

PMR3411 - Projeto de Máquinas

Mecatrônica - EPUSP

Acionamentos e Sensores para Máquinas CNC

Gilberto F. Martha de Souza

Julio Cezar Adamowski

setembro/2023

Acionamentos → Motores elétricos

Características:

linearidade

torque

velocidade

geração de calor

massa

Principais tipos de motor elétrico:

motor CA de indução

motor *Brushless* (CA e CC) → mais utilizado

motor CC (com escovas)

motor de passo → baixo custo e fácil de controlar

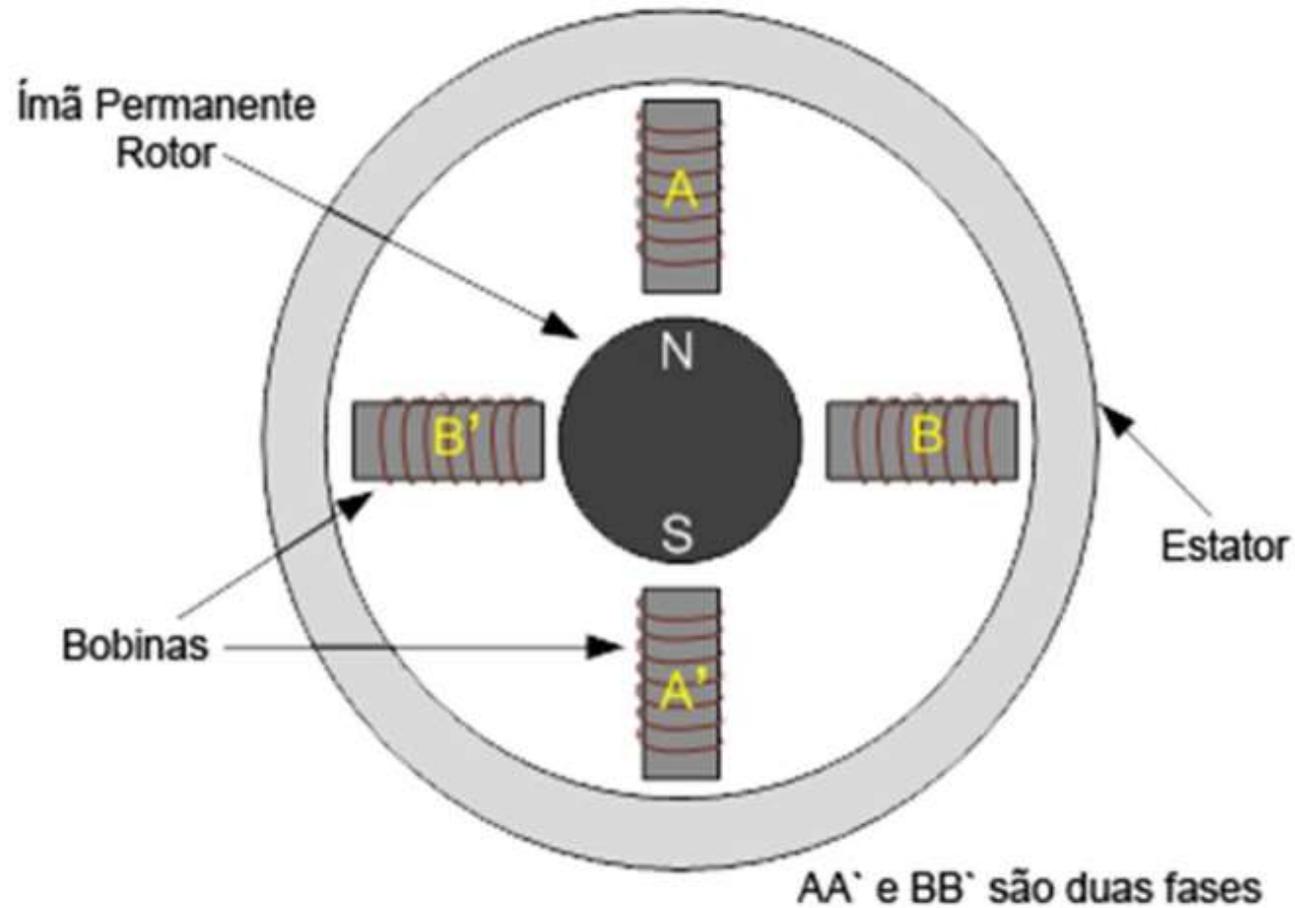
Motor de passo

Ímã permanente

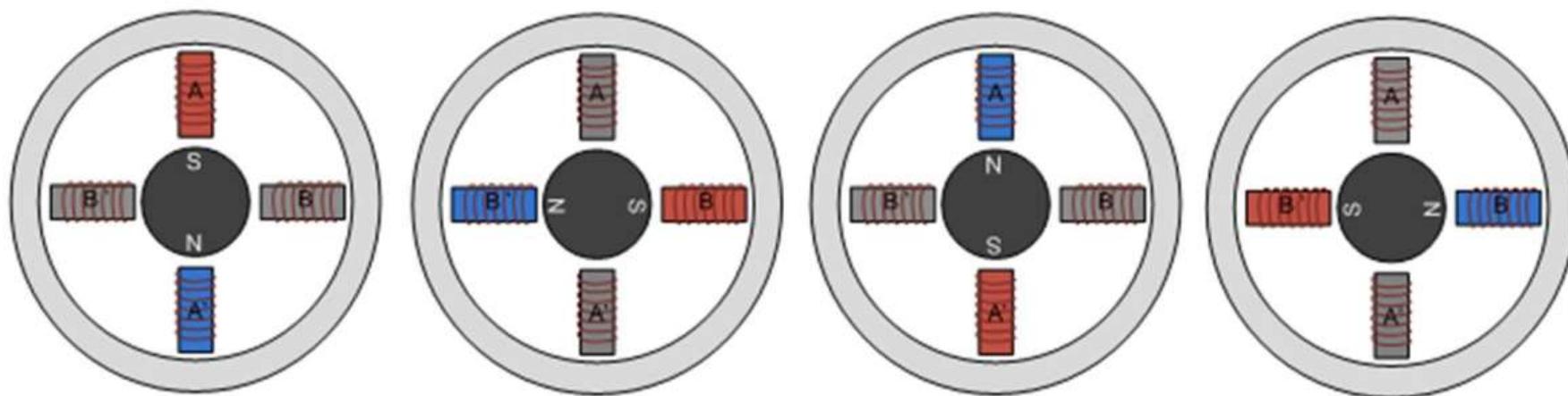
Relutância variável

Híbrido

Motor de Passo com Ímã Permanente



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



 NORTE  SUL

Trabalhando com Motor de Passo de Magnetismo Permanente

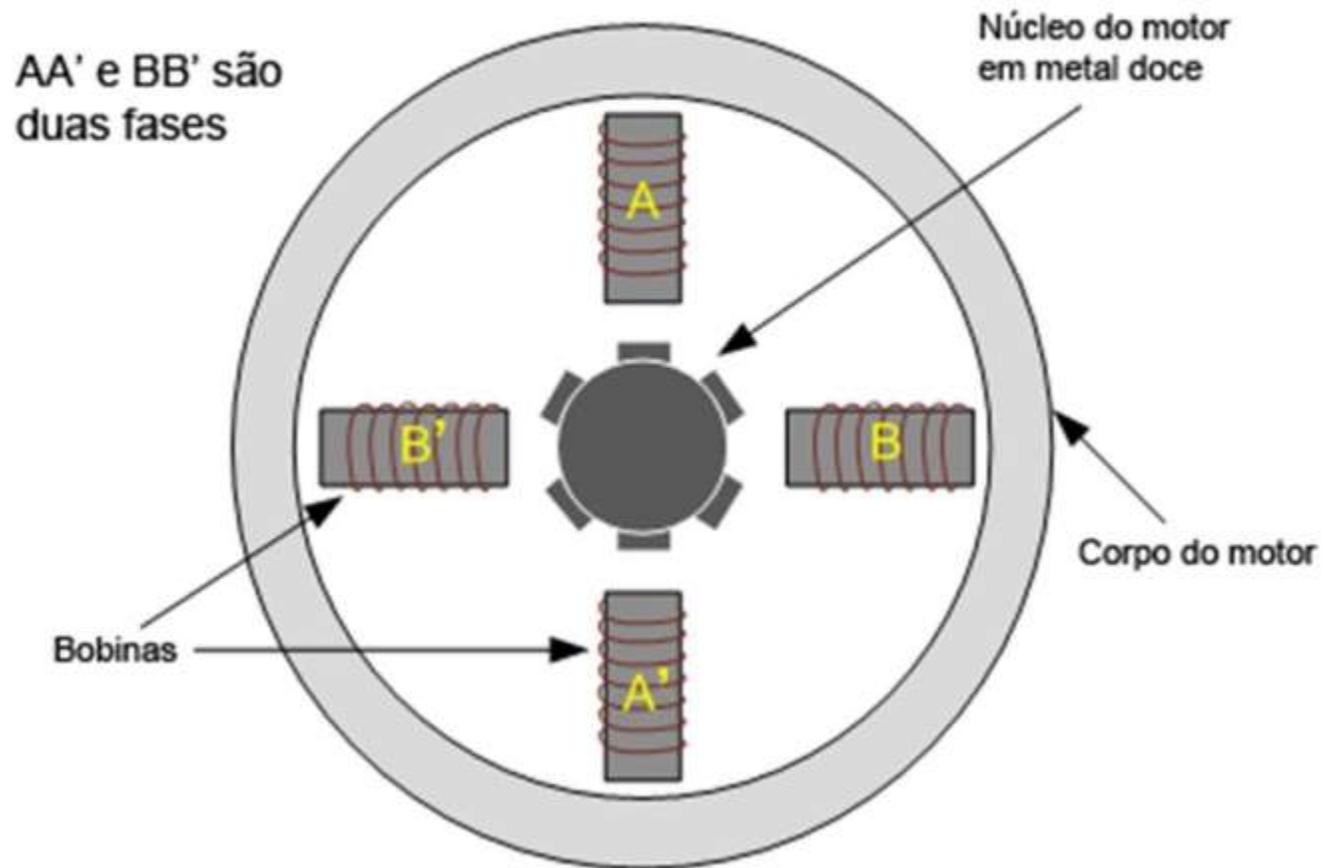
Motor de passo

Imã permanente

Relutância variável

Híbrido

Motor de Passo de Relutância Variável com duas fases

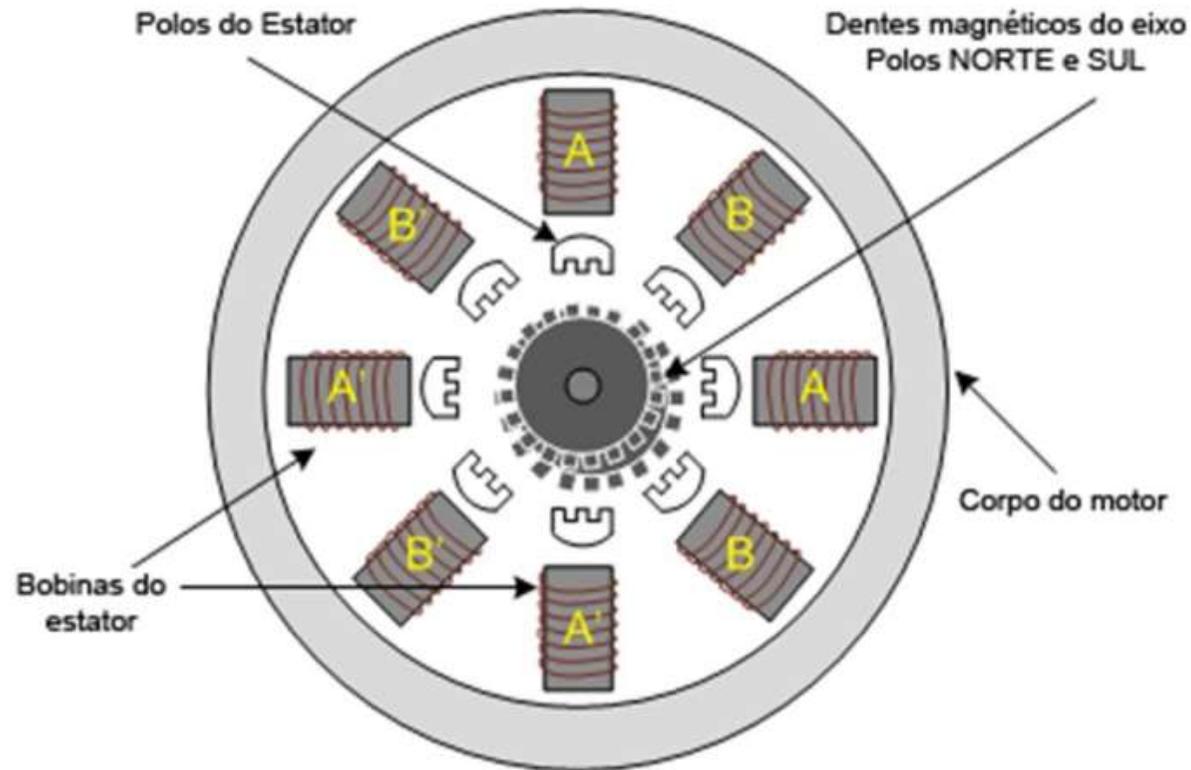


Motor de passo

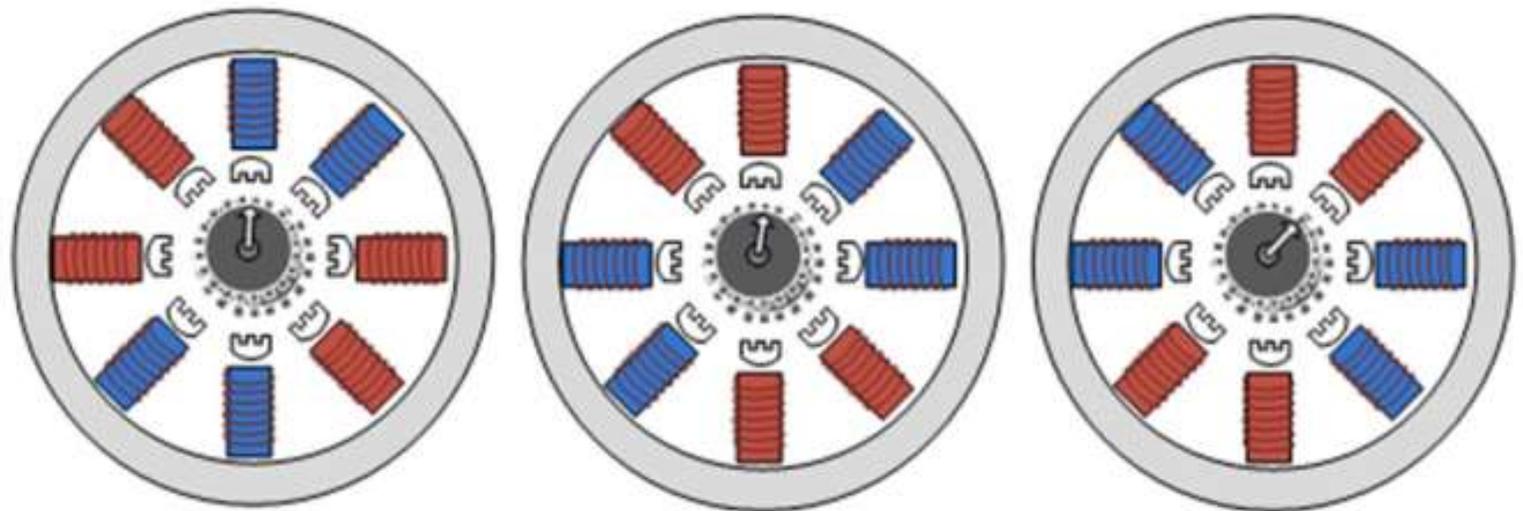
Imã permanente

Relutância variável

Híbrido



Perceba que os polos NORTE e SUL do motor são separados



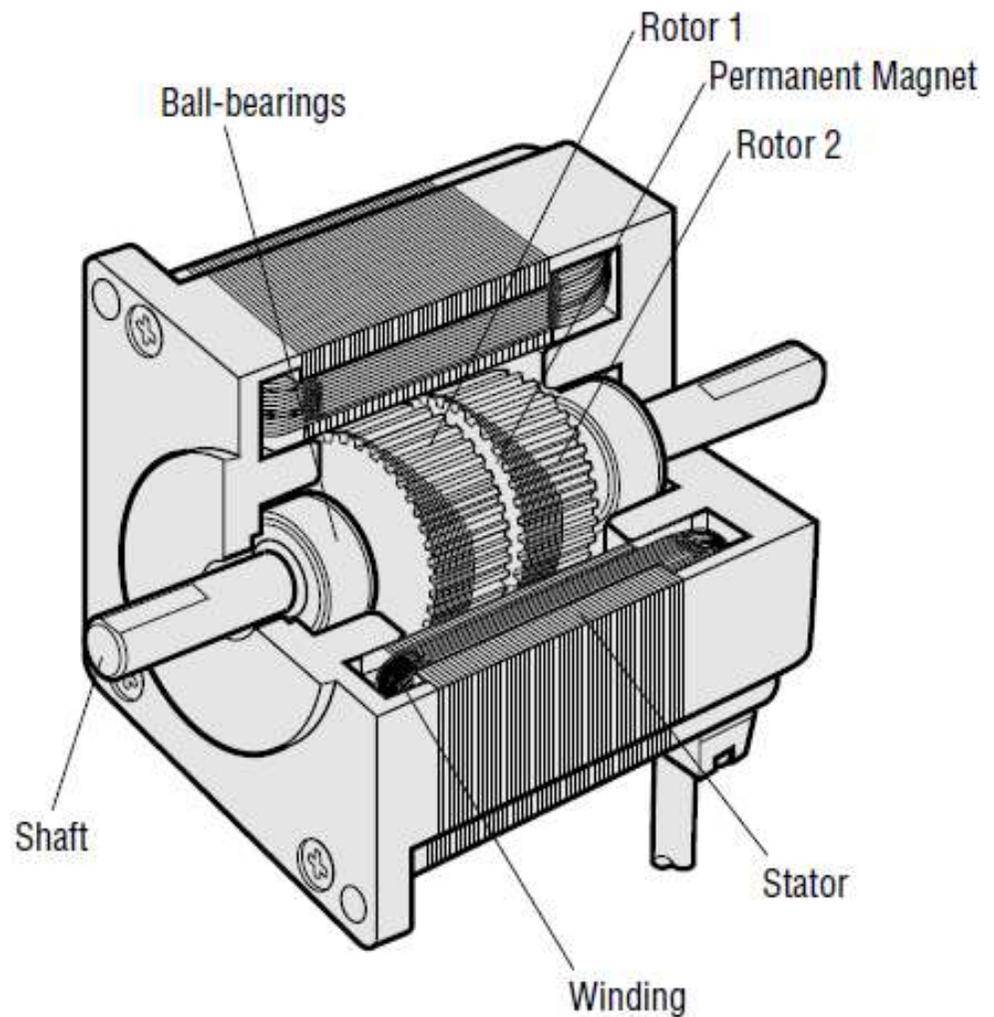
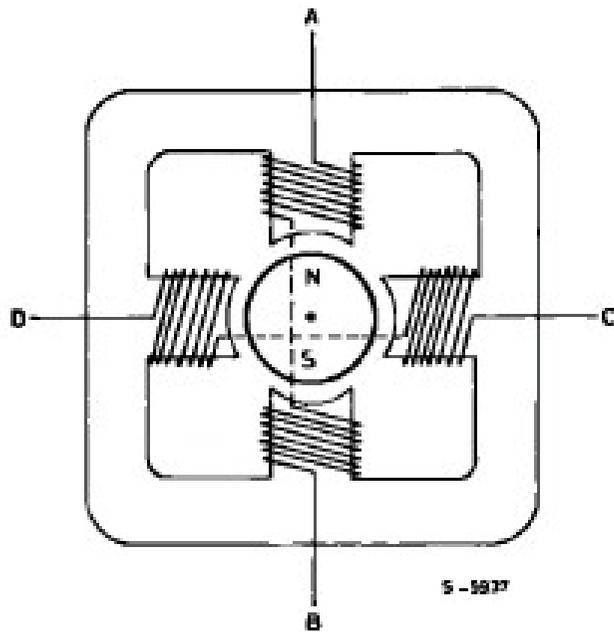
Norte Sul

Motor de passo

Imã permanente

Relutância variável

Híbrido

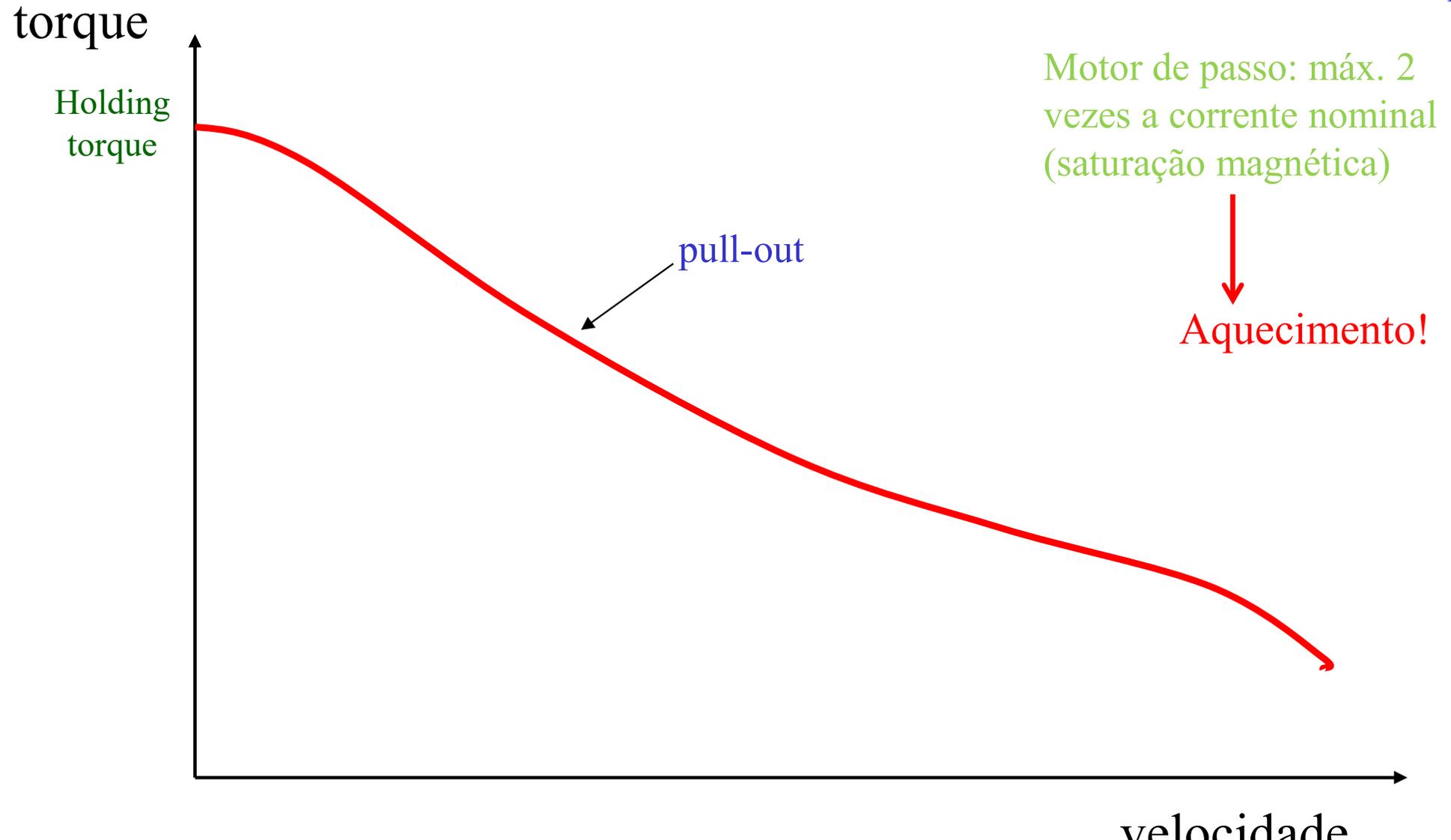


Curva torque x velocidade: motor de passo

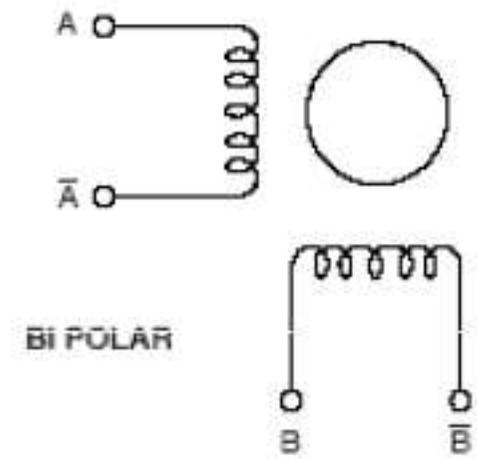
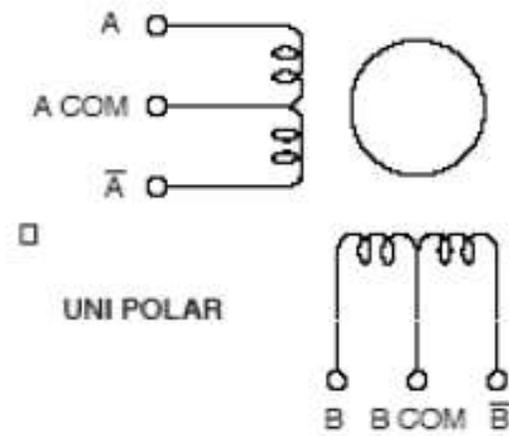
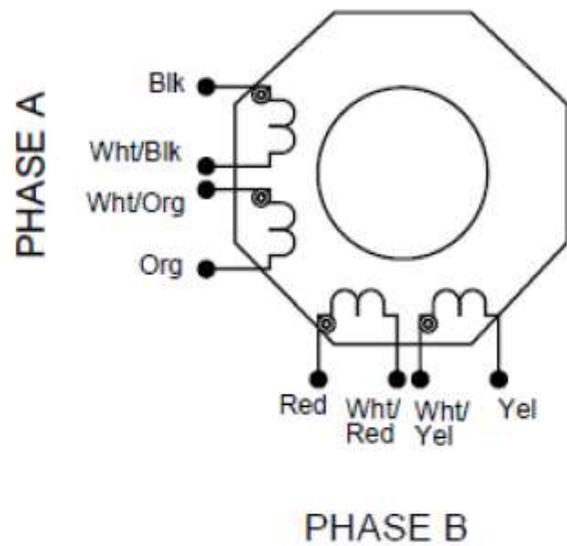
Corrente nominal e velocidade zero → holding torque

Curva de torque x velocidade depende do tipo de acionamento eletrônico

aumento da corrente → aumento do torque



Enrolamentos do motor de passo 4 fases

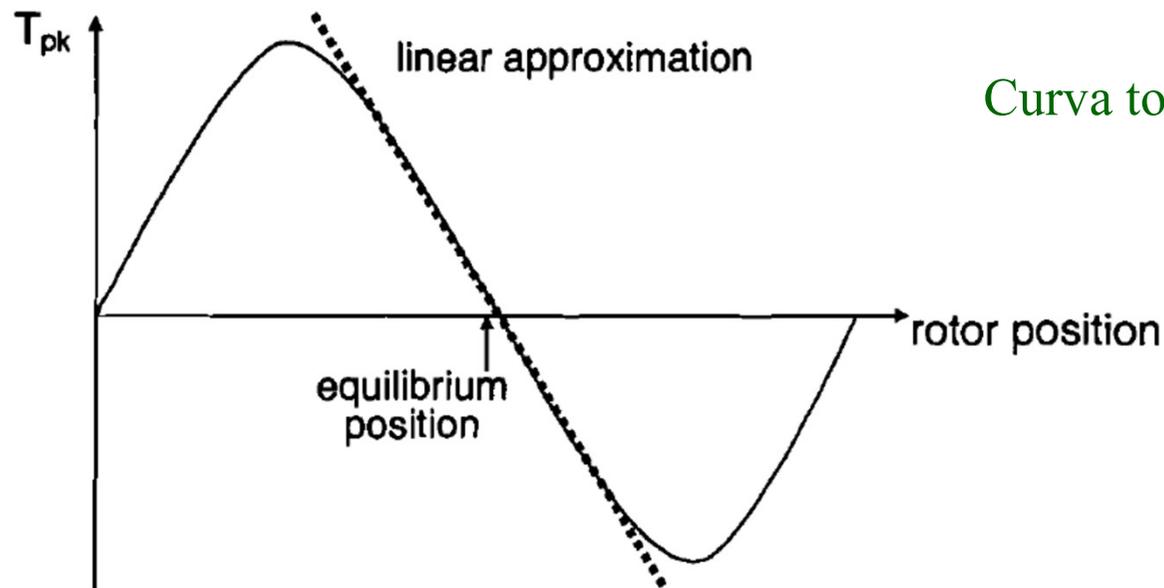
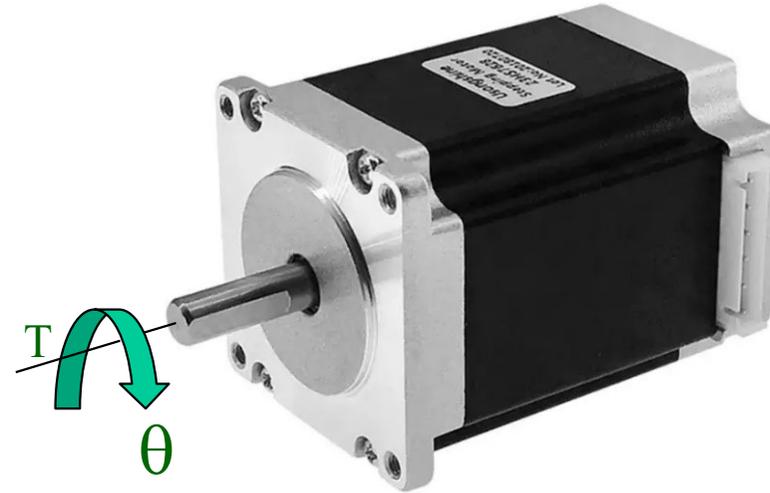


Rigidez magnética

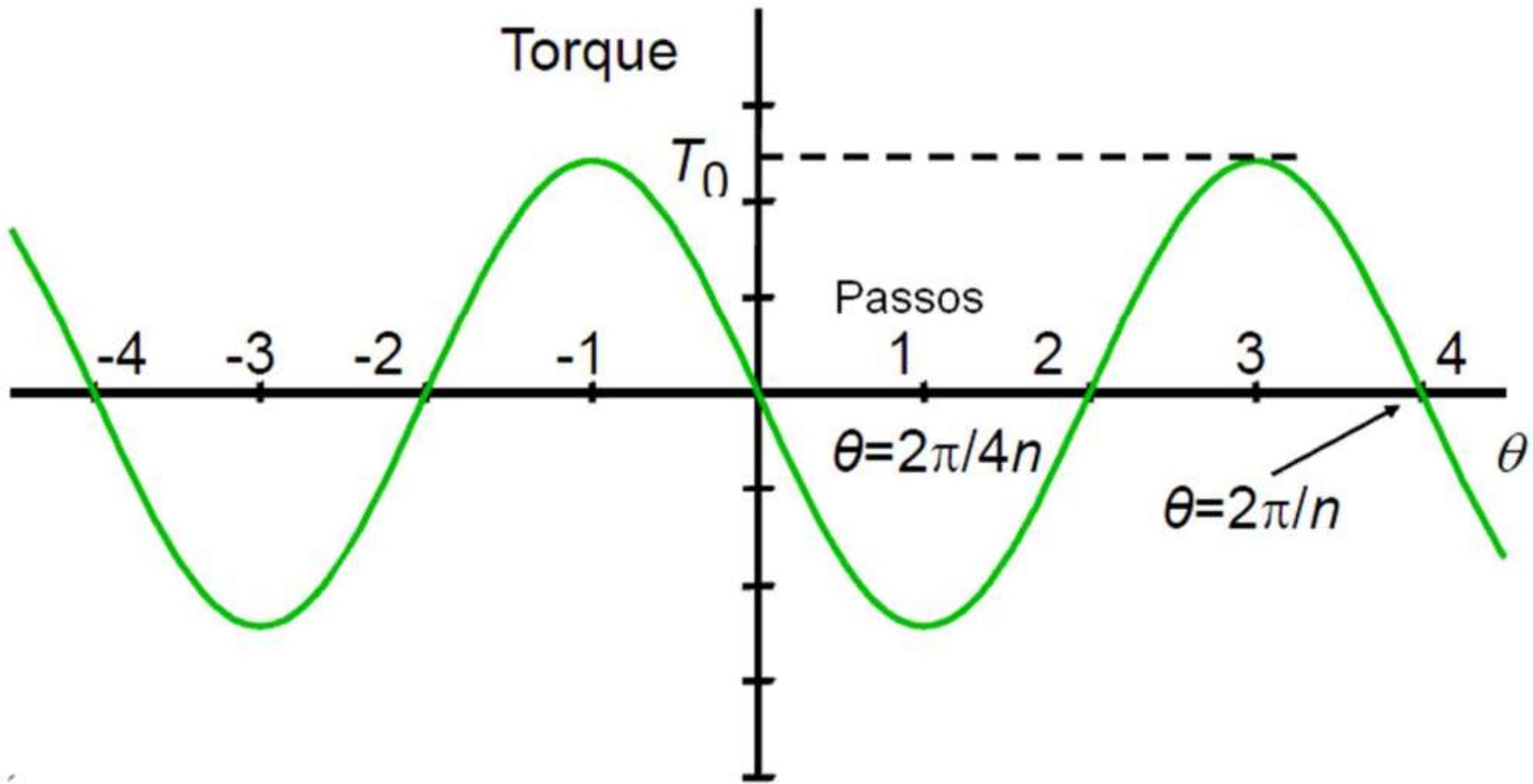
Rigidez torsional

$$k_{\theta} = \frac{T}{\theta}$$

Aplicar torque ao eixo do motor de passo com uma das fases energizada ou com as fases curto-circuitadas → curva torque x deslocamento angular



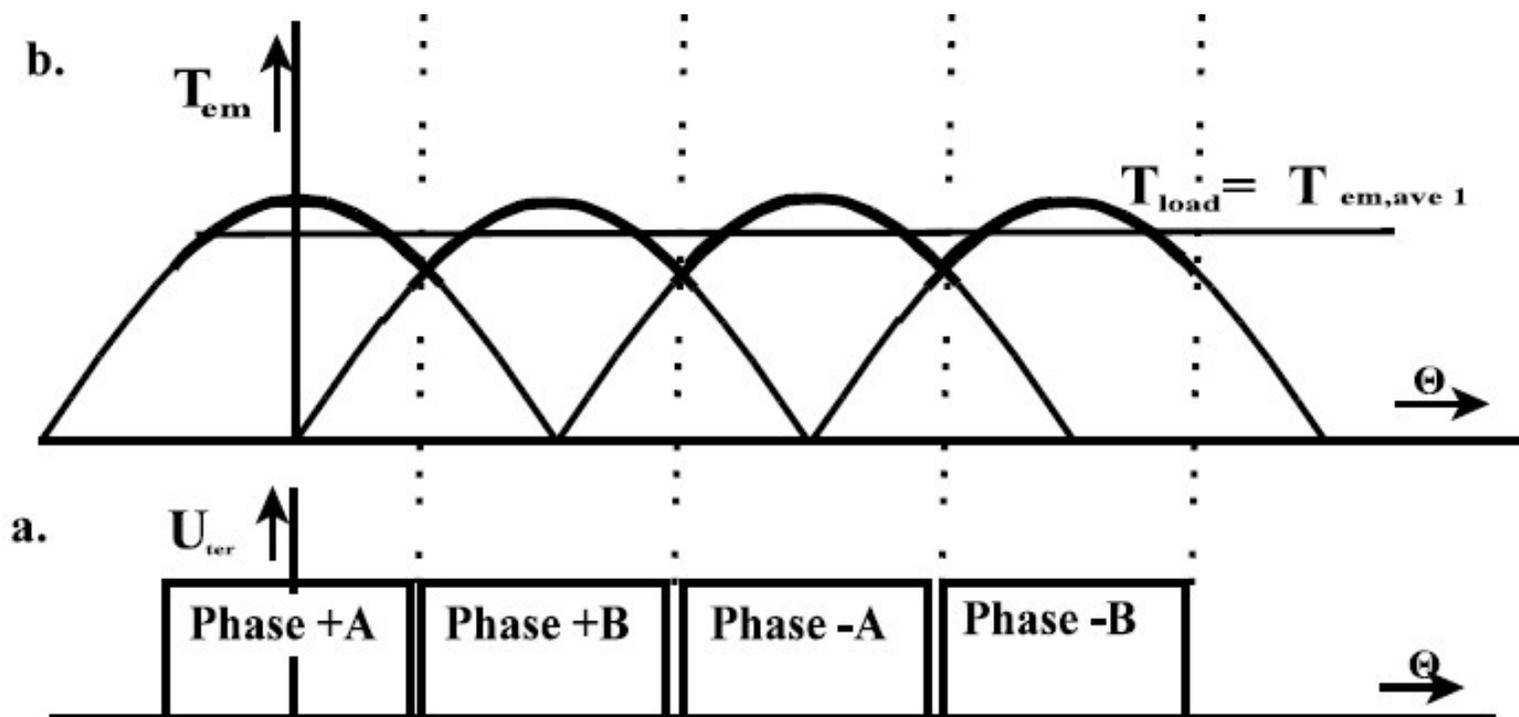
Curva torque x deslocamento angular



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

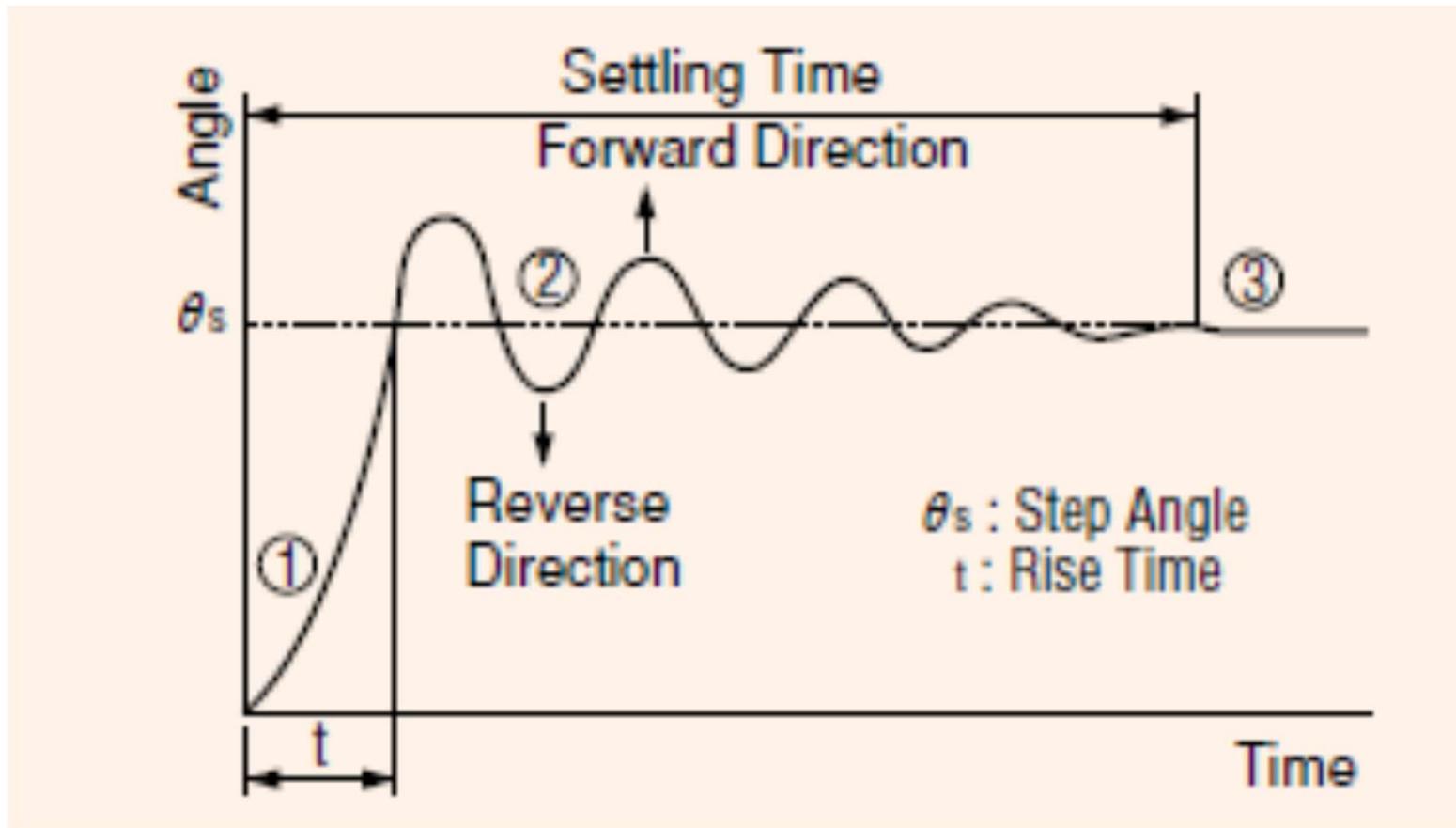
onde n é o número de dentes no rotor e θ é o ângulo do rotor

Acionamento das fases



Curto circuitando as 4 fases, o motor se transforma num freio eletromagnético (holding torque)

Resposta dinâmica: 1 passo



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

k_m = rigidez magnética
 J_r = inércia do rotor

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:

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

Características mecânicas

Frequência natural (ressonância)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{NT_0}{J_r}}$$

N = número de polos no rotor

T_0 = torque máximo

J_r = inércia do rotor

Exemplo:

Motor de passo híbrido de 4 fases:

Número de polos no rotor $N = 50$

Inércia do rotor $J_r = 1,16 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$

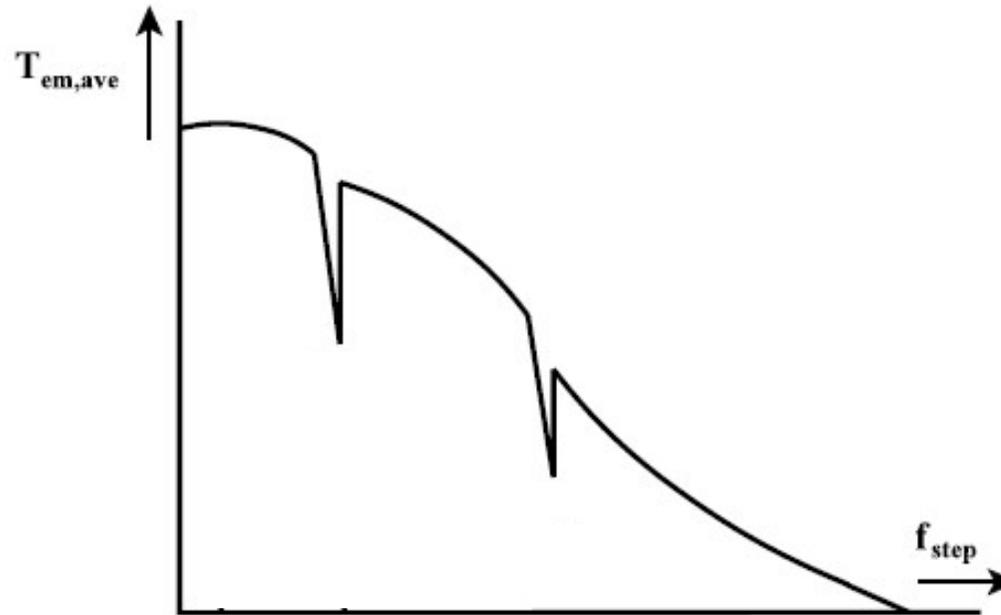
Resistência do enrolamento $R = 0,66 \Omega$

Indutância $L = 1,52 \times 10^{-3} \text{H}$

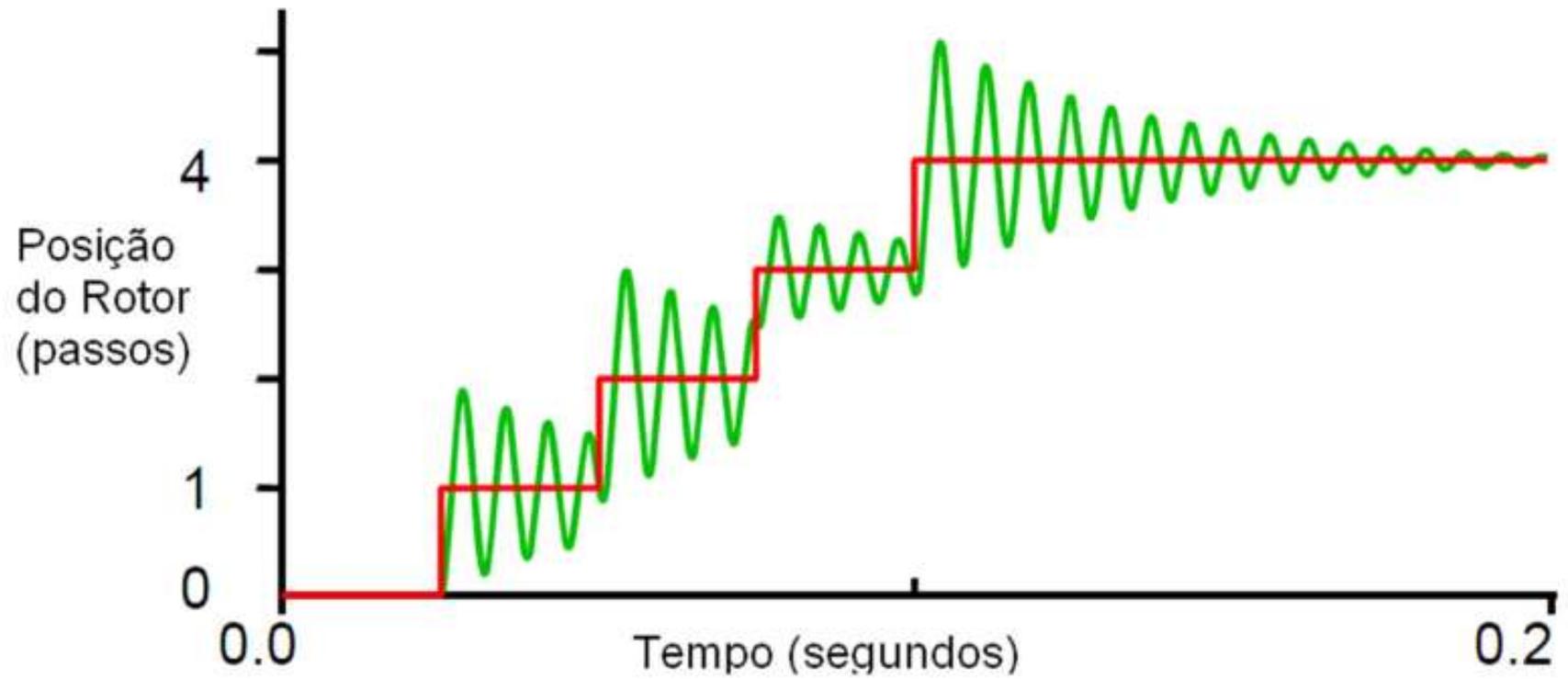
Corrente nominal $I_0 = 2 \text{A}$

Torque ($I_0 = 2 \text{A}$) $T_0 = 0,242 \text{Nm}$

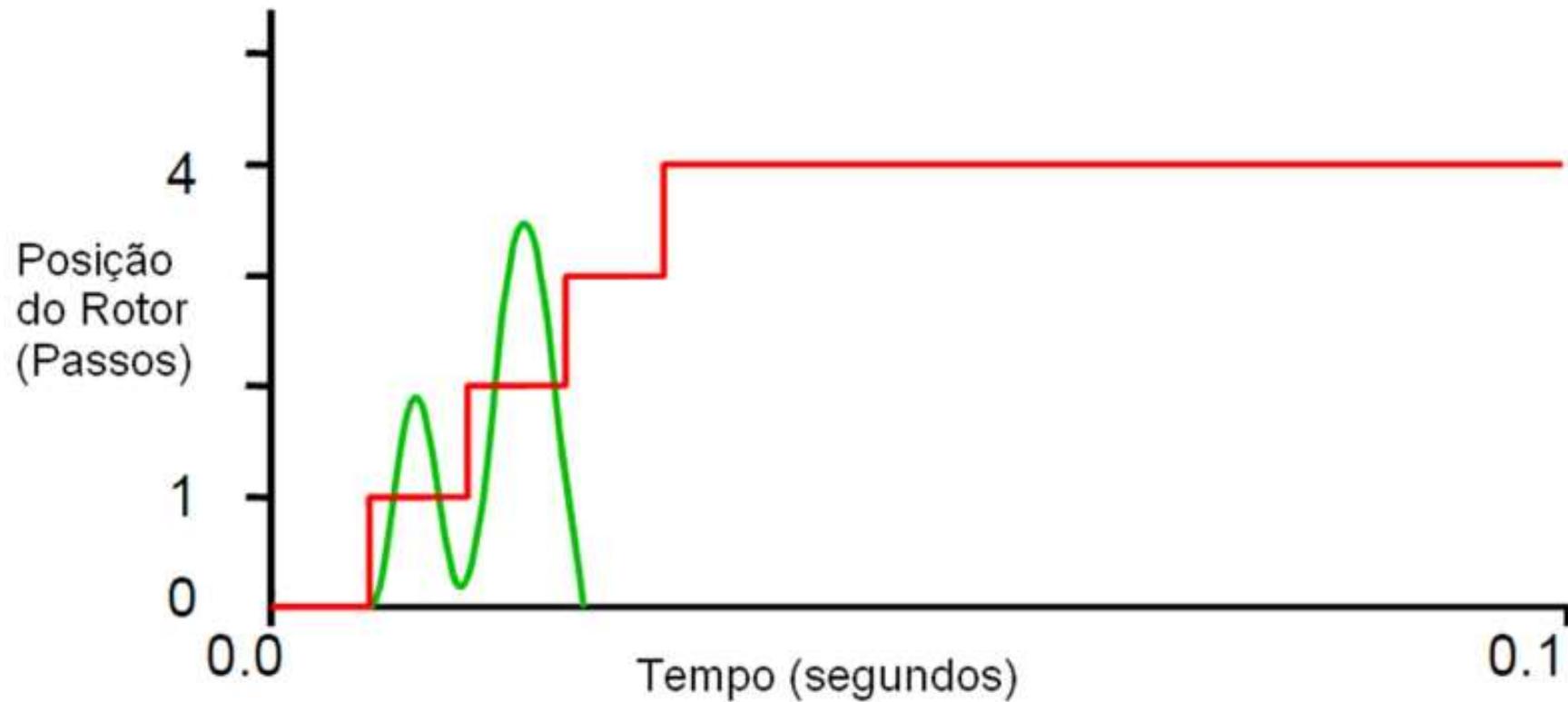
$$f_0 = 162 \text{passos/s}$$



Passo Múltiplos: Resposta Dinâmica (1)



Passo Múltiplos: Resposta Dinâmica (2)

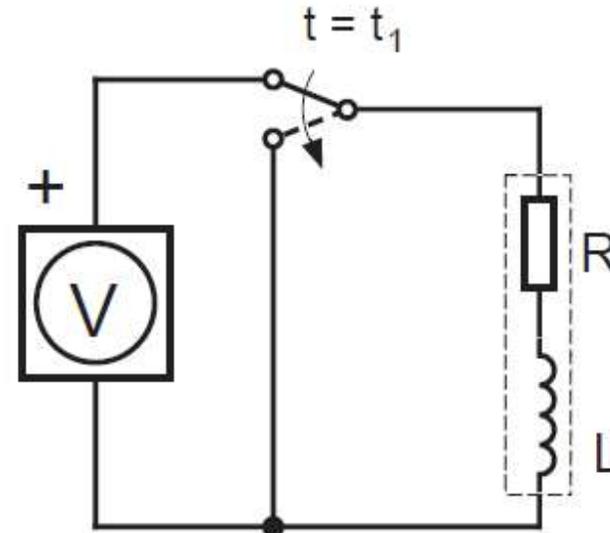
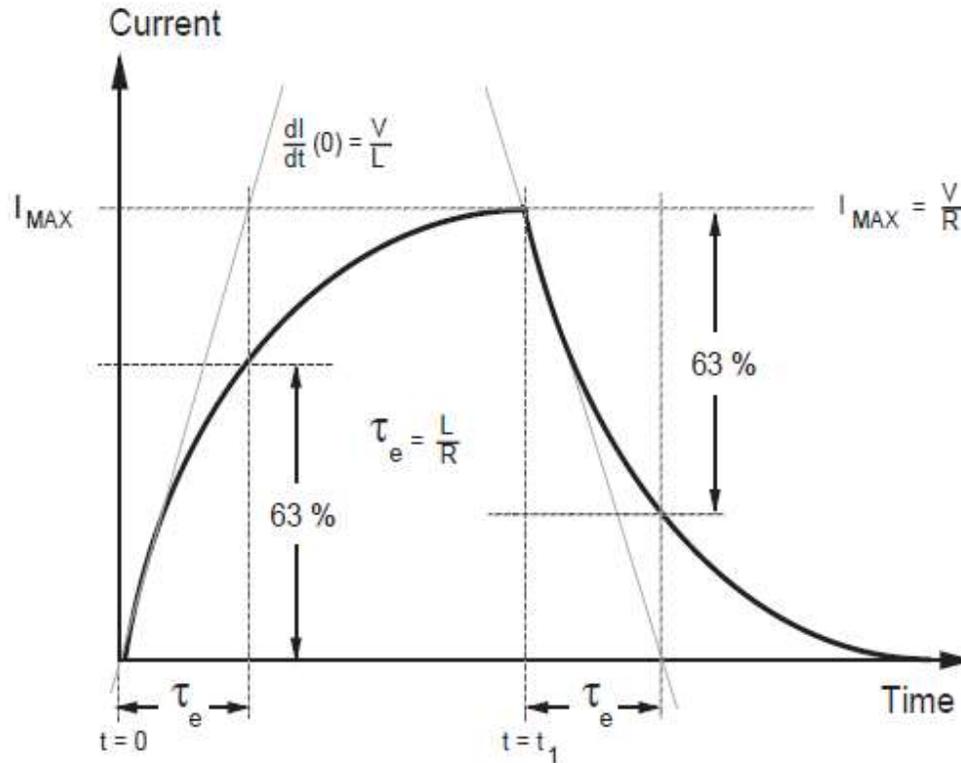


Esta figura mostra a perda da sincronização como resultado de 4 passos na frequência de 132 passos/s (próxima da frequência de ressonância).

Características elétricas do motor de passo

L = indutância do enrolamento

R = resistência elétrica



Constante de tempo elétrica: $\tau_e = \frac{L}{R}$

Exemplo: $L = 1,52 \times 10^{-5} \text{H}$ e $R = 0,66 \Omega \longrightarrow \tau_e = 2,3 \text{ms}$

Taxa máxima de passos/s = 434

Acionamento elétrico

Como reduzir a constante de tempo elétrica?

Aumentar a resistência: com uma resistência em série de $11,34\Omega$ \longrightarrow $\tau_e = 0,13\text{ms}$

Taxa máxima de passos/s = 7692

Para manter corrente 2A, aplica-se tensão de 24V

Dissipação passa de 2,64W para 48W

Acionamento tipo chopper:

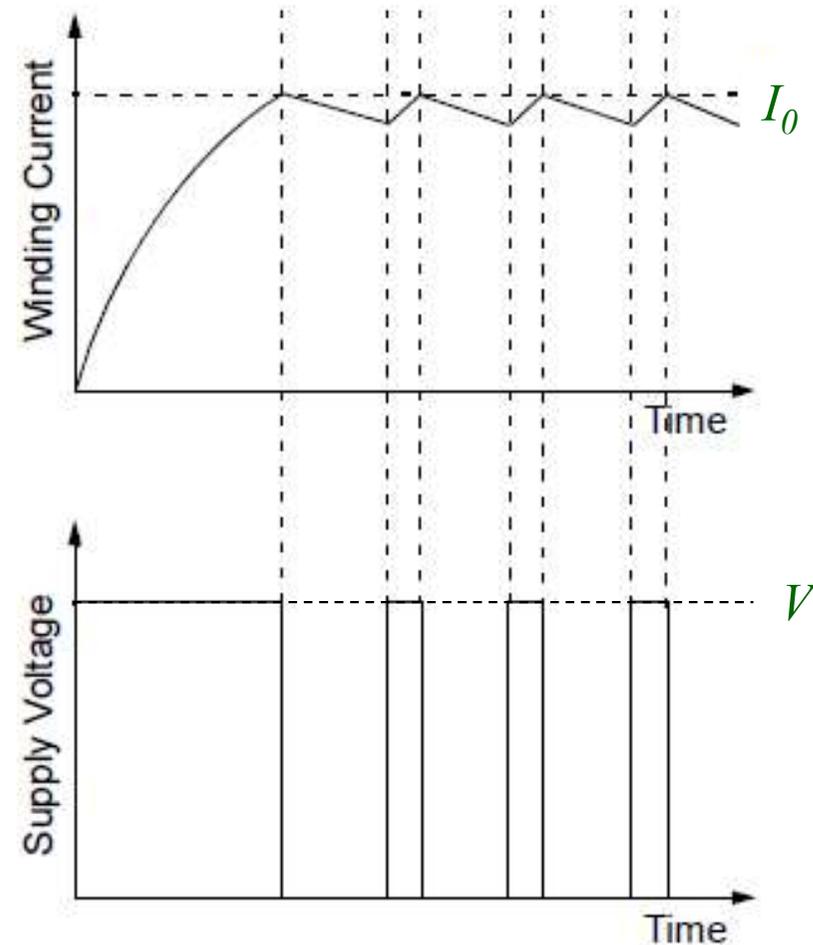
$$\tau_e = \frac{I_0 L}{V} \quad \text{Relembrando: } V=RI$$

I_0 = corrente nominal do motor

V = tensão de alimentação do chopper

$$V = 24\text{V e } I_0 = 2\text{A} \longrightarrow \tau_e = 0,13\text{ms}$$

Dissipação de 2,64W

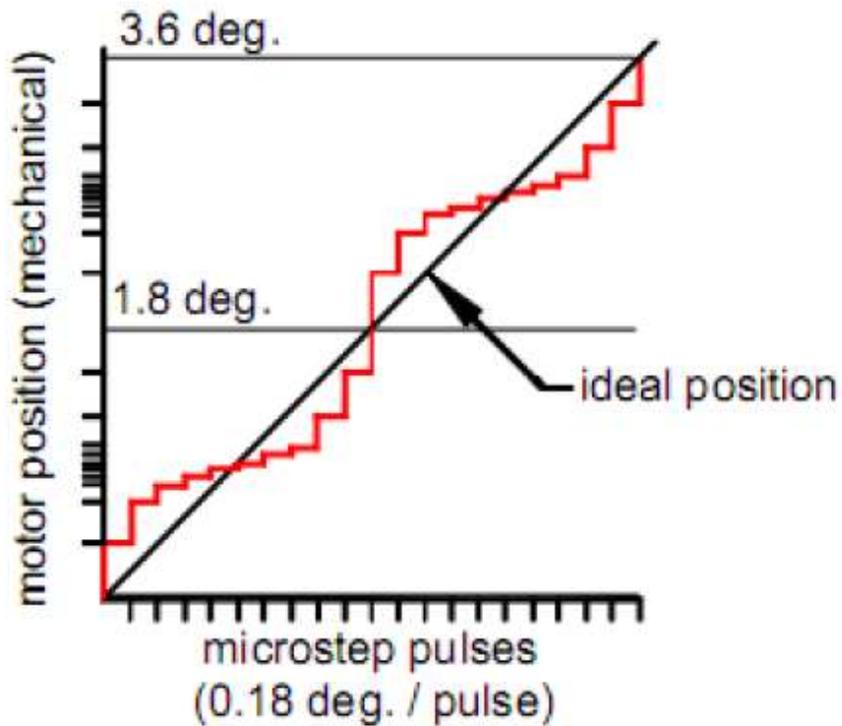


Acionamento elétrico

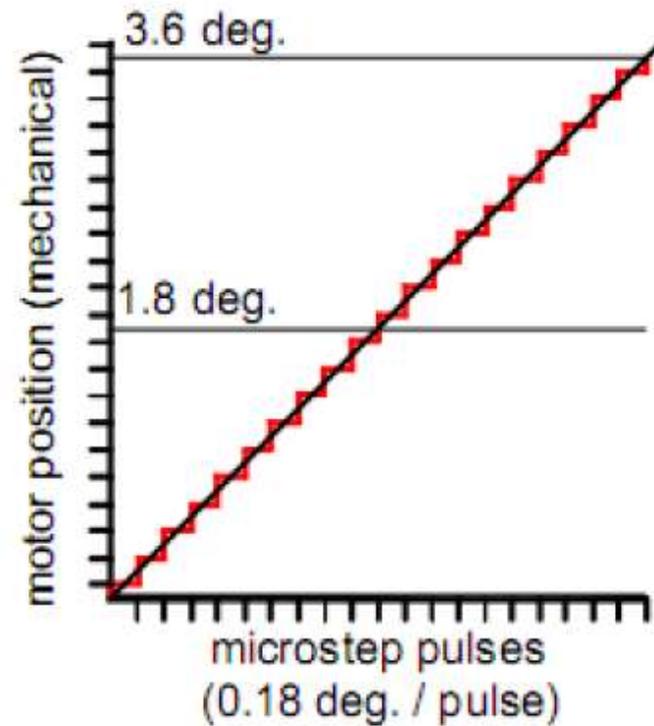
Micropasso

Comportamento depende da precisão de fabricação do motor

Motor pouco linear



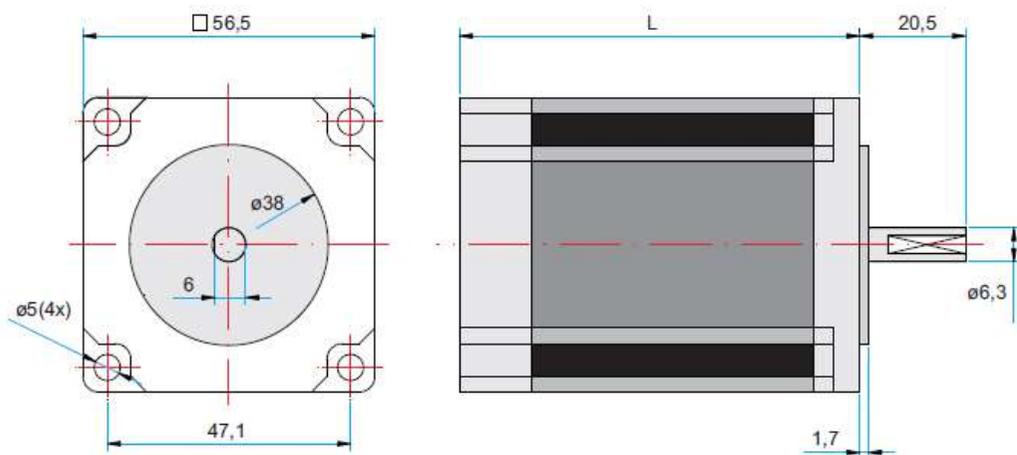
Motor muito linear



Motores usados em PMR3411

Motor de passo HT23-401

curva de torque x velocidade



MODELO	LIGAÇÃO DO MOTOR 1=SÉRIE 2=PARALELO 3=UNIOLAR	COMPRIMENTO "L" (mm)	MINIMO TORQUE ESTÁTICO (N.m)	FIOS	STEP (ÂNGULO)	VOLTS	AMPS	OHMS	mH	ROTOR INÉRCIA (g.cm ²)	MOTOR PESO (Kg)
KTC-HT23-401	1	76	1,86	8	1,8	4,2	2,12	2,0	6,4	480	1,00
	2					2,1	4,24	0,5	1,6		
	3					3,0	3,00	1,0	1,6		

Principais problemas nos motores de passo

Tem operação limitada a baixas rotações: limitação na velocidade de chaveamento das fases

Não suporta picos de torque: perde sincronismo

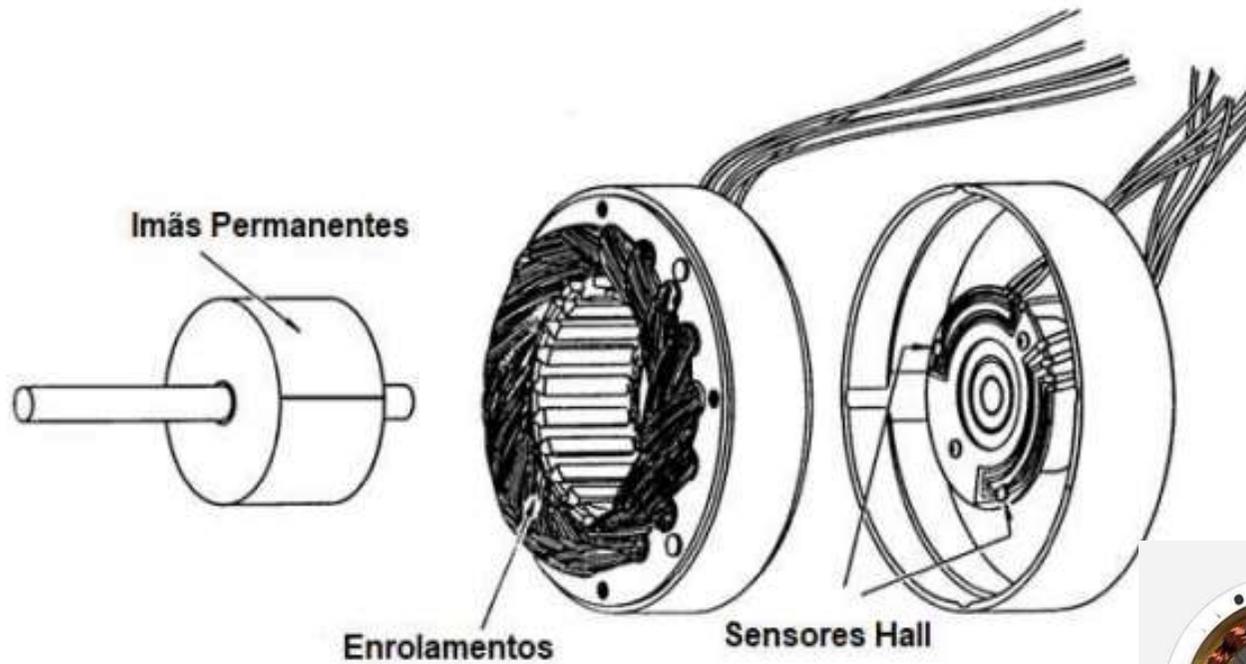
Grande relação massa/potência do motor

Torque de retenção devido aos ímãs permanentes: variação de torque → vibração

Motores Brushless DC

- O motor BLDC é um motor síncrono, ou seja, sua frequência elétrica está vinculada a velocidade de rotação do rotor, porém geralmente motores síncronos são alimentados diretamente por tensão trifásica senoidal enquanto o motor Brushless DC é alimentado através de um controlador responsável pela comutação das bobinas.

Figura 2.1: Composição de um motor BLDC



Fonte: Adaptado de motor wallpapers



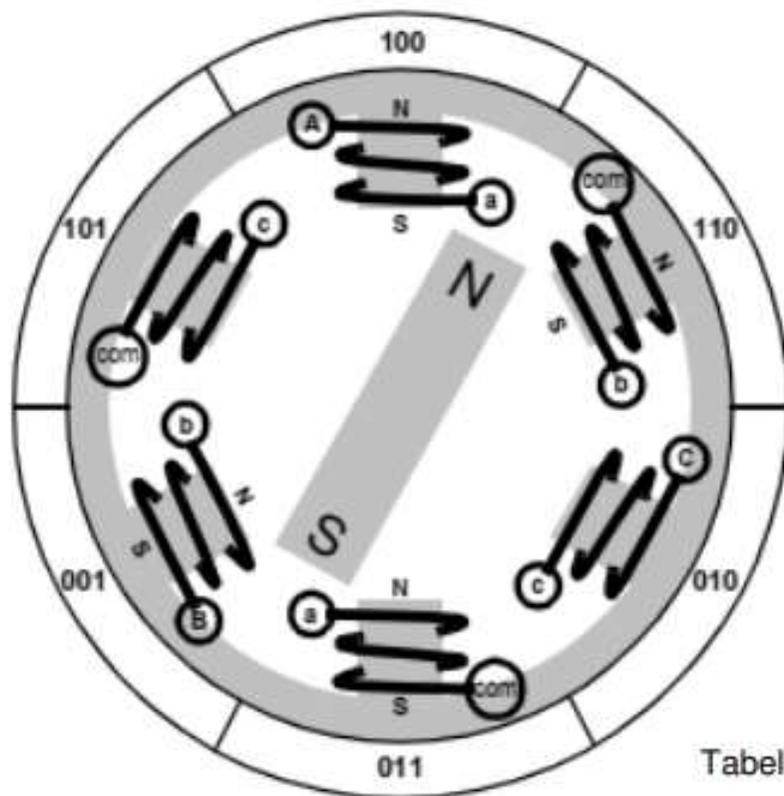
Motores Brushless DC

- Muito comuns, acionamento e controle essencialmente simples.
 - Diversos tamanhos, potências e tensões de alimentação.
 - Acionados por uma tensão contínua.
 - Em geral:
 - O controle da magnitude da tensão controla a velocidade de rotação.
 - O controle da corrente de alimentação controla o torque no motor.
- Desvantagens: possuem escovas que se desgastam ao longo do tempo. Tipos mais modernos: motores brushless (sem escovas) alto desempenho, altíssimas velocidades, alta durabilidade.

Motores Brushless DC

- O funcionamento do motor BLDC é baseado na interação do campo magnético gerado pelas bobinas de enrolamento e o campo magnético dos ímãs permanentes.
- O funcionamento correto desta estratégia depende do conhecimento prévio da posição do rotor e sua velocidade instantânea para que as comutações aconteçam no tempo exato, pois, caso estas comutações aconteçam em momentos incorretos, o motor tenderá a cessar seu movimento rotacional dissipando energia em forma de calor.

Figura 2.7: Estrutura simplificada dos enrolamentos e sequência de comutação.



Fonte: Brown (2002).

Tabela 2.1: Os seis passos de comutação de um motor Brushless DC.

Passo	Comutação
1	AB
2	CB
3	CA
4	BA
5	BC
6	AC

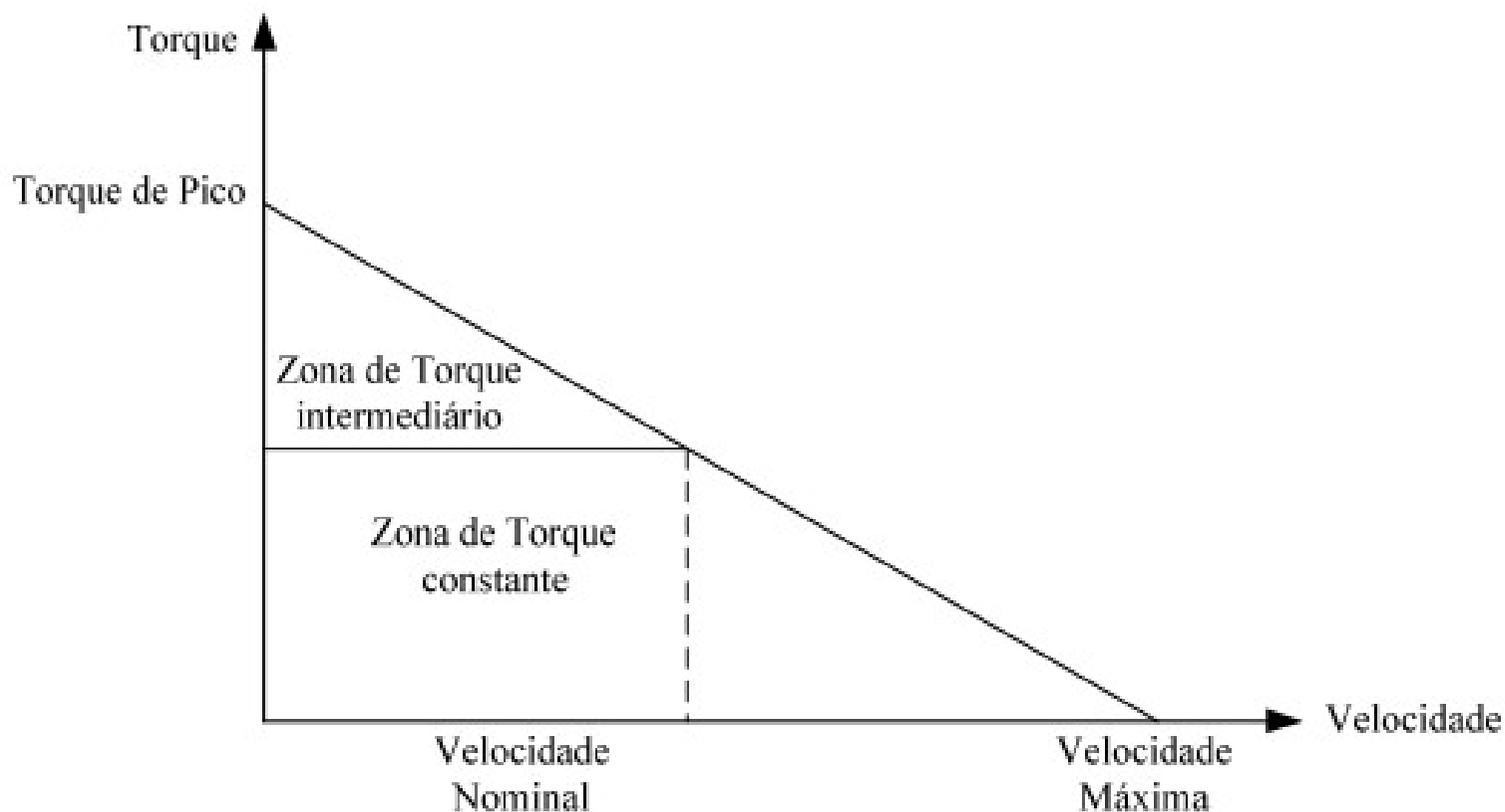
Fonte: Brown (2002)

BROWN, Ward. *Brushless DC Motor Control Made Easy*. P 48. Disponível em <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00857b.pdf>>. Acesso em 10 de setembro de 2023

Motor Brushless: curva torque x velocidade angular

- Existem dois parâmetros de torque a serem seguidos para o motor Brushless DC, o Torque de Pico e o Torque Nominal.
- Para operações contínuas com o motor, se caracteriza um Torque Nominal. Para a máquina, o torque permanecerá constante para uma faixa de rotação até sua velocidade nominal.
- O motor pode ser operado até sua velocidade máxima, que pode ser até 150% da sua velocidade nominal, mas seu torque começa a diminuir.
- Para aplicações que exigem partidas e paradas frequentes, e reversões de rotação com carga no motor, isto exige um torque maior que o torque nominal.

Motor Brushless: curva torque x velocidade angular

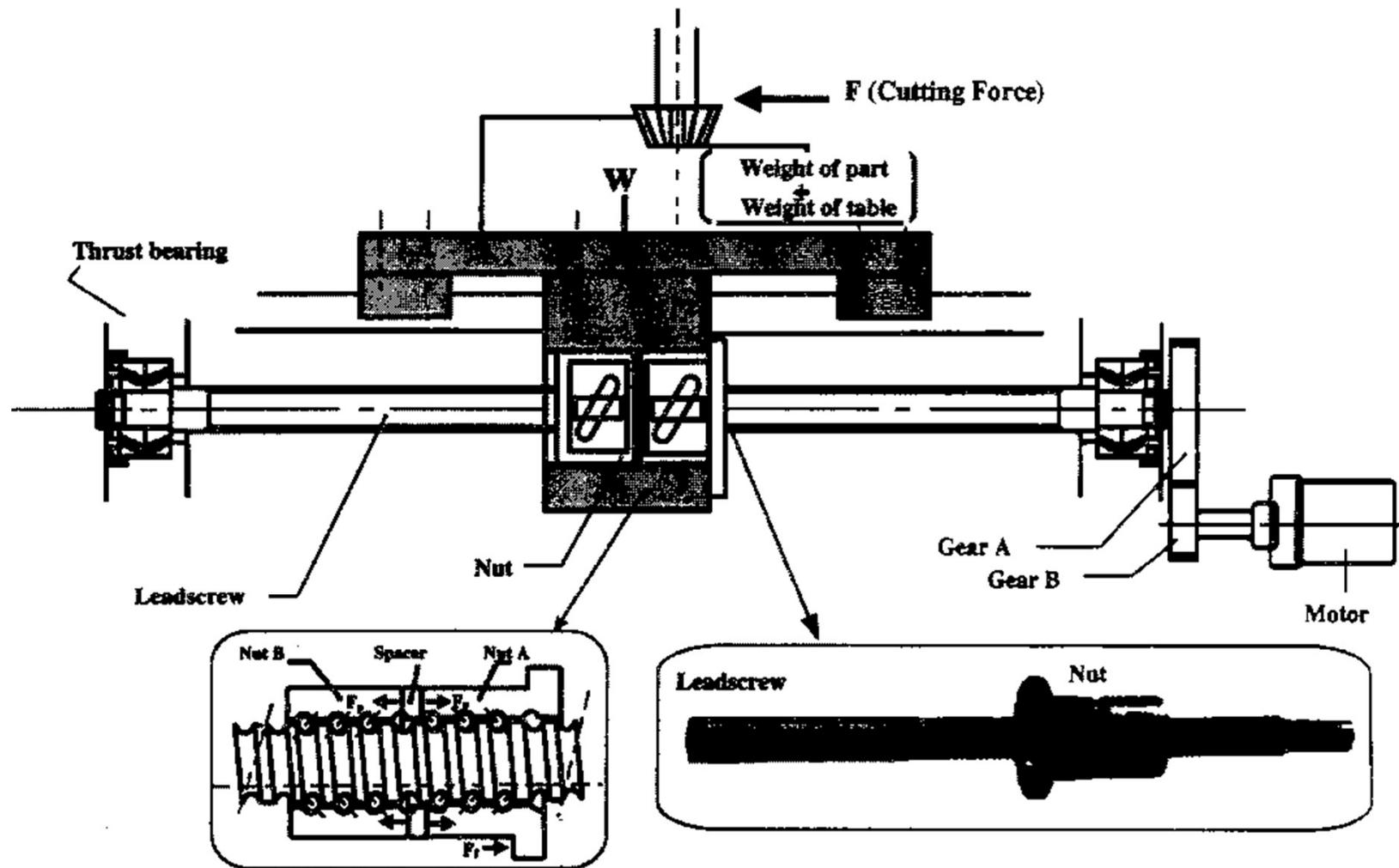


Fonte: JÚNIOR SANTIS VIEIRO – “MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLE DO MOTOR BRUSHLESS DC”, TCC 2013

Dimensionamento mecânico

Torque, rotação, inércia do rotor, potência, massa do motor

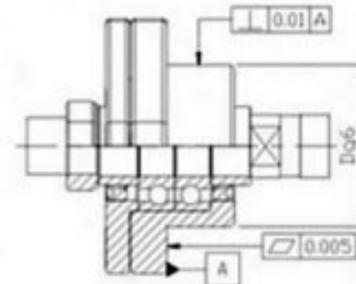
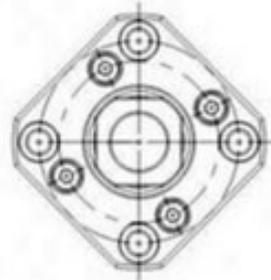
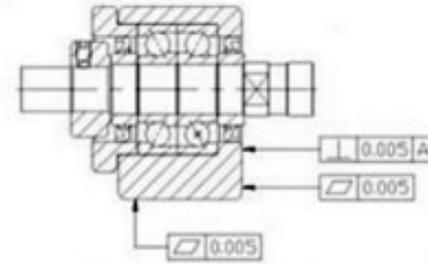
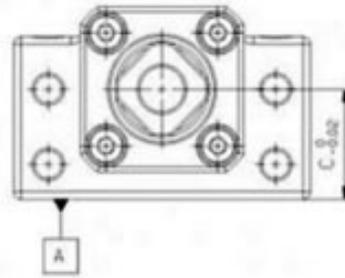
Sistema de acionamento: cálculo do torque no motor



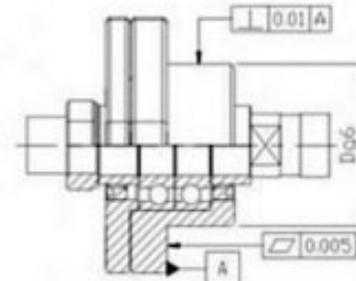
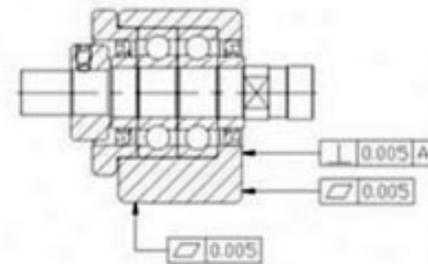
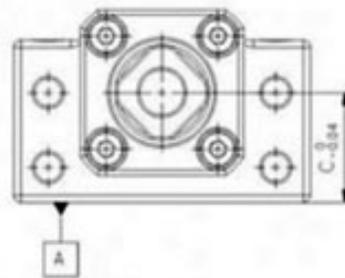
Fuso: comprimento l , diâmetro d_f , passo p , massa m_f

momento de inércia de massa J_f

Standard: Ø10~Ø40



Economic: Spec Ø6~Ø20



Torque estático devido ao atrito nas guias

$$T_{e\mu} = \frac{p}{2\pi} \mu_g \left[(m_m + m_p)g + F_{cn} \right]$$

p = passo do fuso

m_m = massa da mesa

m_p = massa da peça

μ_g = coeficiente de atrito das guias

F_{cn} = componente da força de corte normal à mesa

Coeficiente de atrito de rolamento muito pequeno
~0,01

Torque devido à força de corte

$$T_{fc} = \frac{p}{2\pi} F_c$$

F_c = força de corte

Torque devido às cargas dinâmicas

Cargas dinâmicas: inércia do rotor do motor e inércia da carga refletida no eixo do motor

Inércia do conjunto peça e mesa: J_p

$$J_p = (m_m + m_p) \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2$$

Inércia da carga: J_c

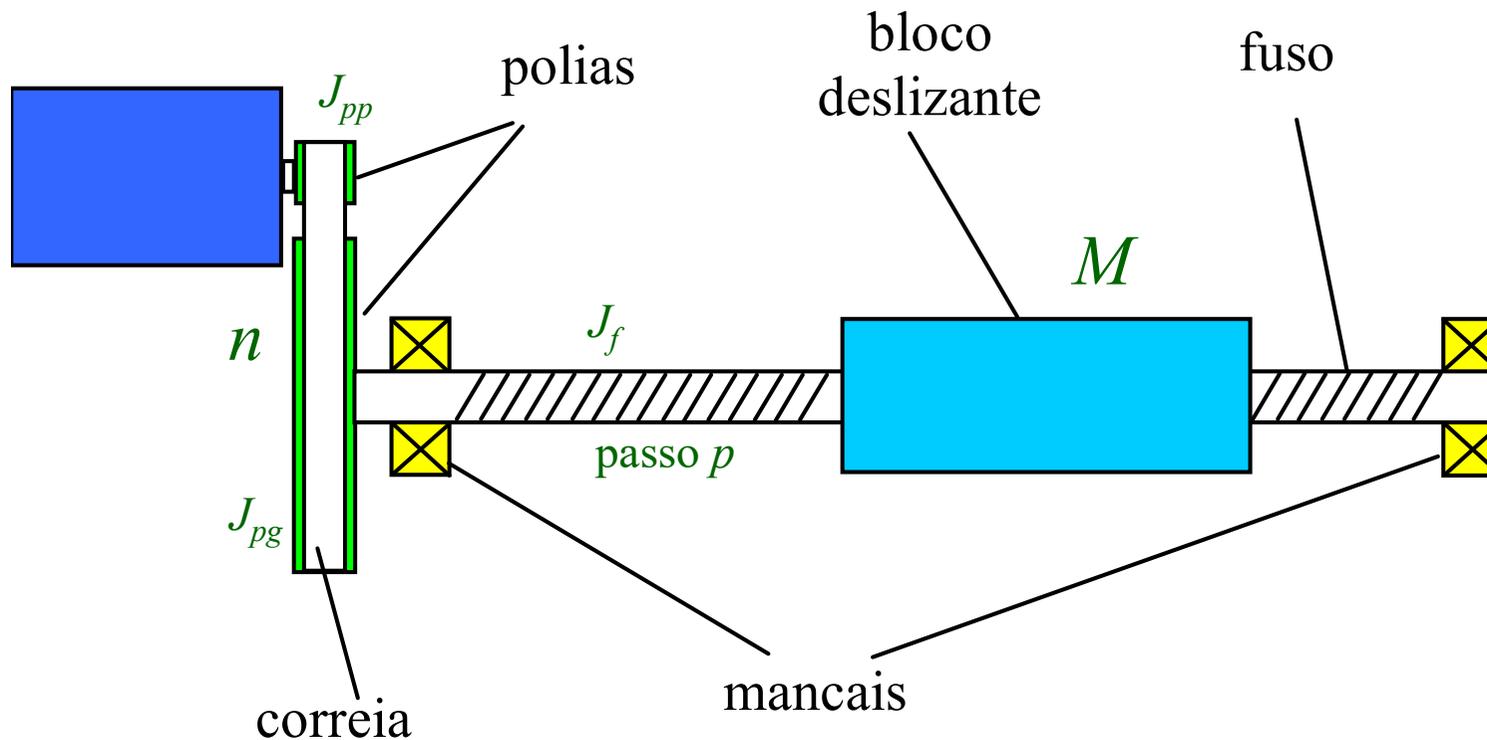
$$J_c = J_f + J_p \quad J_f = \frac{1}{2} m_f \left(\frac{d_f}{2} \right)^2 \quad (\text{inércia do fuso})$$

Torque a ser fornecido pelo motor: T

$$T = \alpha (J_r + J_c) + T_{e\mu} + T_{fc}$$

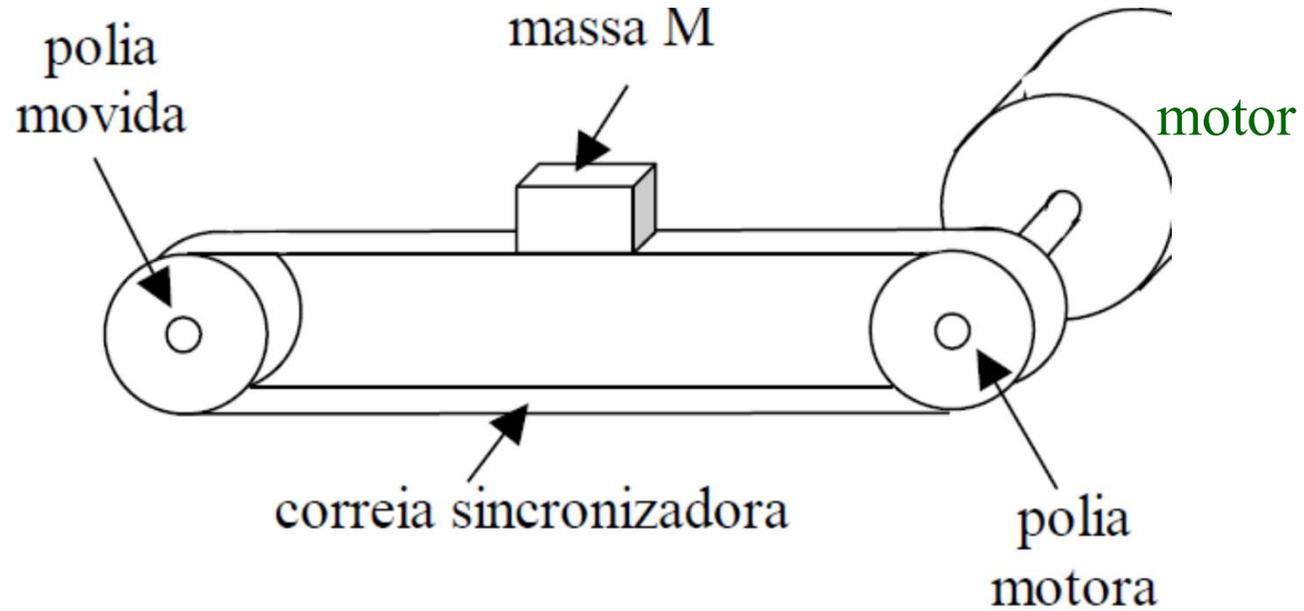
J_r = inércia do rotor do motor

Exemplo: inércia da carga



$$J_c = J_{pp} + \left(\frac{1}{n}\right)^2 \left[J_{pg} + J_f + M \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2 \right]$$

Exemplo: inércia da carga



$$J_{carga} = 2J_{polia} + Mr^2$$

Curvas de torque x velocidade do motor de passo

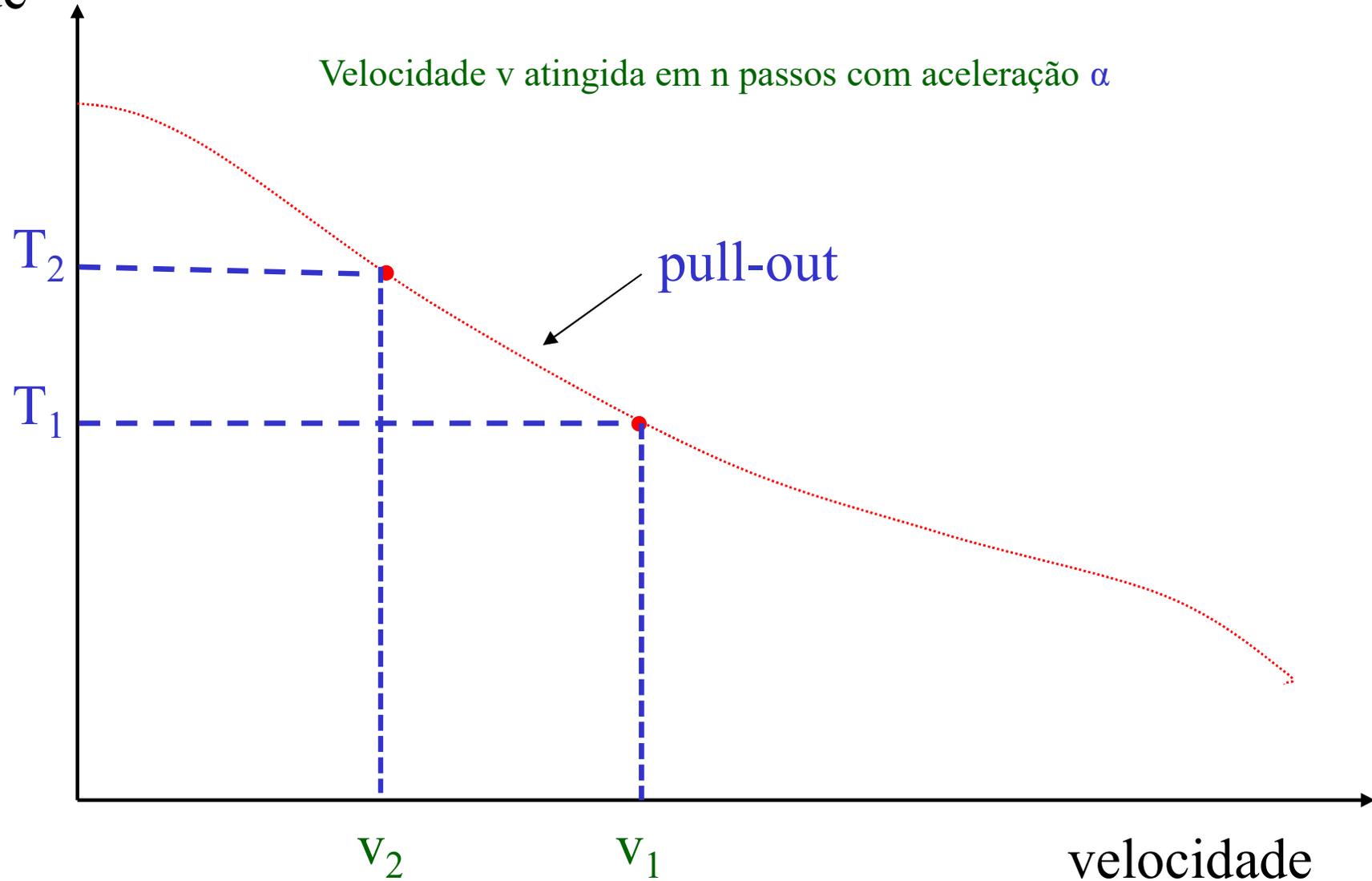
Curva pull-out

Curva pull-out: $T = J \alpha$ carga inercial

$$T_1 = J \alpha_1$$

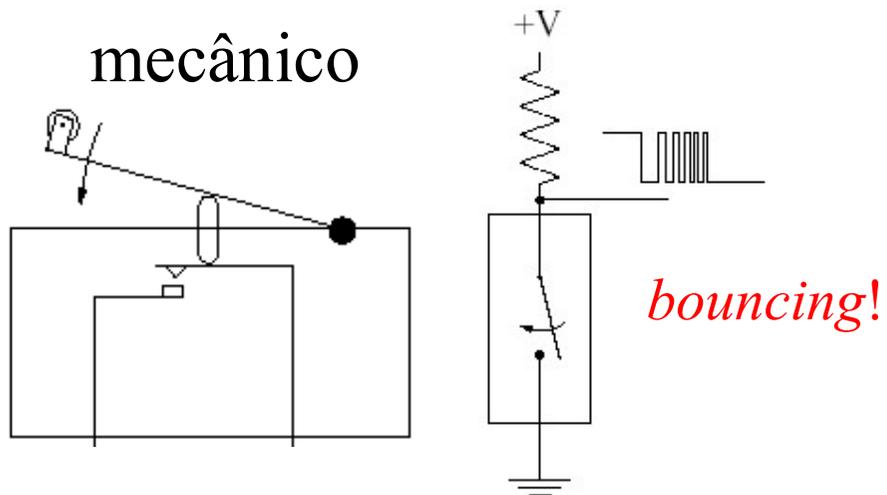
$$T_2 = J \alpha_2 \quad \alpha_1 < \alpha_2$$

torque

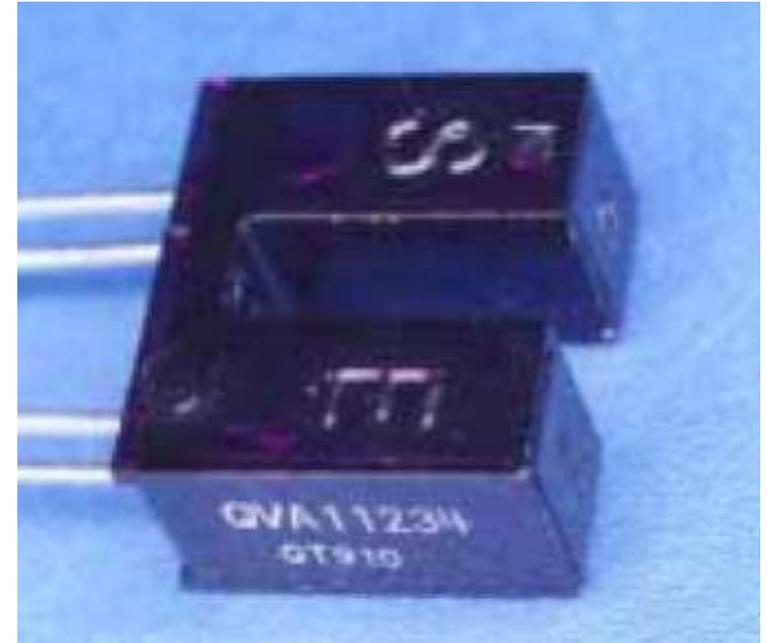


Sensores

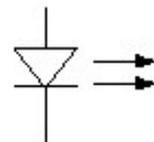
Chaves de fim de curso:



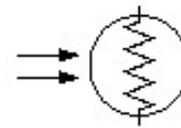
óptico



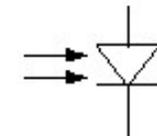
magnético



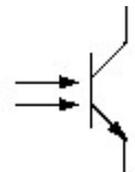
LED



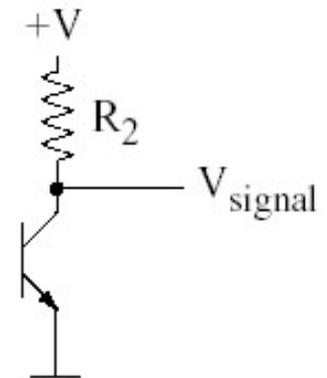
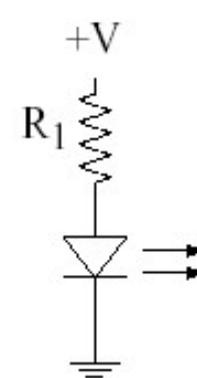
photoresistor



photodiode

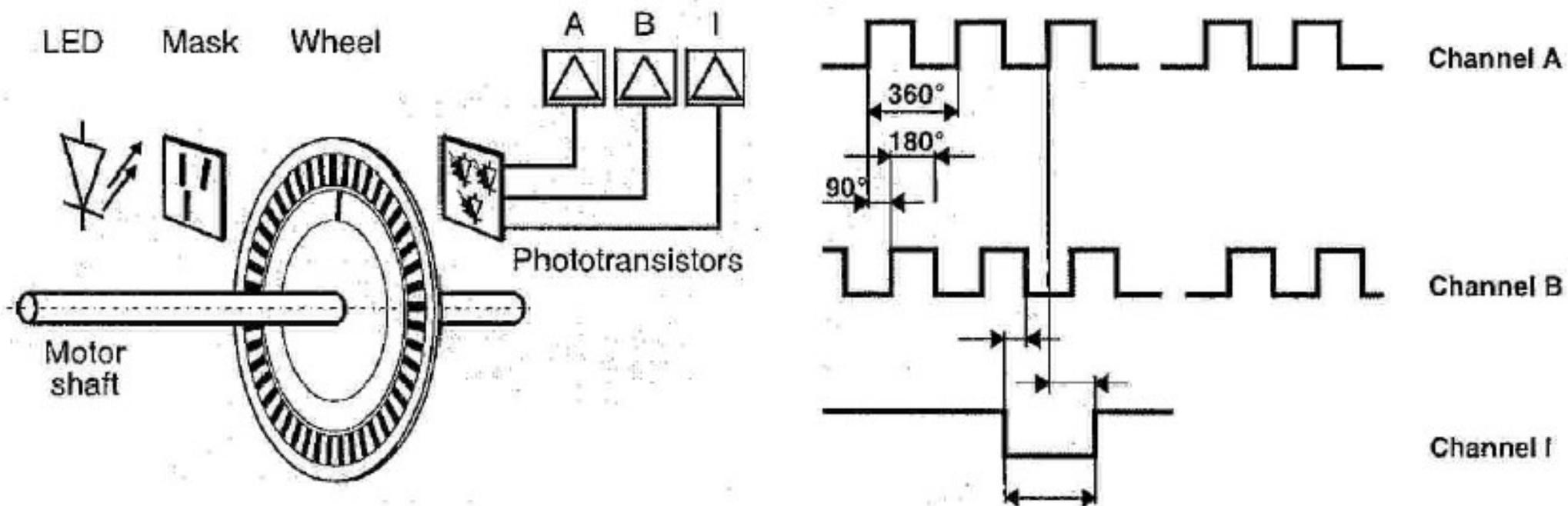


phototransistor



typical configuration

Encoder óptico incremental



- Sentido de movimento
- vibração