



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3501
Engenharia de Precisão

A24

Atuadores

2020.2



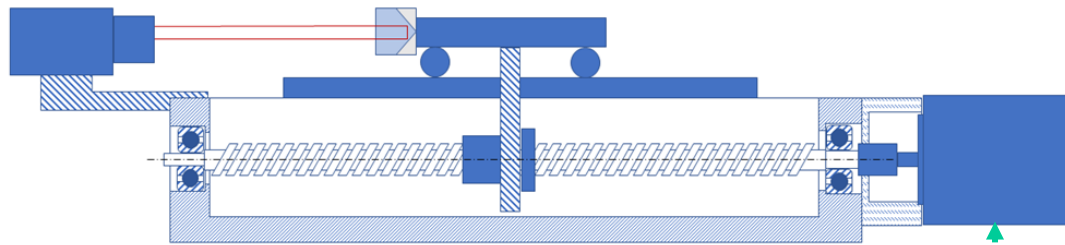
Planejamento

Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
08.10	5ª	A17	Elementos de máquinas de precisão – mancais e guias hidrostáticos	RS
14.10	4ª	A18	Elementos de máquinas de precisão – mancais e guias aerostáticos	RS
15.10	5ª	A19	Elementos de máquinas de precisão – mancais e guias de elementos rolantes	RS
21.10	4ª	A20	Elementos de máquinas de precisão – mancais não convencionais	RS
22.10	5ª	A21	Elementos de máquinas de precisão – transmissores do movimento	RS
28.10	4ª	A22	Elementos de máquinas de precisão – conversores do movimento	RS
29.10	5ª	A23	Elementos de máquinas de precisão – acoplamentos	RS
04.11	4ª	A24	Elementos de máquinas de precisão – atuadores	RS
05.11	5ª	A25	Estruturas de sistemas de precisão: Requisitos, Materiais e Fabricação	RS
11.11	4ª	A26	Exercícios -4	RS
12.11	5ª	A27	Estruturas de sistemas de precisão: configurações estruturais e laço estrutural	RS
18.11	4ª	A28	Estruturas de sistemas de precisão: considerações estáticas, dinâmicas e térmicas. Erros, propagação de erros / compensação de erros	RS
19.11	5ª	A29	Materiais para componentes de precisão	RS
25.11	4ª	A30	Exercícios -5	RS
26.11	5ª	A29	Apresentação de Estudo de Caso/Seminário	RS
02.12	4ª	A30	Apresentação de Estudo de Caso/Seminário	RS
03.12	5ª	A31	Apresentação de Estudo de Caso/Seminário	RS
09.12	4ª			
10.12	5ª			
14.12	3ª		Encerramento do semestre 2020-2	
06.12			Mecedor tridimensional de coordenadas	





Como promover o movimento?



Acionamentos

Rotativos

Lineares





Atuadores

Definição

- Atuadores/acionamentos são os elementos utilizados para promover movimentos, força e torques ou uma combinação de ambos



Atuadores

Requisitos

- 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

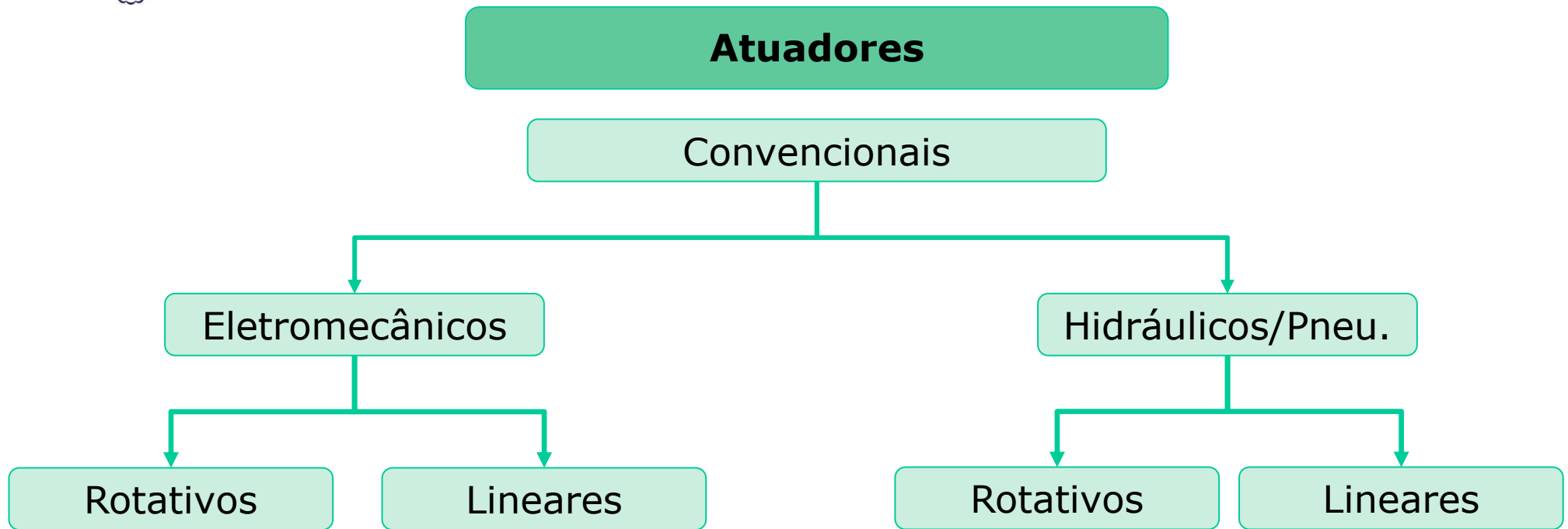
Piezoelétricos

Ultrassônicos

Piezoelétricos

Voice Coils

Outros





Atuadores

Eletromecânicos

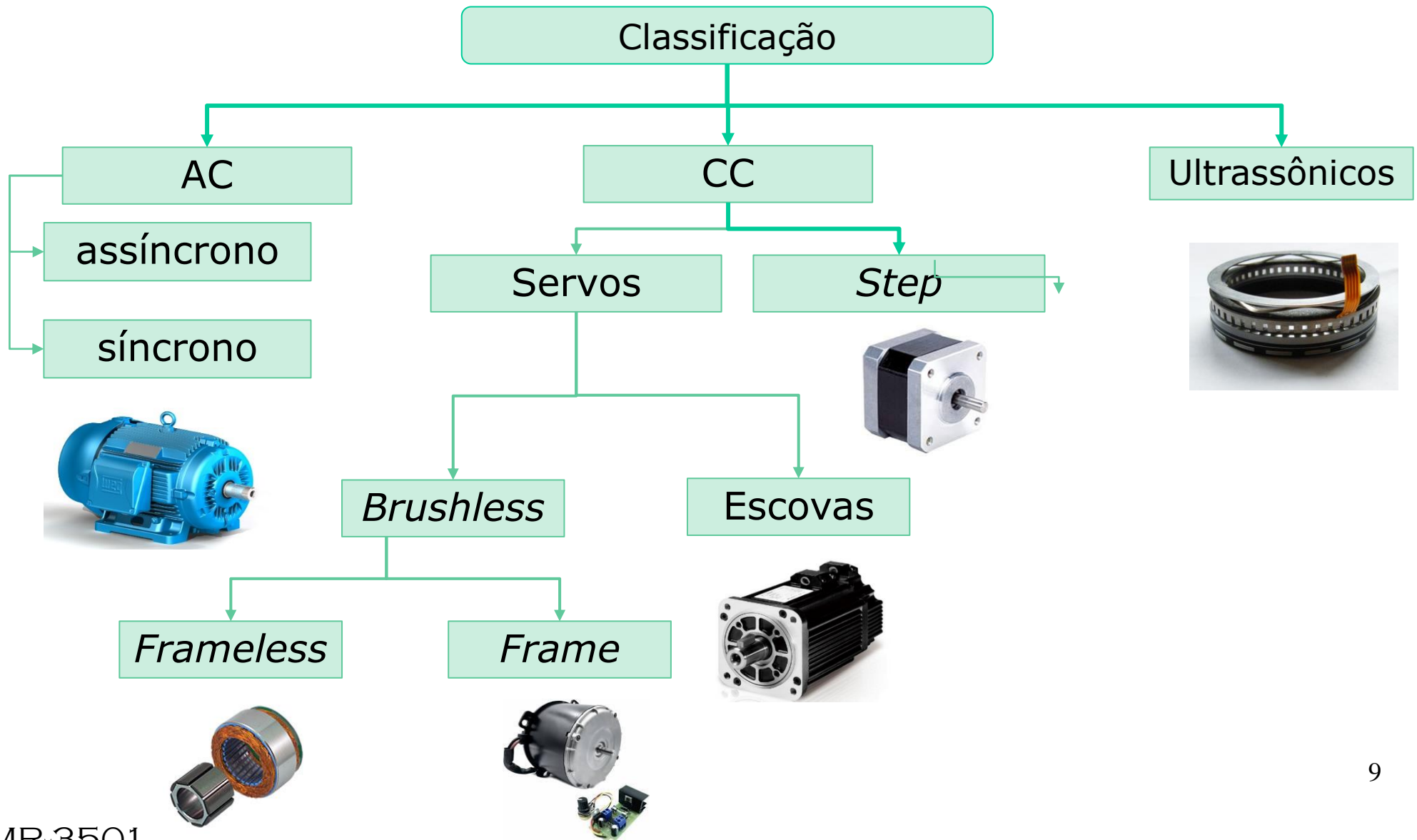
Rotativos



- 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*)

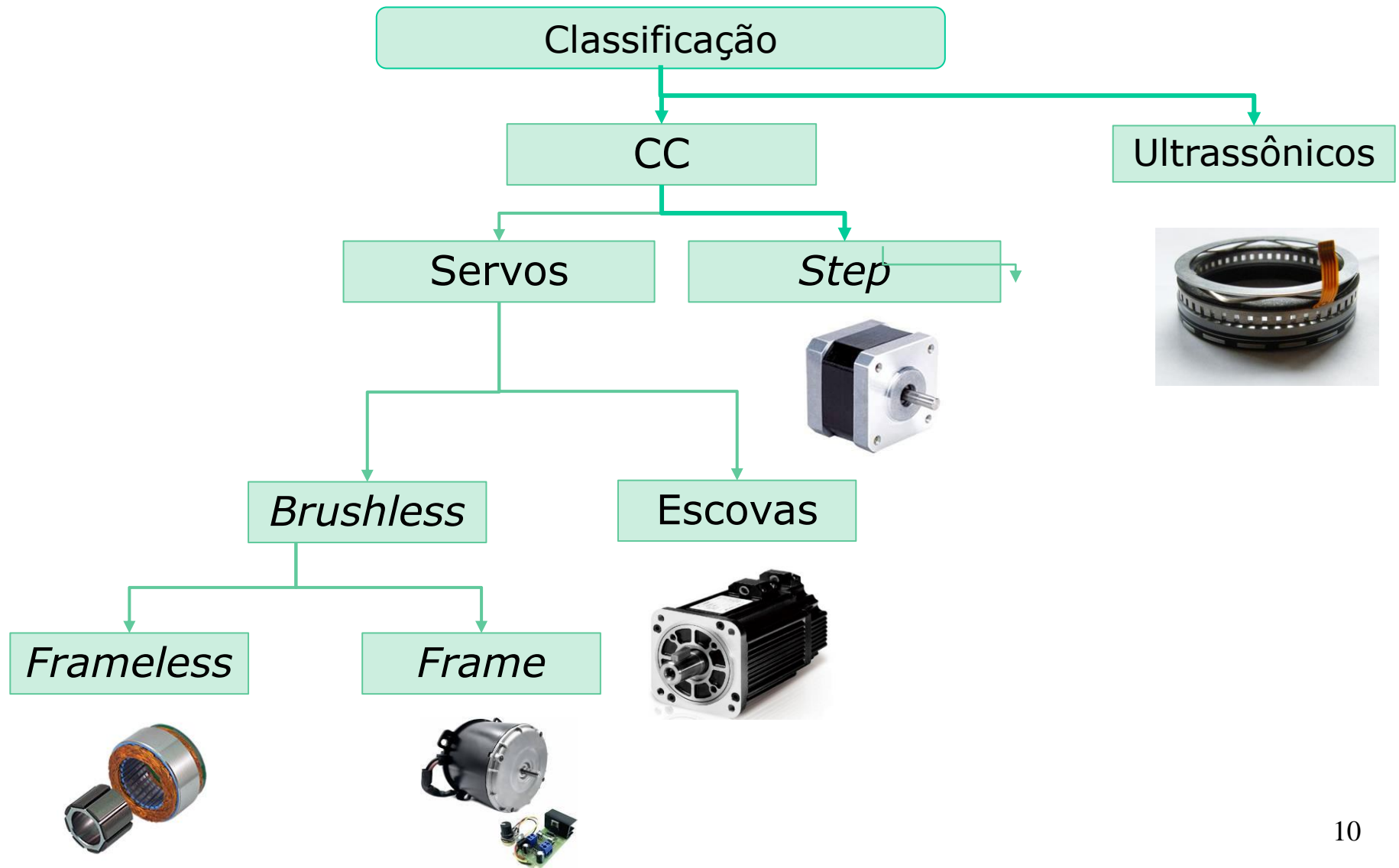


Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos



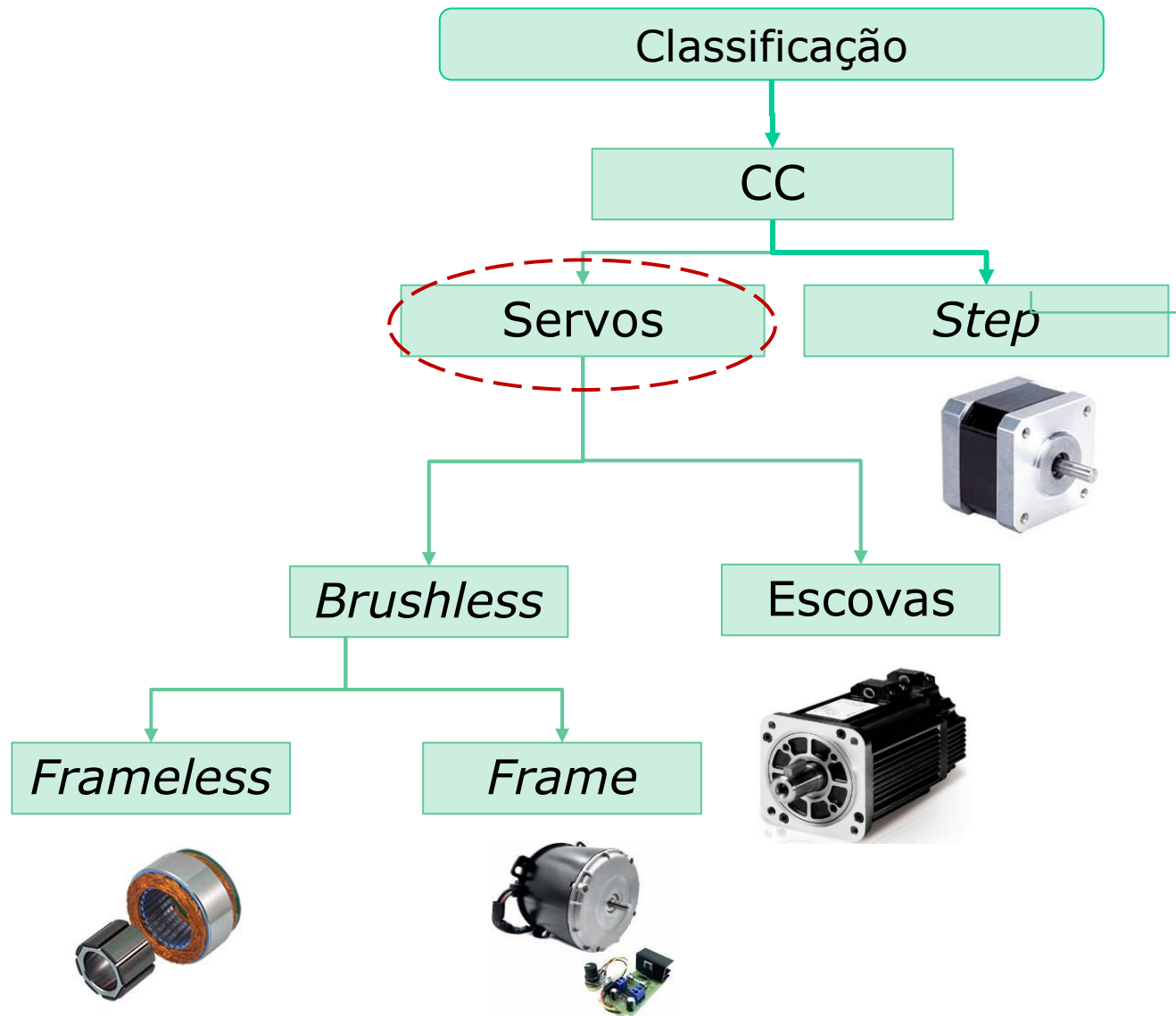


Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos





Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos





Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC

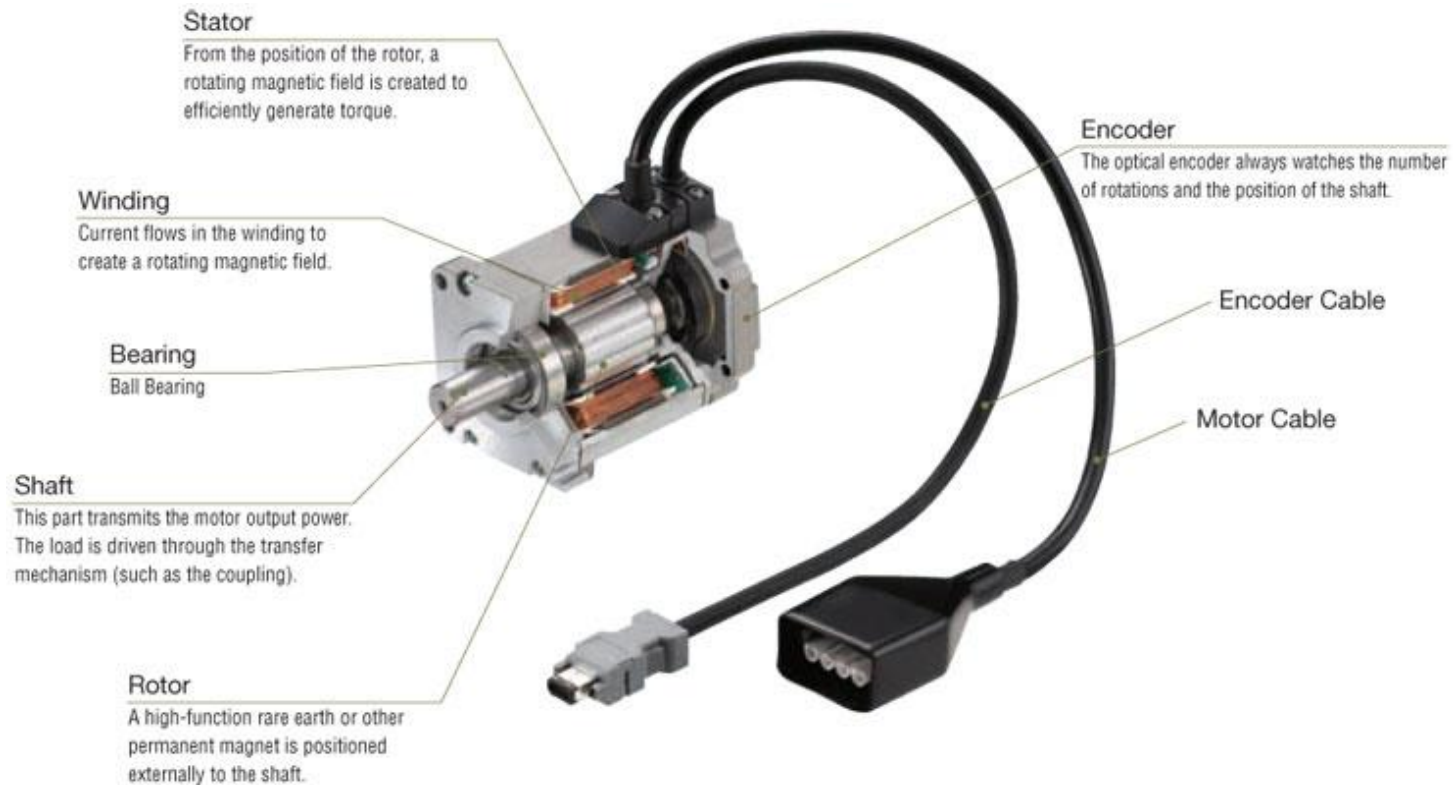
- Amplamente empregados em sistemas UP
- Fáceis de controlar (posicionamento)
- Necessitam de balanceamento especial
- Chaveamento com escovas é fonte de ruído e vibrações
- Chaveamento eletrônico (*brushless*)
- Baixo nível de vibrações (quase isento)
- Empregado generalizado (posicionamento e acionamentos)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



Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC

Constituintes

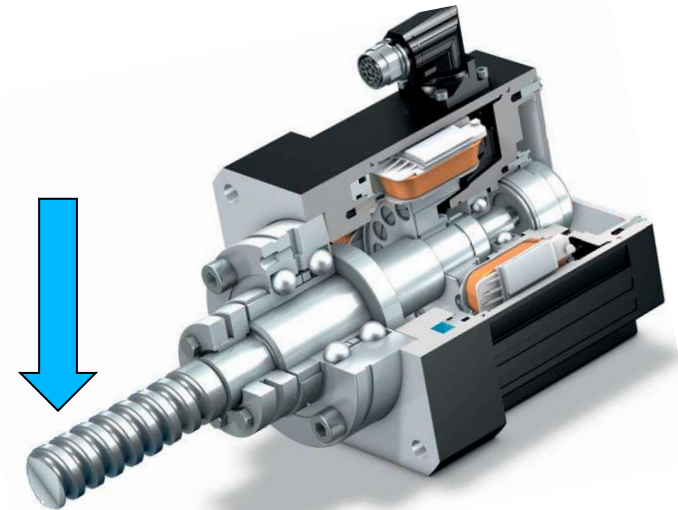
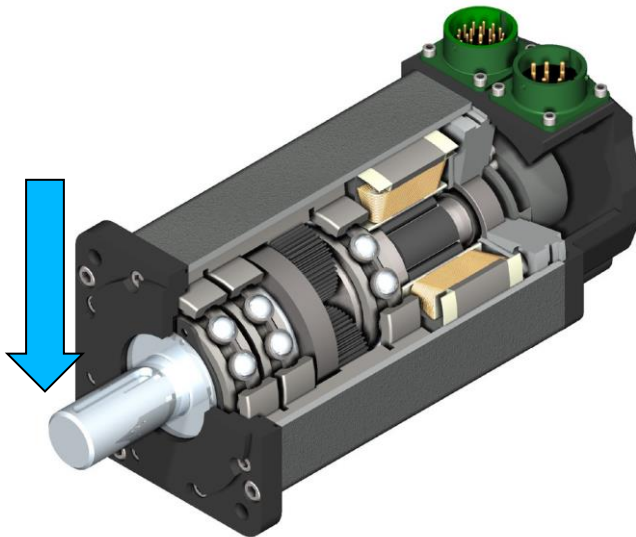




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC

Constituintes

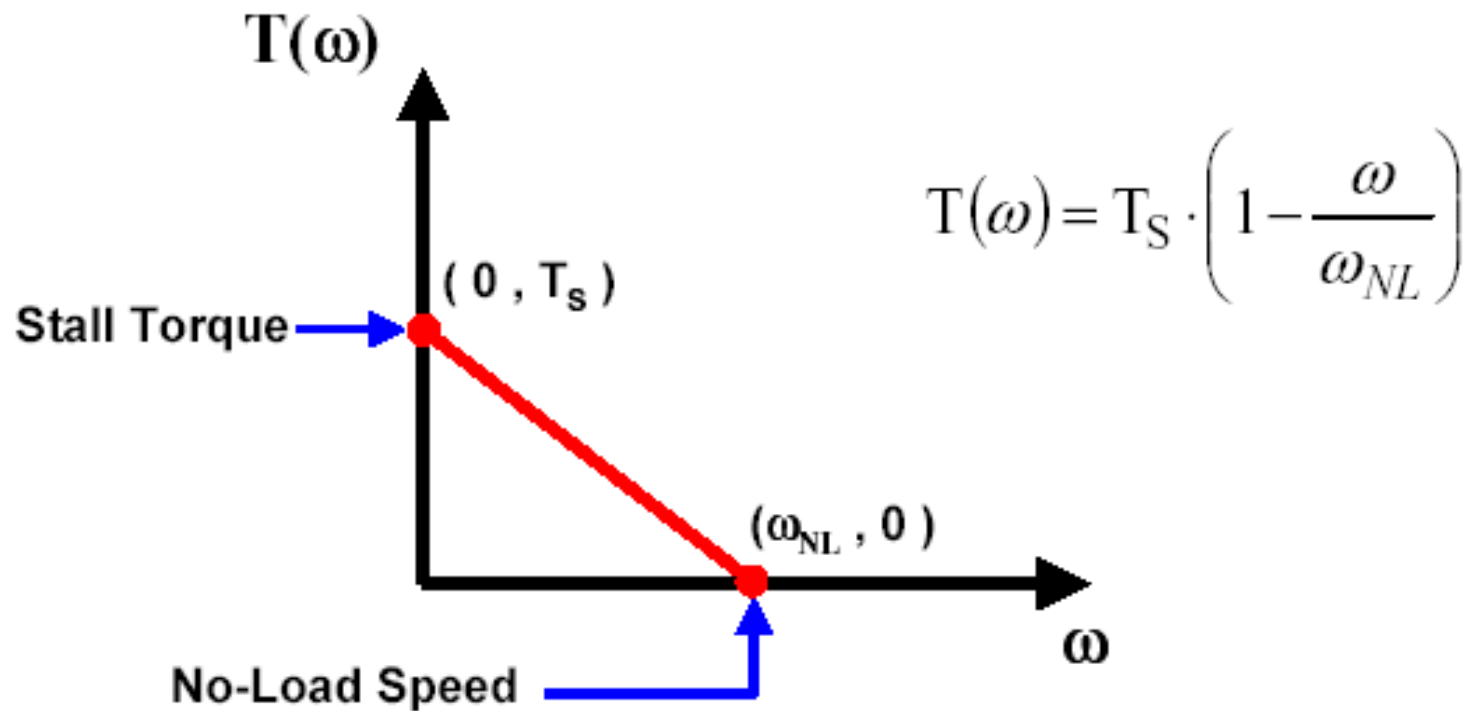




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC

Torque X Velocidade





Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

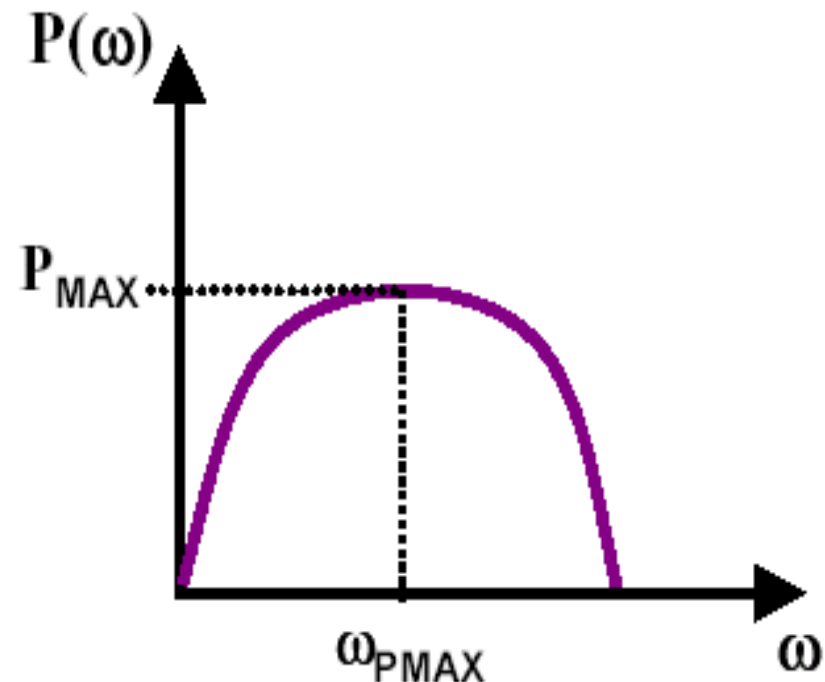
Servos motores CC

Potência

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

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

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

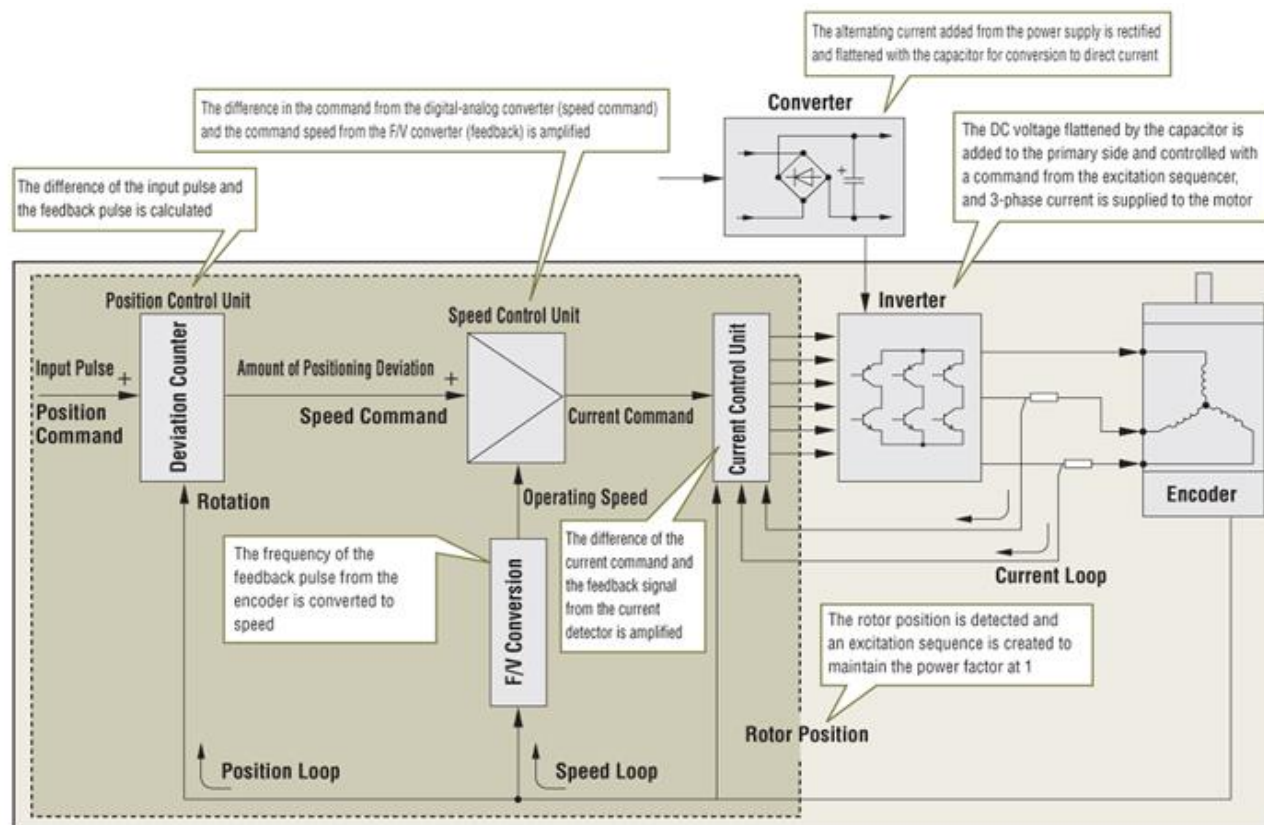




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

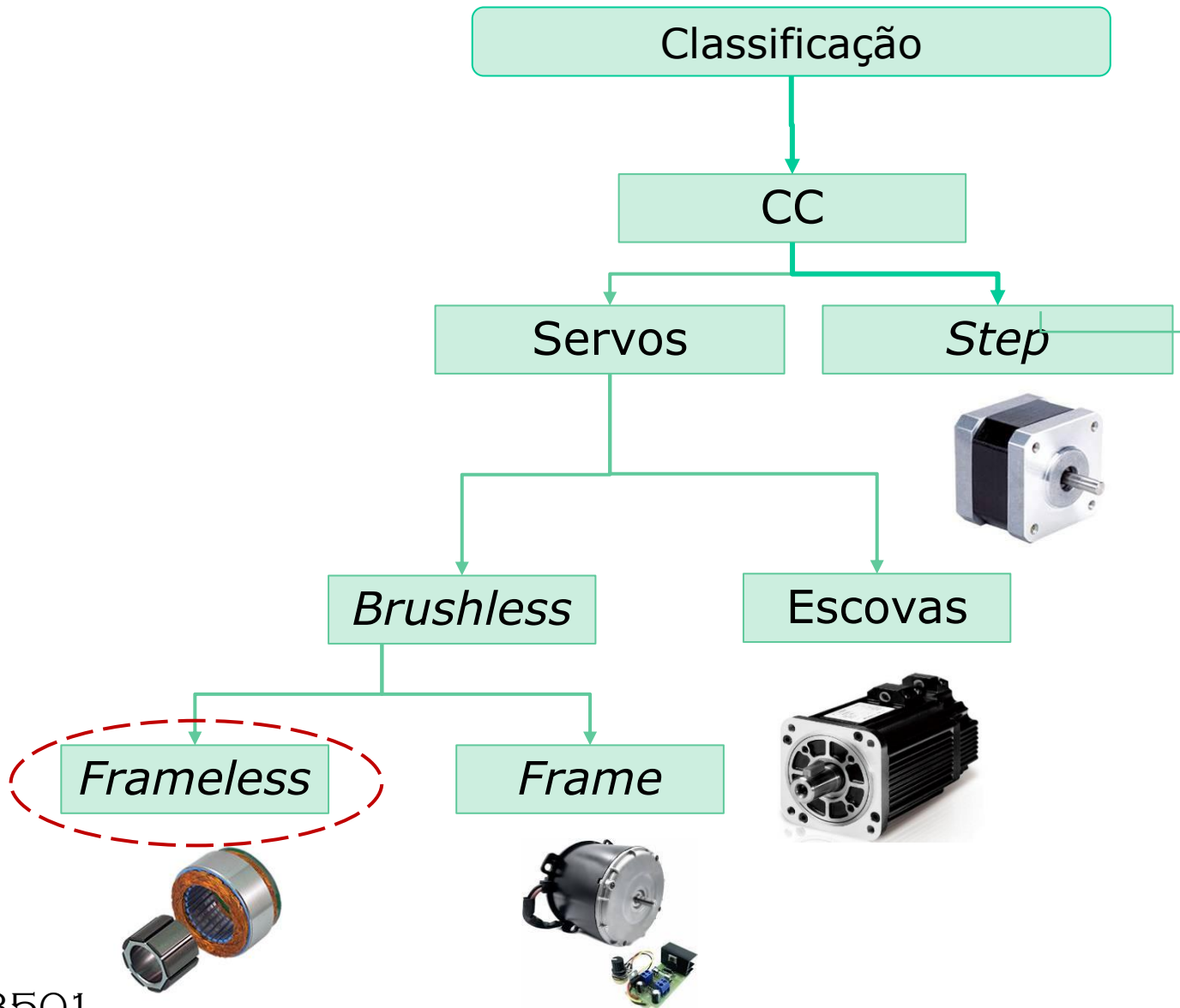
Servos motores CC

Controle





Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos





Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC Brushless

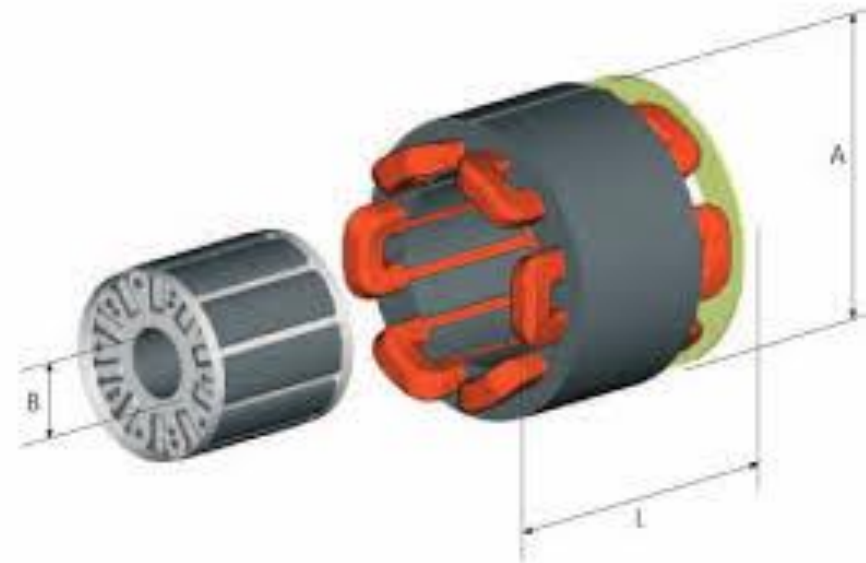
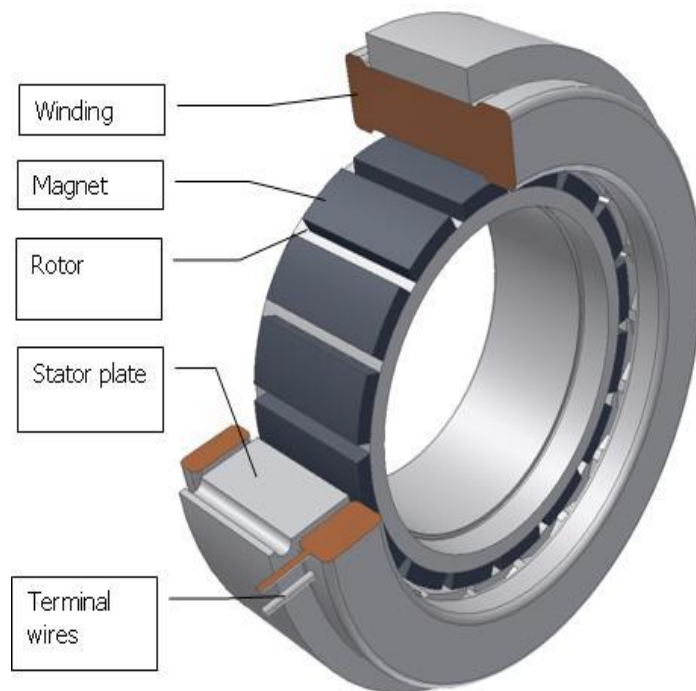
- Empregados em sistemas UP
- Montagem em espaços restritos
- Montagem cuidadosa
- Emprego em baixa velocidade ($< 1 \text{ min}^{-1}$)
- Emprego em acionamento direto (HDs, *spindles*)
- Chaveamento eletrônico
- Baixo nível de vibrações
- Alta dinâmica em ampla faixa de velocidades
- Custo elevado,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



Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC Brushless

Constituintes

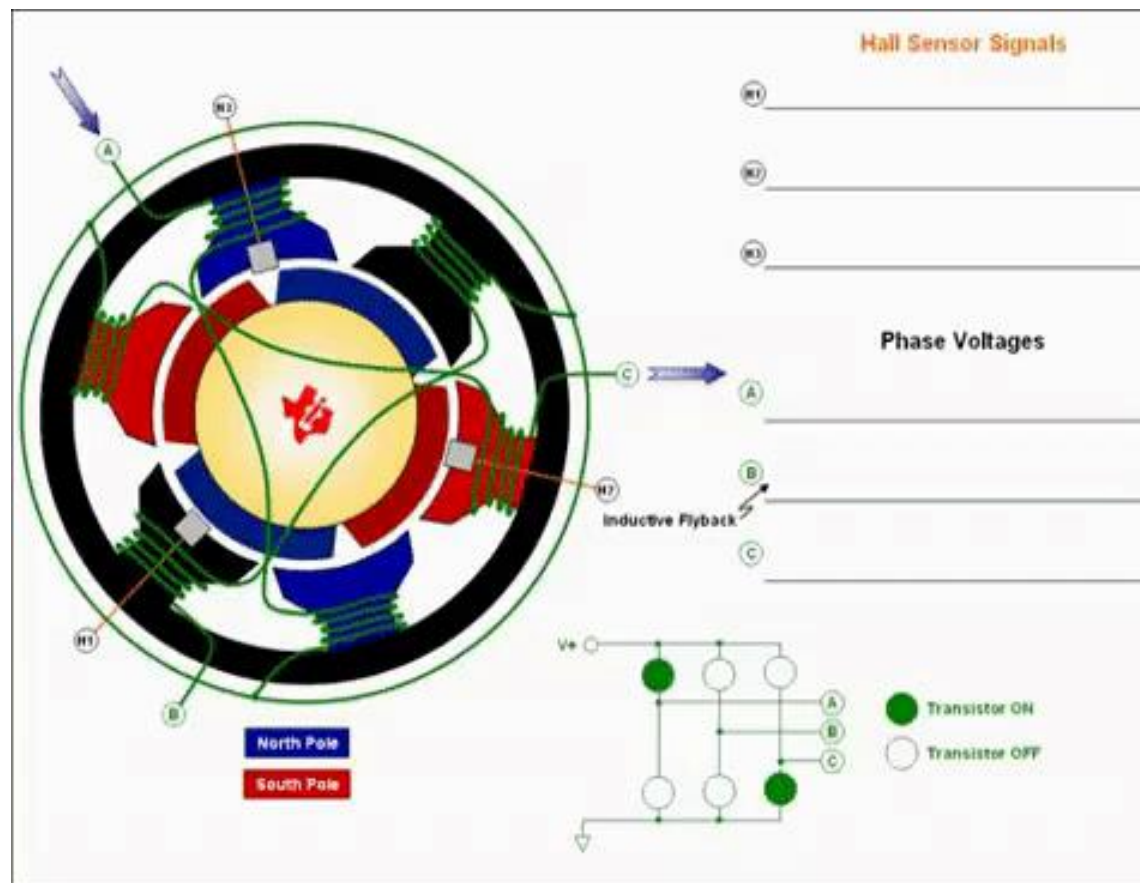




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC Brushless

Controle

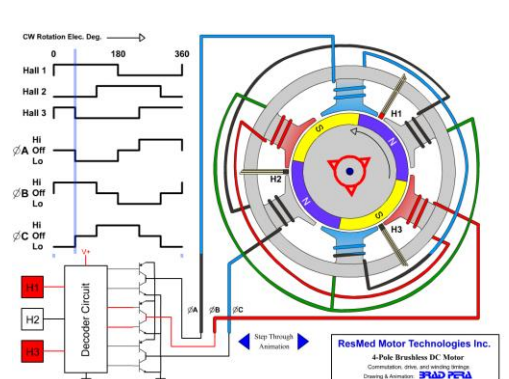
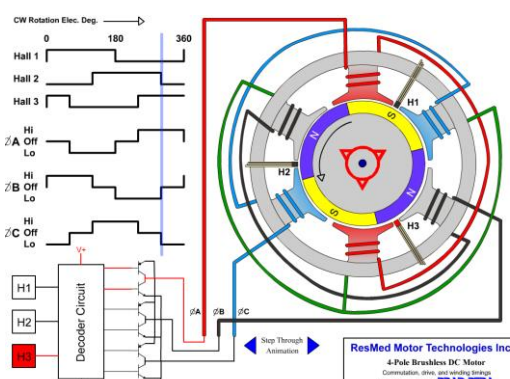
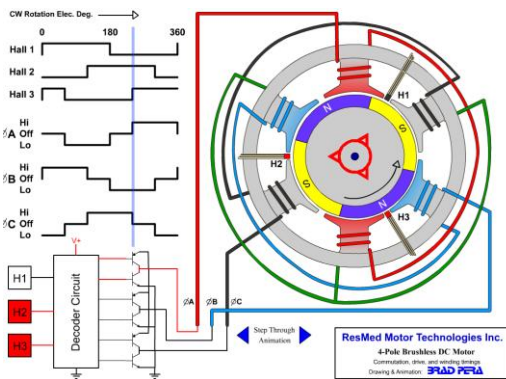
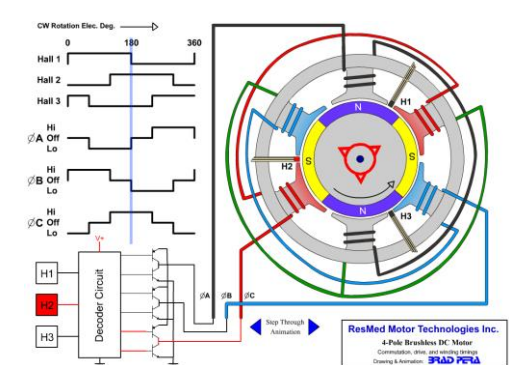
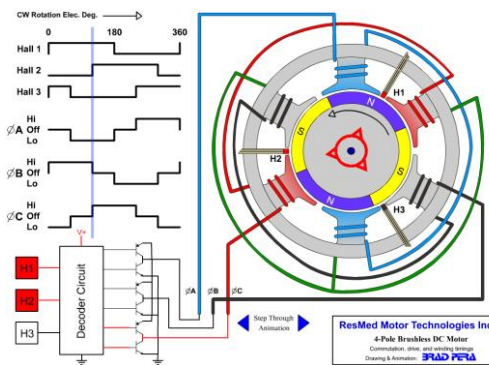
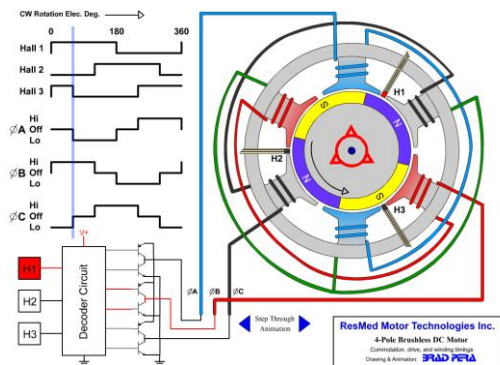




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC Brushless

Controle

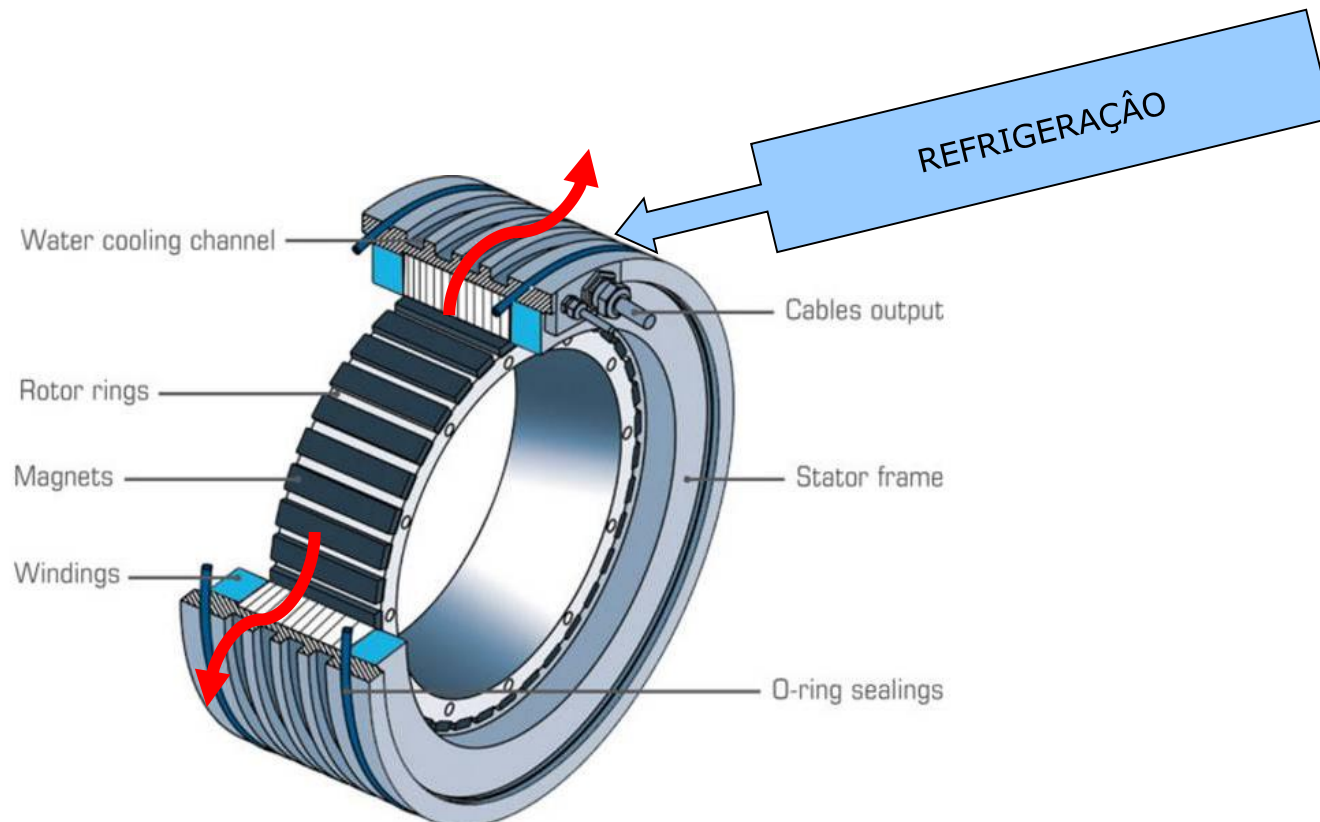




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC Brushless

Problema do aquecimento





Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC Brushless

Exemplos



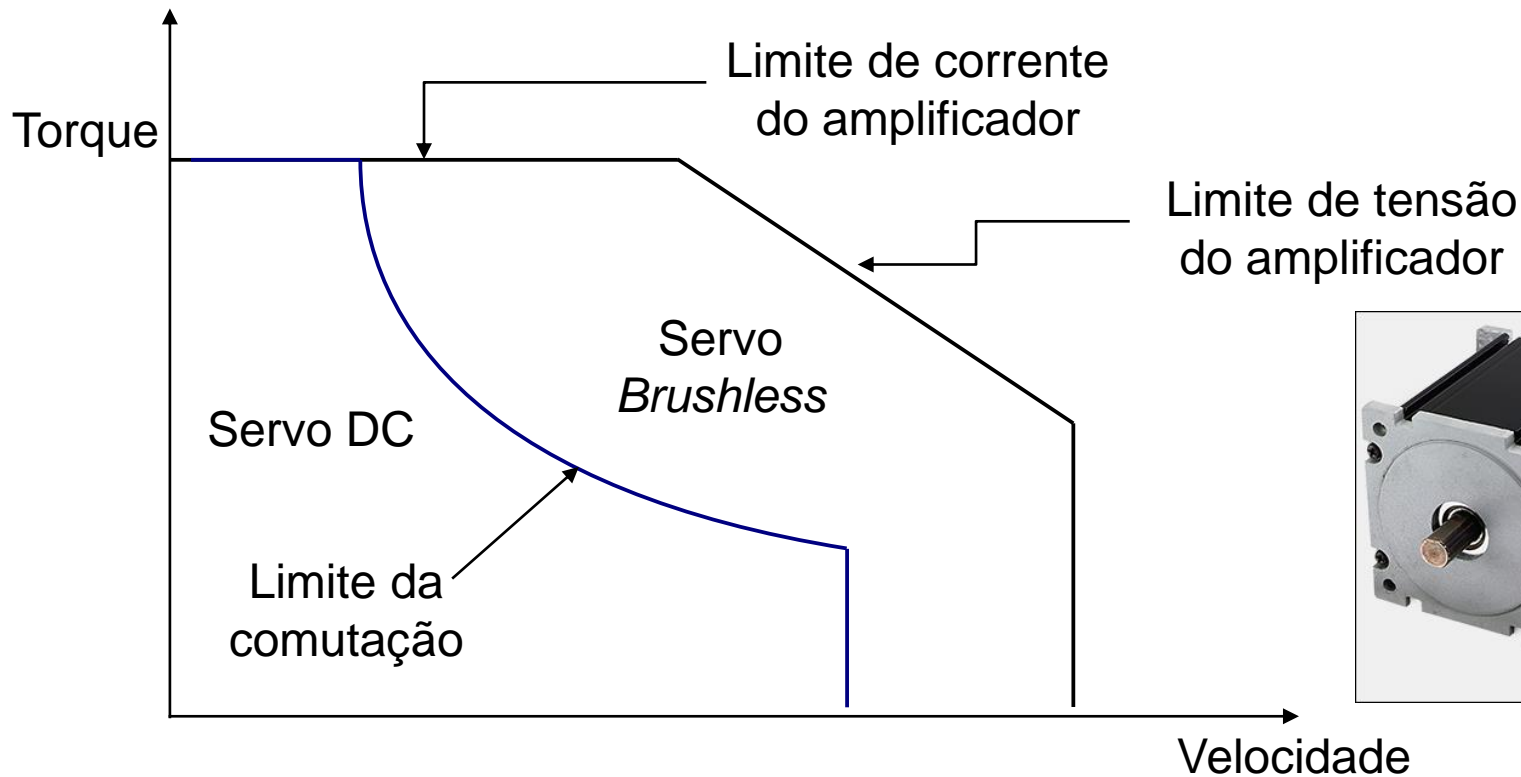


Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Servos motores CC Brushless

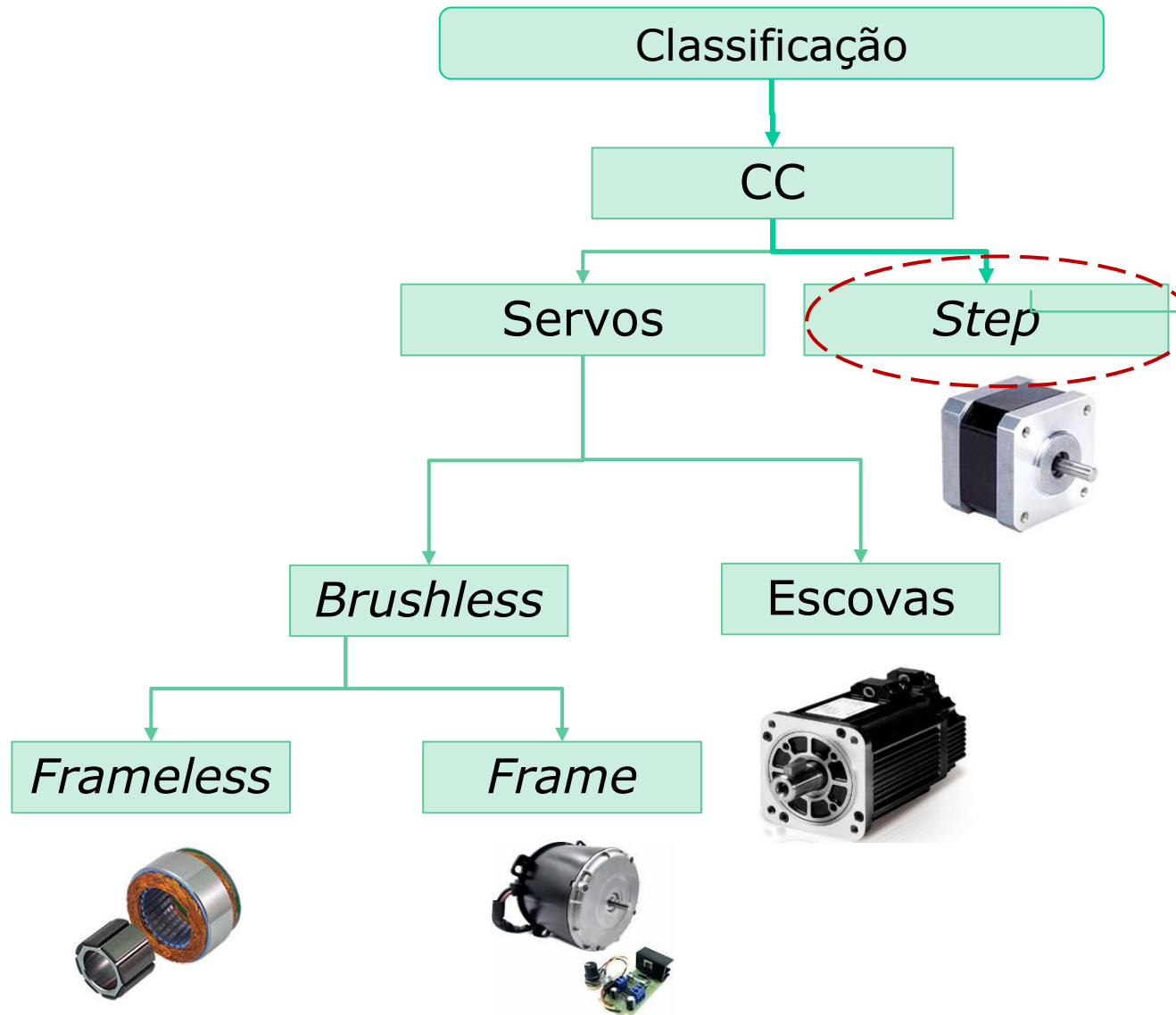
VS

Servos motores CC Brushled





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:

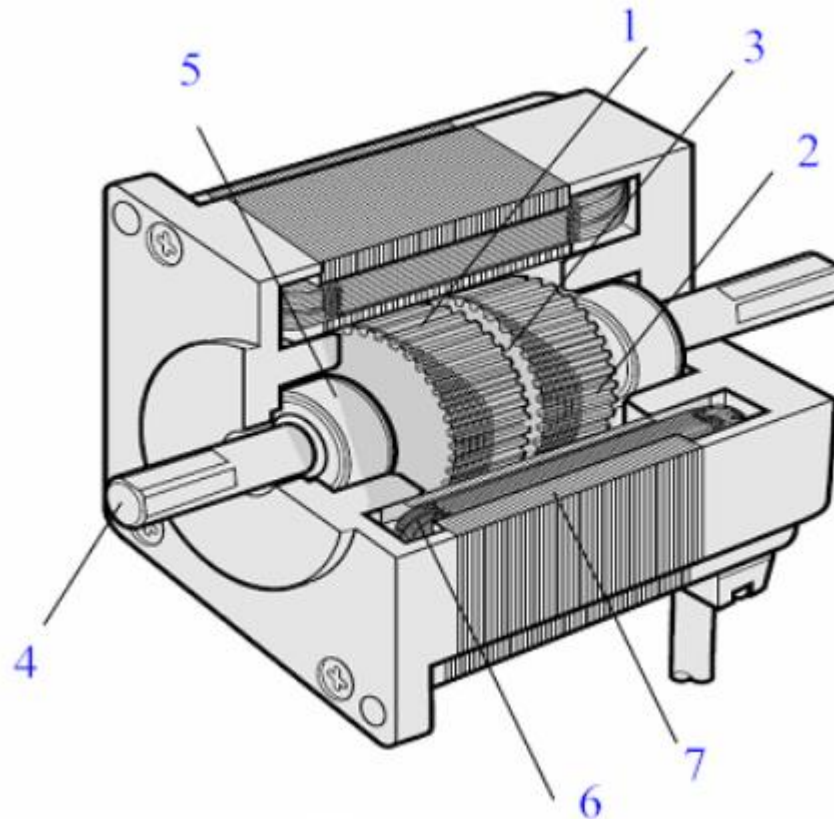
- motores à relutância variável
- motores a imã permanente
- motores híbridos



Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Motores de passo

Constituintes



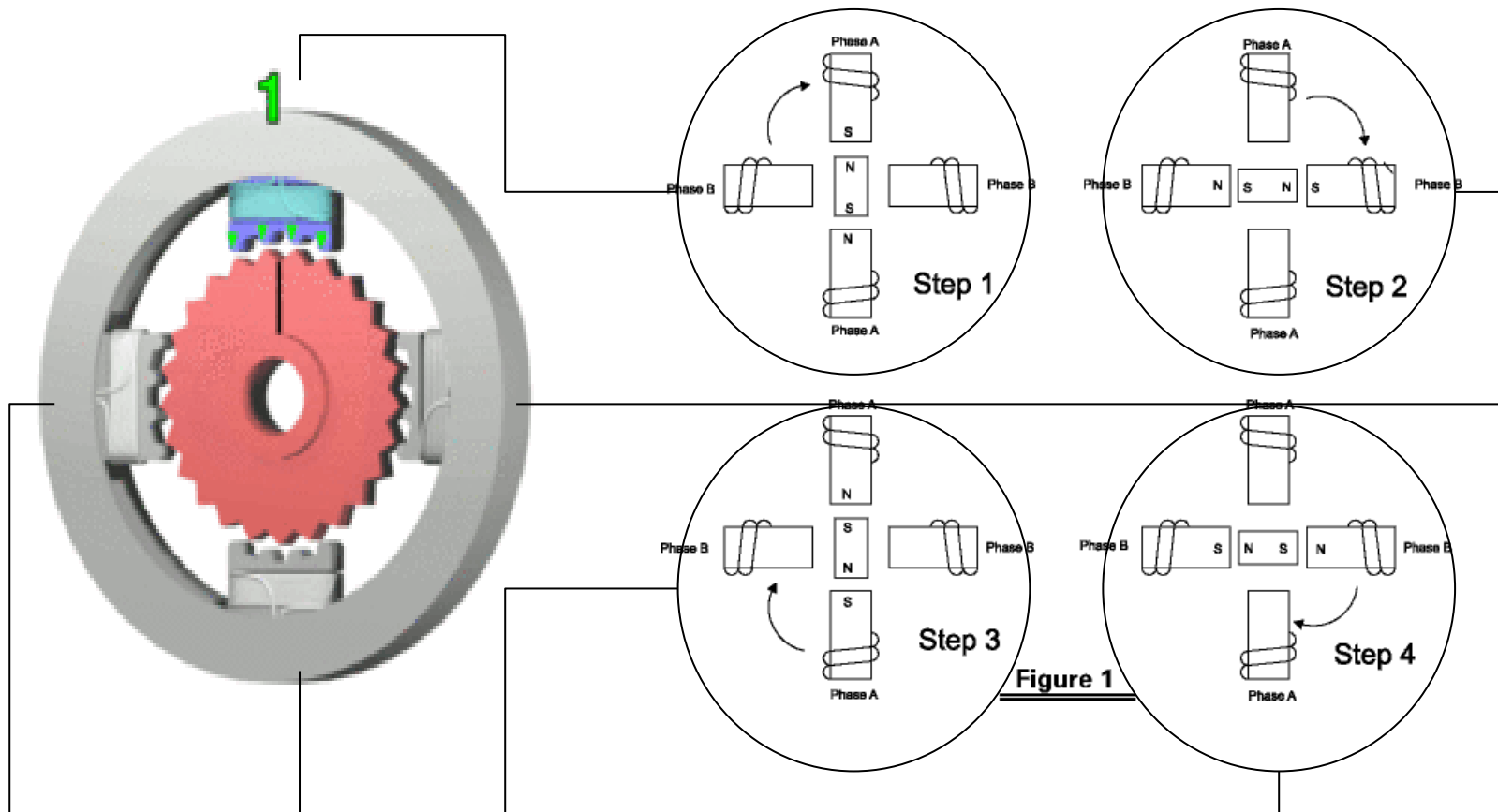
1. Rotor
2. Imãs permanentes
3. Eixo
4. Mancais de rolamento
5. Bobinas
6. Estator



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

Servos motores CC Passo

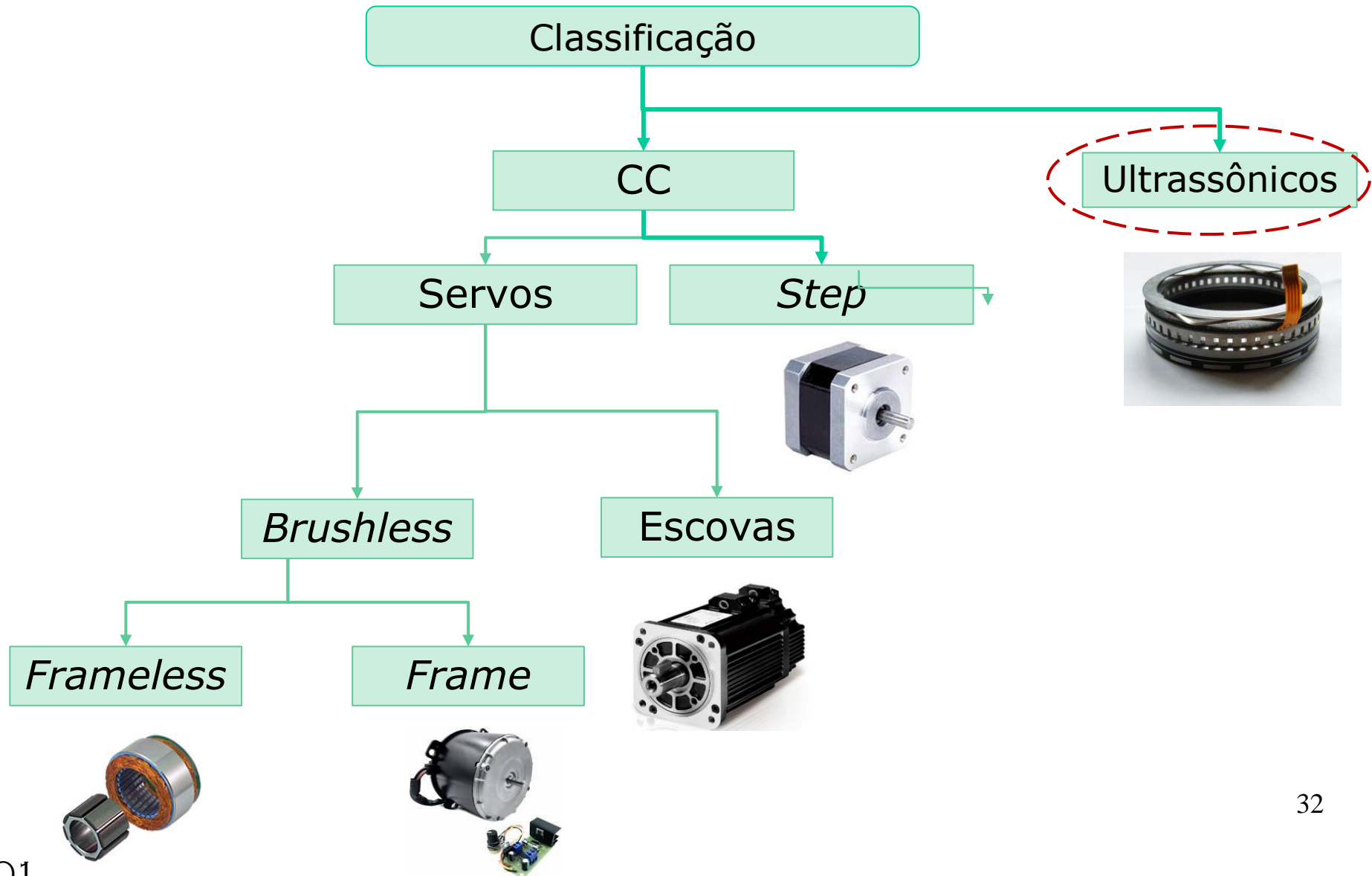
VS

Servos motores CC 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

Ultrassônicos

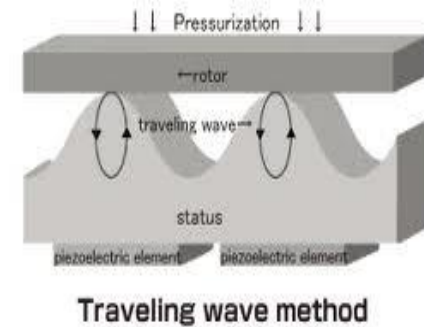
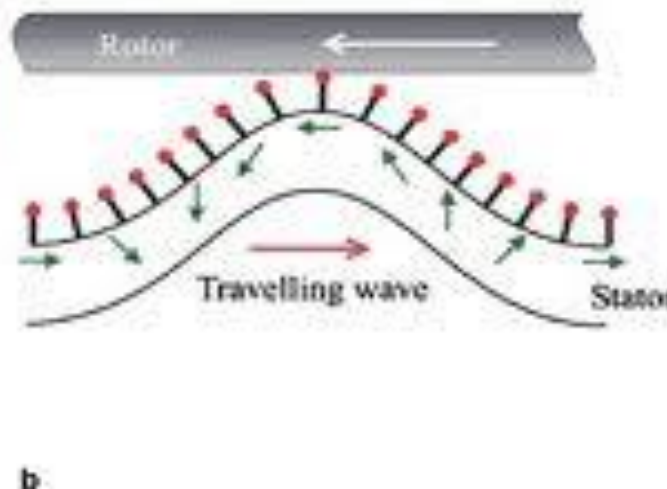
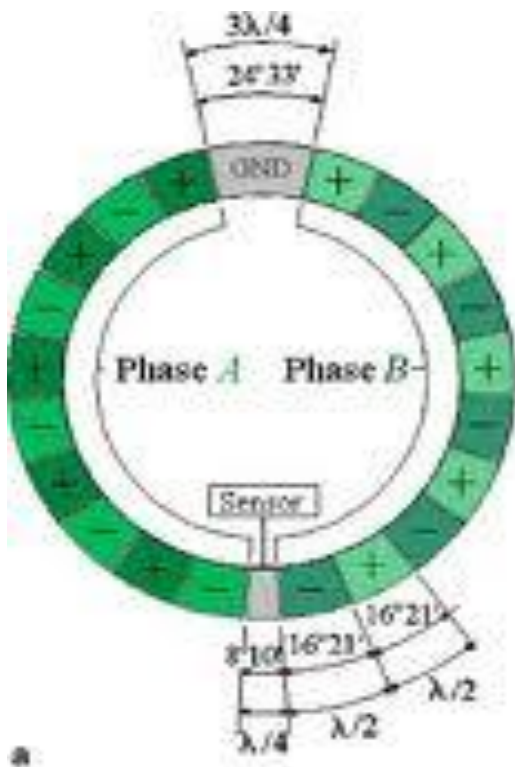
- Motores Ultrassônicos são baseados em um novo princípio de funcionamento que não envolve os princípios do magnetismo utilizado nos motores convencionais.
- Estes apresentam a vantagem de operarem em baixa velocidade, terem alto torque e alta dinâmica de resposta, além de silenciosos e não magnéticos.
- 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

Ultrassônicos

Princípio de funcionamento



Traveling wave method

PI Piezo Motor Precision Positioning Solutions



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

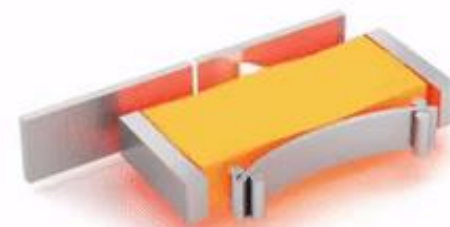
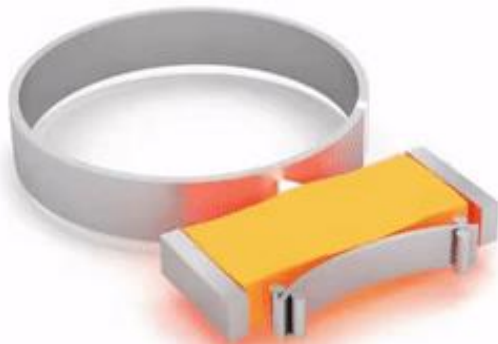
Inertia Motors PiezoWalk® Ultrasonic PiezoMike Mini-Rod



Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Ultrassônicos

Princípio de funcionamento



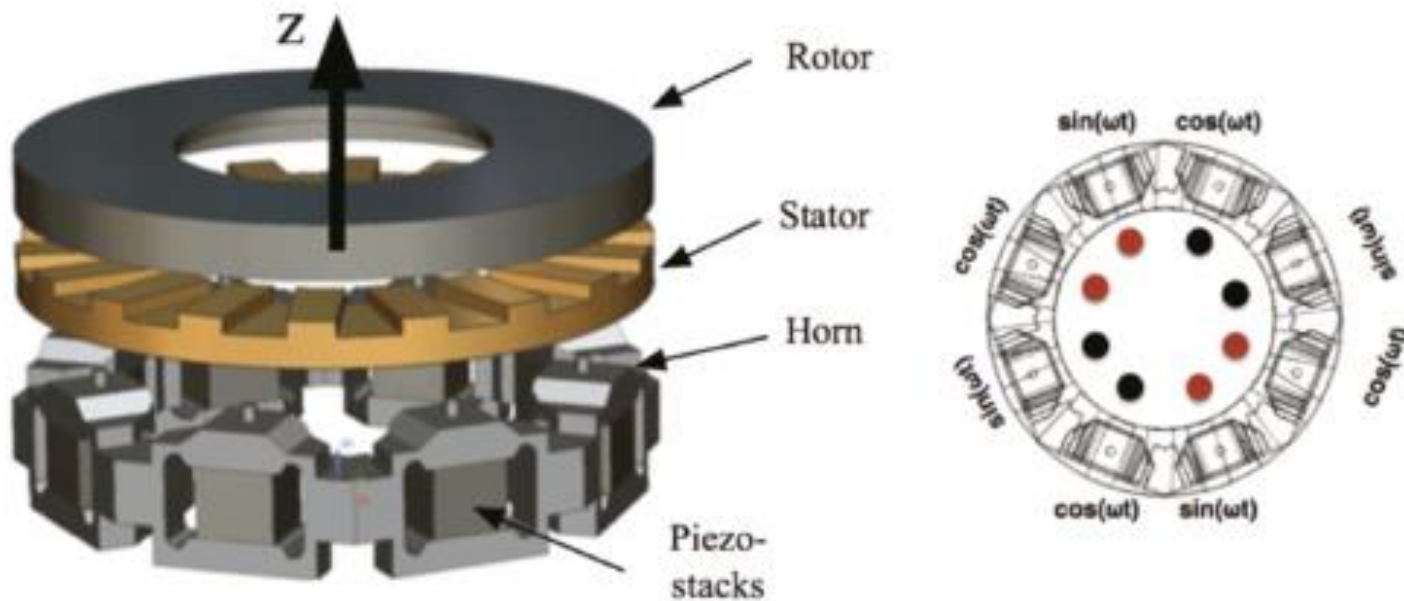
PI



Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Ultrassônicos

Constituintes

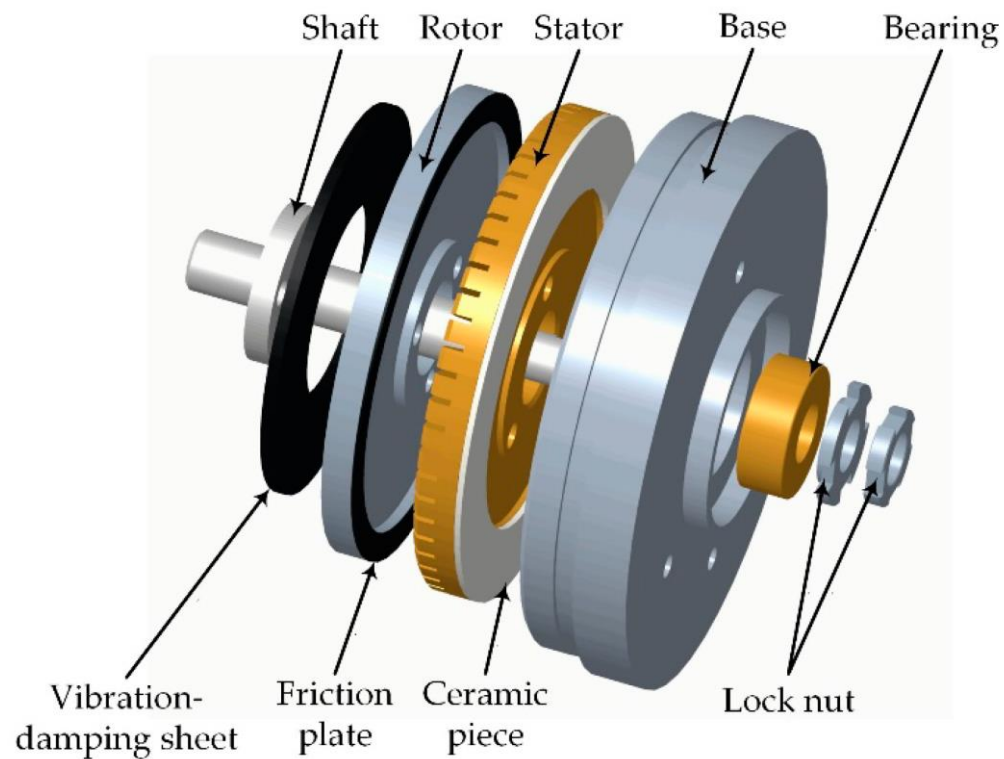




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Ultrassônicos

Constituintes

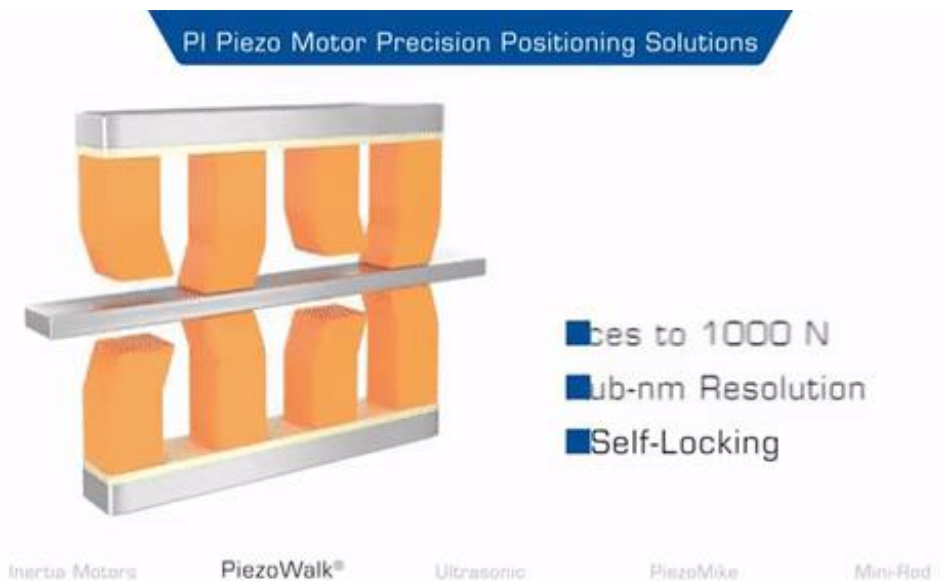
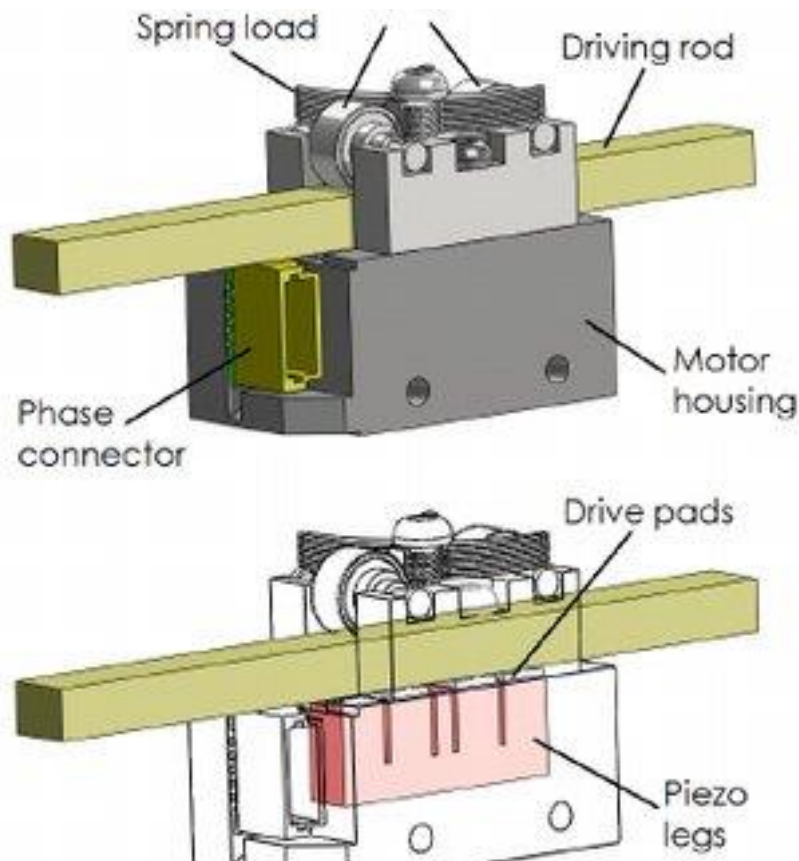




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Ultrassônicos

Constituintes

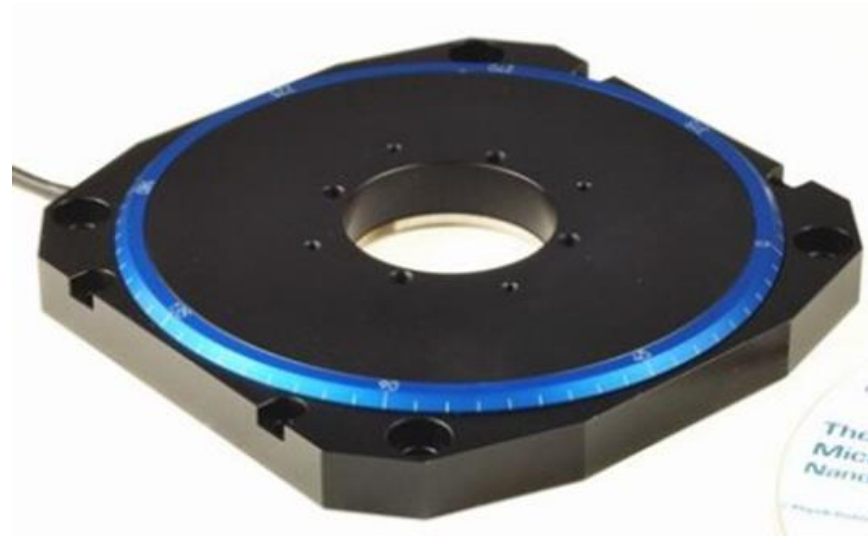




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Ultrassônicos

Exemplos de aplicações

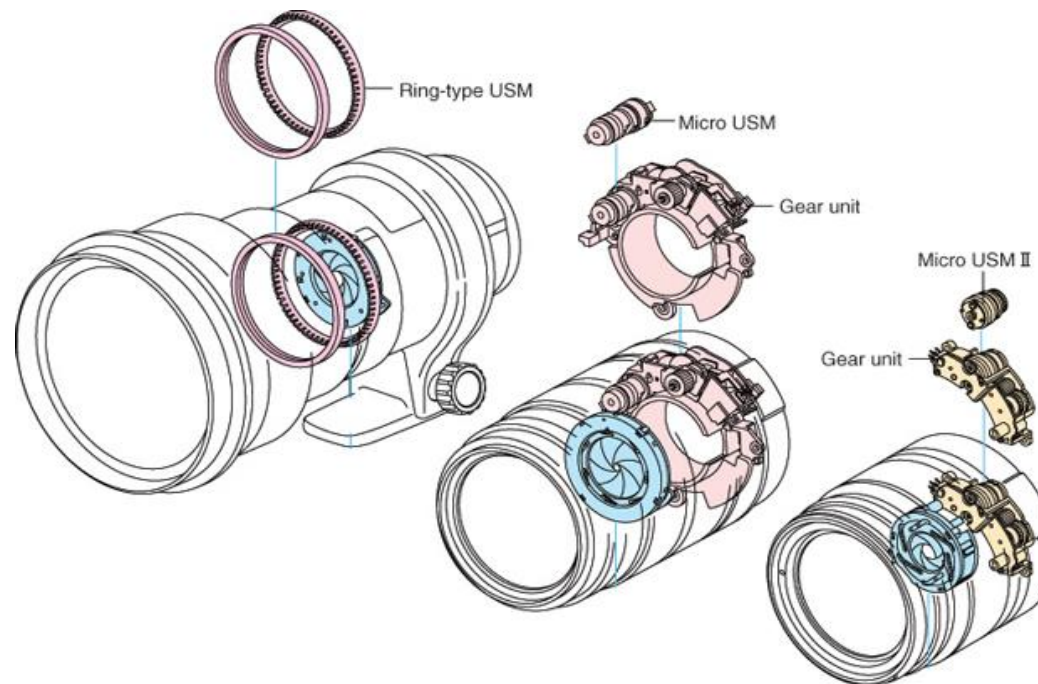




Atuadores – Eletromecânicos - Rotativos

Ultrassônicos

Exemplos de aplicações

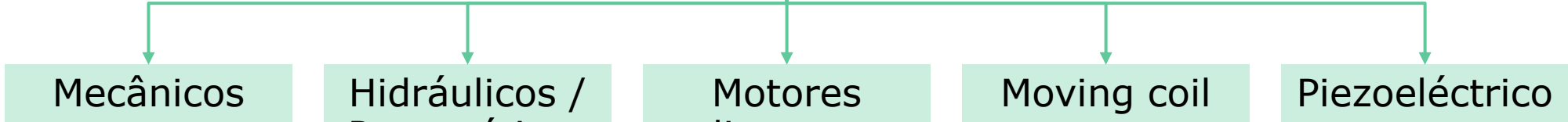


The three types of USM focus motor showing where they fit in the lenses.

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



Atuadores 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 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)?

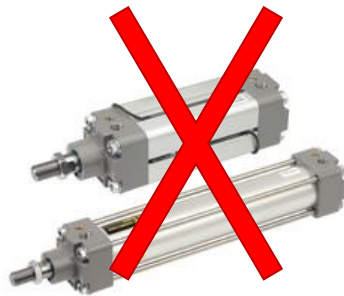


Atuadores Lineares

Mecânicos



Hidráulicos /
Pneumáticos



Motores
lineares



Moving coil



Piezoelétrico



- 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 Lineares

Mecânicos

- Em geral baseados parafusos micrometros ou parafusos diferenciais
- Exatidão máxima de 1 μm
- Confiáveis
- Baixo custo
- Podem ser motorizados





Atuadores Lineares

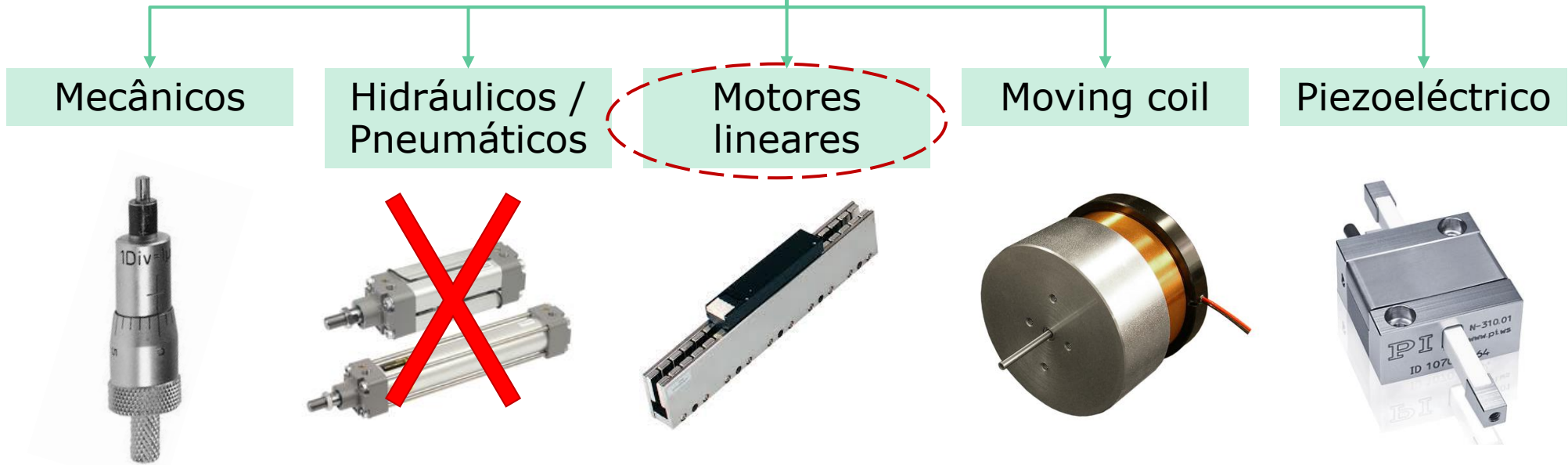
Mecânicos

Exemplos de aplicações





Atuadores 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 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 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 Lineares

Motores lineares

Características

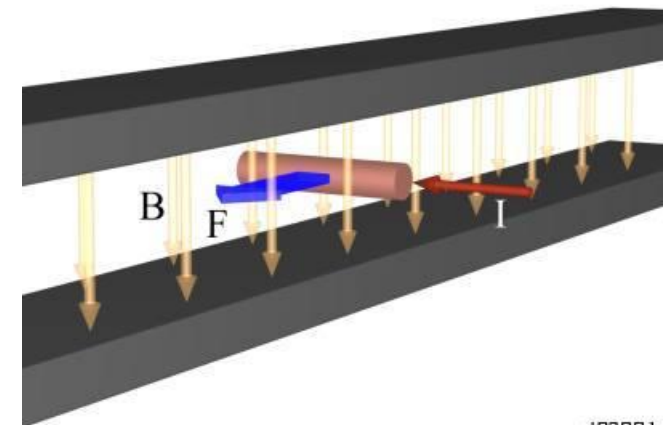
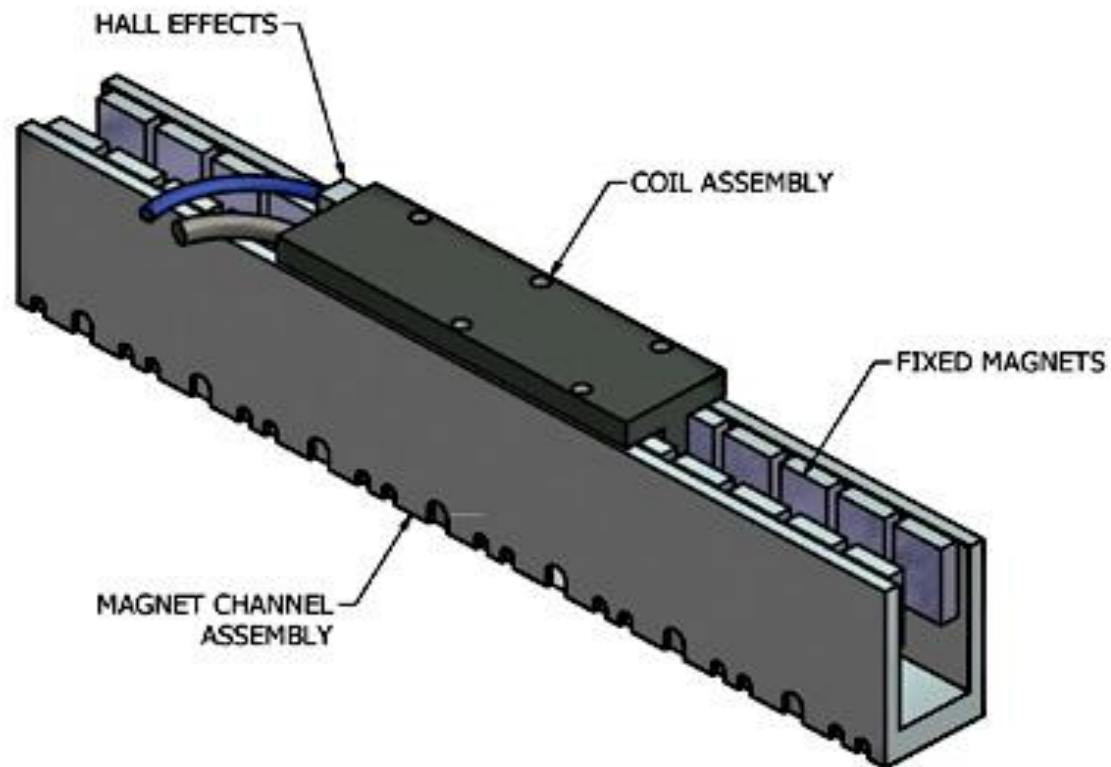
- alta velocidade e aceleração
- operação suave e alta precisão de posicionamento
- alta gama de velocidades
- sem limites de deslocamento
- alta rigidez
- simplicidade mecânica
- sem *backlash* mecânico;
- forças múltiplas em um mesmo estator



Atuadores Lineares

Motores lineares

Constituintes



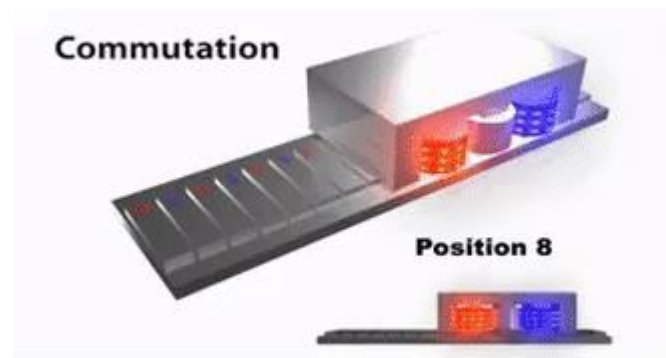
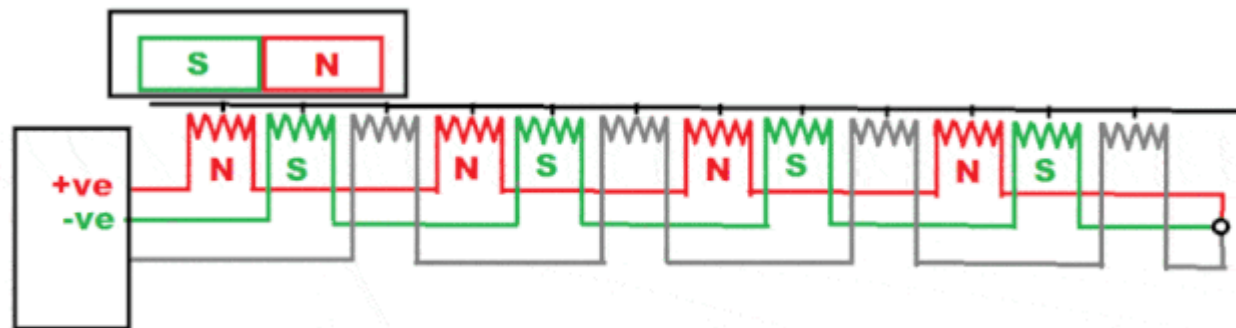
JP2001



Atuadores Lineares

Motores lineares

Funcionamento

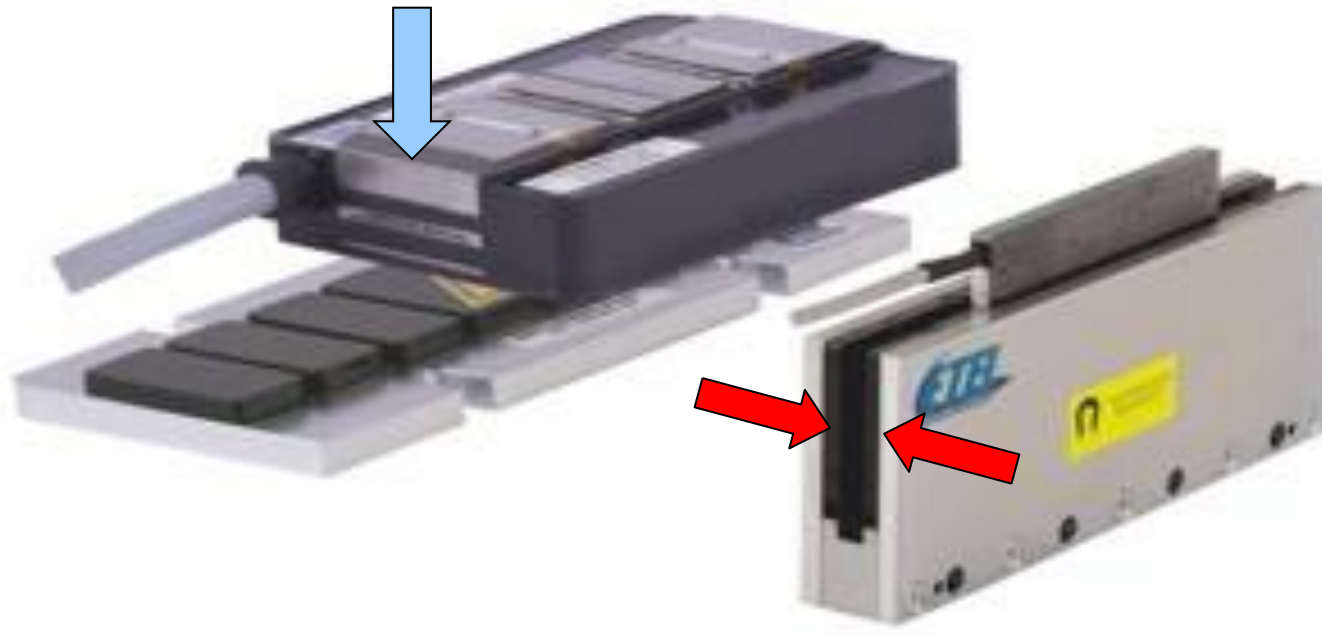




Atuadores Lineares

Motores lineares

Tipos





Atuadores Lineares

Motores lineares

Aplicações

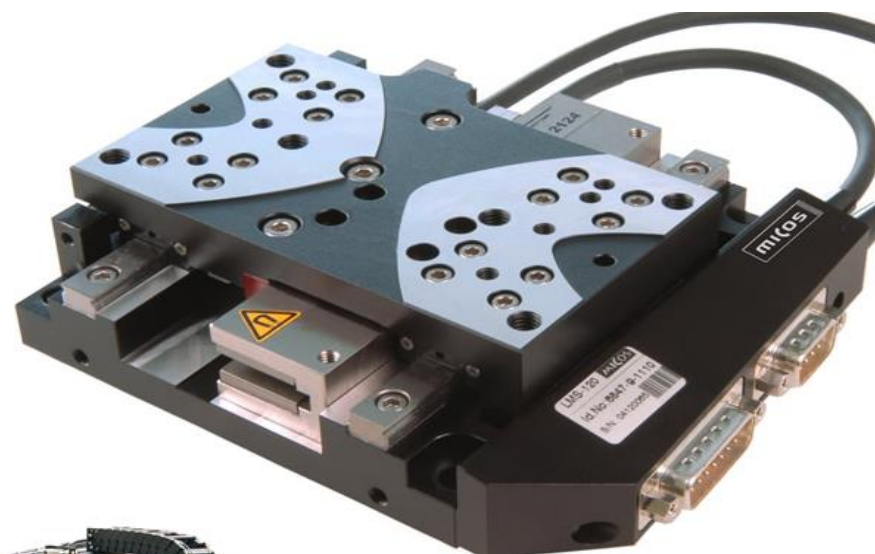
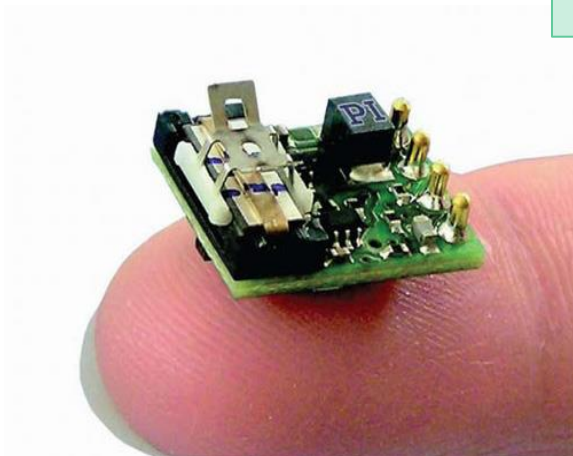
- inspeção e teste de semicondutores
 - manipulação de materiais compósitos
 - produção de placas de circuitos impresso
 - posicionadores X-Y
 - posicionamentos em múltiplos estágios
 - manipuladores e movimentadores (*pick and place*)
 - montagens automáticas
 - máquinas CNC
 - outros



Atuadores Lineares

Motores lineares

Aplicações





Atuadores 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]

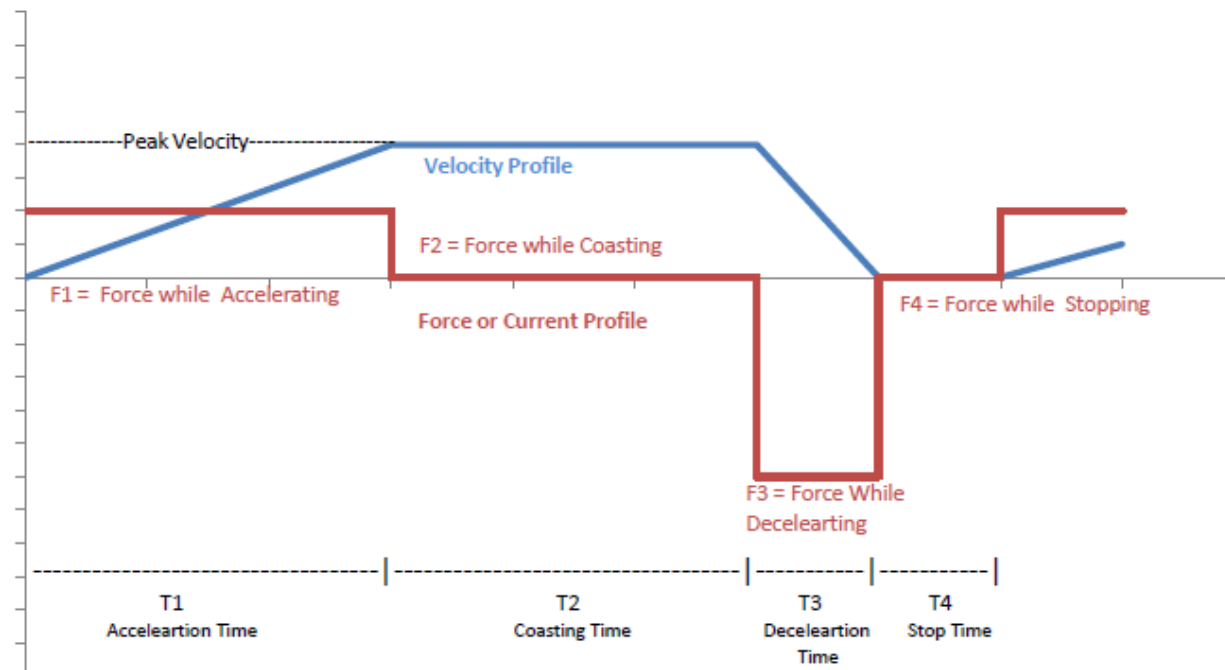


Atuadores Lineares

Motores lineares

Dimensionamento

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

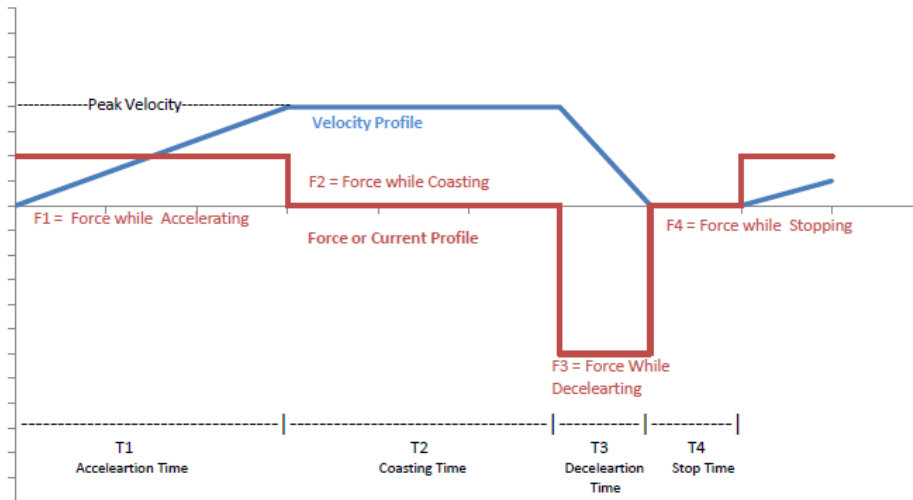




Motores lineares

Dimensionamento

➤ decompor t em:



t1 – tempo de aceleração

t2 – tempo de deslocamento efetivo

t3 – tempo de desaceleração

t4 – tempo de parada

sendo: $t = t1 + t2 + t3 + t4$

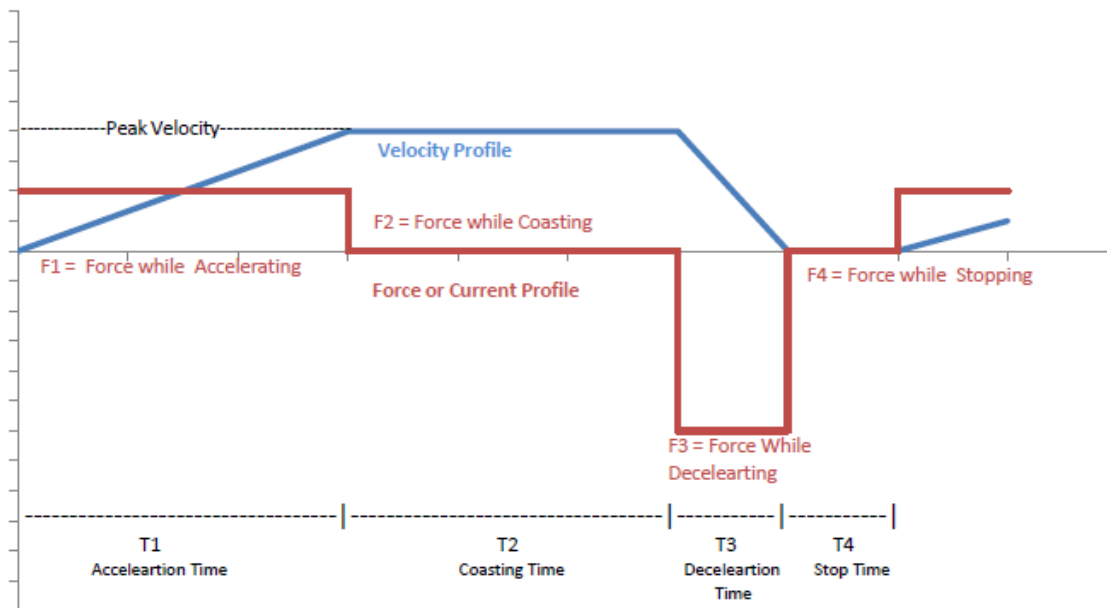
E o ciclo de movimento é dado por: $Dc = \frac{t}{t+t_4}$



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

Frms - média quadrática das forças

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

Kf - constante de força [N/A]

Ke - constante BEMF [V/m/s]

R - impedância do motor [Ω]

f - frequência [Hz]

P - potência [W]



Motores lineares

Dimensionamento

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

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

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

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

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

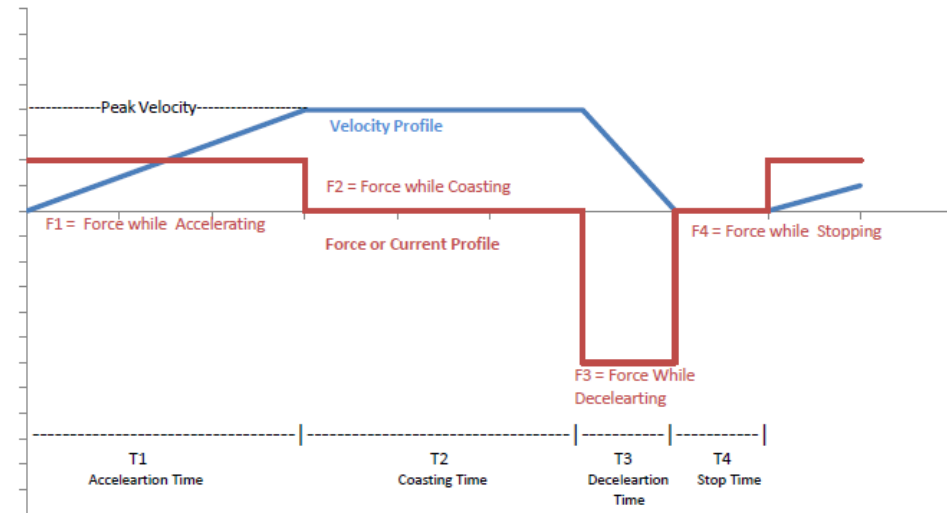
$F_2 =$ Friction force

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

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

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

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



Deve ser menor do que a força contínua do motor

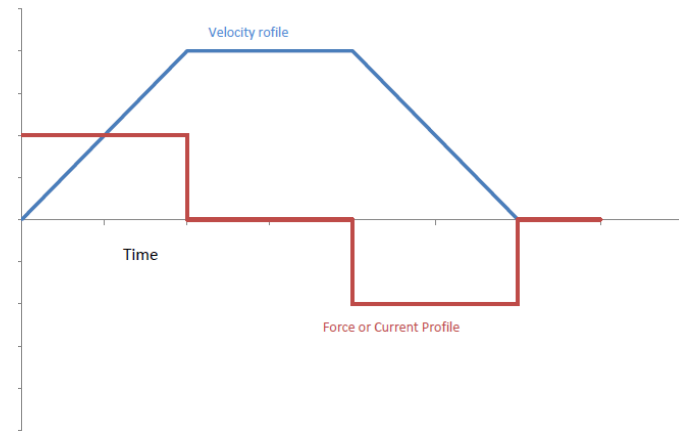
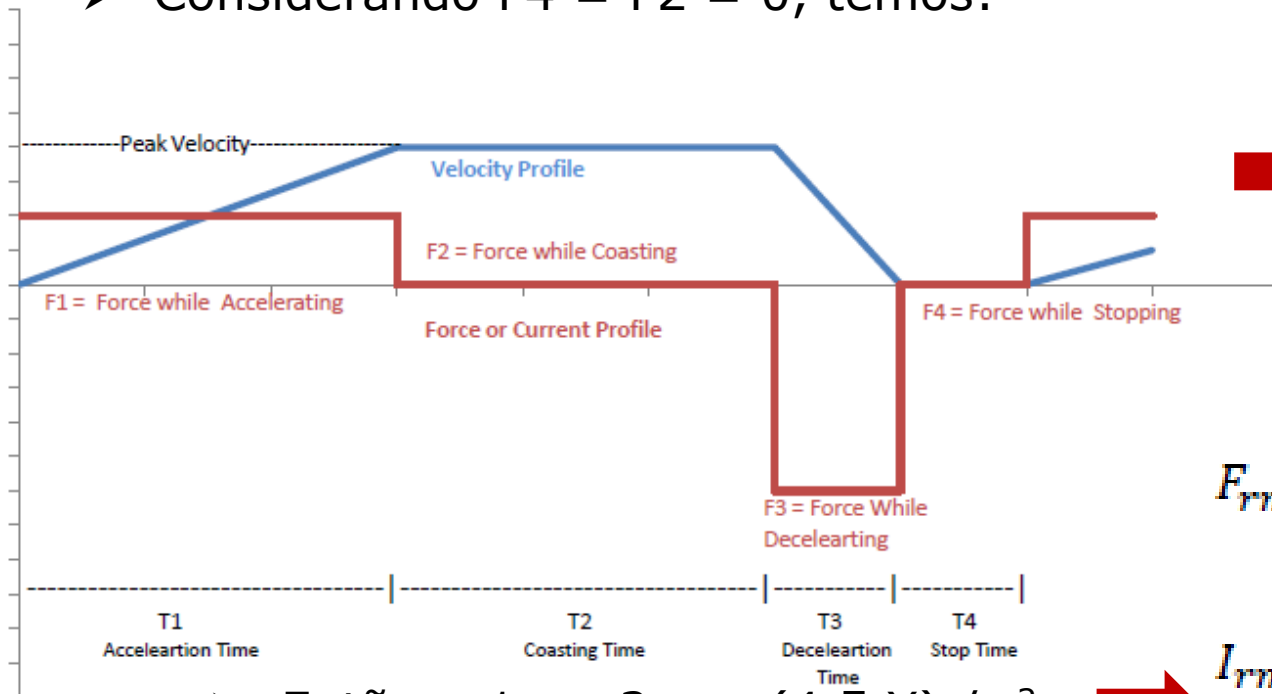
Deve ser menor do que a potência contínua do motor



Motores lineares

Dimensionamento

➤ Considerando $F4 = F2 = 0$, temos:



➤ Então: $a1 = a2 = a (4,5.X) / r^2$

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

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

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

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



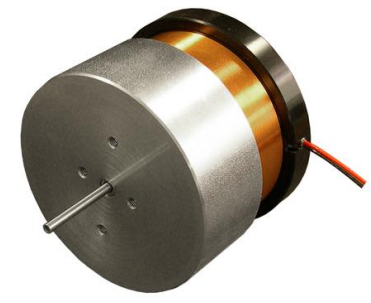
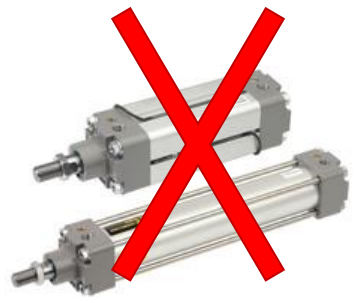
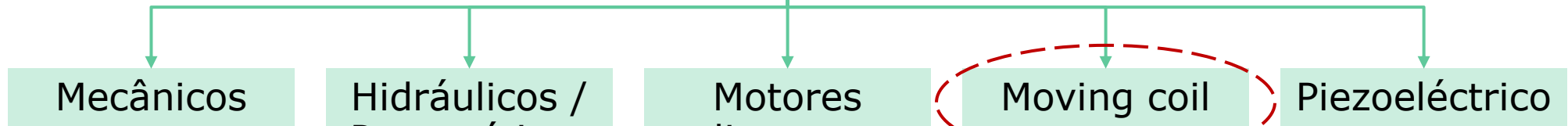
Motores lineares

Exemplos





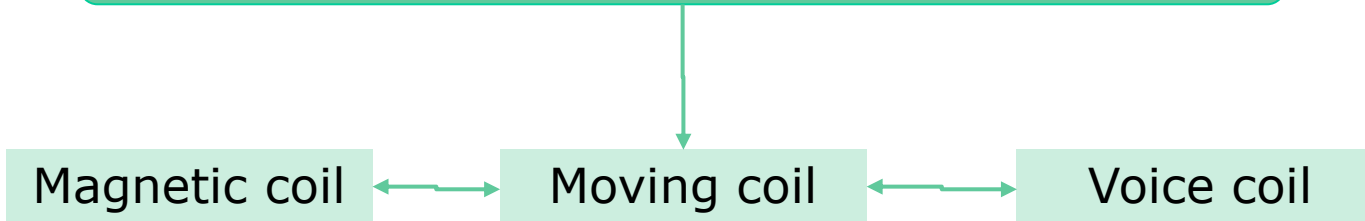
Atuadores Lineares



- 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 Lineares





Atuadores Lineares

Moving coil

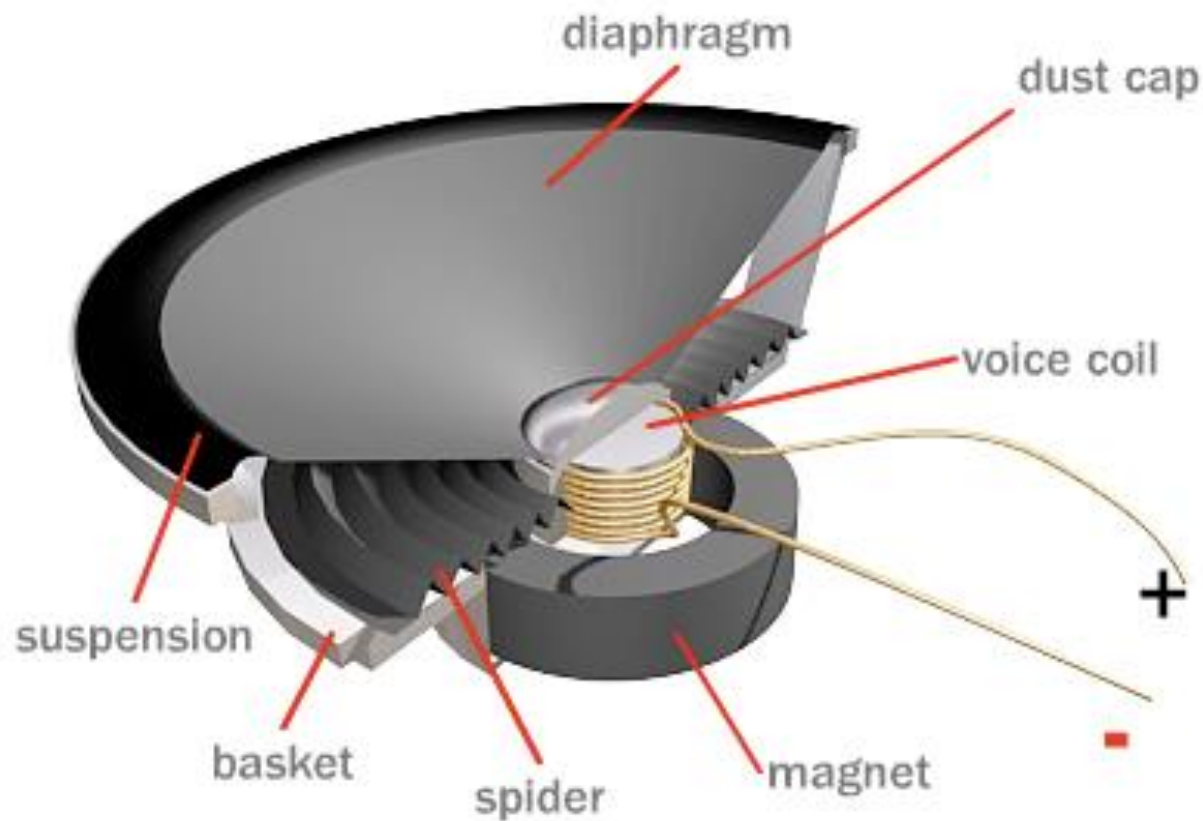
- Moving coils podem ser considerados como um tipo especial de motores lineares.
- Funcionam segundo o princípio de atração/repulsão magnéticos
- Ideais para pequenos cursos com forças moderadas
- Compactos
- Controle simples
- Boa relação custo benefício
- O dimensionamento é feito da mesma forma que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



Atuadores Lineares

Moving coil - Magnetic coil

Origens





Moving coil - Magnetic coil

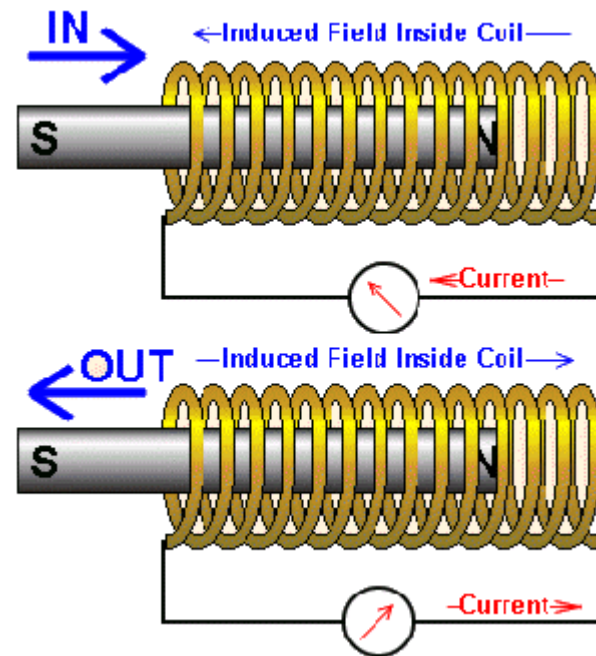
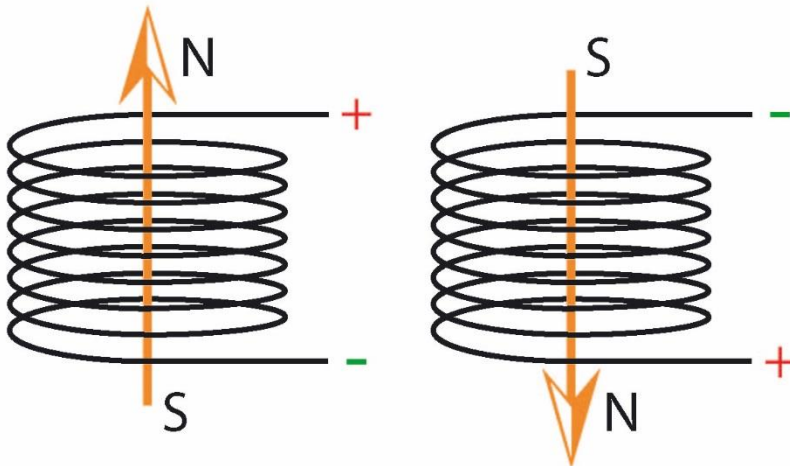
Funcionamento

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

$$\text{Força} = B \times I$$

Onde B = Densidade de fluxo (Teslas)

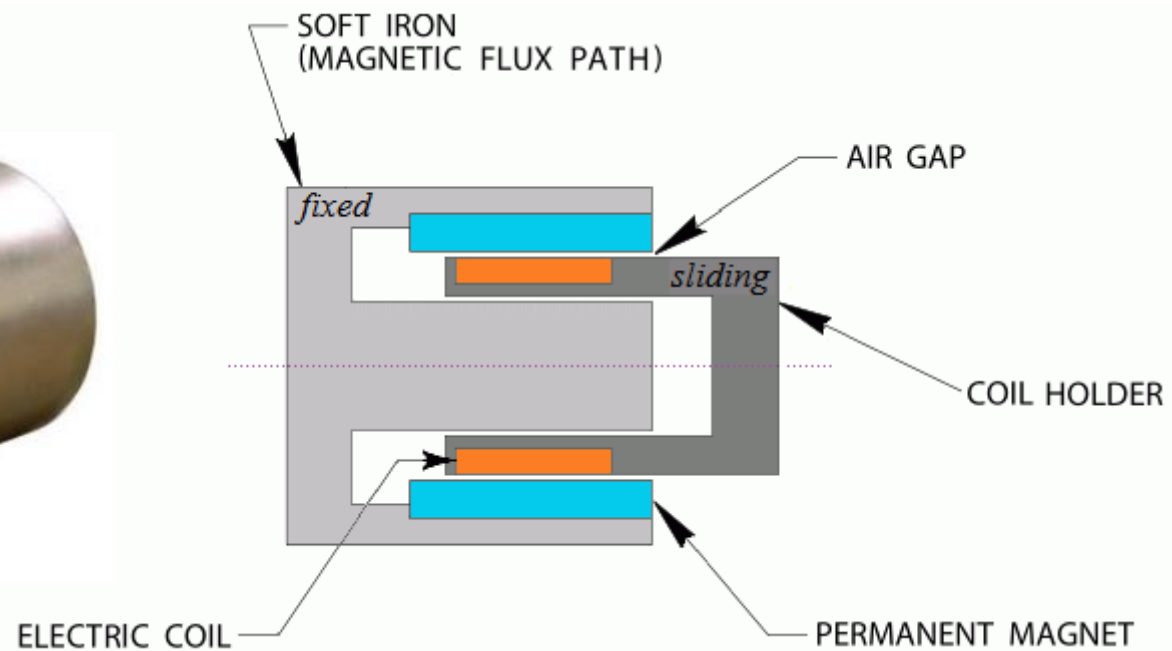
I = corrente (A)





Moving coil - Magnetic coil

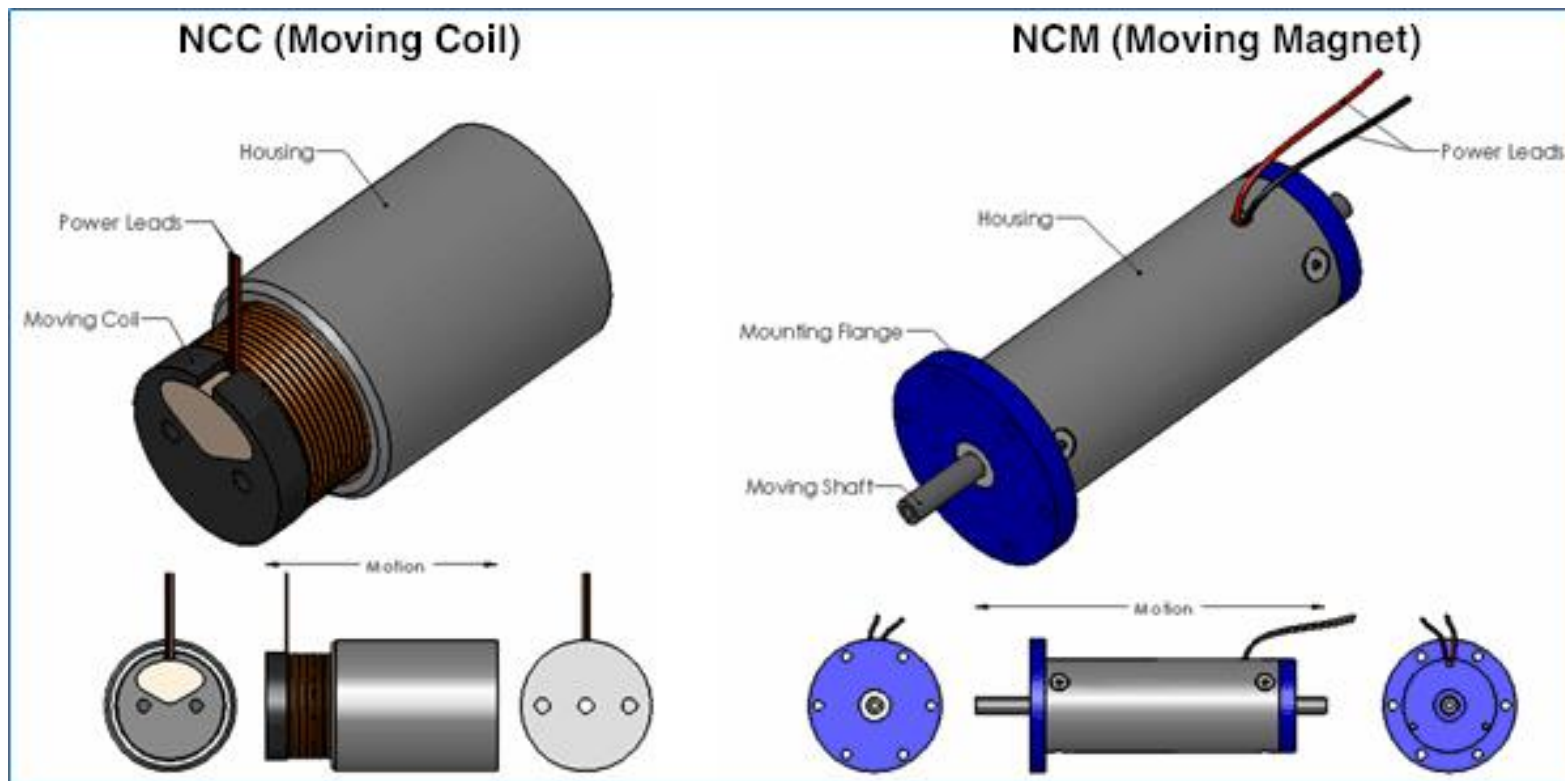
Constituintes





Moving coil - Magnetic coil

Configurações



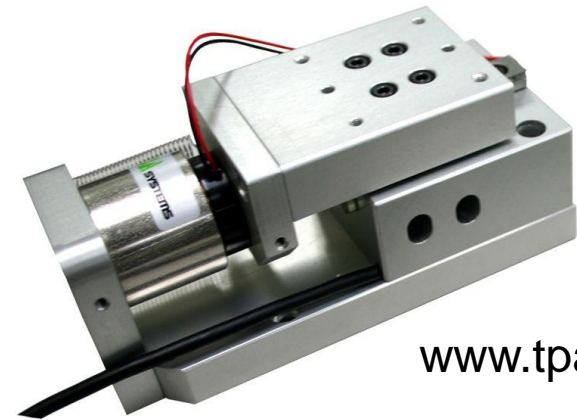


Moving coil - Magnetic coil

Exemplos



www.linearpositioningsystems.com



www.tpa-us.com



PMR-2530

www.linearmotiontips.com



www.beikimco.com



Moving coil - Magnetic coil

Exemplos

XY HiPER NaP:
High Precision Extended Range Nano Positioner

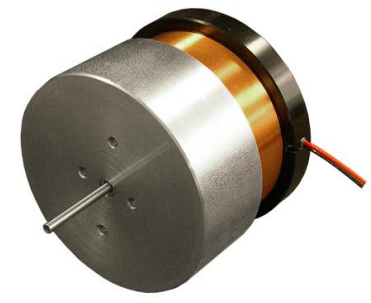
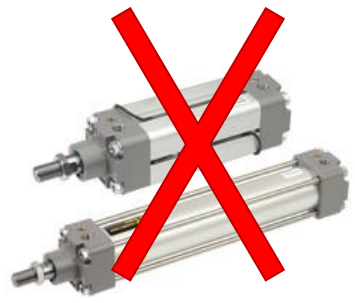
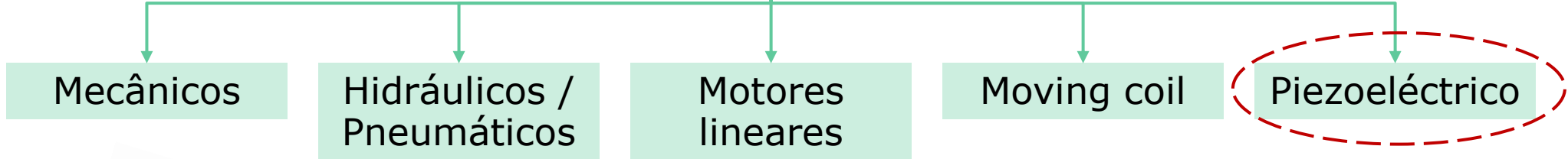
System Demonstration



Prof. Shorya Awtar (awtar@umich.edu)
Mechanical Engineering, University of Michigan



Atuadores 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 Lineares

Motores piezelétricos

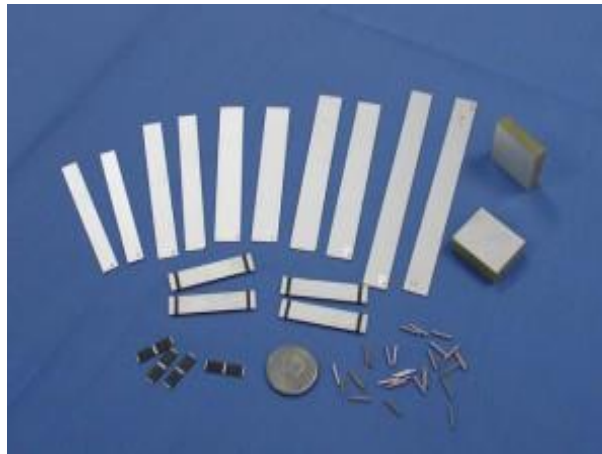
- O efeito piezelétrico é uma propriedade de determinados materiais de gerarem uma diferença de potencial elétrica quando submetidos a deformações ou vice-versa.
- Acionamento piezoelétricos exploram esta característica para proporcionar movimentos.
- Os atuadores piezelétricos têm ampla aplicação em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



Motores piezelétricos

Cerâmicas piezelétricas

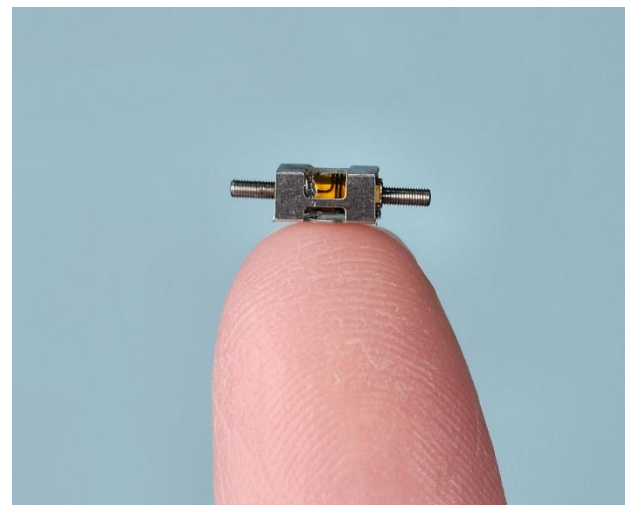
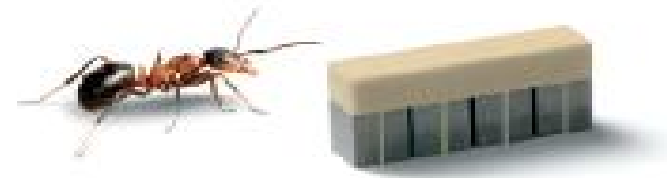
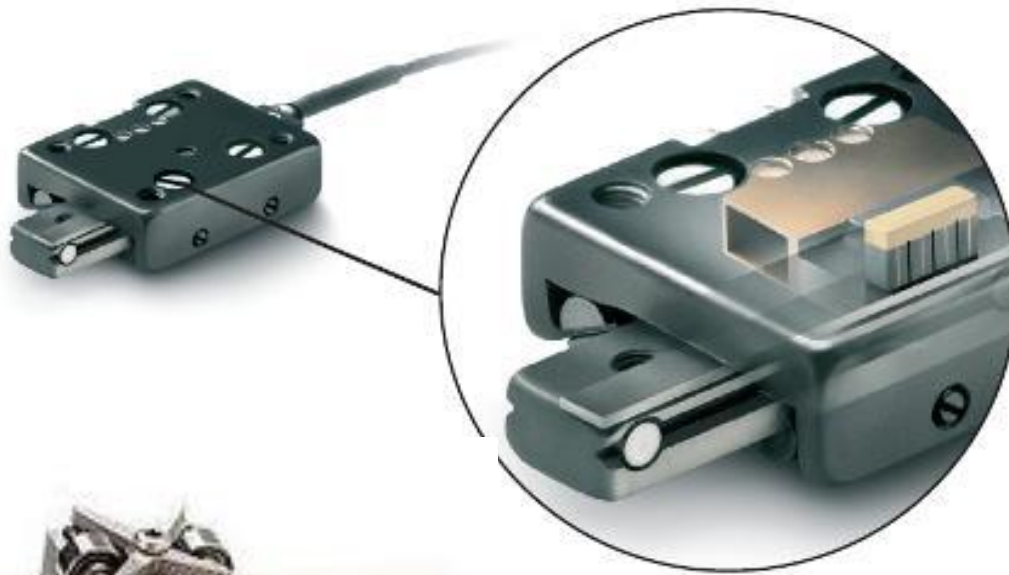
As piezo cerâmicas assumir o formato de discos, barras, tubos, fios e cilindros





Motores piezelétricos

Exemplos





Motores piezelétricos

Exemplos

PI PZT Flexure Stages are Based on the Mars Rover Tested PICMA® Actuators

PICMA®

Flexure Actuators

Nano Focus

NanoCube® XYZ

6-Axis

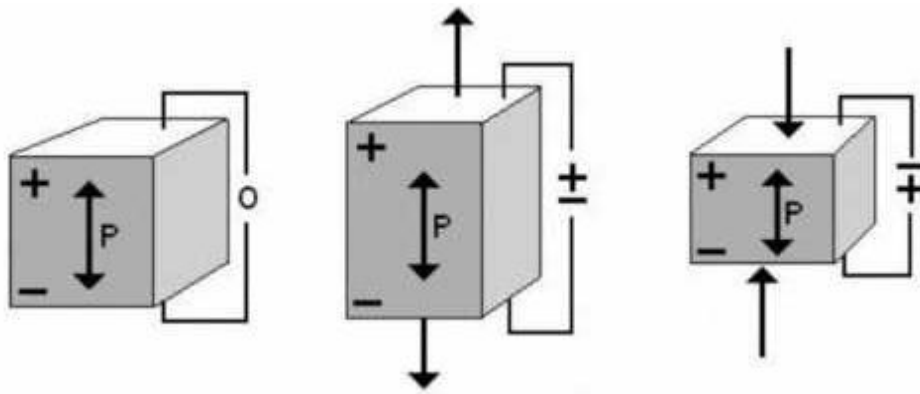
Piezo Motor



Atuadores Lineares

Outras formas de acionamentos

Eletroestricção – baseado em um efeito similar ao efeito piezoelétrico, as cerâmicas eletrorestrictivas operam com gradiente de campo para gerar a tensão, que pode ser conceituada como uma deformação resultante (Smith-Chetwynd, 1994, Krause, 2000).





Atuadores Lineares

Outras formas de acionamentos

Magnetoestricção – princípio muito similar ao piezoelétrico, contudo a deformação é causada pela presença de um campo magnético.

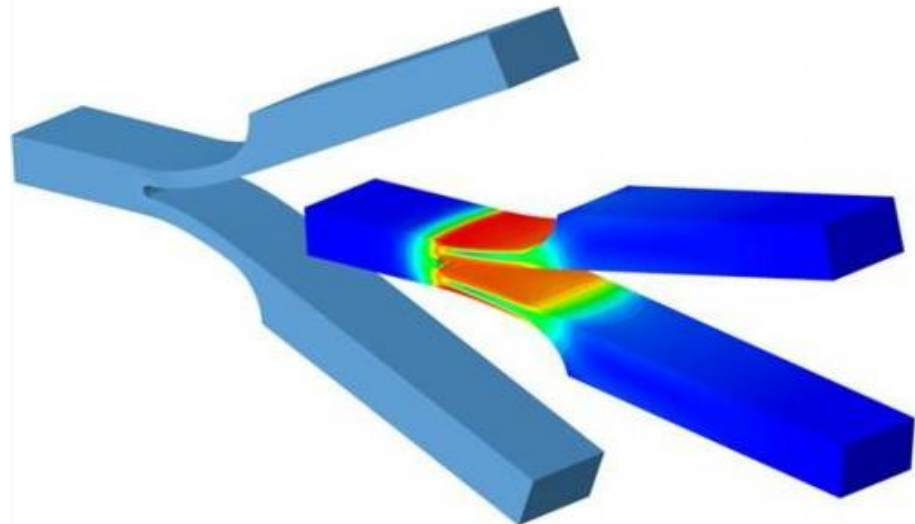
Magnetoelasticidade – baseia-se na capacidade que todos os materiais magnéticos têm para alterar seu módulo de elasticidade na presença de campos magnéticos uniformes (Smith-Chetwynd, 1994; Krause, 2000).



Atuadores Lineares

Outras formas de acionamentos

Ligas de memória mecânica – algumas ligas, notadamente as de níquel e titânio, apresentam uma transformação de fase reversível entre a estrutura martensítica e austenítica, as quais têm propriedades elásticas muito diferentes (Smith-Chetwynd, 1994; Calister, Jr. 1994).





Atuadores Lineares

Outras formas de acionamentos

Ligas bi-metálicas – princípio muito utilizado em disjuntores elétricos de segurança, baseado na união de dois materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica, sendo o deslocamento proporcional à variação de temperatura (Smith-Chetwynd, 1994), utilizados na função de aplicação de pressão



Atuadores Lineares

Comparação

atuador	F.O. μm	rigidez	linearid.	exatidão	custo
piezoelétrico	0.1-200	alta	pobre	10nm	médio
Memory Shape Alloys	20mm	média	pobre	0.1mm	baixo
eletromag.	100 μm	~ 0	boa	0.005nm	médio
eletrostático	100nm	~ 0	quadrática	0.1nm	baixo



Atuadores

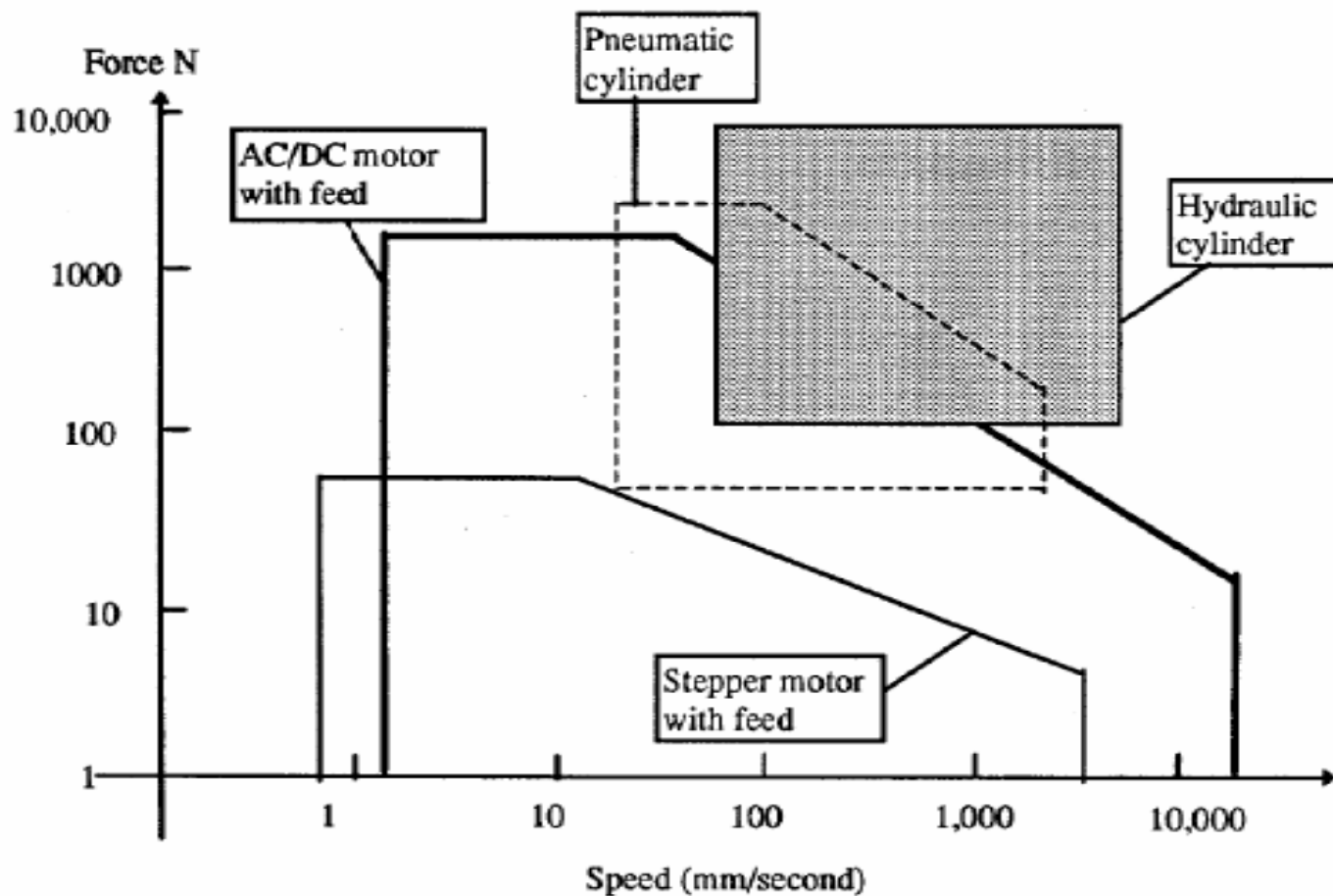
Seleção

- 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

Seleção





ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FIM DA AULA