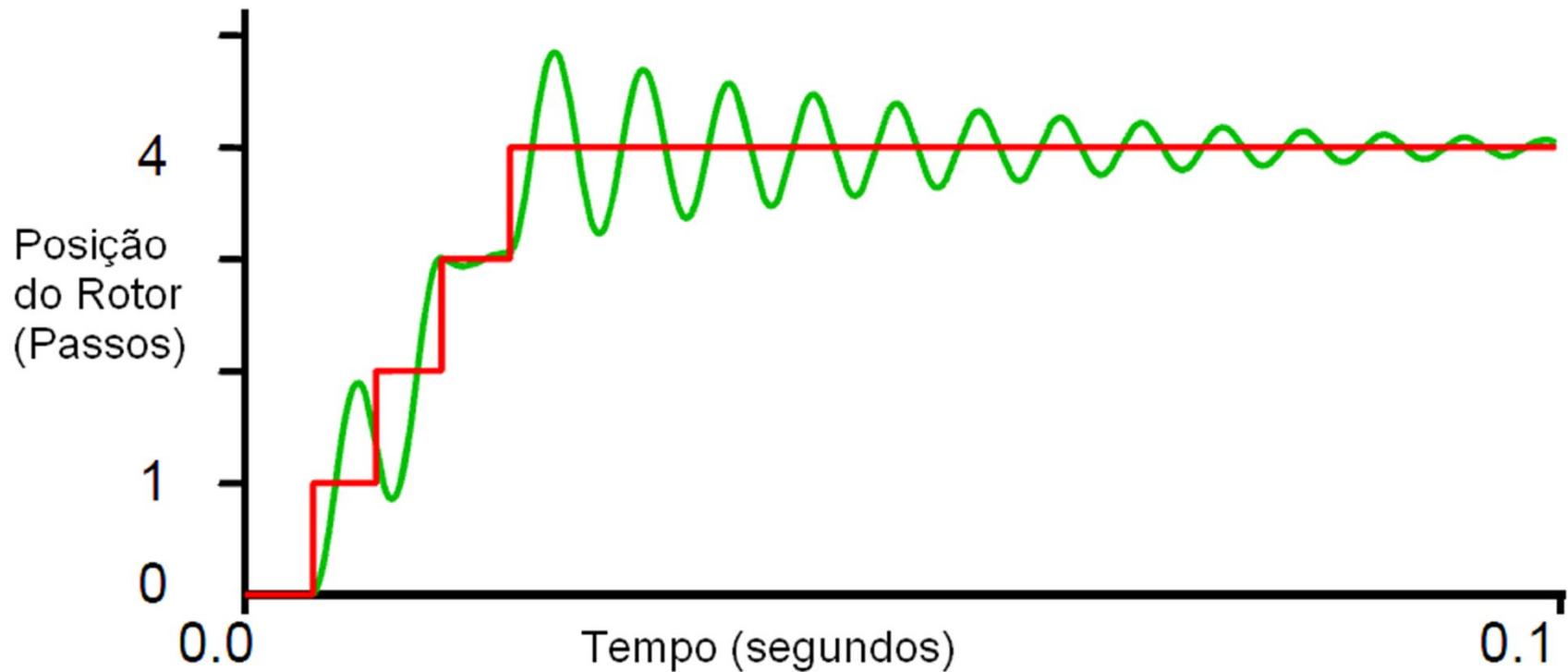
Esta figura mostra a perda da sincronização como resultado de 4 passos na frequência de 132 passos/s ( próxima da frequência de ressonância).

### Passo Múltiplos: Resposta Dinâmica (3)



Esta figura mostra a perda da sincronização como resultado de 4 passo a frequência de 66 passos/s (metade da frequência de ressonância)

## Passo Múltiplos: Resposta Dinâmica (4)



Esta figura mostra 4 passos para a frequência de 200 passos/s (acima da frequência de ressonância).

## **Micro-passos (Micro-stepping) (1)**

Micro-passos envolve uma interpolação entre as posições de passo completo e meio passo.

Isto é obtido através do controle linear das correntes de acionamento dos estatores.

Micro-passos prove grande precisão e operação suave em baixas velocidades e diminuem as possibilidades de ressonância

Micro-passos requerem acionamentos lineares complexos com conversores digitais-analógicos para determinação das correntes nos enrolamentos.

## Micro-passos (Micro-stepping) (2)

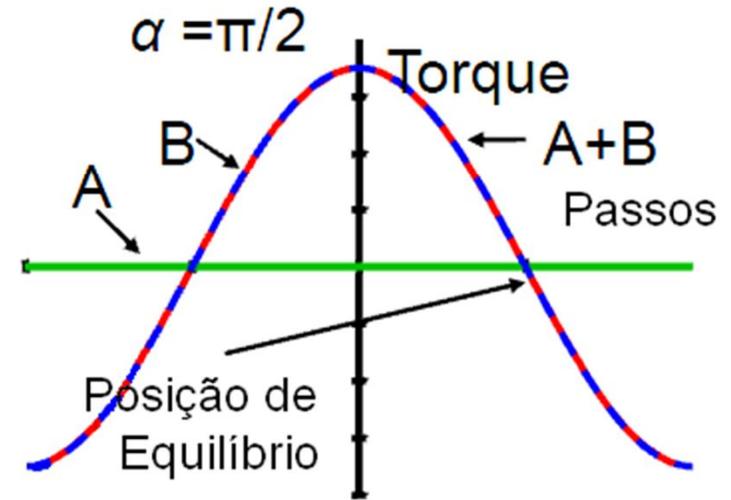
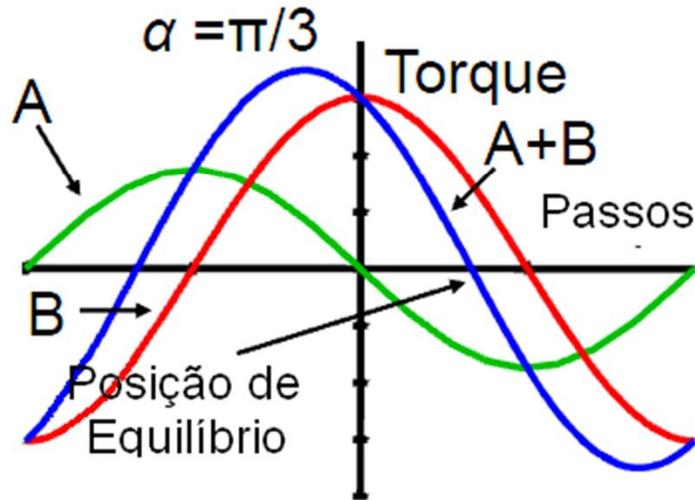
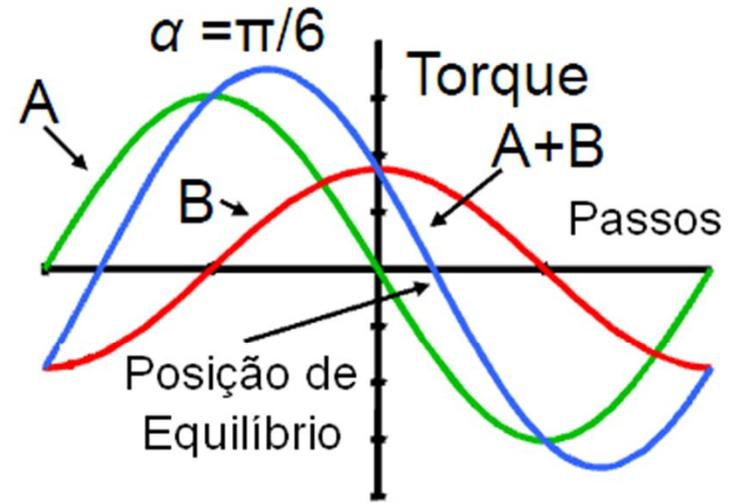
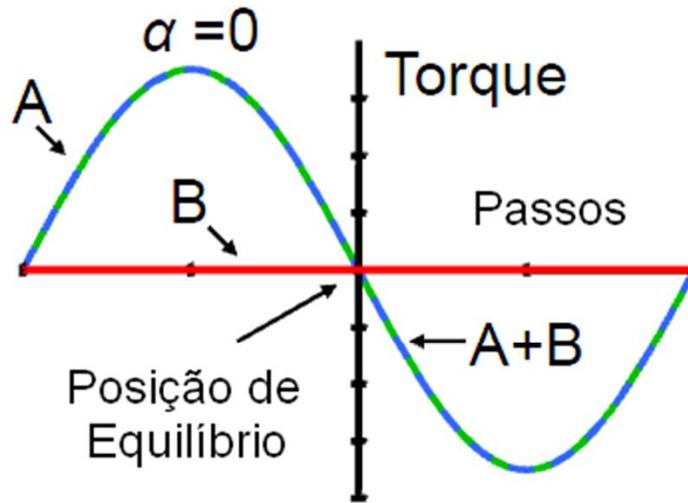
Micro-passos com correntes senoidais e cossenoidais nos enrolamentos dos estatores A e B são dados por

$$\begin{aligned}i_a &= i_0 \sin \alpha \\i_b &= i_0 \cos \alpha\end{aligned}$$

onde ao se variar  $\alpha$  de 0 a  $\pi/2$  move a posição do rotor de um passo.

Em princípio não há limites para o número de micro-passos, no entanto em termos práticos não se utiliza mais que 256 micro-passos por passo completo.

### Micro-passos (Micro-stepping) (3)



## **Micro-passos (Micro-stepping) (4)**

A precisão aparente dos micro-passos acontece na prática quando não há fricção de Coulomb e torque de carga.

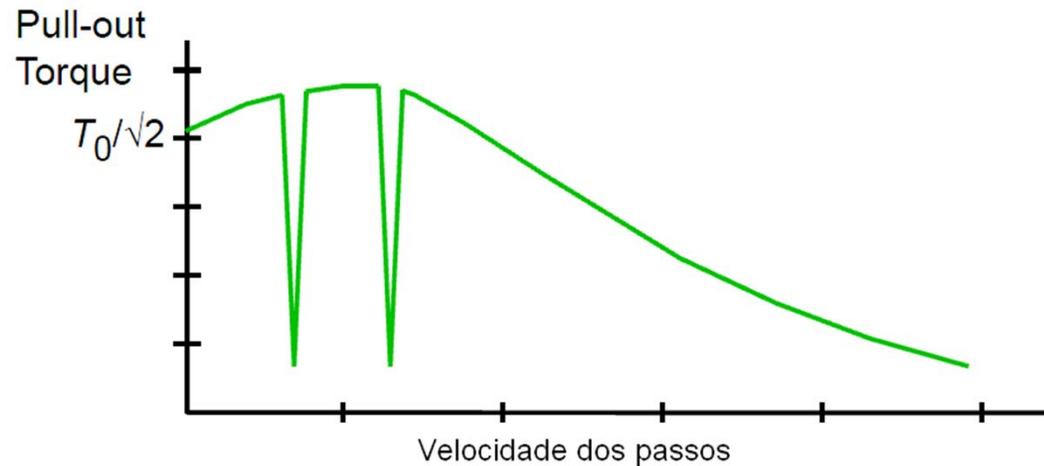
A forma real da curva de torque não é exatamente senoidal, resultando na necessidade de micro-passos não uniformemente espaçados.

A quantização do conversor digital-analógico também resulta em espaçamentos não uniformes dos micro-passos.

São necessárias razões de passos muito altas para obter uma velocidade de rotação normal.

## Operação de Início e Parada (1)

A característica torque pull-out versus velocidade pode se estender Por 10000 ou 20000 passos por segundo.



Pull-out torque é o torque que o motor pode gerar a uma dada velocidade de passos: se o torque da carga exceder este limite então o motor perde a sincronização

Entretanto, o motor não pode começar ou parar a partir destas velocidades.

## Operação de Início e Parada (2)

Para mover-se com um grande número de passos rapidamente o motor precisa iniciar com baixa velocidade e então acelerar até atingir uma alta velocidade. O inverso também é verdadeiro.

A faixa de torques de carga e velocidades na qual o motor começa e para sem perda de sincronização é conhecida como **característica pull-in**.

A máxima velocidade pull-in ocorre quando o torque da carga é zero e todo torque do motor é disponibilizado para aceleração:

$$J_r \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_{avg} = \frac{2T_0\sqrt{2}}{\pi}$$

Integrando

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{2T_0\sqrt{2}}{\pi J_r} t^2 \geq \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{4n}$$

$$t \geq \sqrt{\frac{\pi^2 J_r}{4nT_0\sqrt{2}}}$$

A velocidade máxima de pull-in dada em termos de frequência é

$$f_{max} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{nT_0\sqrt{2}}{J_r}}$$

### Operação de Início e Parada (3)

Para um motor de passo com os seguintes parâmetros

Number of rotor poles:	$N_r = 50$
Rotor inertia:	$J_r = 1.16 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$
Peak torque:	$T_0 = 0.242 \text{ N m}$

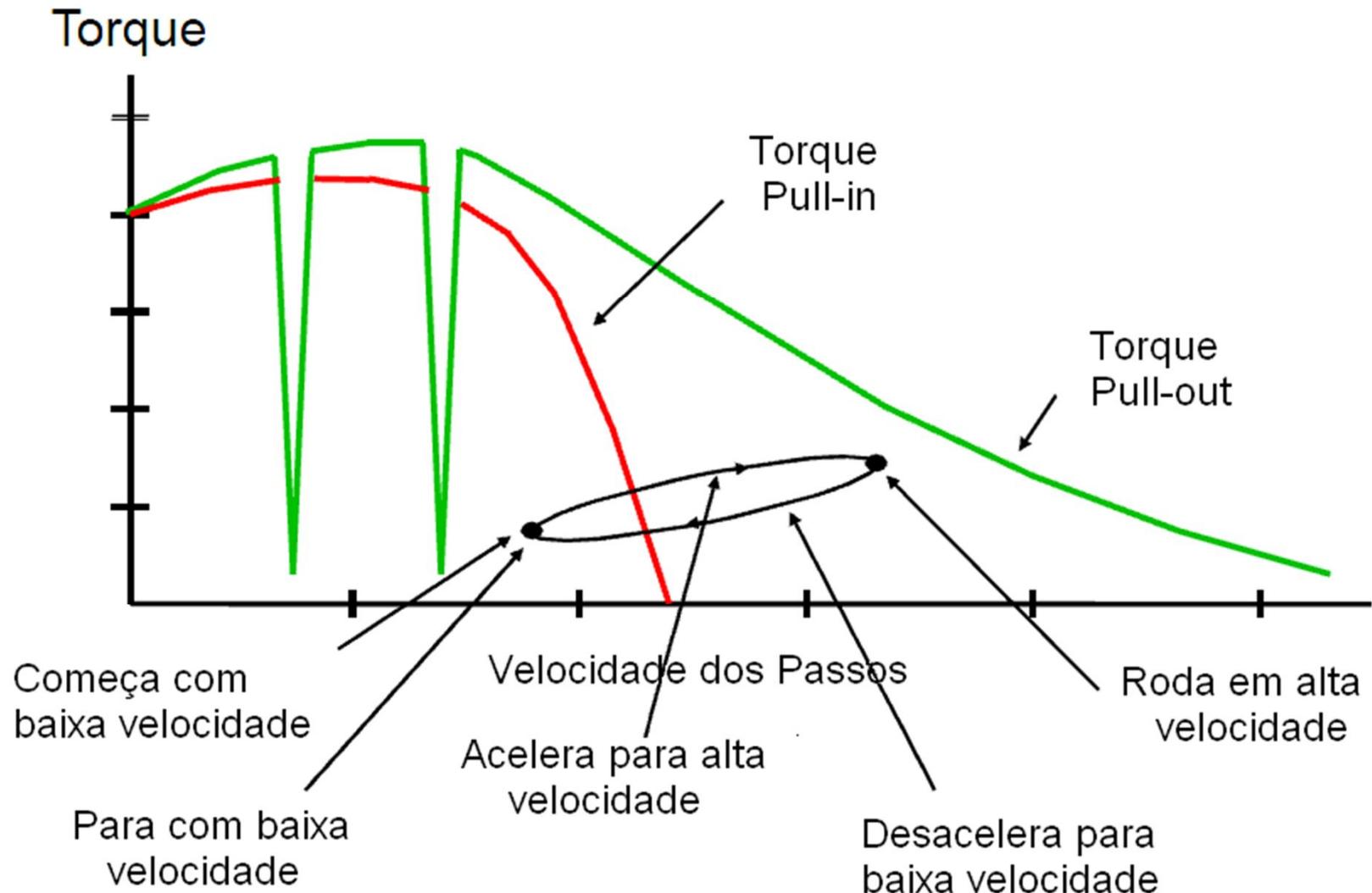
A velocidade máxima de pull-in da em termos de frequência é

$$\begin{aligned} f_{\max} &= \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{nT_0\sqrt{2}}{J_r}} \\ &= 773 \text{ step/s} \end{aligned}$$

Em geral  $f_{\max}$  está relacionada com a frequência de ressonância  $f_0$ :

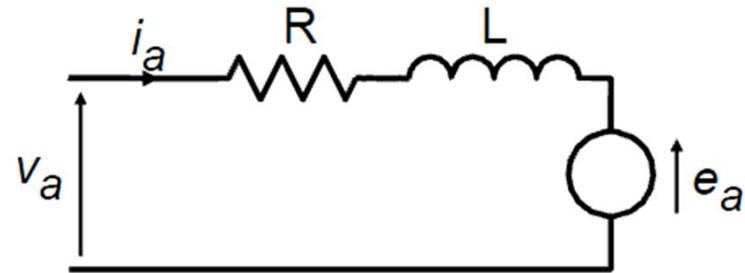
$$f_{\max} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{nT_0\sqrt{2}}{J_r}} = 4\sqrt[4]{2}f_0 = 4.8f_0$$

## Operação de Início e Parada (4)



## Modelo do Motor de Passo (1)

No enrolamento A do motor



onde  $v_a$  é a tensão aplicada no enrolamento;  
 $i_a$  é corrente no enrolamento; e  
 $e_a$  é a tensão induzida no enrolamento

$$v_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a$$

No enrolamento B do motor

$$v_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b$$

## Modelo do Motor de Passo (2)

$\Psi_a$  e  $\Psi_b$  são os fluxos magnéticos nos enrolamentos A e B sendo:

$$\Psi_a = \Psi_m \cos n\theta$$

$$\Psi_b = \Psi_m \sin n\theta$$

e  $\Psi_m$  é o fluxo máximo no estator .

A tensão  $e_a$  e  $e_b$  que são induzidas nos enrolamentos do estator são dadas por:

$$e_a = m \frac{d\Psi_a}{dt} = -mn\Psi_m \sin n\theta \cdot \frac{d\theta}{dt} = -K_c \omega \sin n\theta$$

$$e_b = m \frac{d\Psi_b}{dt} = mn\Psi_m \cos n\theta \cdot \frac{d\theta}{dt} = K_c \omega \cos n\theta$$

onde  $m$  é o número de espiras no enrolamento dos estator.

### Modelo do Motor de Passo (3)

Pela conservação de energia: potência mecânica na saída = potência elétrica na entrada:

$$\omega T_a = i_a e_a \quad \text{e} \quad \omega T_b = i_b e_b$$

tal que

$$T_a = -i_a K_c \sin n\theta \quad \text{e} \quad T_b = i_b K_c \cos n\theta$$

Modelo completo:

$$\begin{aligned} J_r \frac{d^2\theta}{dt^2} + D_r \frac{d\theta}{dt} &= T + T_a + T_b \\ &= T - i_a K_c \sin n\theta + i_b K_c \cos n\theta \end{aligned}$$

$$v_a = R i_a + L \frac{di_a}{dt} - \omega K_c \sin n\theta$$

$$v_b = R i_b + L \frac{di_b}{dt} + \omega K_c \cos n\theta$$

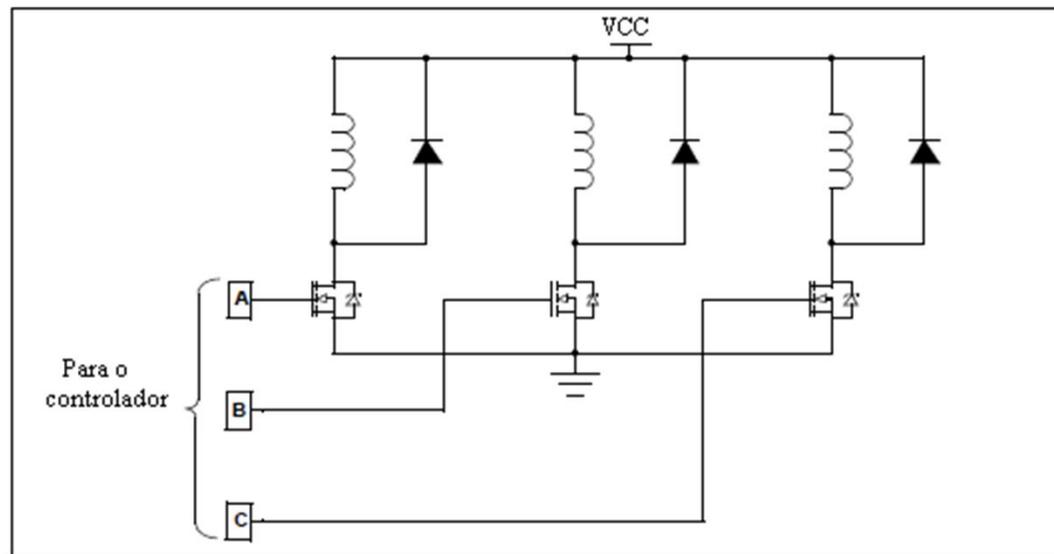
## Circuitos de Controle Básicos

Nesta seção serão apresentados os circuitos básicos necessários para acionar os diversos tipos de motores de passo.

### Relutância Variável

Os motores de relutância variável tem múltiplas bobinas, tipicamente de 3 a 5, que possuindo um terminal comum. As bobinas são acionadas uma de cada vez em uma determinada sequência para girar o motor.

A Fig. 12 mostra o circuito básico para acionar um motor de relutância variável. Note os diodos nos terminais da bobina. Como elas são cargas indutivas, necessitam de um caminho para a corrente quando são chaveadas. O diodo protege o transistor MOSFET.



**Figura 12: Circuito de Controle de um motor de relutância variável**

## Unipolar

O circuito de controle básico de um motor unipolar, mostrado na Fig.13, é similar ao do motor de relutância variável. Note diodos extras para cada MOSFET. Isto é necessário porque a bobina possui derivação central nos motores unipolares. Quando uma extremidade da bobina é aterrada a outra é colocada na tensão alta e vice versa. Estes diodos previnem que a tensão através dos MOSFETS caiam abaixo da tensão de terra.

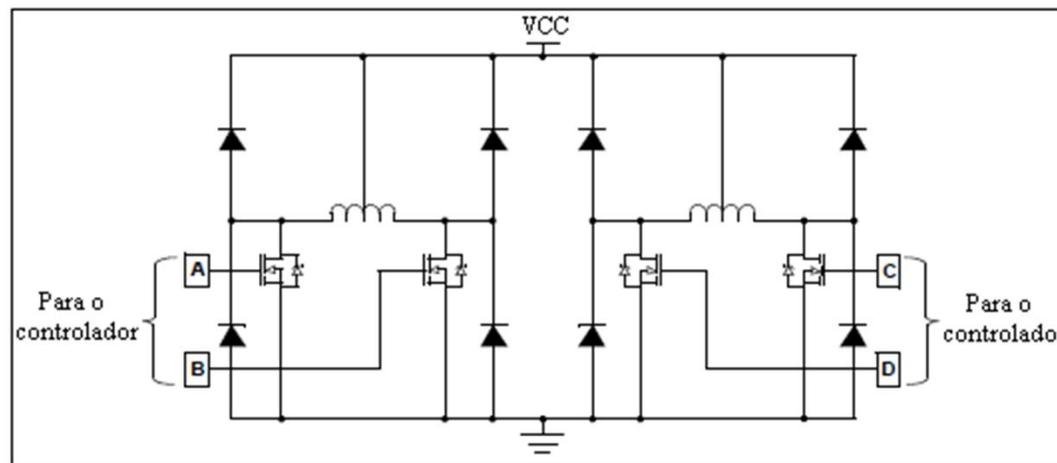


Figura 13: Circuito de Controle de um Motor unipolar

## Bipolar

O circuito básico para acionar as bobinas do motor de passo bipolar é a ponte H mostrada na Fig. 14. A ponte H pode ser configurada para permitir o fluxo de corrente em uma outra direção na bobina. Considerando a Fig. 14, a corrente fluirá da esquerda para direita na bobina 1 quando os MOSFETs Q1 e Q4 estiverem acionados e os transistores Q2 e Q3 cortados. A corrente fluirá da direita para esquerda quando Q2 e Q3 estiverem conduzindo e Q1 e Q4 cortados.

As pontes H possuem um perigo inerente que deve ser mencionado. Sob nenhuma condição os transistores de um mesmo lado da ponte devem ser ligados ao mesmo tempo. Isto causará um curto-circuito que poderá danificar o circuito de controle. Um cuidado especial deve ser tomado no chaveamento dos MOSFETs.

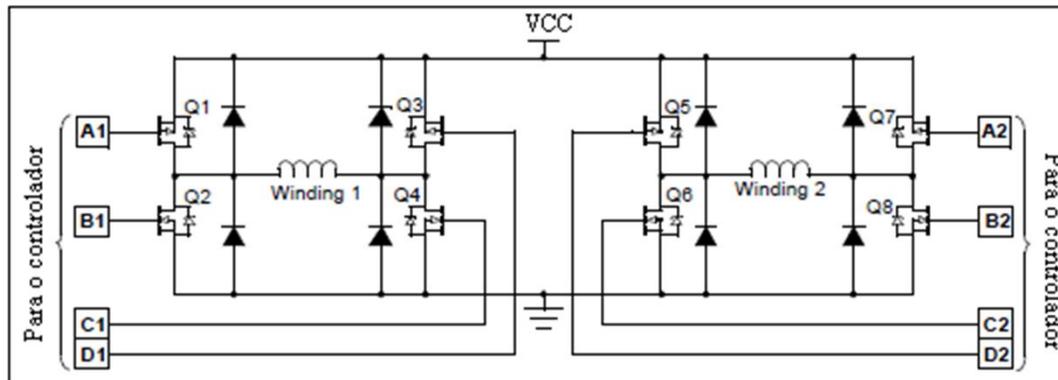


Figura 14: Circuito de Controle do Motor bipolar

## Referência

AN907 Stepping Motors Fundamentals – Applications Note – Microchip,  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00907a.pdf> acessado  
em 11/03/2013.

Parte do material foi obtido do seguintes site:s

<http://www.engineersgarage.com/articles/stepper-motors?page=1>

[http://www.personal.rdg.ac.uk/~stsgrimb/teaching/stepping\\_motors.pdf](http://www.personal.rdg.ac.uk/~stsgrimb/teaching/stepping_motors.pdf)