



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Engenharia de Precisão

PMR 3501 – A19

**Acionamentos e atuadores em
Sistemas de Precisão**

2023.2

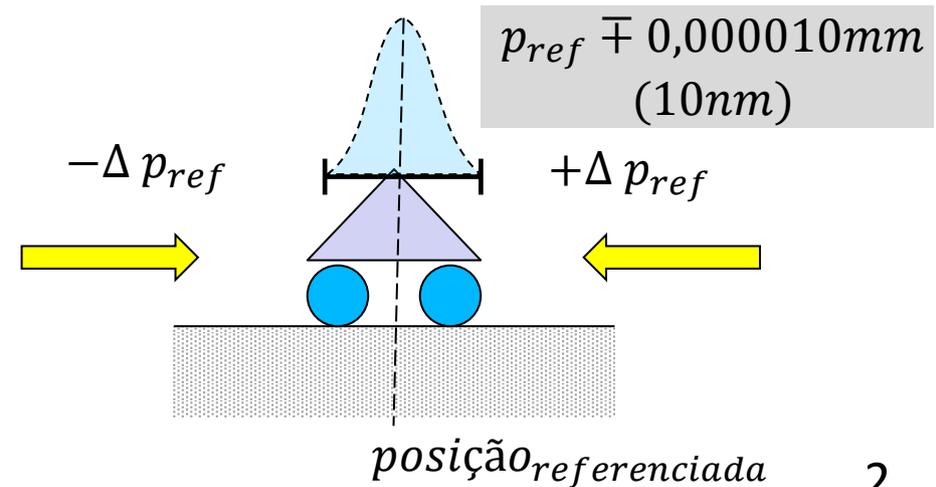
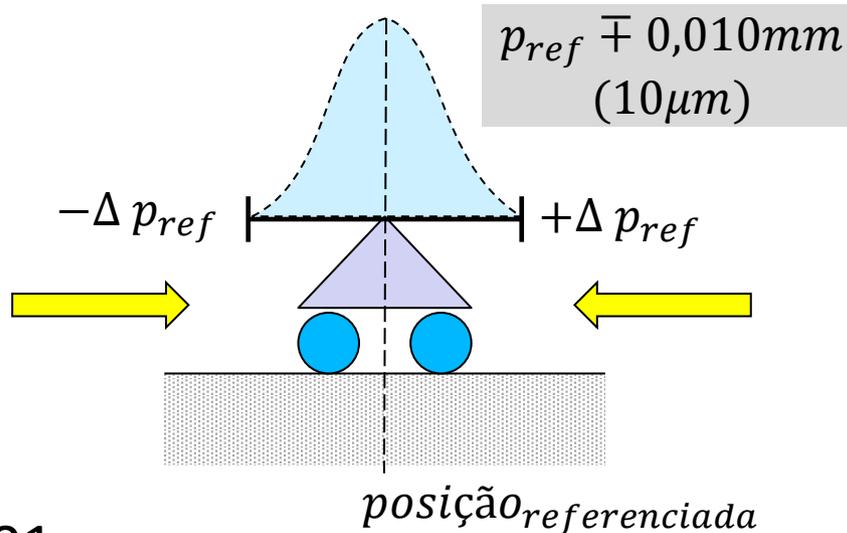


Considerações sobre sistemas de precisão

Sistemas convencionais

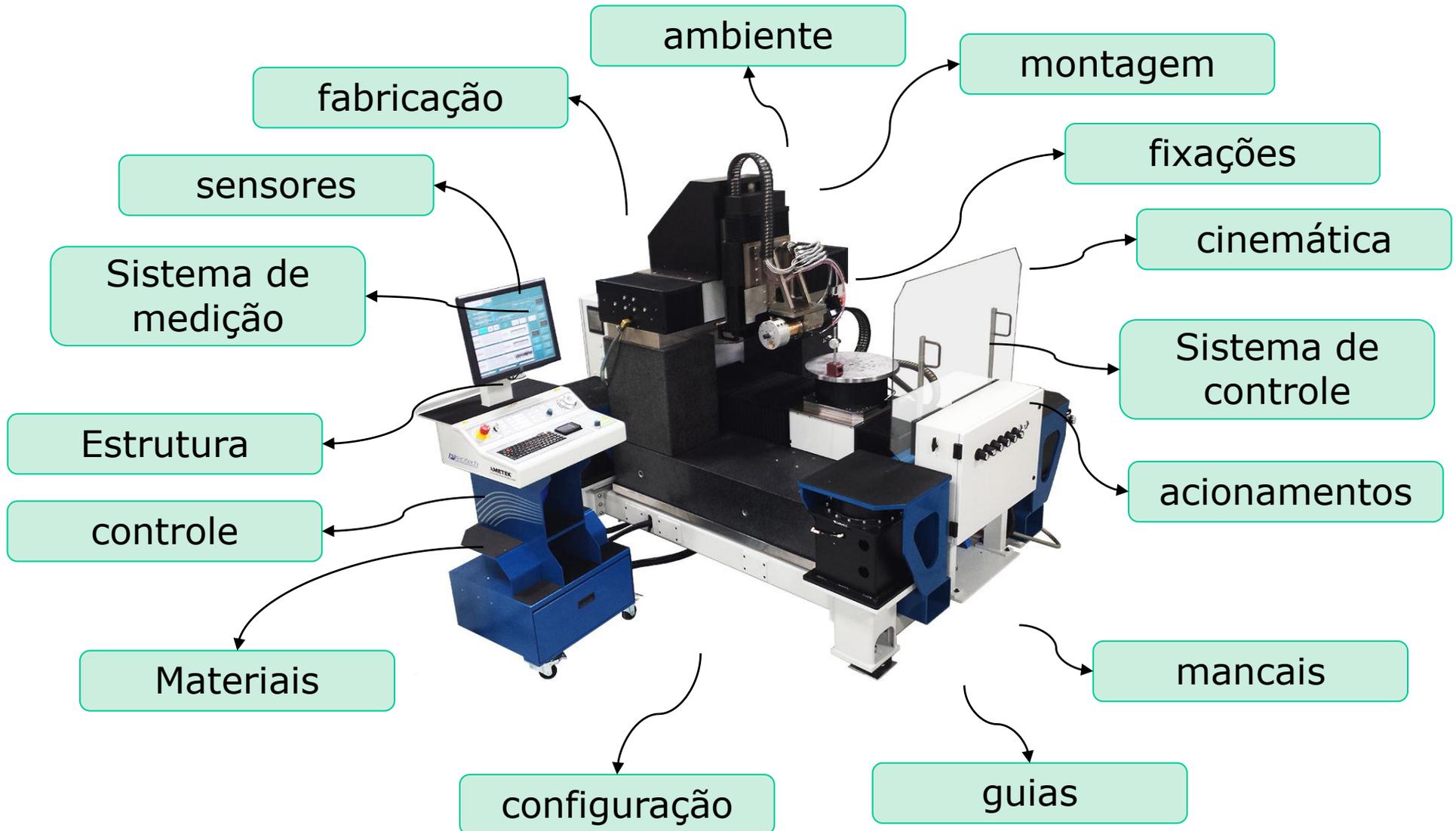


Sistemas de precisão





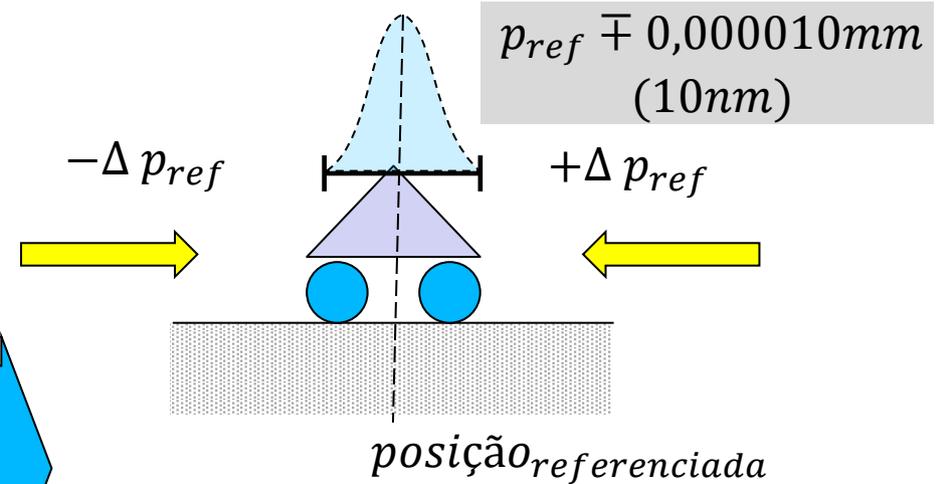
Considerações sobre sistemas de precisão



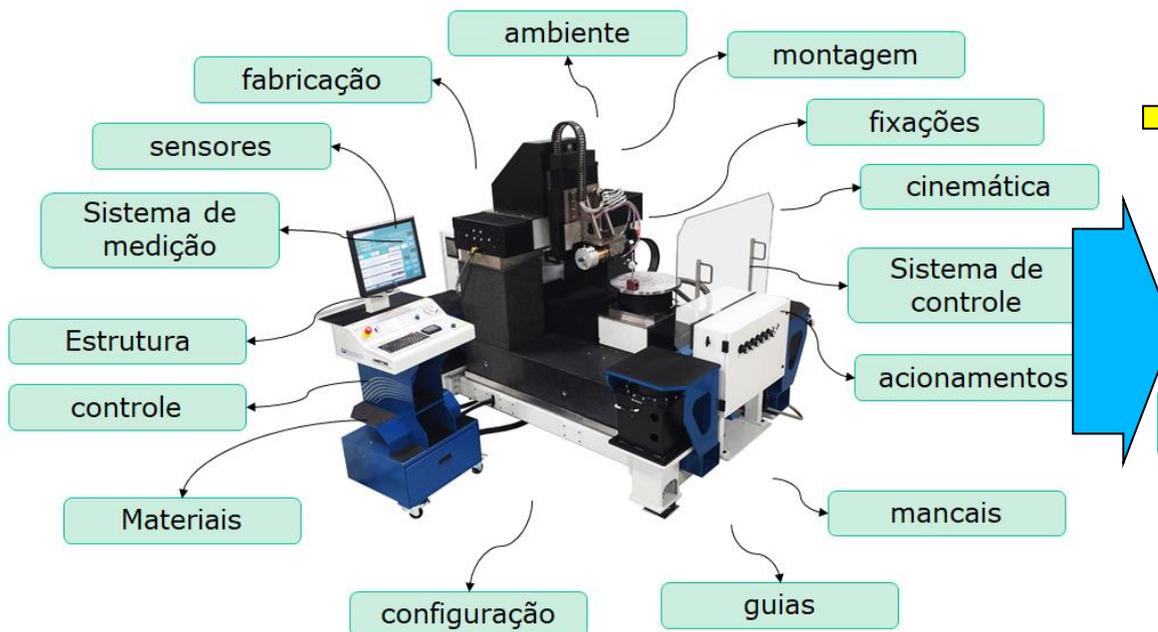
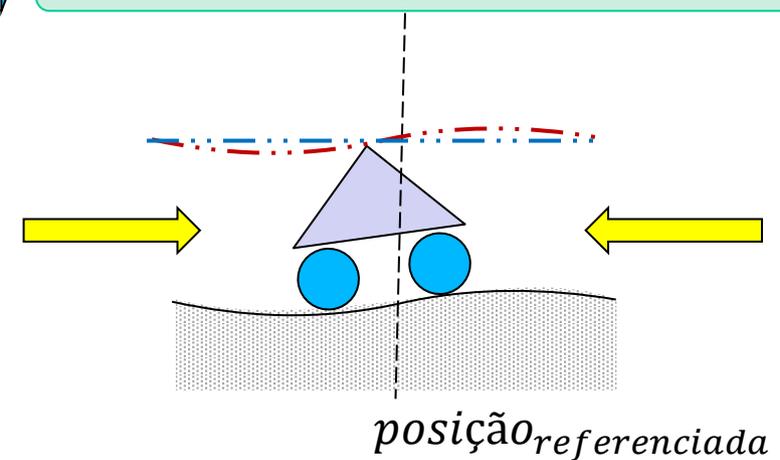


Considerações sobre sistemas de precisão

Posicionamento preciso e exato



movimento preciso e suave

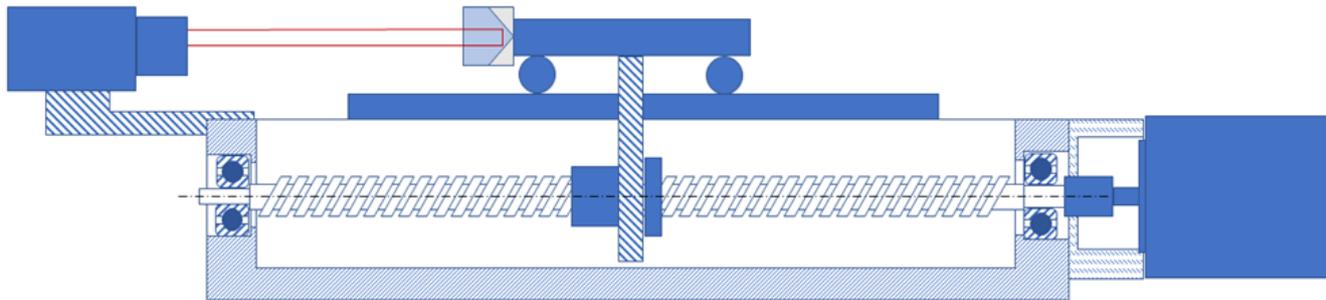




Atuadores

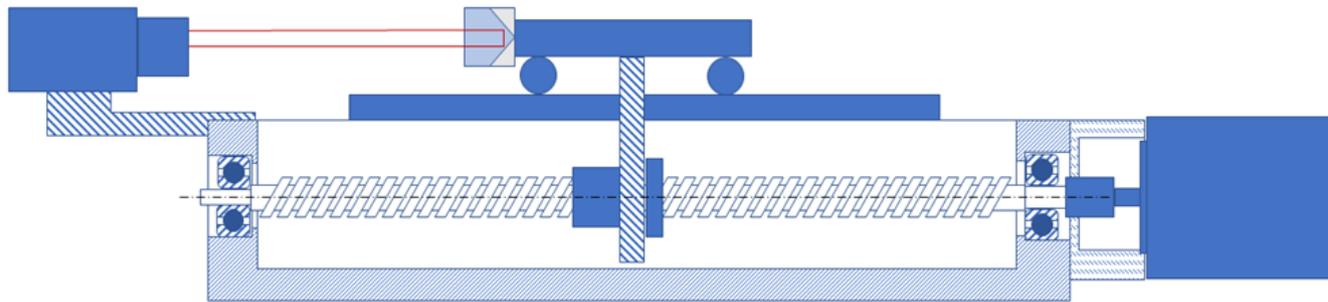
Definição

Atuadores/acionamentos são os elementos utilizados para promover os movimentos, as força e torques ou qualquer uma combinação destes.





Como promover o movimento?



Acionamentos

Rotativos

Lineares





Atuadores

Características

- Capacidade de posicionamento
- Movimento suave
- Isento de vibrações
- Dinâmica de aceleração/desaceleração
- Dinamicamente estável
- Controlável
- Baixa geração de calor
- Baixa geração de ruído elétrico
- Tensão de alimentação
- Corrente
- Dimensões



Atuadores

Tipos

Convencionais

Eletromecânicos



Hidráulicos/Pneu.



Não convencionais

Mecânicos

Piezoelétricos

Ultrassônicos

Piezoelétricos

Voice Coils

Outros



Atuadores

Convencionais

Eletromecânicos

Hidráulicos/Pneu.

Rotativos

Lineares

Rotativos

Lineares





Atuadores

Eletromecânicos

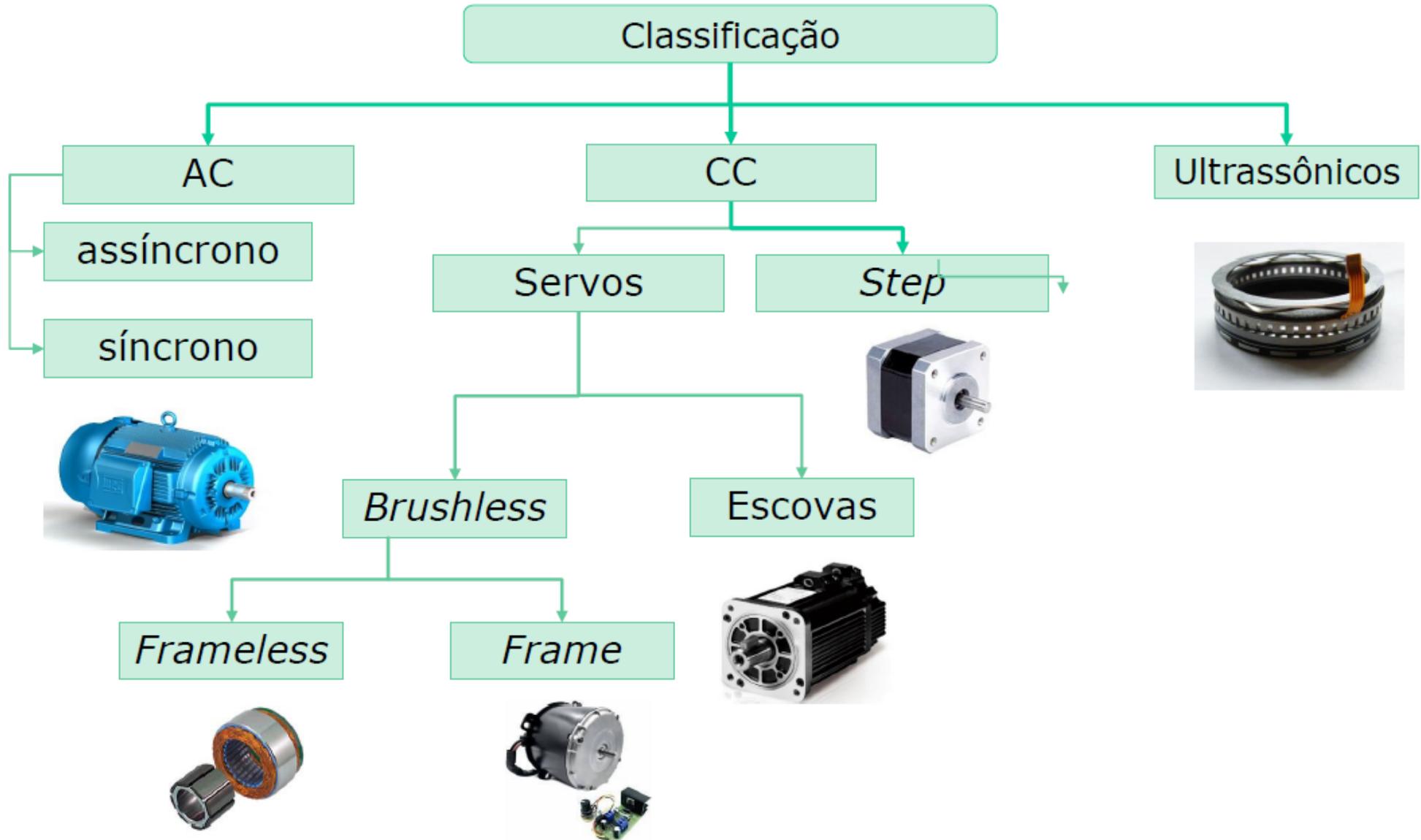
Rotativos



- são os mais comuns aplicados a sistemas de precisão
- diversidade de oferta o que implica em facilidade de seleção
- aplicação pode ser dividida entre os sistemas de posicionamento e de acionamento (ex. *spindles*)

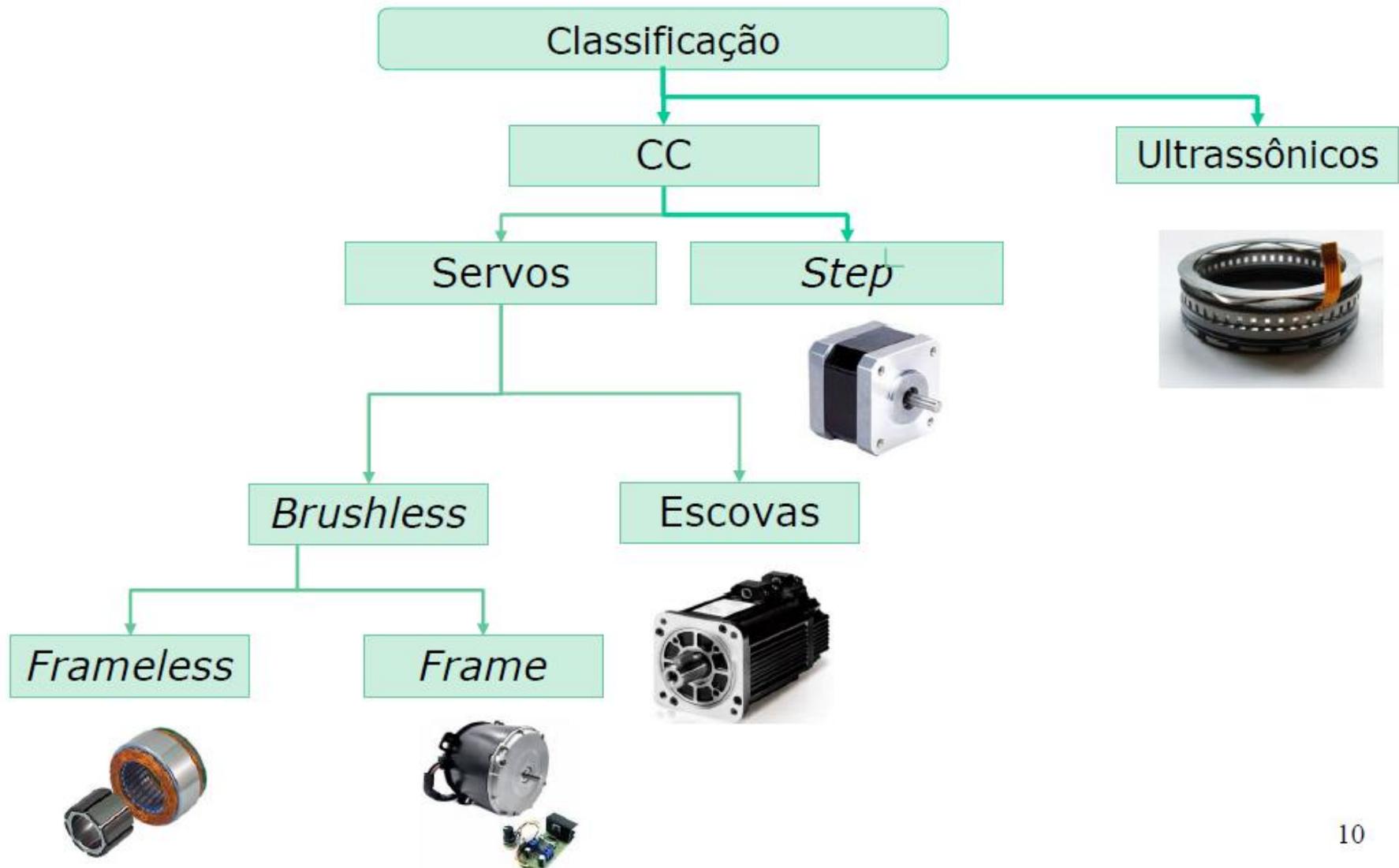


Atuadores – Eletromecânicos Rotativos



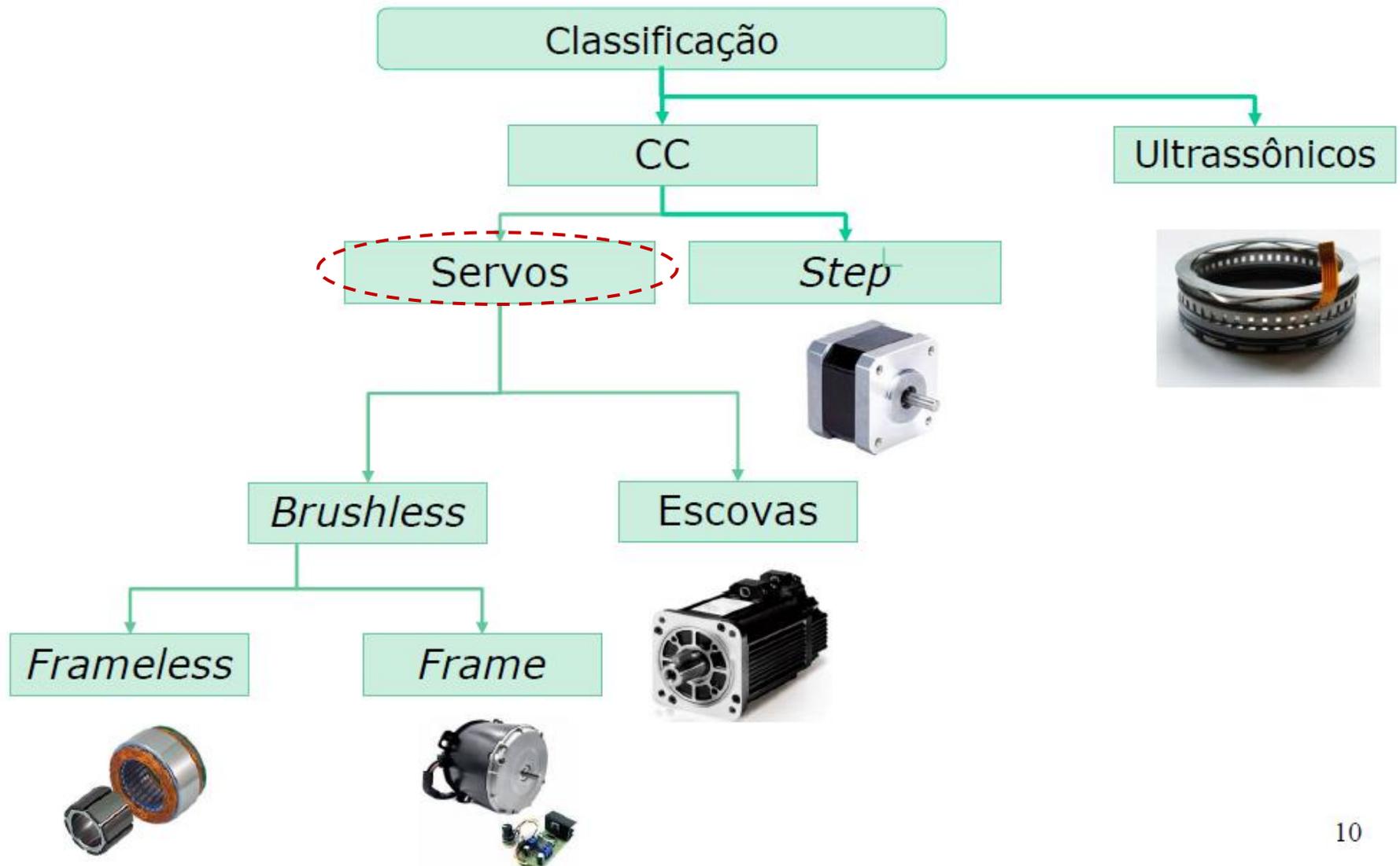


Atuadores – Eletromecânicos Rotativos





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC

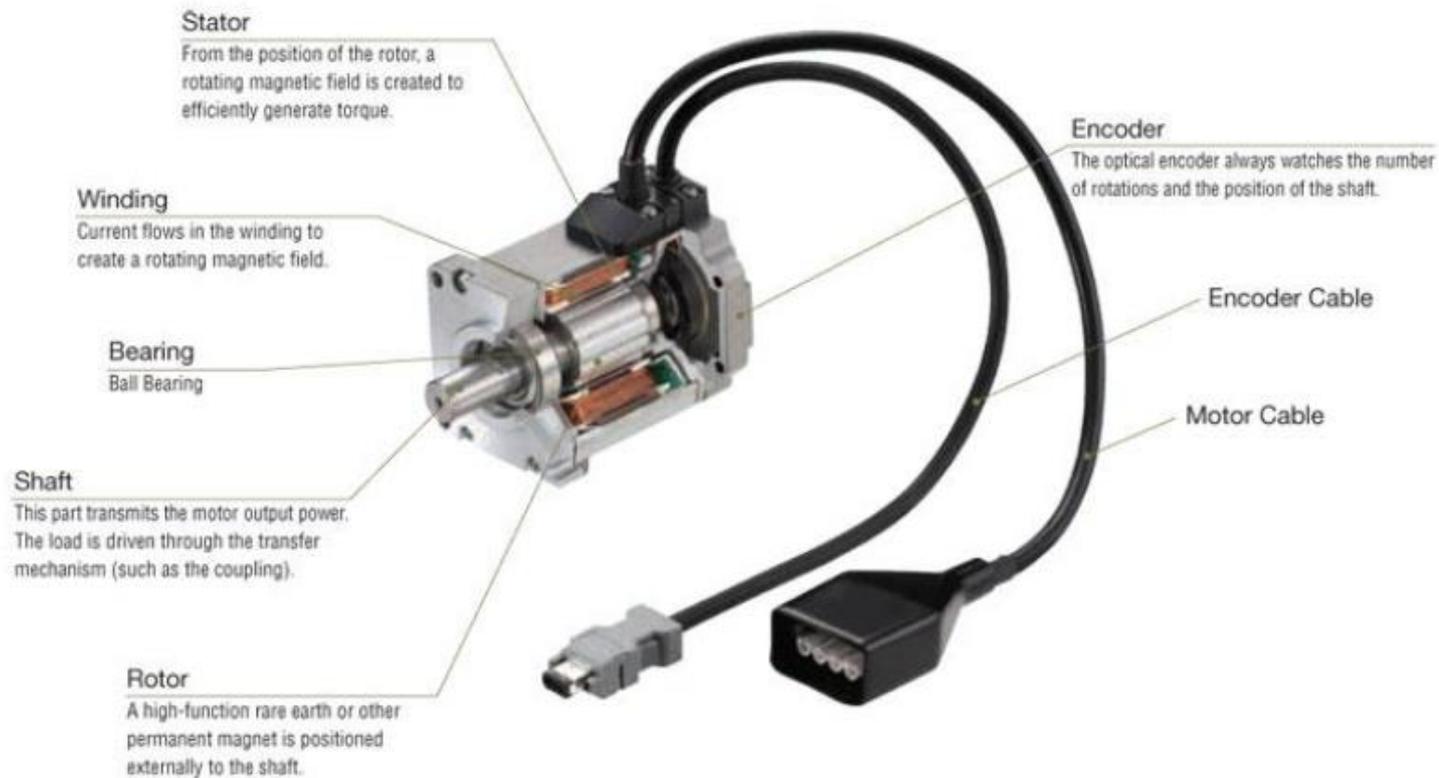
- Amplamente empregados em sistemas UP
- Fáceis de controlar (posicionamento)
- Necessitam de balanceamento especial
- Chaveamento com escovas é fonte de ruído e vibrações
- Chaveamento eletrônico (*brushless*)
- Baixo nível de vibrações (quase isento)
- Empregado generalizado (posicionamento e acionamentos)
- Alta dinâmica em ampla faixa de velocidades
- Custo variável
- Especificação requer mais cuidados



Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC

Constituintes

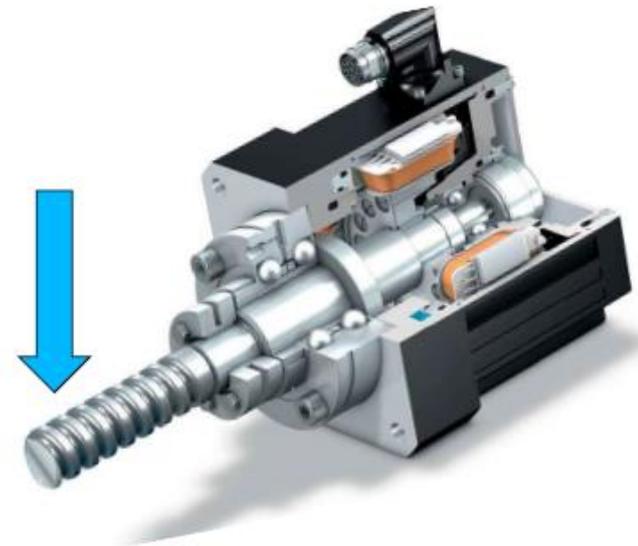
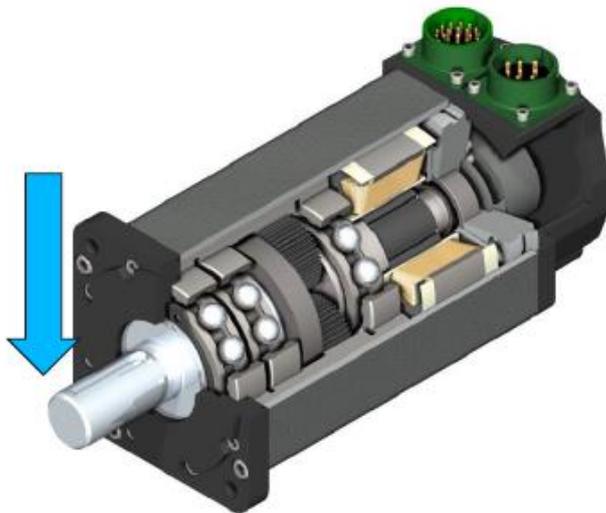




Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC

Constituintes

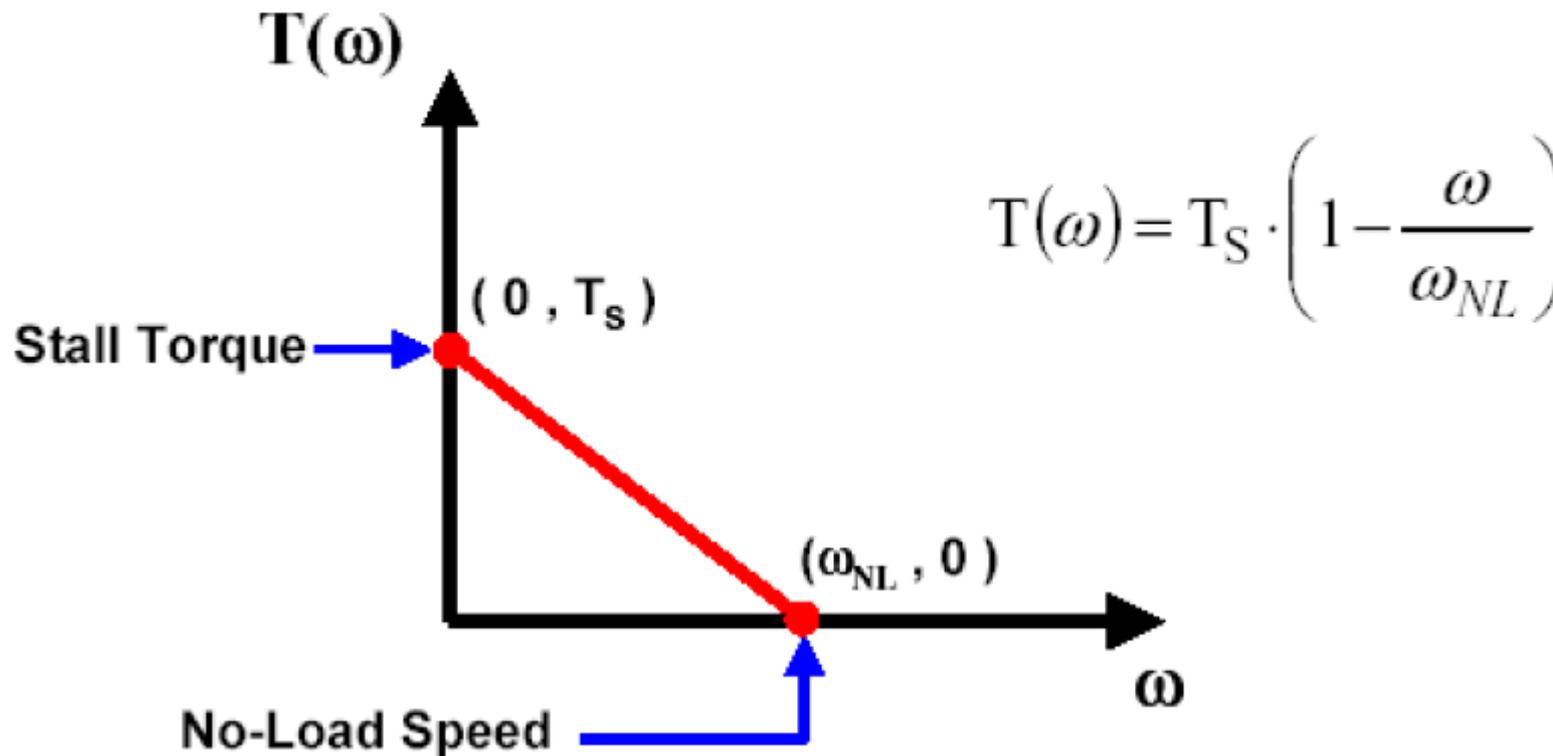




Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC

Torque X Velocidade





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

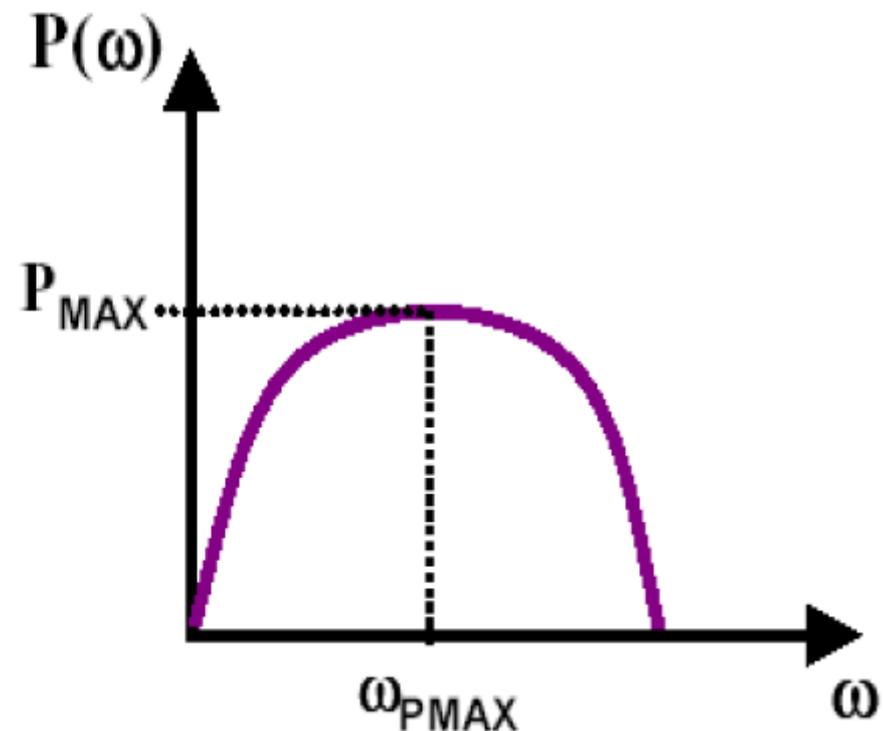
Servos motores CC

Potência

$$P(\omega) = T(\omega) \cdot \omega = T_S \cdot \left(\omega - \frac{\omega^2}{\omega_{NL}} \right)$$

$$\omega_{P_{MAX}} = \frac{\omega_{NL}}{2}$$

$$P_{MAX} = T_S \cdot \left(\frac{\omega_{NL}}{4} \right)$$

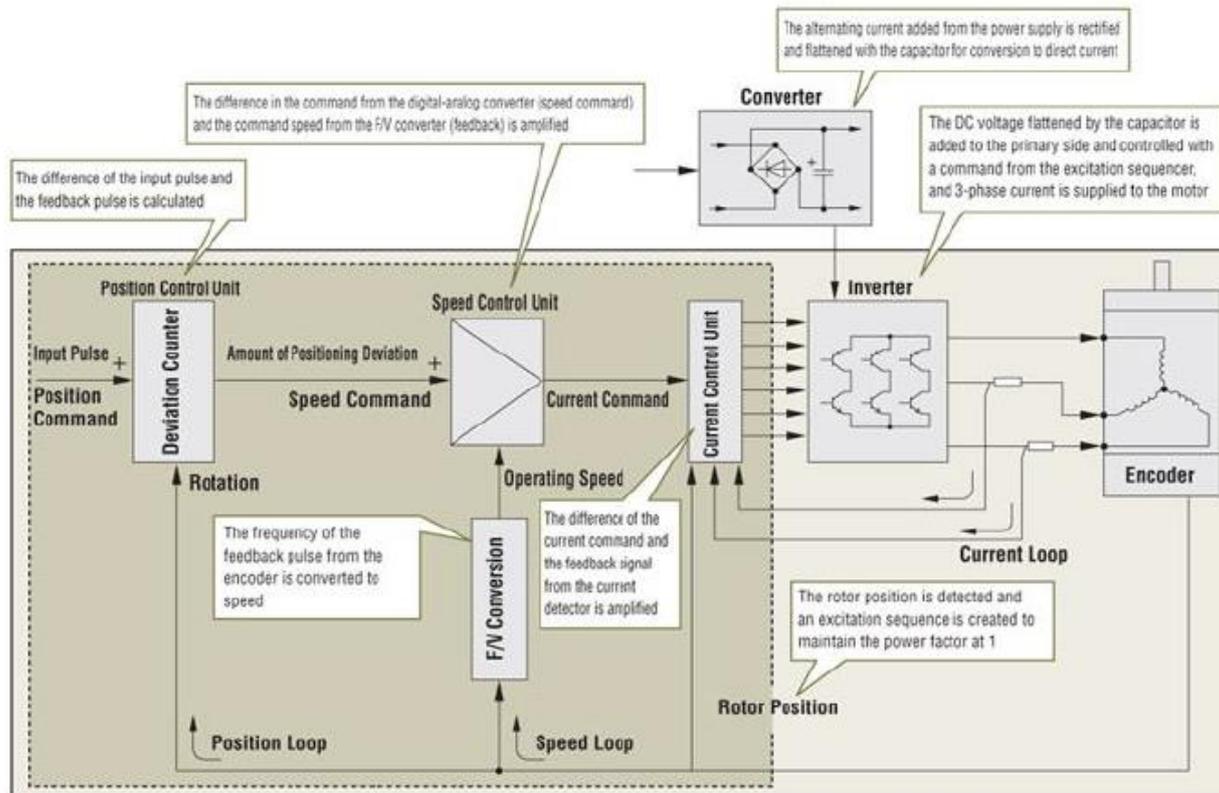




Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

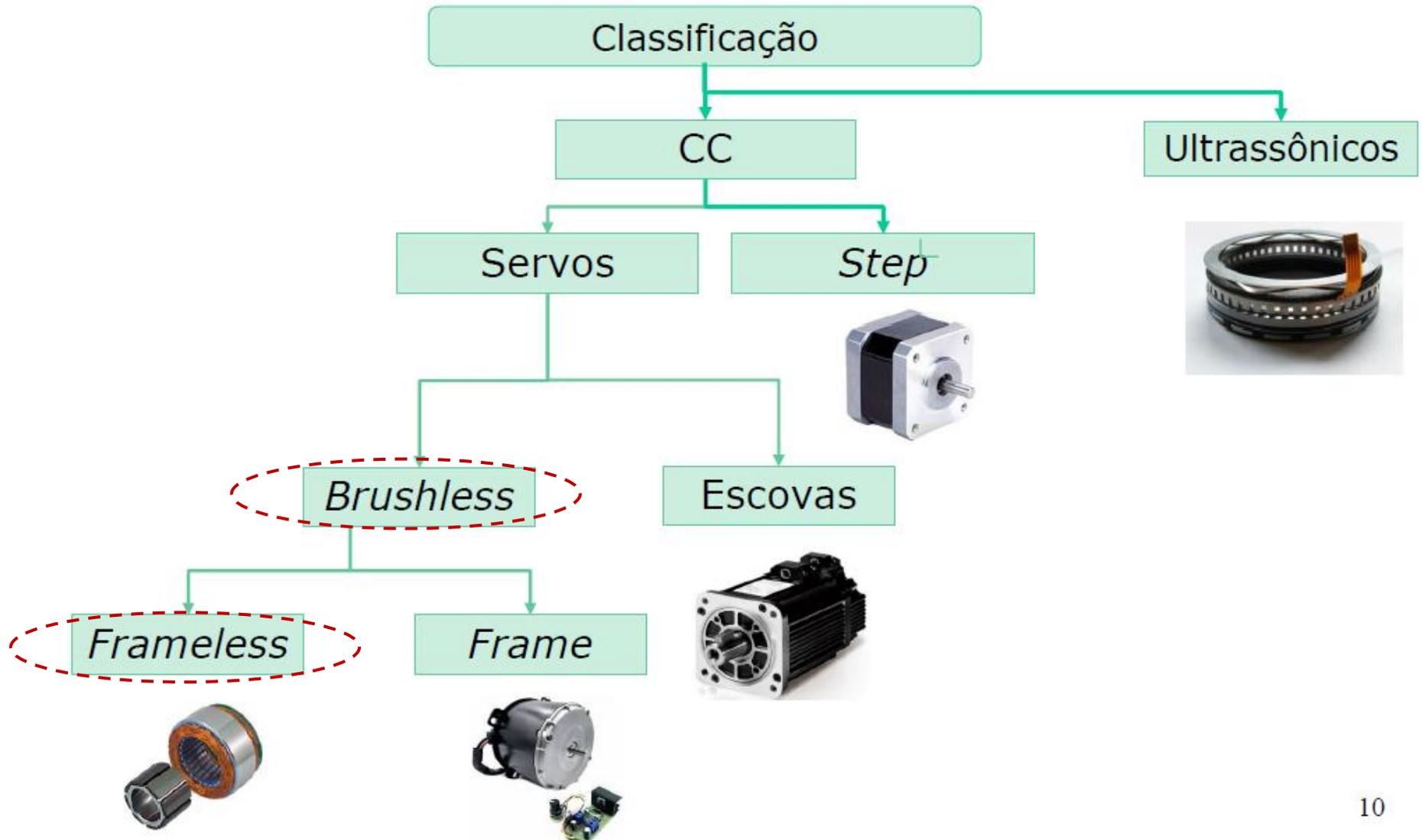
Servos motores CC

Controle





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC Brushless

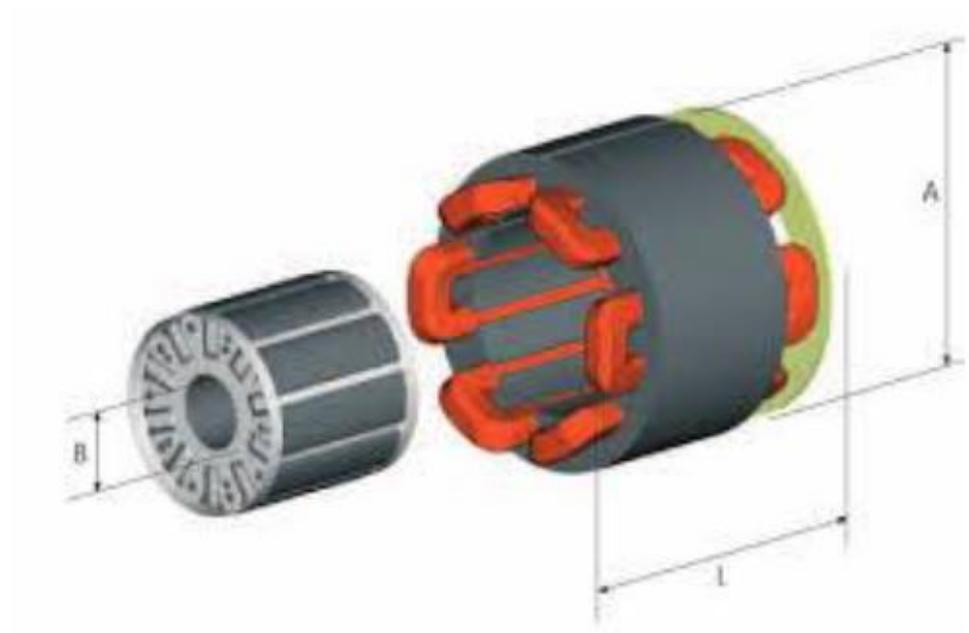
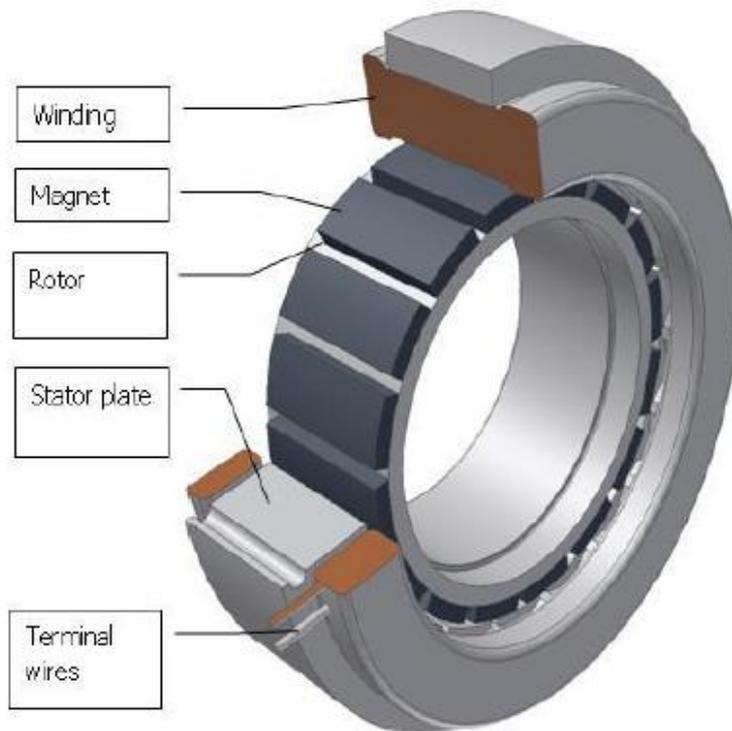
- Empregados em sistemas UP
- Montagem em espaços restritos
- Montagem cuidadosa
- Emprego em baixa velocidade ($< 1 \text{ min}^{-1}$)
- Emprego em acionamento direto (HDs, *spindles*)
- Chaveamento eletrônico
- Baixo nível de vibrações
- Alta dinâmica em ampla faixa de velocidades
- Custo elevado, comparado aos servos com frame
- Especificação requer cuidados
- Problema de aquecimento



Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC Brushless

Constituintes

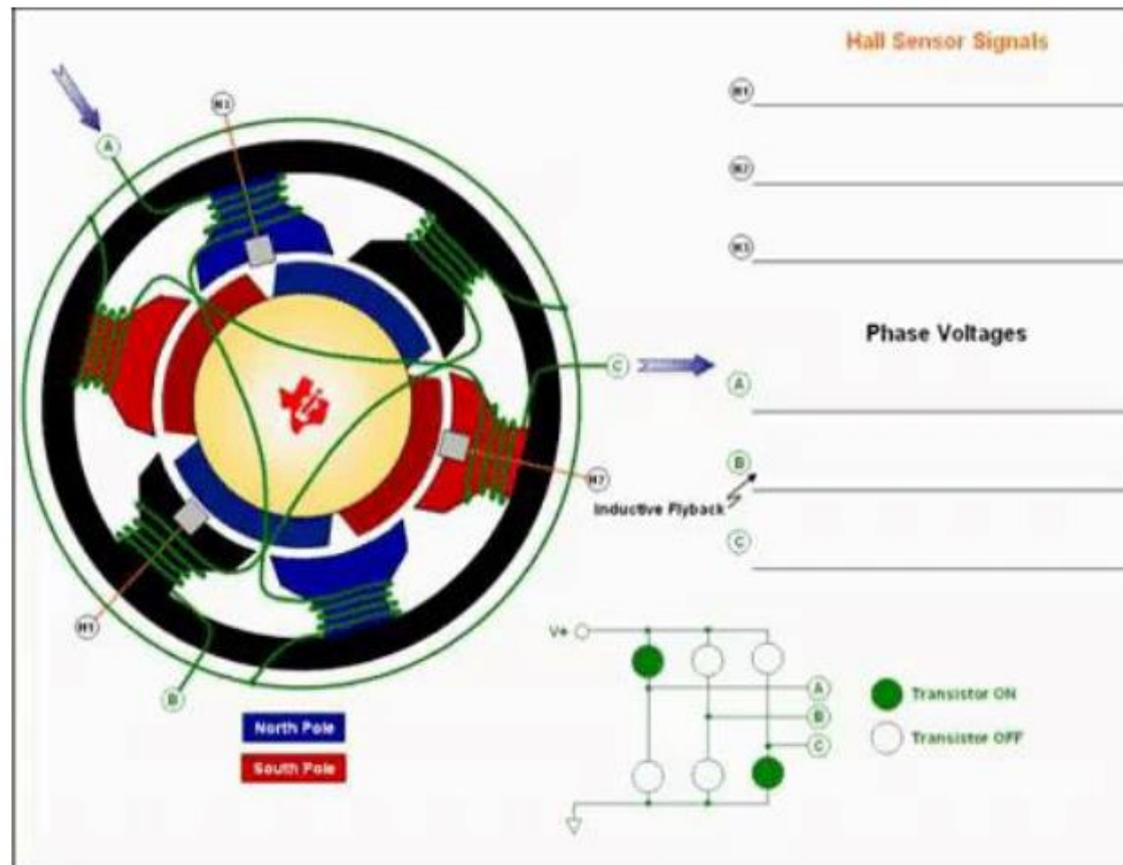




Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC Brushless

Controle

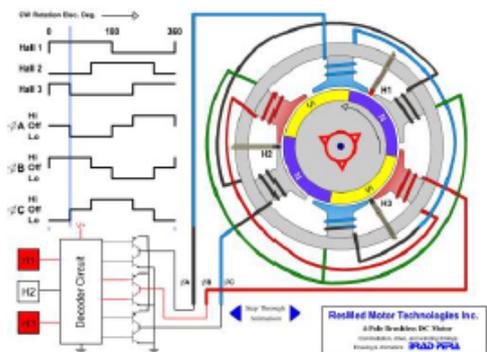
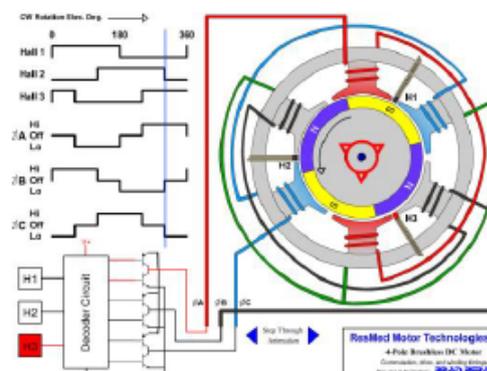
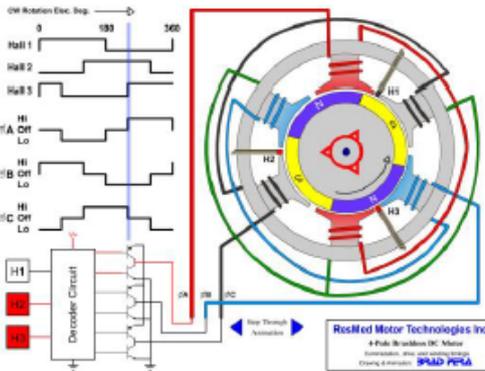
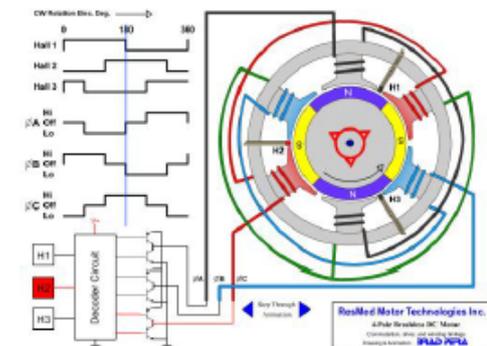
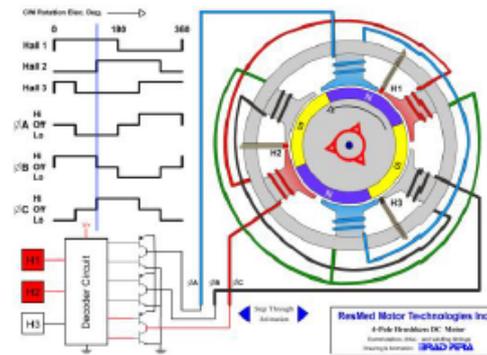
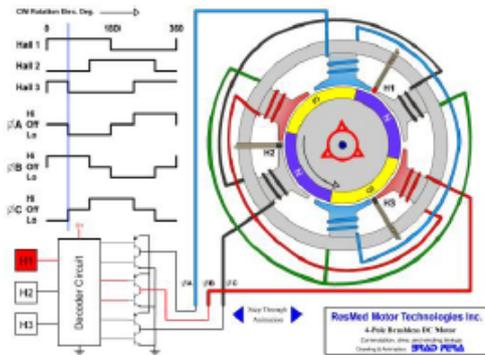




Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC Brushless

Controle

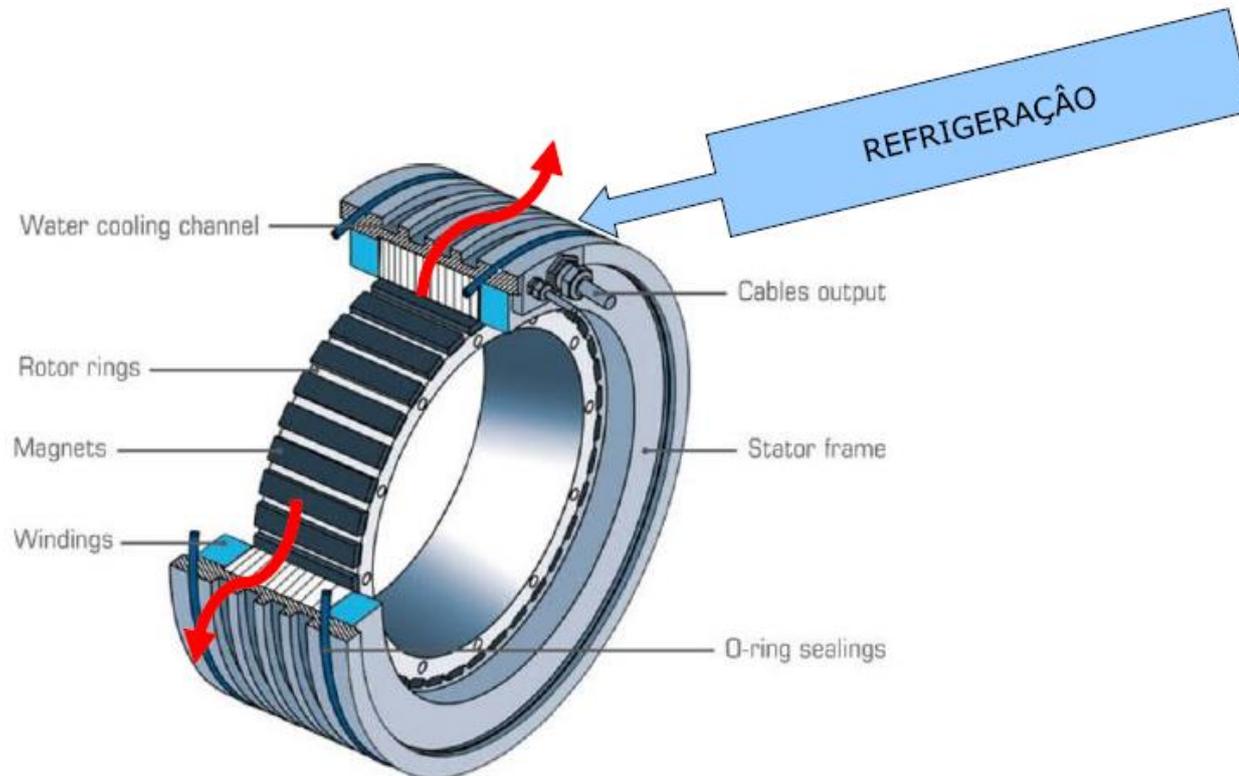




Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC Brushless

Problema do aquecimento





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servos motores CC Brushless

Exemplos



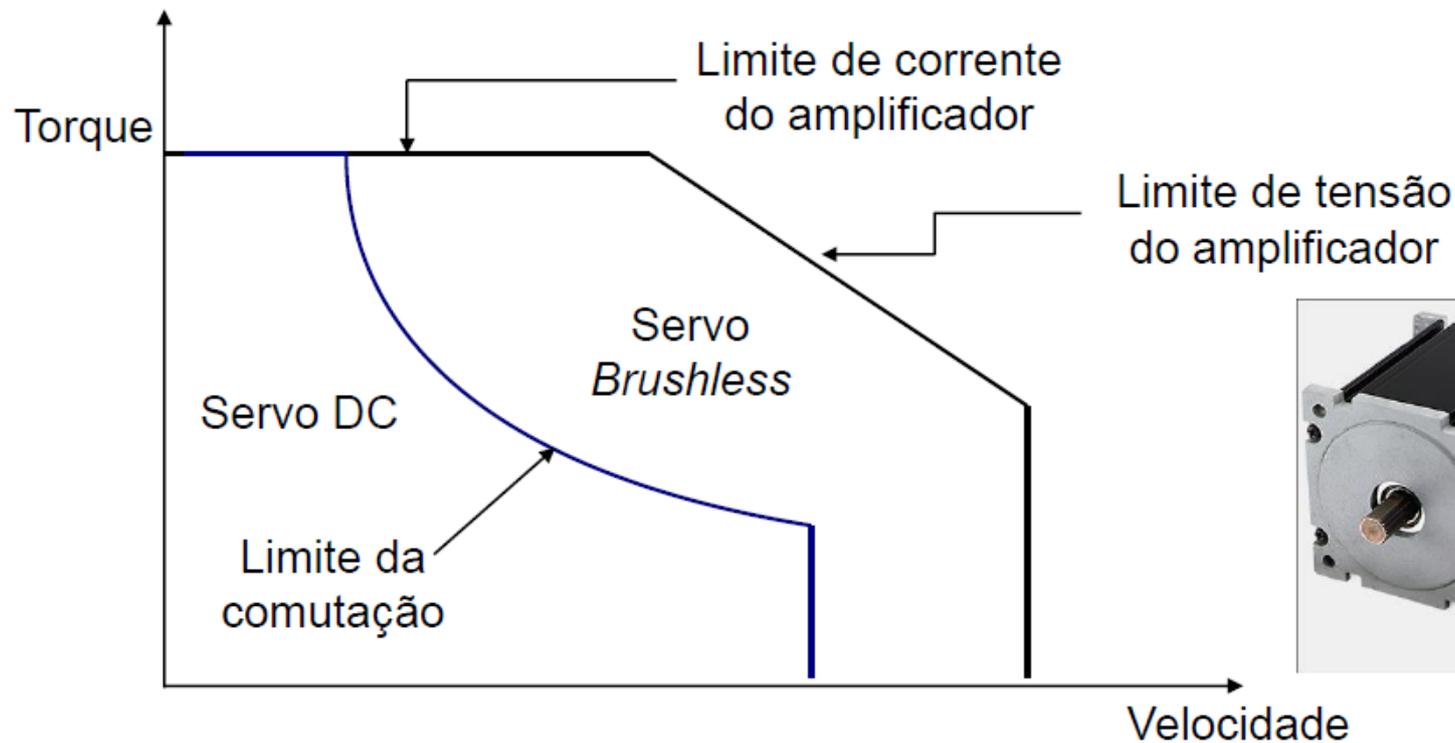


Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Servomotores Brushed

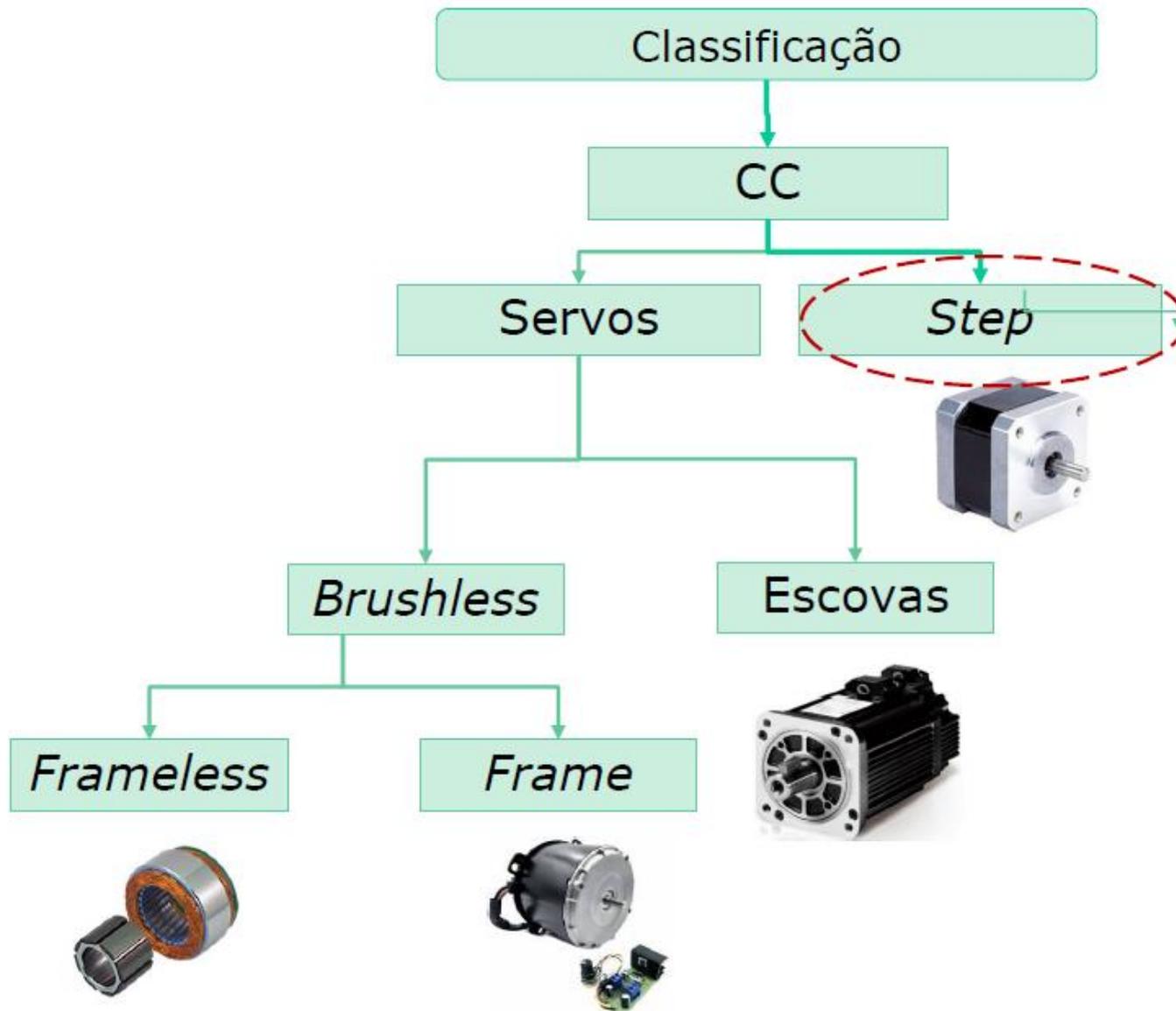


Servomotores Brushless





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores de passo

Definição

são transdutores que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos discretos denominados de passos.

Classificação quanto ao magnetismo:

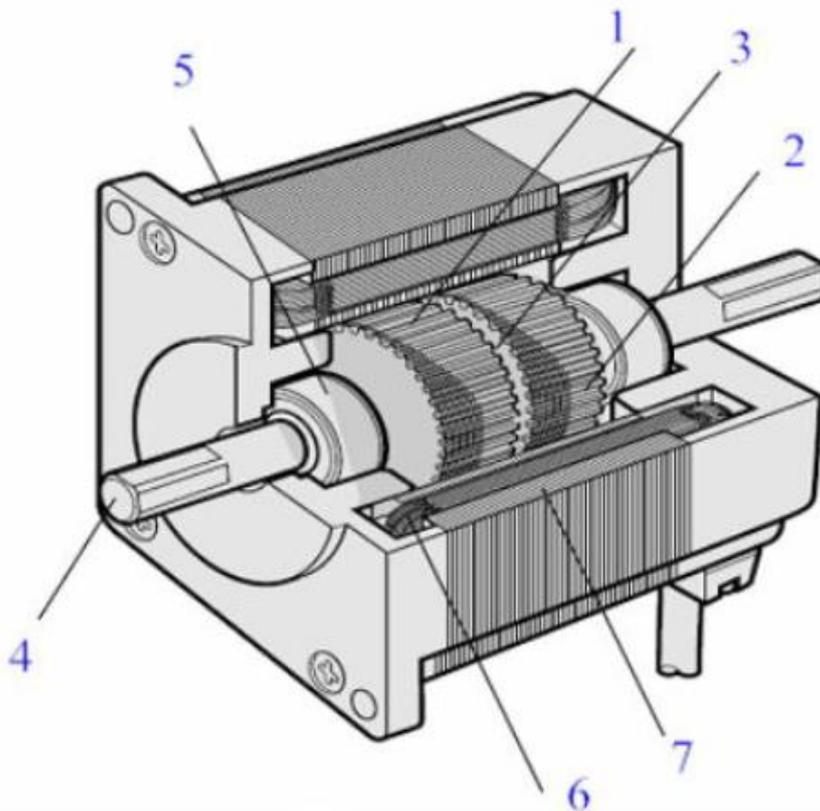
- motores à relutância variável
- motores a imã permanente
- motores híbridos



Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores de passo

Constituintes



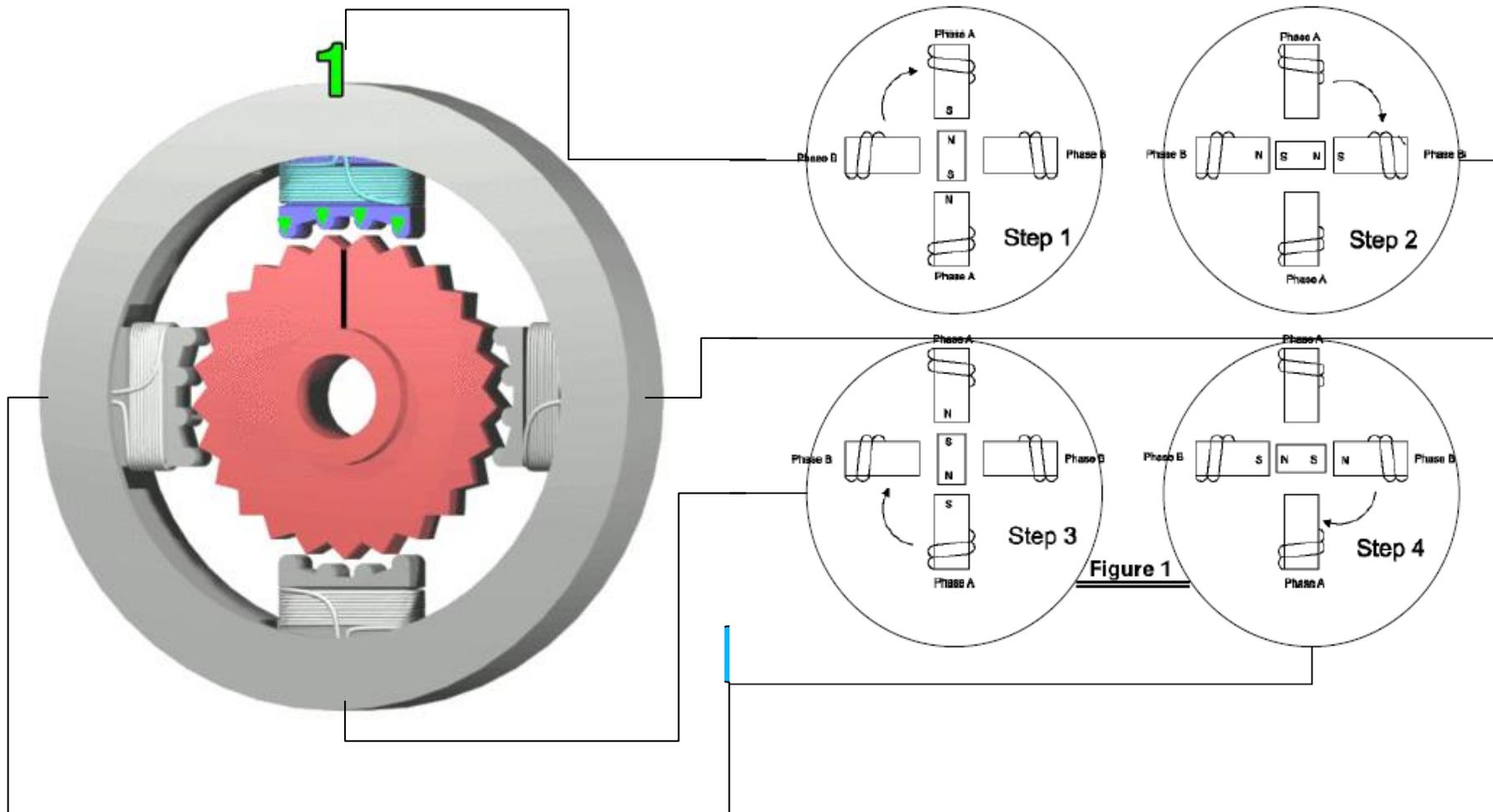
1. Rotor
2. Imãs permanentes
3. Eixo
4. Mancais de rolamento
5. Bobinas
6. Estator
7. Carcaça



Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores de passo

Controle





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores de passo

Controle

- Posicionamento limitado pelo passo
- Possibilidade de micro passo
- Controle em malha aberta ou fechada





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores de passo

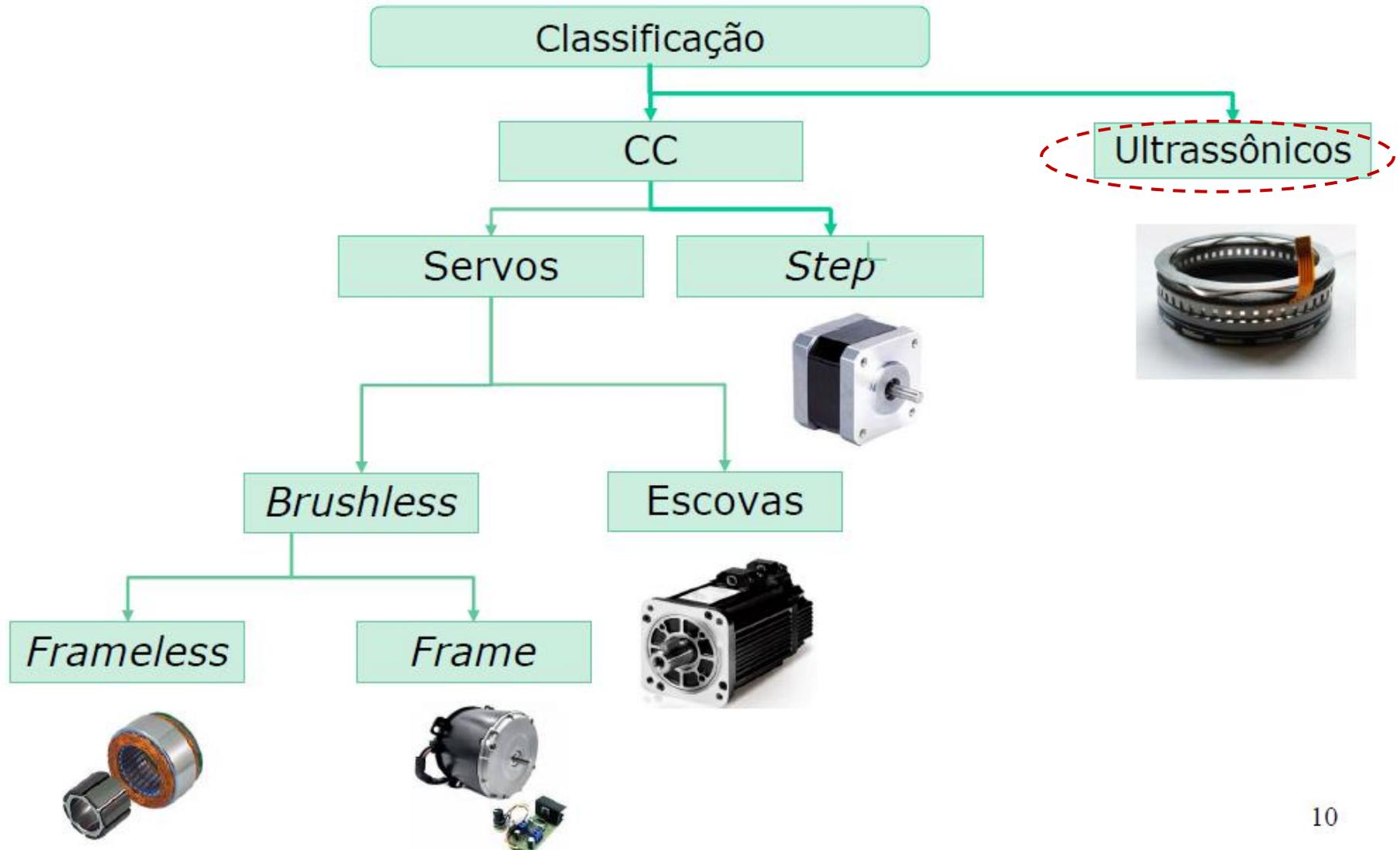


Servomotores Brushless

- Motores de passo tem relação peso/potência
- Motores de passo tem eficiência em torno de 70%, *brush* e *brushless* tem eficiência entre 80 e 90%
- Motores de passo tem baixa resolução
- Motores de passo podem apresentar *stall* e perda de passo se subdimensionados
- Motores de passo operam com corrente excessiva, independentemente da carga
- Fontes de ruído, vibrações e podem entrar em ressonância



Atuadores – Eletromecânicos Rotativos





Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores ultrassônicos

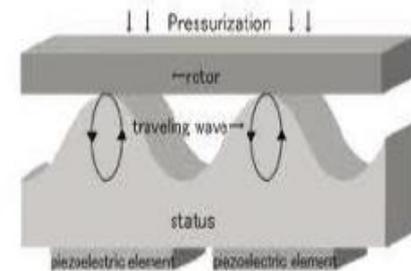
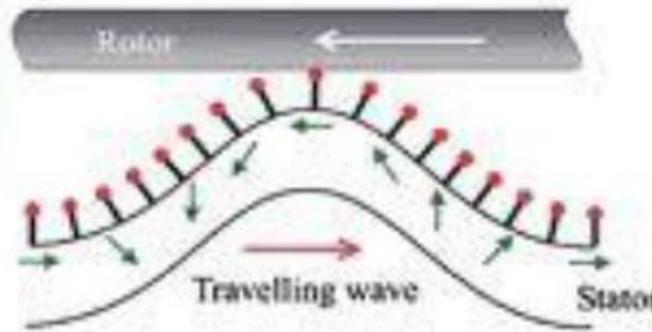
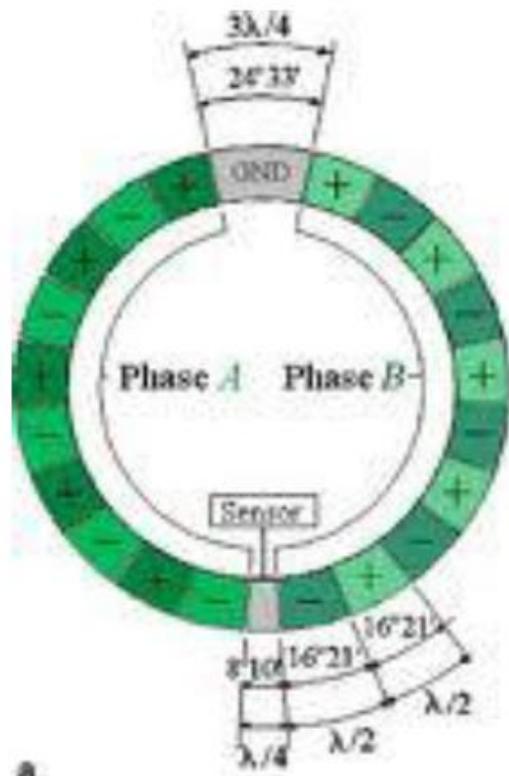
- Motores Ultrassônicos são baseados em um novo princípio de funcionamento que não envolve os princípios do magnetismo utilizado nos motores convencionais.
- Estes apresentam a vantagem de operarem em baixa velocidade, terem alto torque e alta dinâmica de resposta, além de silenciosos e não magnéticos.
- São amplamente utilizados em sistemas de auto focagem em máquinas fotográficas SLR, em posicionadores na indústria de semicondutores, nano posicionadores entre outras aplicações em sistemas de precisão



Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores ultrassônicos

Funcionamento



Traveling wave method

PI Piezo Motor Precision Positioning Solutions



- Up to 1000 N
- Sub-nm Resolution
- Self-Locking

Piezo Motor PiezoWalk® Ultrasonic PiezoMotor PiezoAct

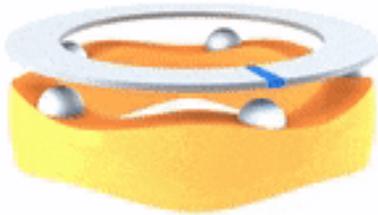


Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

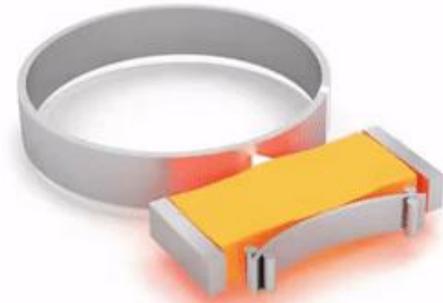
Motores ultrassônicos

Funcionamento

PI



PI

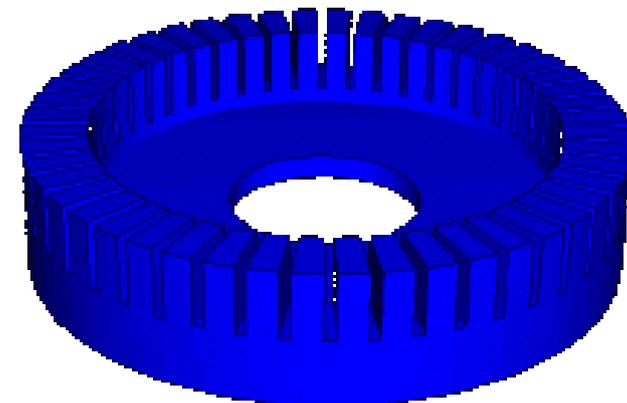
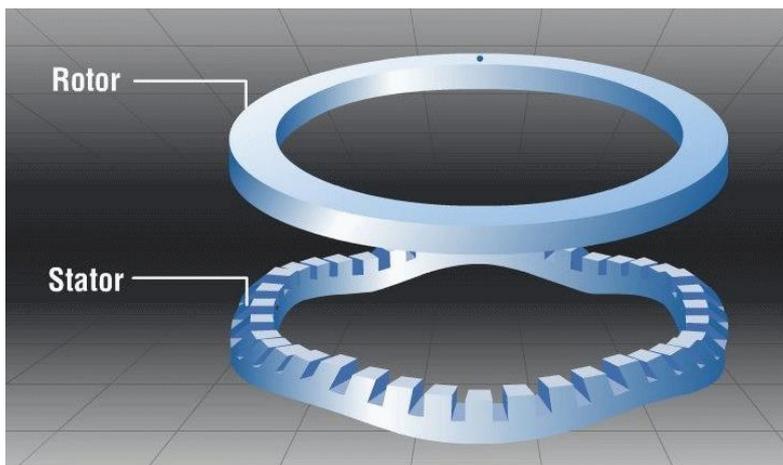
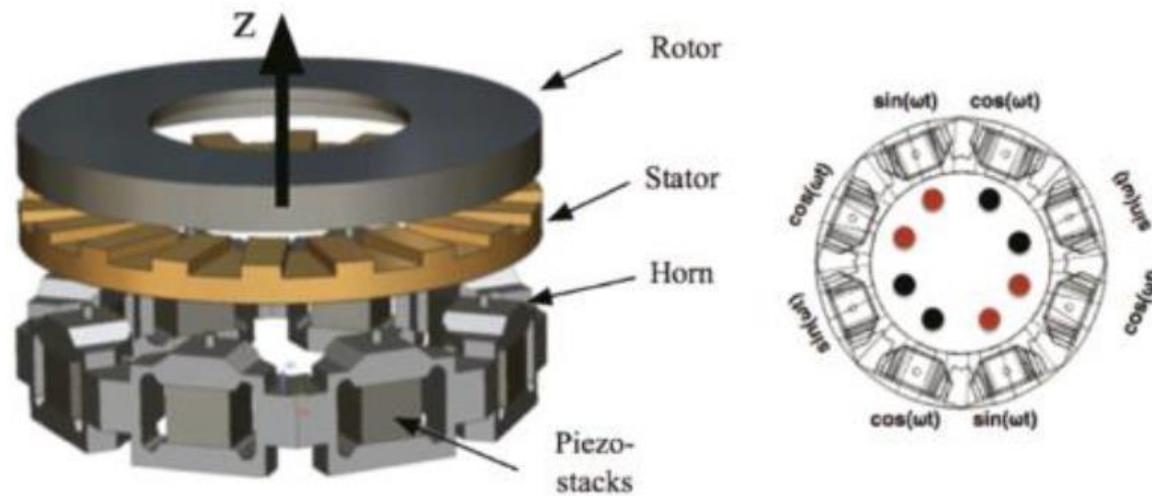


PI



Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

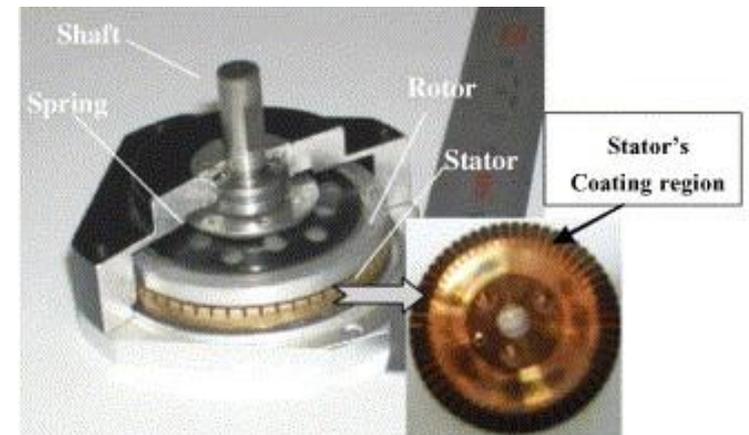
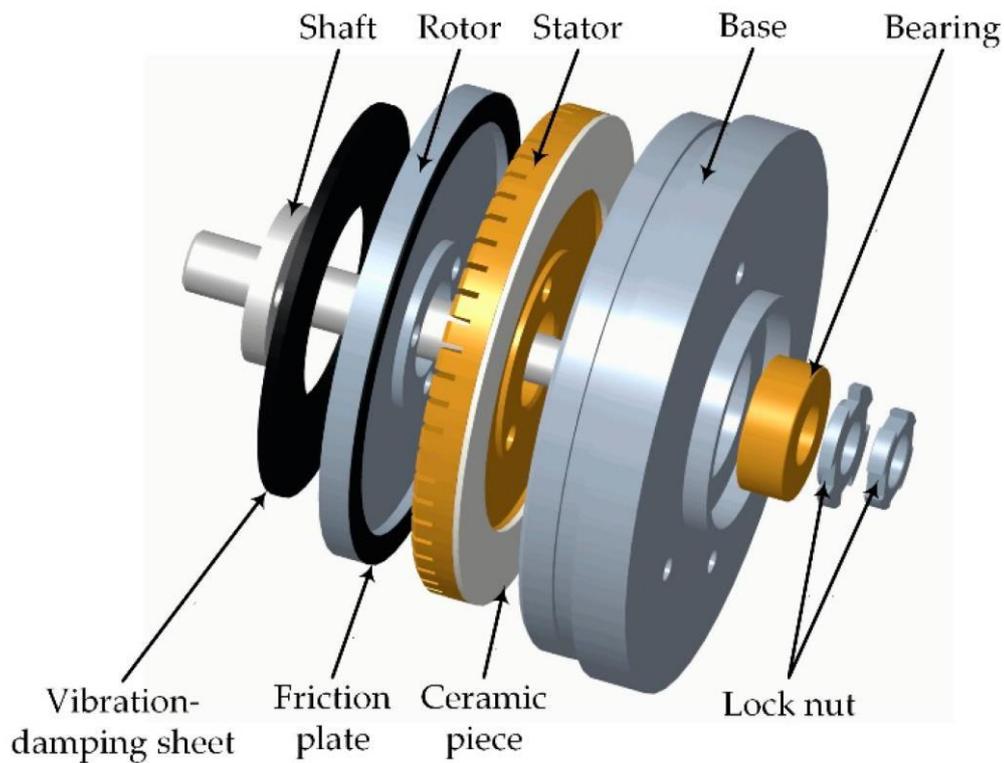
Motores ultrassônicos



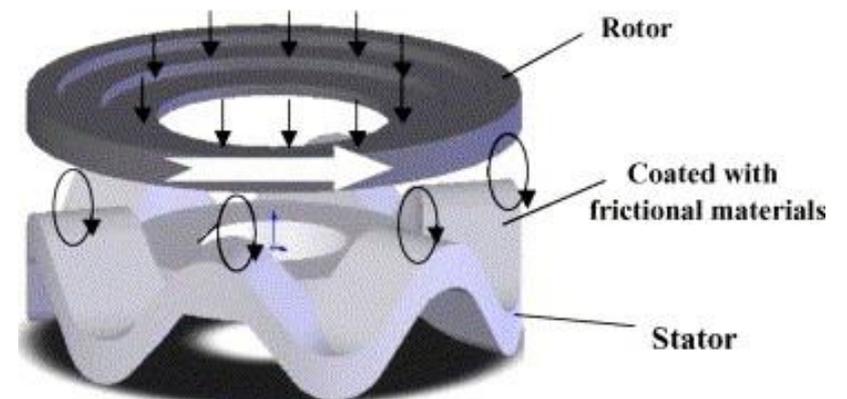


Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores ultrassônicos



(a)



(b)



Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores ultrassônicos

Aplicações

https://www.youtube.com/watch?v=SAB_Zb6c4CE



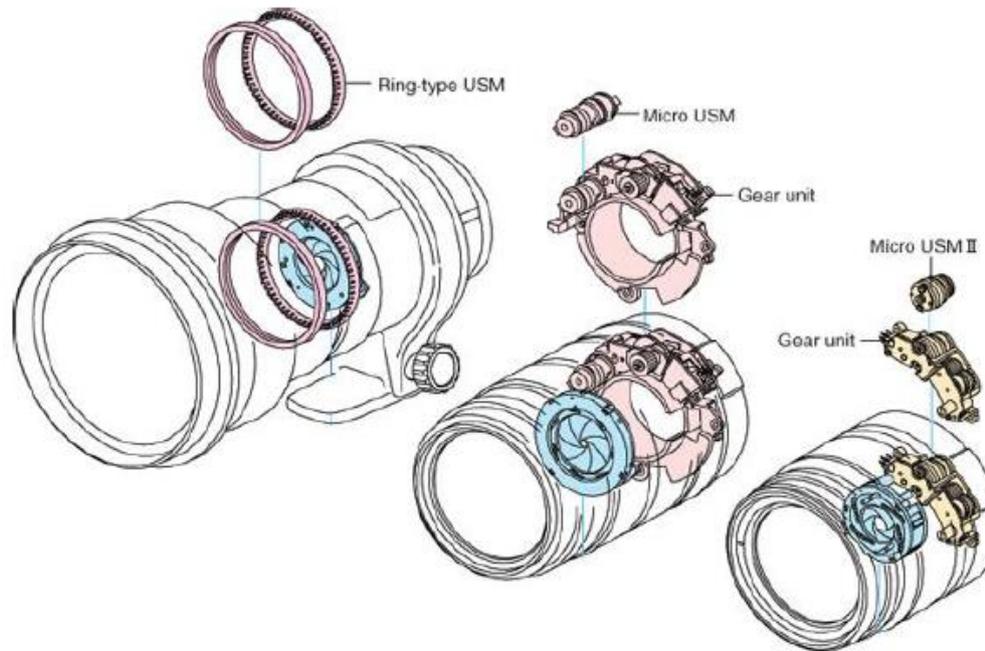


Atuadores – Eletromecânicos Rotativos

Motores ultrassônicos

Aplicações

<https://www.youtube.com/watch?v=xY9uLixGvnY>

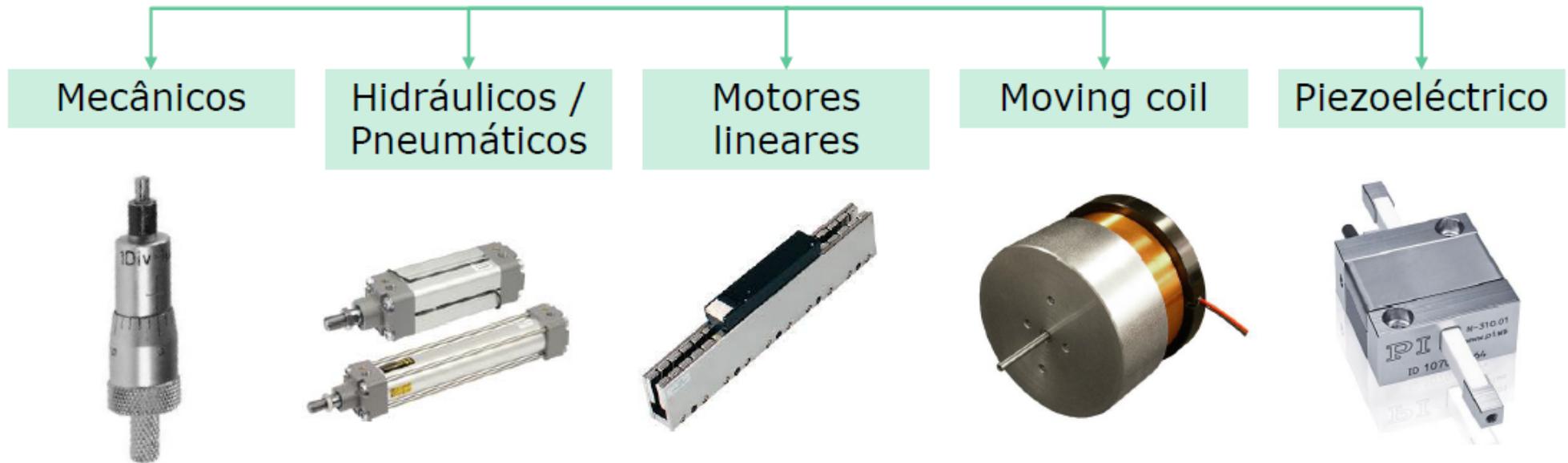


The three types of USM focus motor showing where they fit in the lenses.

http://cpn.canon-europe.com/content/education/technical/usmlens_technology.do



Atuadores – Eletromecânicos Lineares



- Acionamentos lineares são aqueles em que o padrão de deslocamento é de translação, não havendo a necessidade de se introduzir elementos para conversão de movimento rotativo/linear, tais como fusos



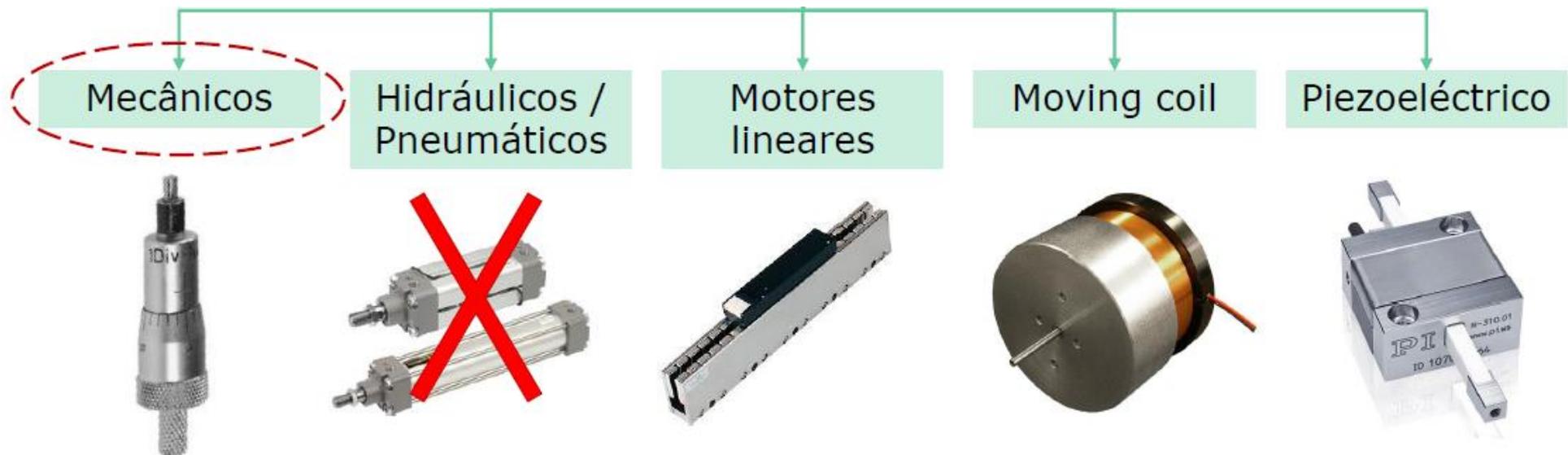
Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Características gerais

- são comuns a sistemas de ultra precisão
- evitam a necessidade de conversores, acoplamentos e redutores/amplificadores do movimento
- são compactos
- tem custo elevado (em geral)?



Atuadores – Eletromecânicos Lineares



- Acionamentos lineares são aqueles em que o padrão de deslocamento é de translação, não havendo a necessidade de se introduzir elementos para conversão de movimento rotativo/linear, tais como fusos



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Mecânicos

- Em geral baseados parafusos micrometros ou parafusos diferenciais
- Exatidão máxima de $1\ \mu\text{m}$
- Confiáveis
- Baixo custo
- Podem ser motorizados

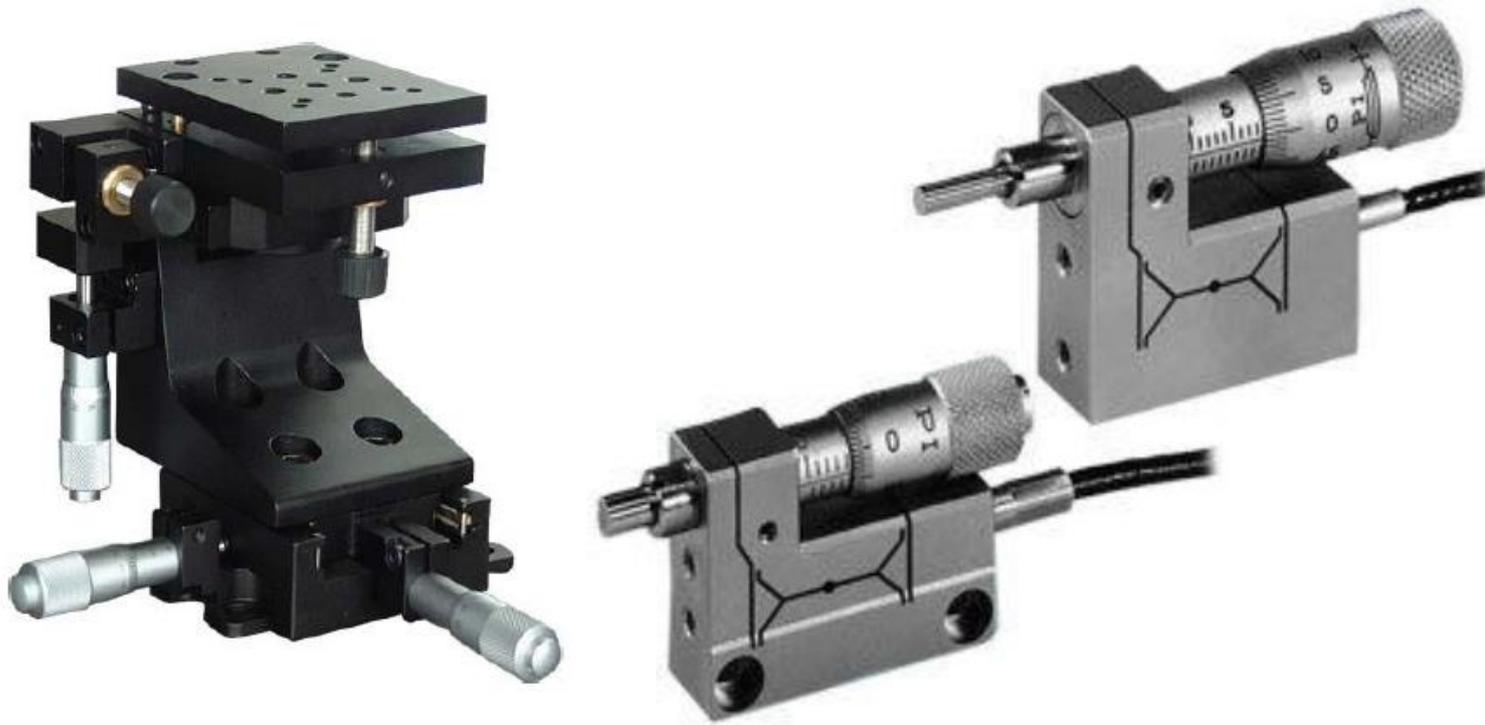




Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Mecânicos

Exemplos de aplicações





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

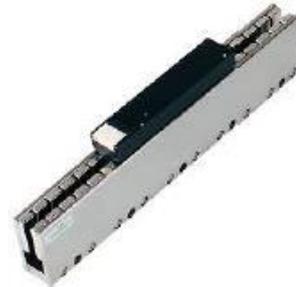
Mecânicos



Hidráulicos /
Pneumáticos



Motores
lineares



Moving coil



Piezoelétrico





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

- Motores lineares podem ser definidos como transdutores que transformam sinais elétricos em movimentos de translação.
- São projetados para executar movimento linear diretamente, sem a necessidade de conversores e acoplamentos mecânicos.
- Motores lineares podem ser melhor descrito como um motor CC rotativo tradicional planificado (aberto)



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

- Ao contrário dos motores rotativos, onde os parâmetros de referência são velocidade angular e torque, nos motores lineares as componentes do movimento são referenciadas como força e velocidade de translação.
- A força atua ao longo do deslocamento da componente estacionária, a qual é denominada de estator ou padrão, enquanto que o elemento móvel é referenciado como cursor



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Características

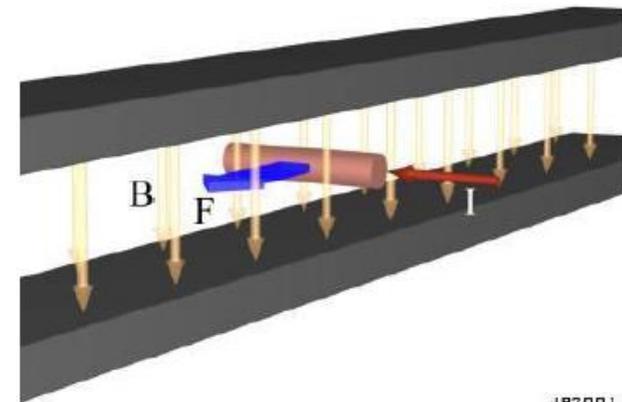
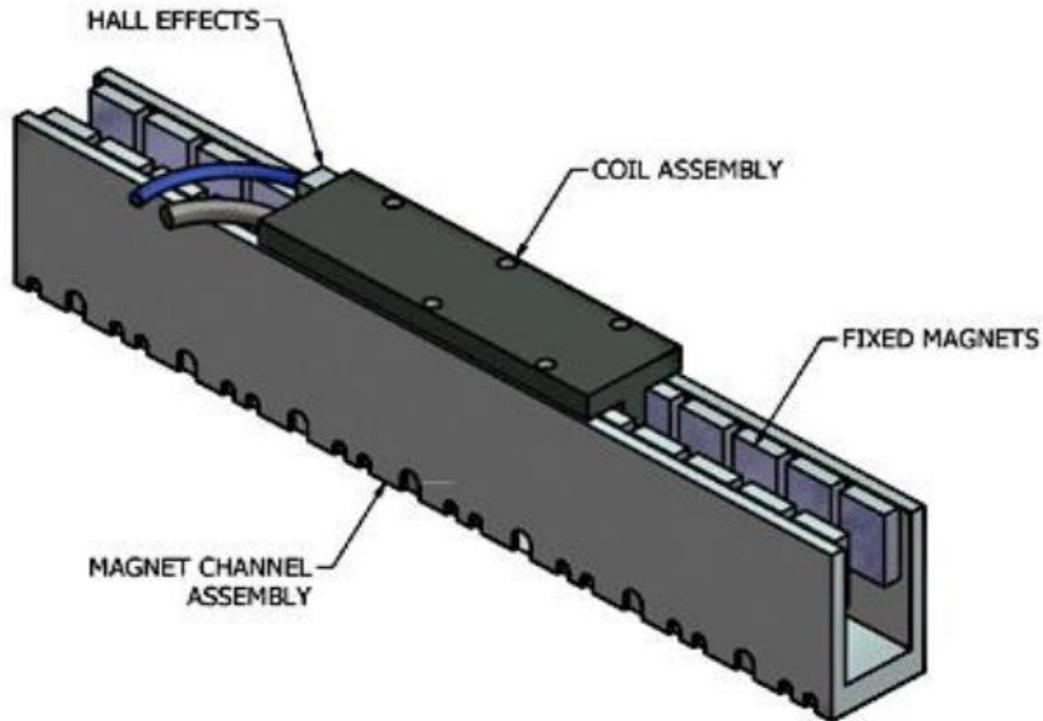
- alta velocidade e aceleração
- operação suave e alta precisão de posicionamento
- alta gama de velocidades
- sem limites de deslocamento
- alta rigidez
- simplicidade mecânica
- sem *backlash* mecânico;
- forças múltiplas em um mesmo estator



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Constituintes



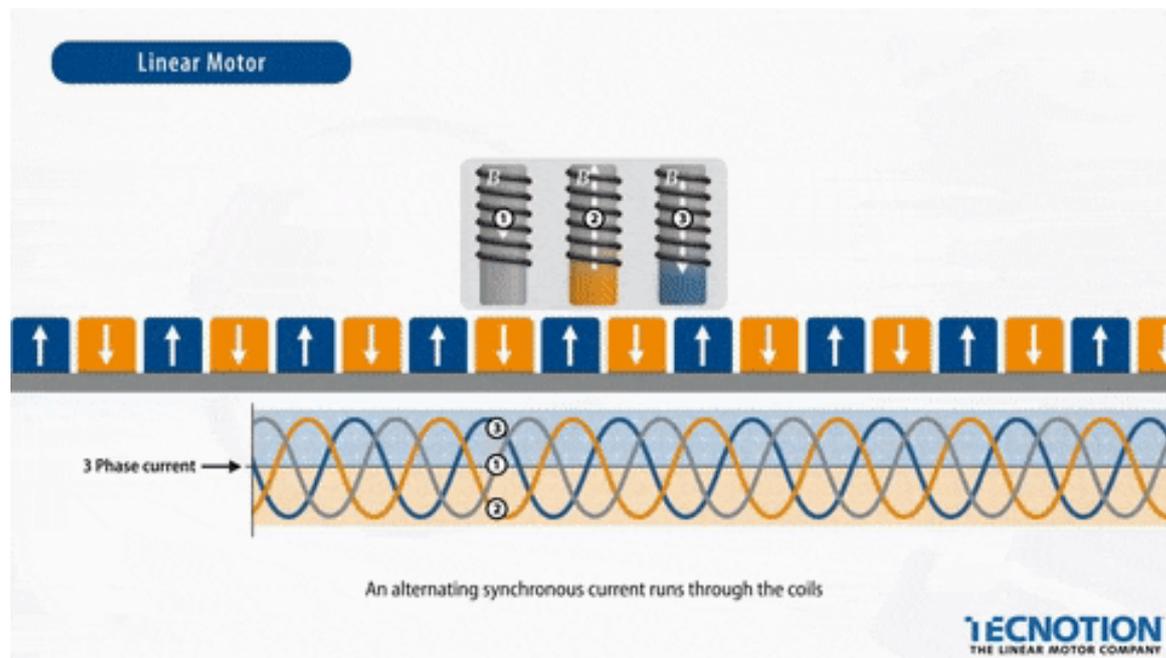
JP2001



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Funcionamento

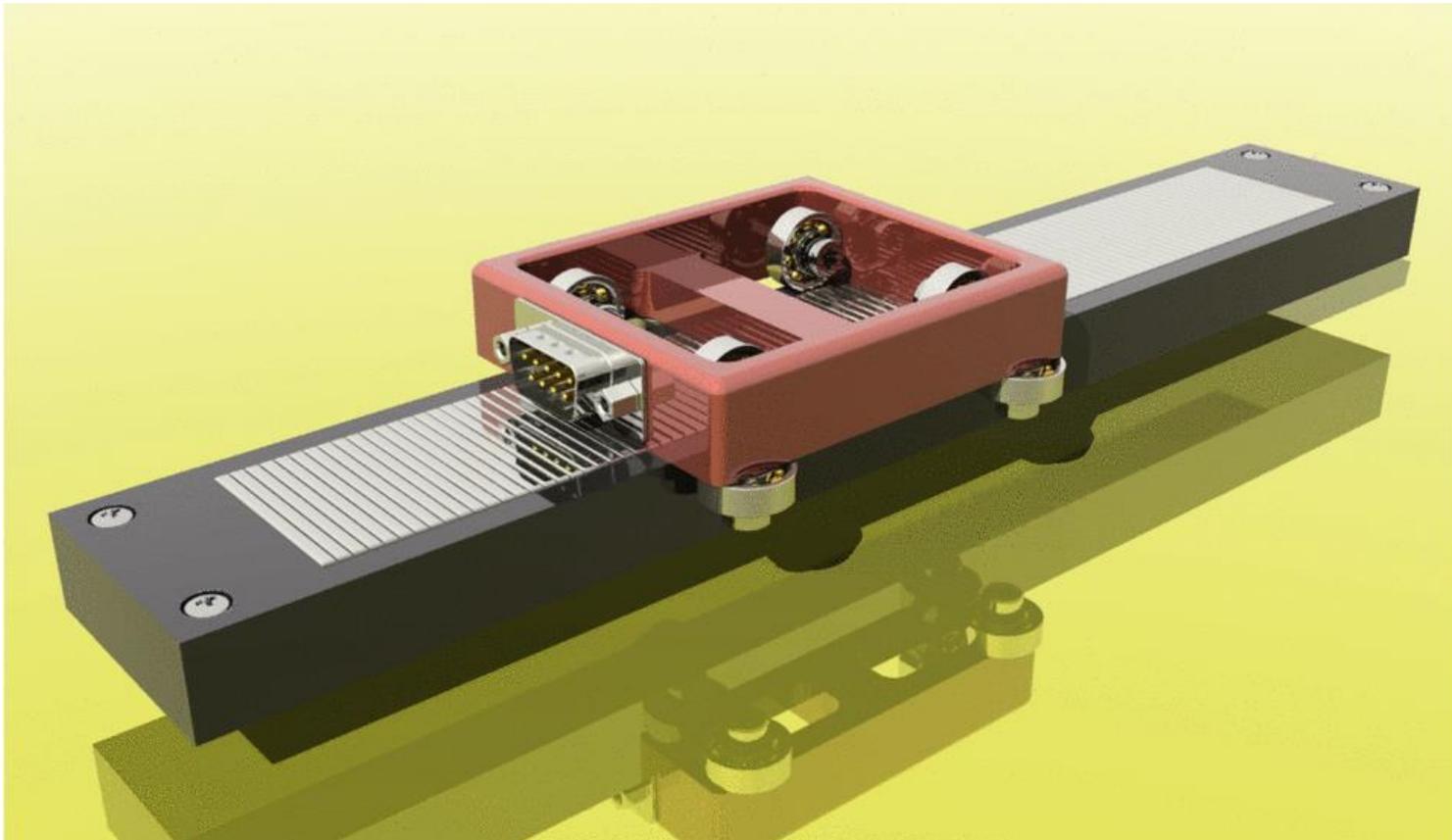




Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Funcionamento

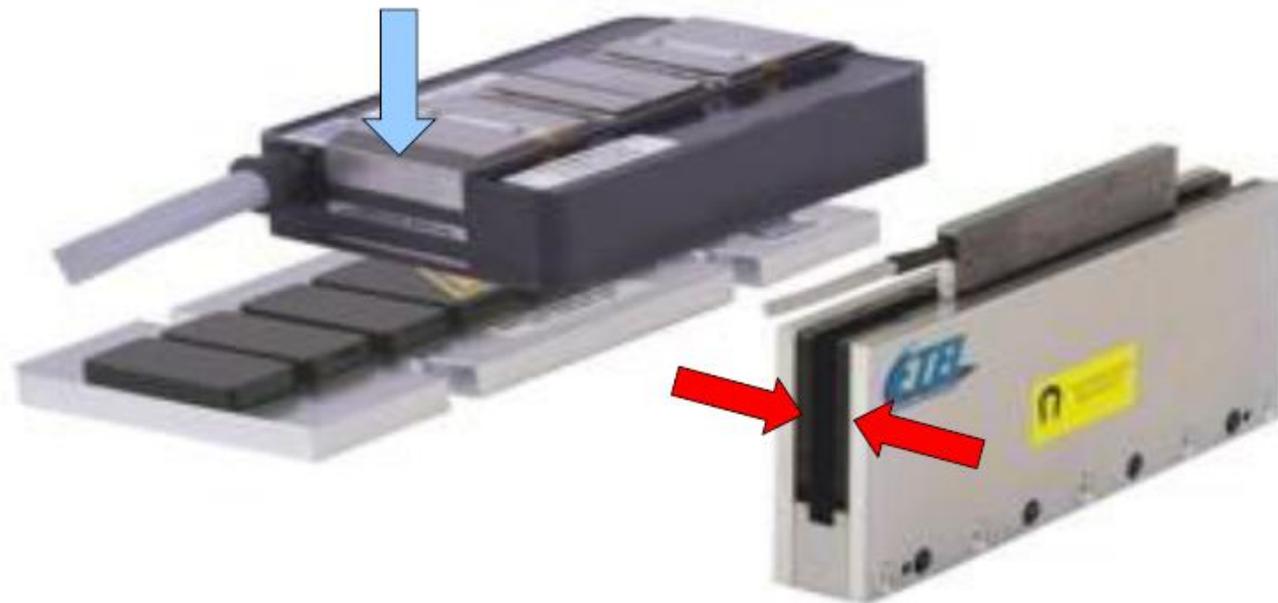




Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Tipos





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Aplicações

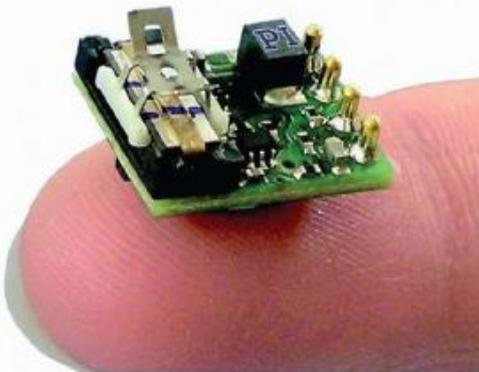
- inspeção e teste de semicondutores
- manipulação de materiais compósitos
- produção de placas de circuitos impresso
- posicionadores X-Y
- posicionamentos em múltiplos estágios
- manipuladores e movimentadores (*pick and place*)
- montagens automáticas
- máquinas CNC
- outros



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Aplicações





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Dimensionamento

O dimensionamento de motores lineares é realizado com base nas equações do movimento:

$$x_0 + v_0 t = \frac{a \cdot t^2}{2}$$

Onde: a – aceleração [m/s²]

x – curso [m]

t – tempo [s]

v – velocidade [m/s]

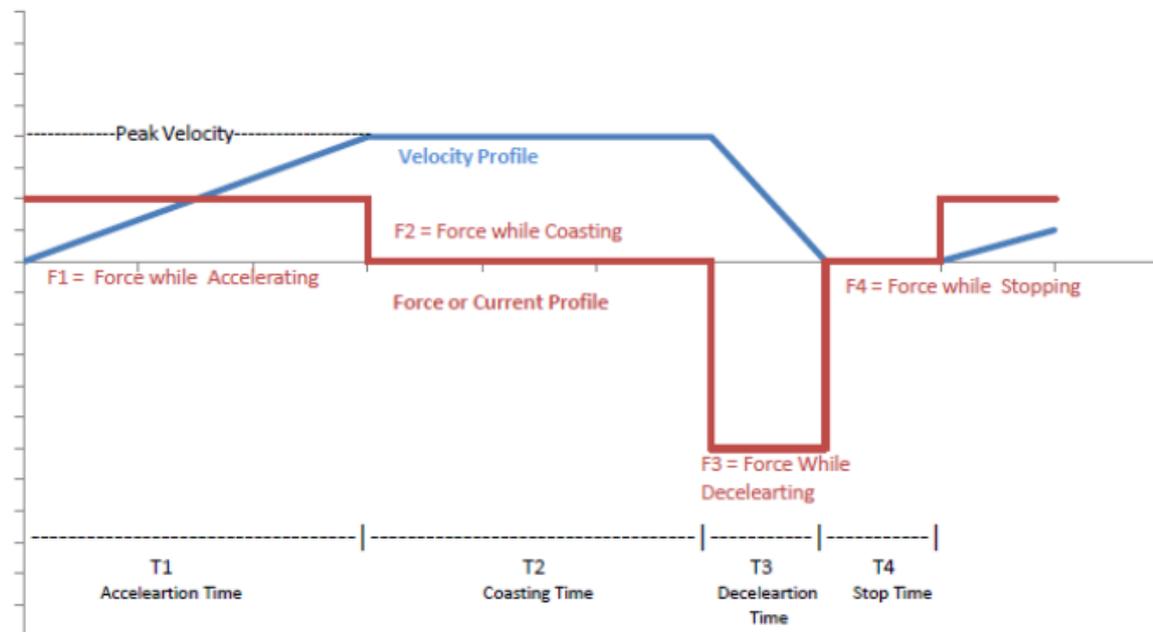


Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Dimensionamento

Assumindo um perfil de velocidade trapezoidal durante o deslocamento, podemos:





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Dimensionamento

➤ decompor t em:

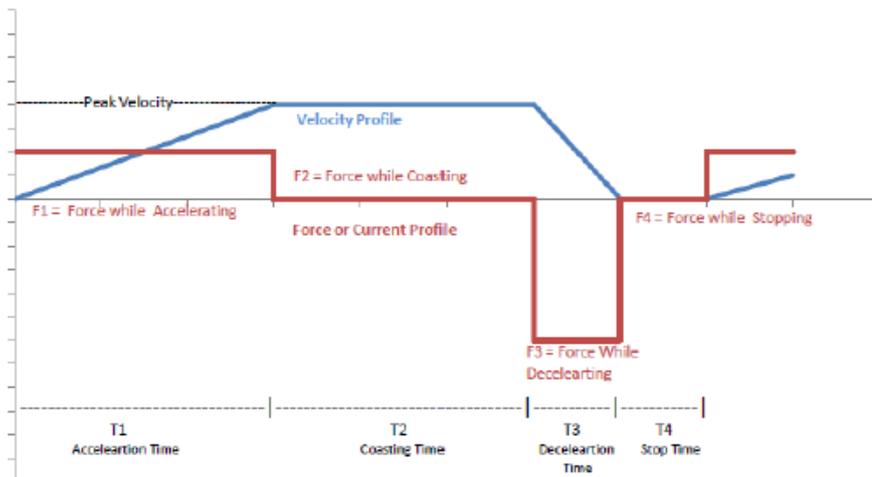
t_1 – tempo de aceleração

t_2 – tempo de deslocamento efetivo

t_3 – tempo de desaceleração

t_4 – tempo de parada

sendo: $t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$



E o ciclo de movimento é dado por: $Dc = \frac{t}{t+t_4}$

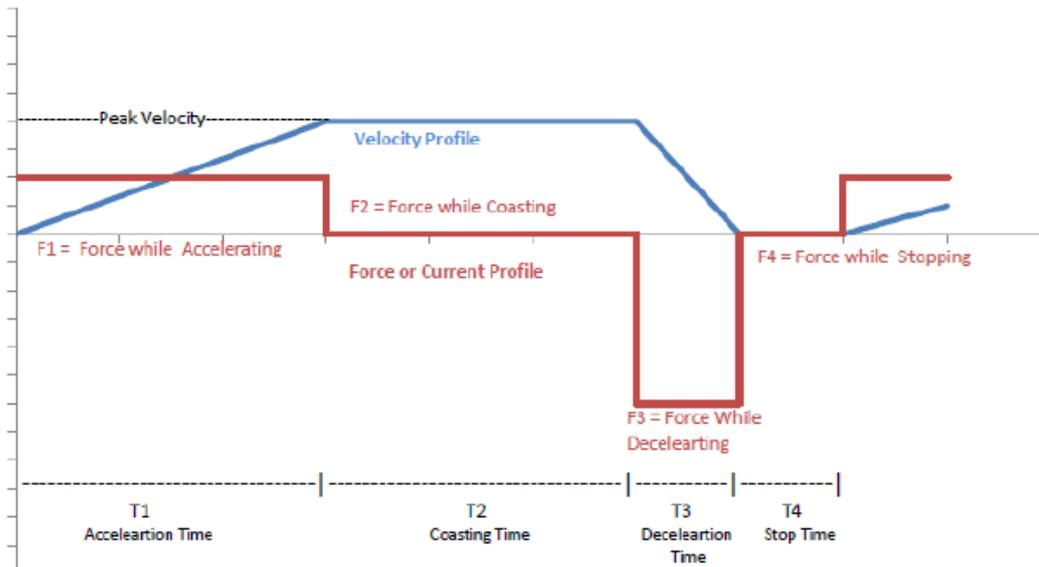


Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Dimensionamento

- decompor a em:
- a1 – aceleração
 - a2 – desaceleração



F1 - força durante a aceleração [N]

F2 - força durante o curso [N]

F3 - força durante a desaceleração [N]

F4 - força durante o tempo de parada

F_{rms} - média quadrática das forças

m - massa total (cursor do motor+outras) [kg]

K_f - constante de força [N/A]

K_e - constante BEMF [V/m/s]

R - impedância do motor [Ω]

f - frequência [Hz]



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Dimensionamento

➤ Exemplo: $X = 0.5 V_{peak} (T_1 + 2T_2 + T_3)$

$$V_{peak} = \frac{2x}{(T_1 + 2T_2 + T_3)}$$

$$a_1 = \frac{V_{peak}}{T_1} = \frac{2x}{T_1((T_1 + 2T_2) + T_3)}$$

$$a_3 = \frac{V_{peak}}{T_3} = \frac{2x}{(T_3((T_1 + 2T_2) + T_3))}$$

$$F_1 = a_1 m = \frac{2x m}{(T_1 + 2T_2 + T_3)(T_1)}$$

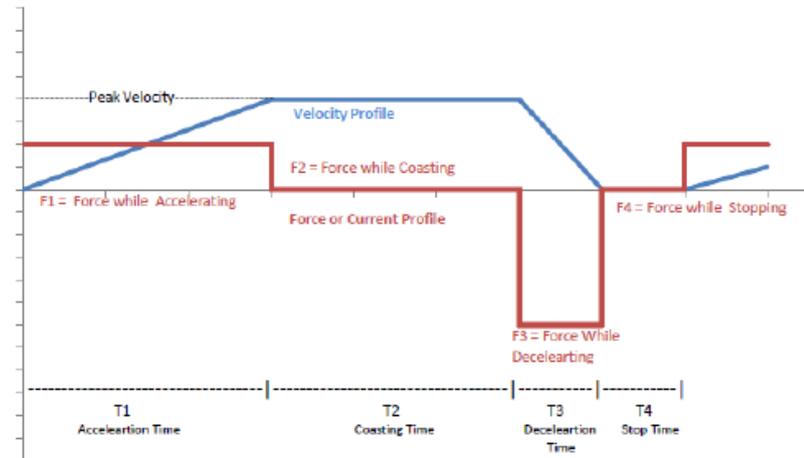
F_2 = Friction force

$$F_3 = a_3 m = \frac{2x m}{(T_3(T_3 + 2T_2) + T_3)}$$

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{F_1^2 T_1 + F_2^2 T_2 + F_3^2 T_3 + F_4^2 T_4}{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}}$$

$$I_{rms} = \frac{F_{rms}}{K_f}$$

$$P = R I_{rms}^2$$



Deve ser menor do que a força contínua do motor

Deve ser menor do que a potência contínua do motor

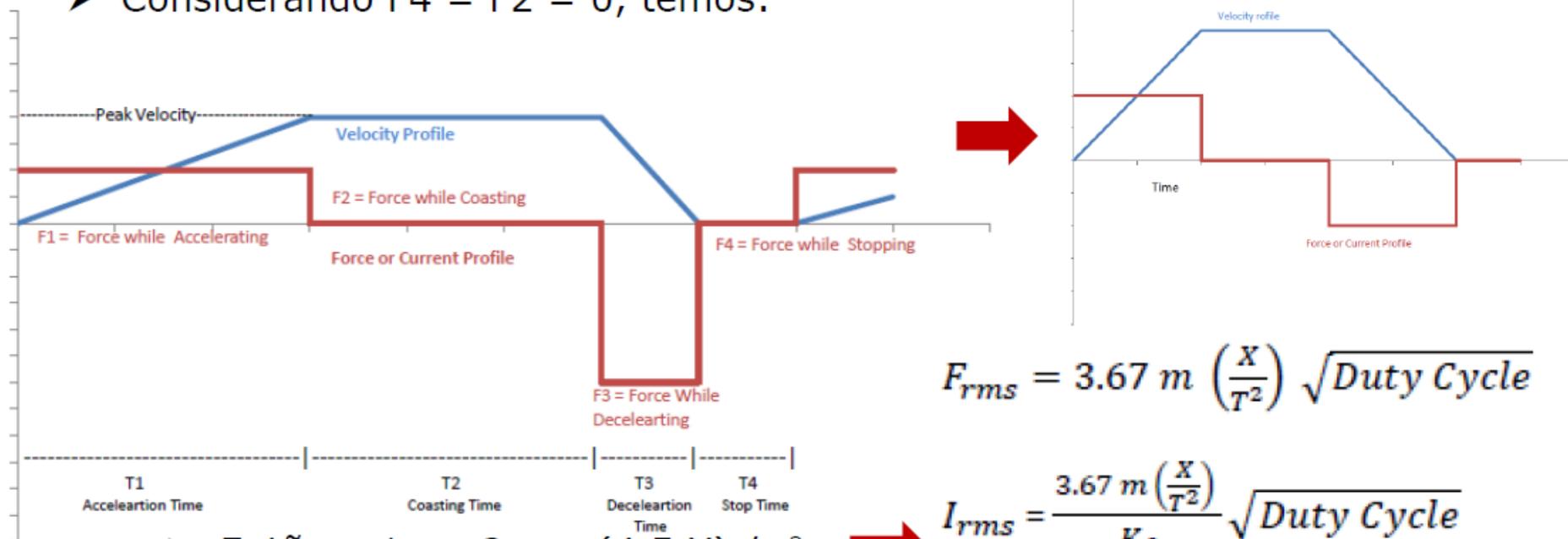


Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores lineares

Dimensionamento

➤ Considerando $F_4 = F_2 = 0$, temos:



➤ Então: $a_1 = a_2 = a (4,5.X) / r^2$

$$F_{rms} = 3.67 m \left(\frac{X}{T^2} \right) \sqrt{\text{Duty Cycle}}$$

$$I_{rms} = \frac{3.67 m \left(\frac{X}{T^2} \right)}{K_f} \sqrt{\text{Duty Cycle}}$$

$$V_{peak} = \frac{1.5 X}{T}$$

$$P = R I_{rms}^2$$



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Mecânicos



Hidráulicos /
Pneumáticos



Motores
lineares



Moving coil



Piezoelétrico





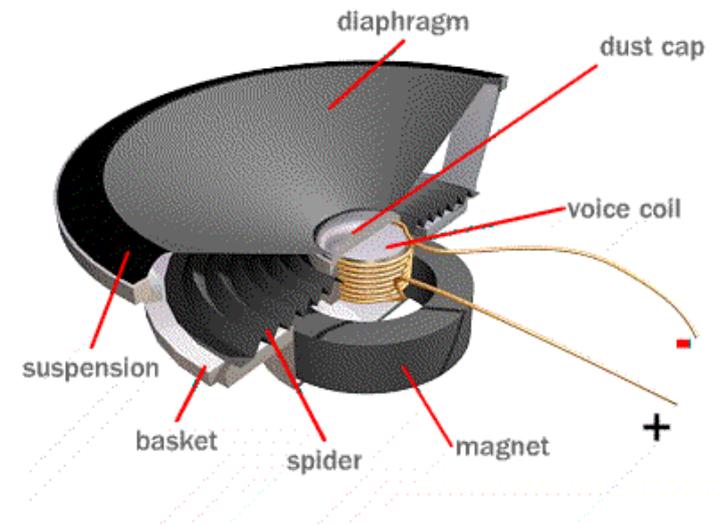
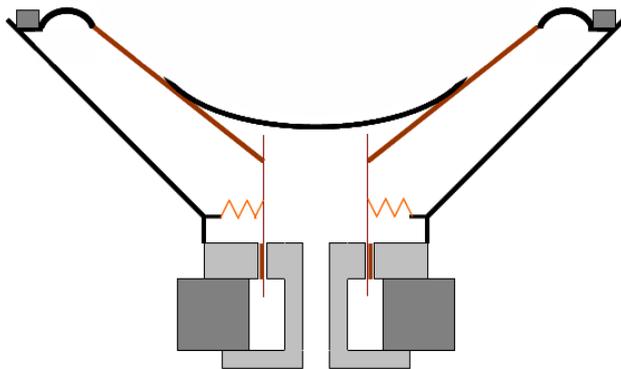
Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Moving coil

Magnetic coil

Moving coil

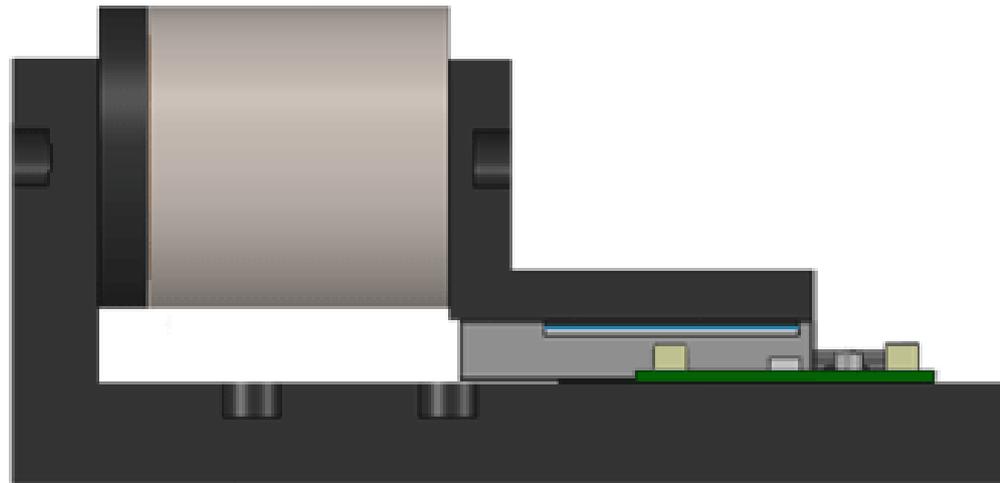
Voice coil



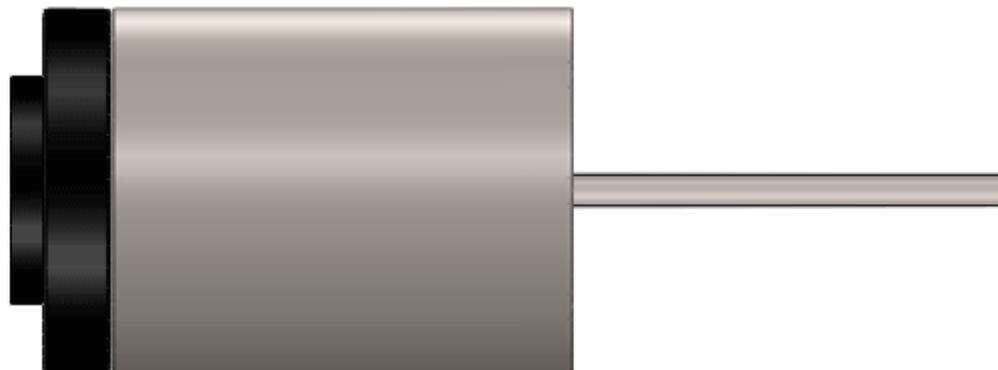


Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Moving coil



Voice coil





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Moving / Voice coil

- Moving coils podem ser considerados como um tipo especial de motores lineares.
- Funcionam segundo o princípio de atração/repulsão magnéticos
- Ideais para pequenos cursos com forças moderadas
- Compactos
- Controle simples
- Boa relação custo benefício
- O dimensionamento é feito da mesma forma que os motores lineares



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Moving / Voice coil

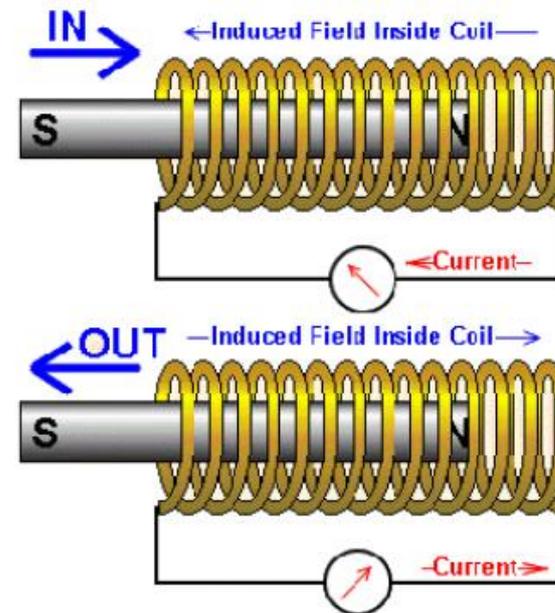
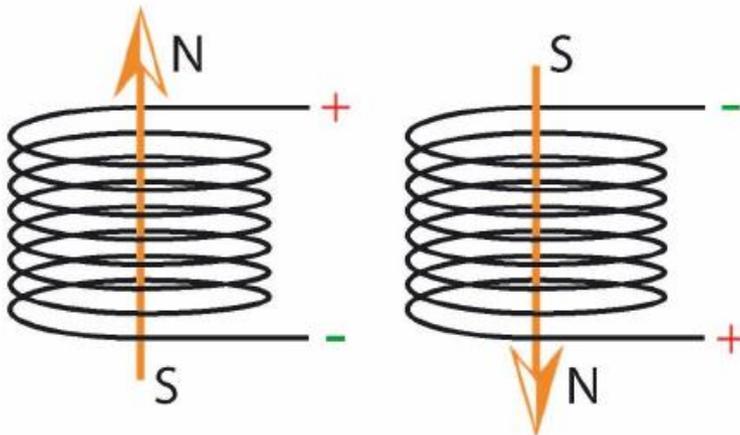
Funcionamento

Voice Coils operam segundo o princípio da equação de força de **Lorentz**

$$\text{Força} = B \times I$$

Onde B = Densidade de fluxo (Teslas)

I = corrente (A)

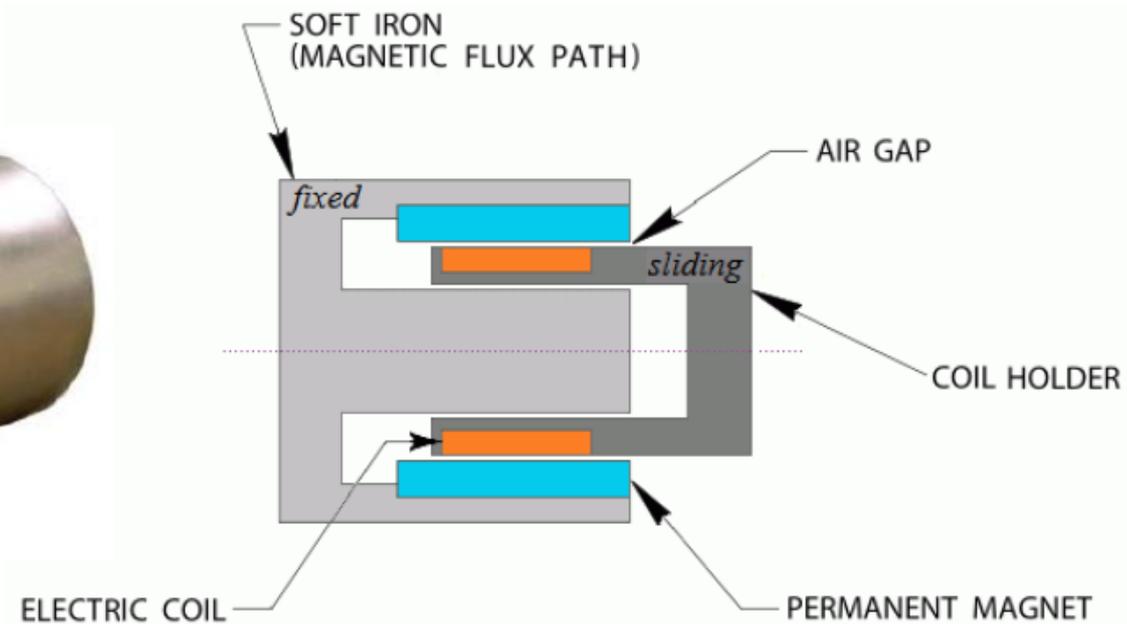




Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Moving / Voice coil

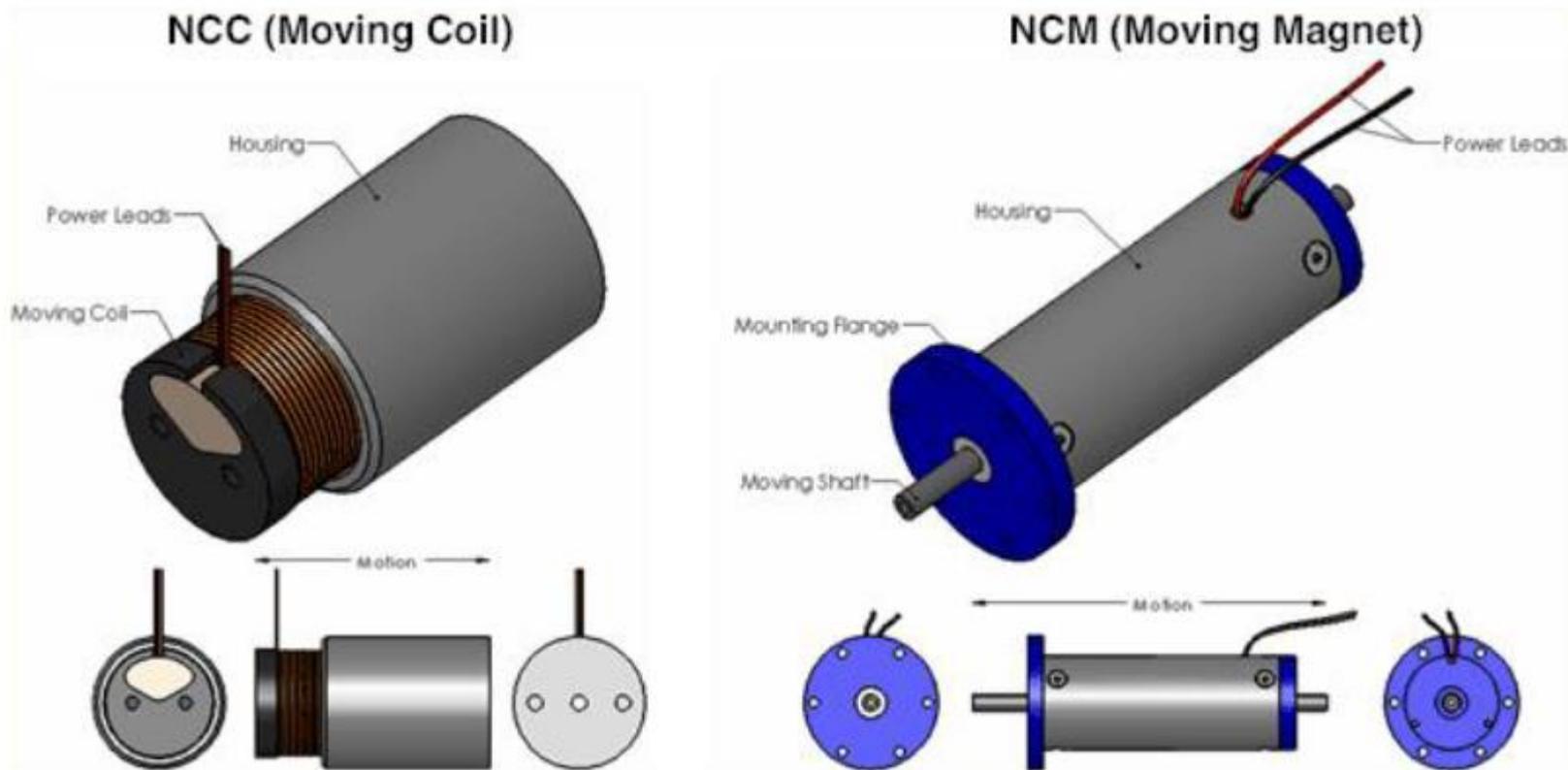
Constituintes





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Moving/Voice e Magnet coil





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Moving/Voice e Magnet coil

Exemplos



www.linearpositioningsystems.com



www.tpa-us.cc



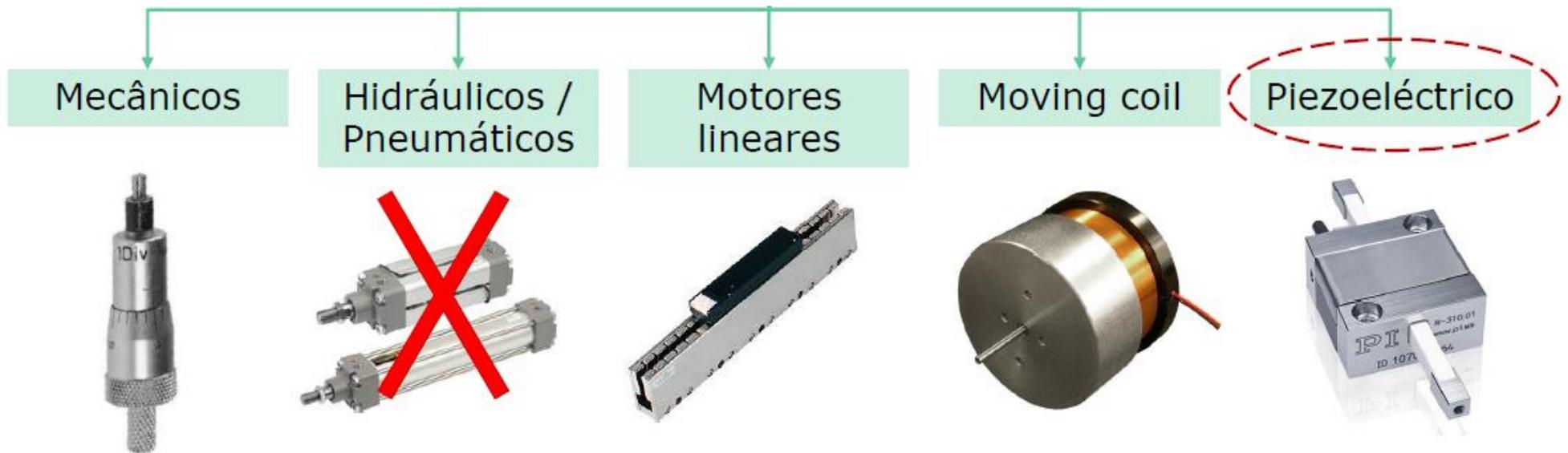
www.linearmotiontips.com



www.beikimco.com



Atuadores – Eletromecânicos Lineares





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Piezo motores

- O efeito piezelétrico é uma propriedade de determinados materiais de gerarem uma diferença de potencial elétrica quando submetidos a deformações ou vice-versa.
- Acionamento piezoelétricos exploram esta característica para proporcionar movimentos.
- Os atuadores piezelétricos têm ampla aplicação em sistemas que necessitem pequenos cursos de deslocamento.
- são muito utilizados em sistemas UP no ajuste fino, na estabilização de sistemas ópticos, como osciladores, etc..

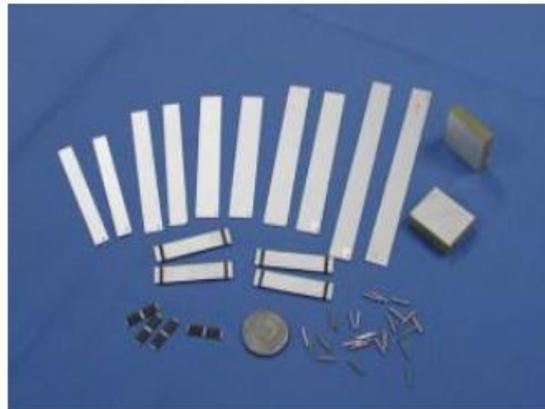


Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Piezo motores

Cerâmicas piezelétricas

As piezo cerâmicas assumir o formato de discos, barras, tubos, fios e cilindros





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Piezo motores

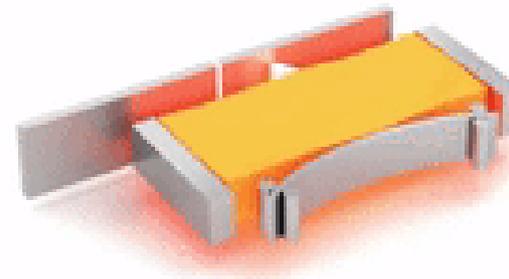
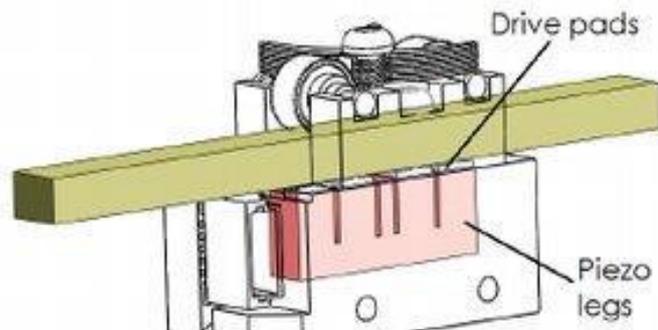
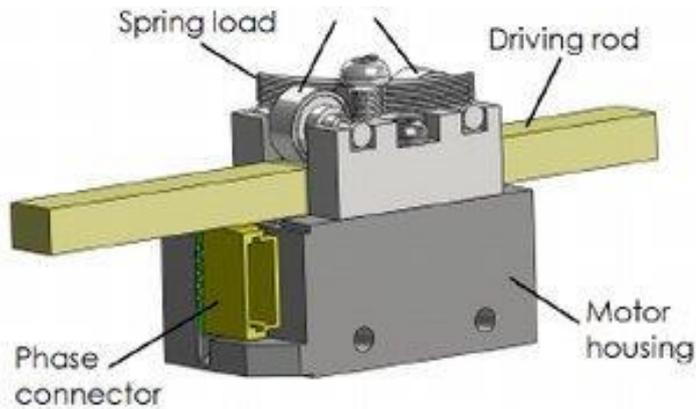
Exemplos





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Motores ultrassônicos



PI Piezo Motor Precision Positioning Solutions

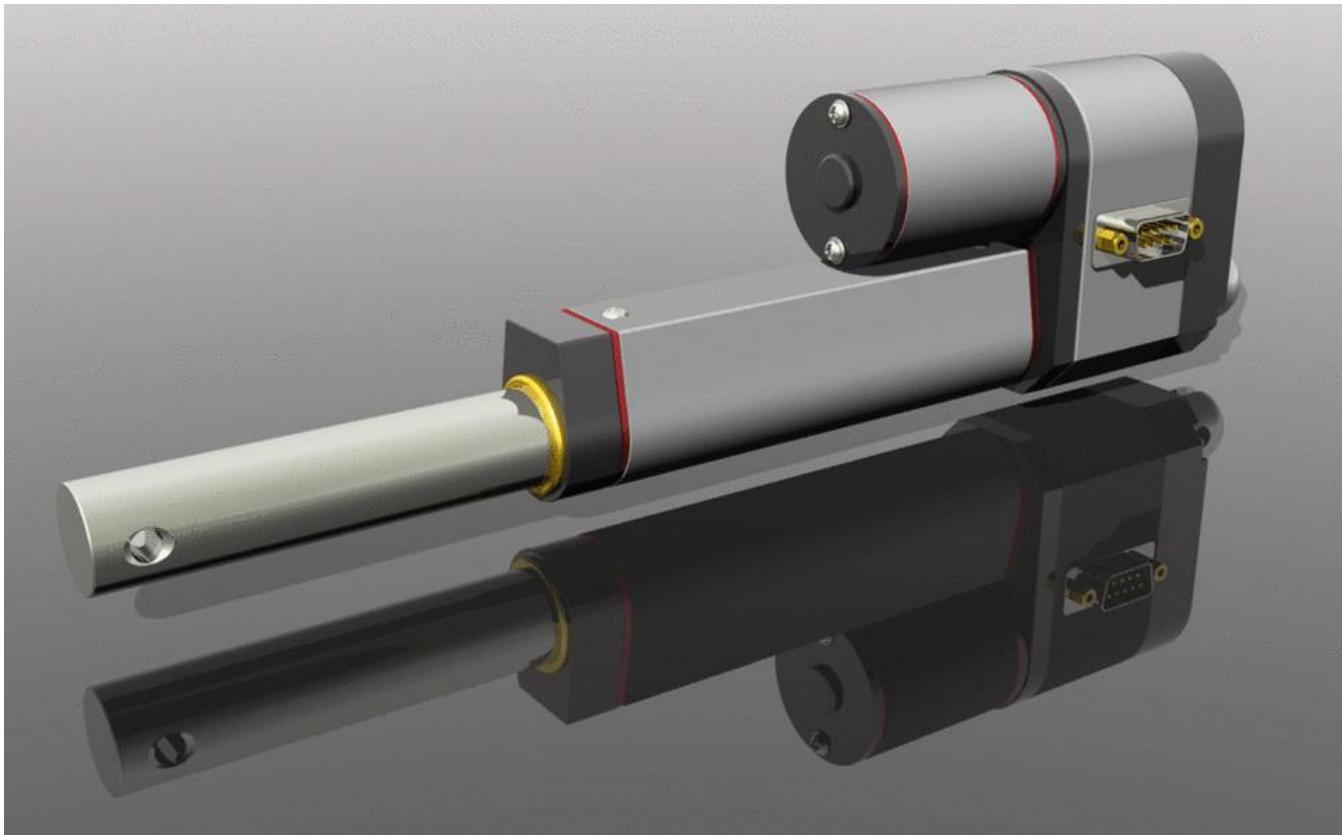


- Up to 1000 N
- Sub-nm Resolution
- Self-Locking



Atuadores – Eletromecânicos Lineares

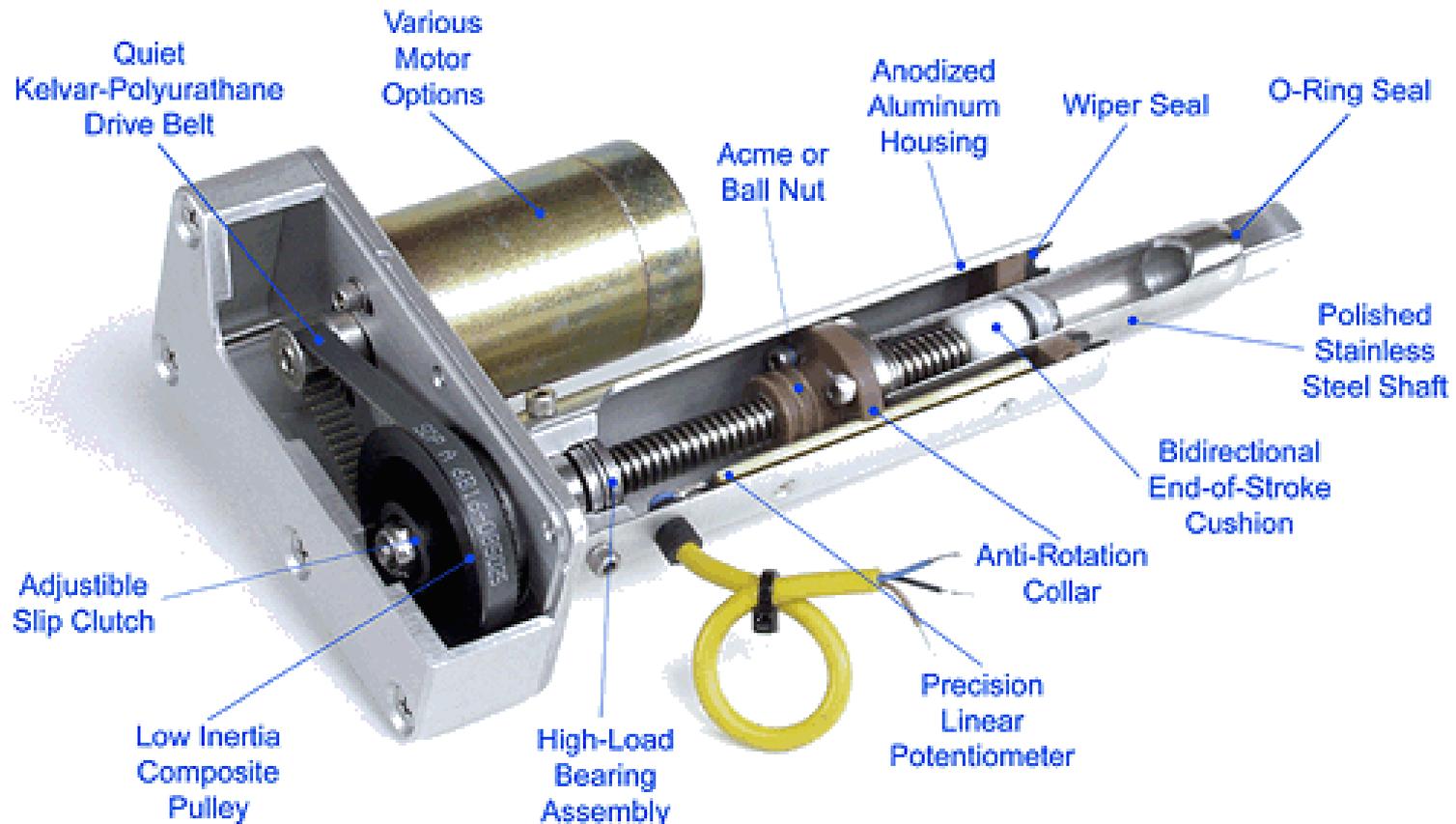
Atuadores lineares





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

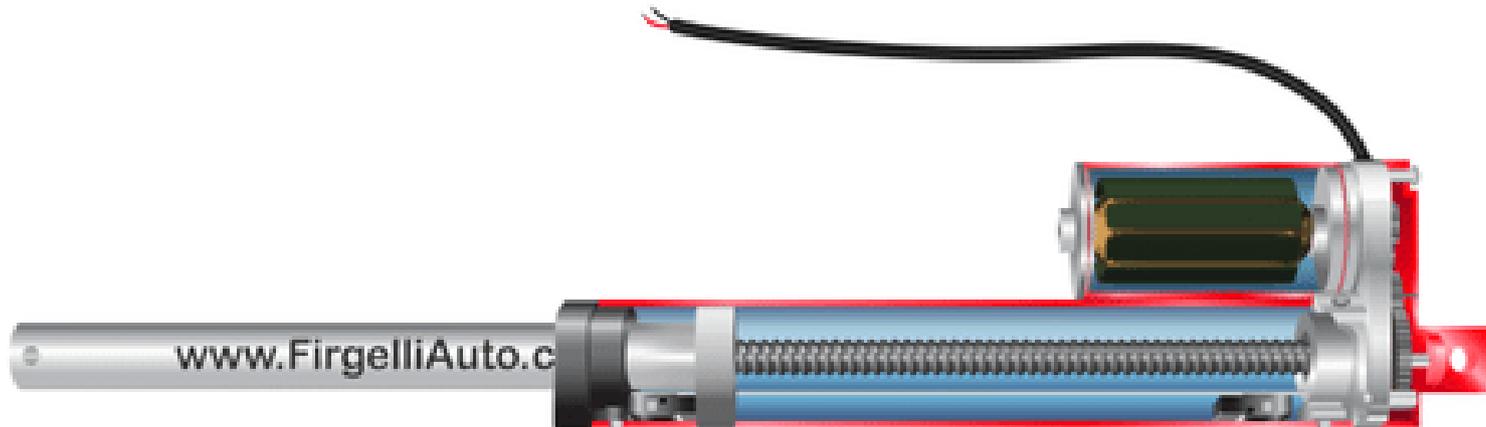
Atuadores lineares





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

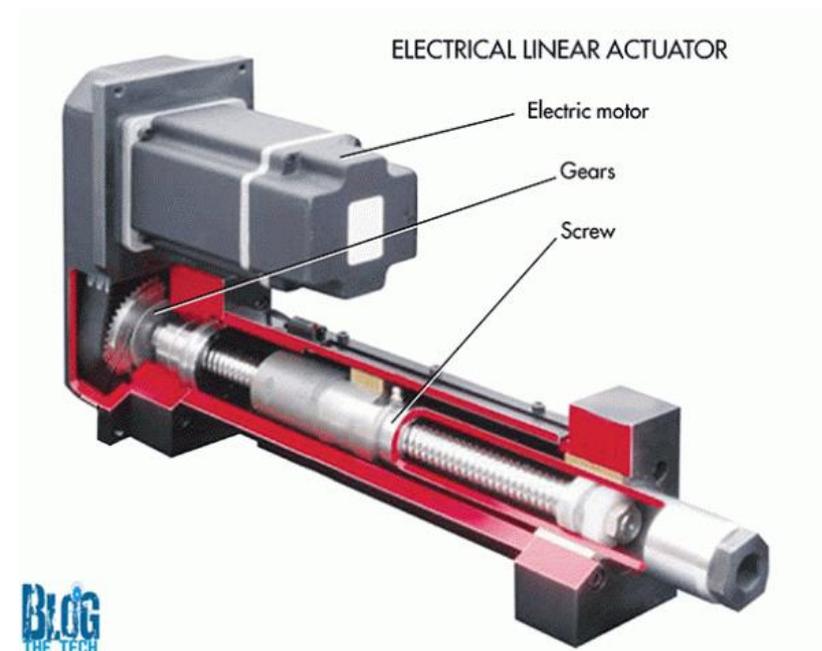
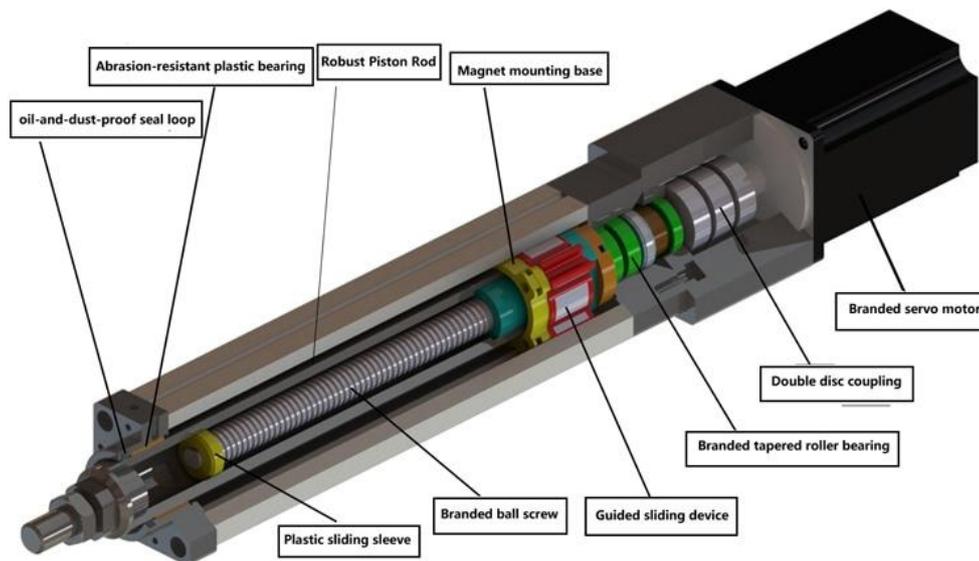
Atuadores lineares





Atuadores – Eletromecânicos Lineares

Atuadores lineares





Atuadores Lineares

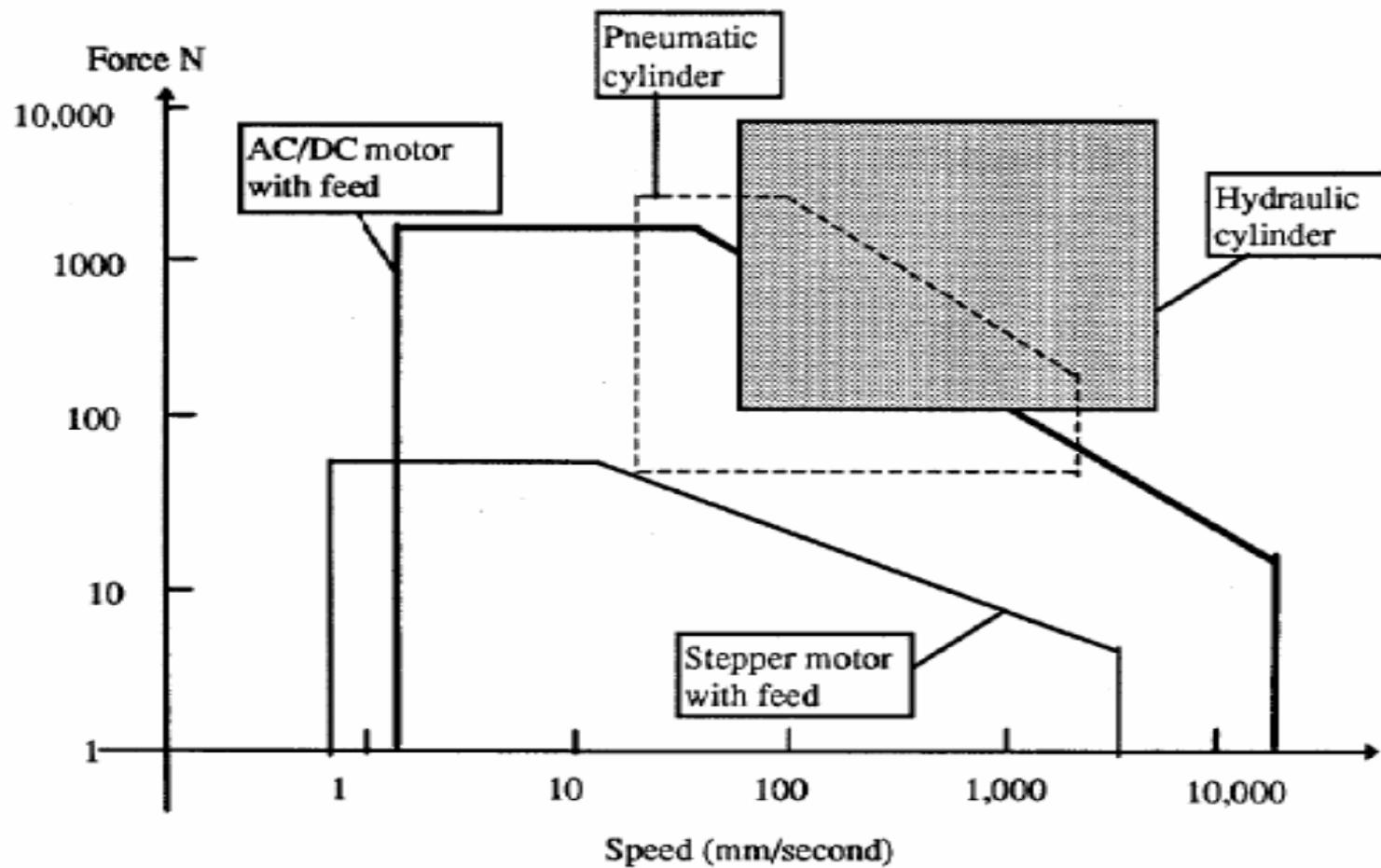
Seleção

- custo
- força ou torque
- utilização (árvore ou posicionamento)
- curso
- dinâmica (resposta a entrada, aceleração e desaceleração)
- facilidade de controle
- exatidão do movimento
- padrão do movimento (rotativo ou linear)
- Espaço
- potência dissipada



Atuadores Lineares

Seleção





ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Fim da aula