

Robótica Móvel e Inteligente

José Luís Azevedo, Bernardo Cunha, Pedro
Fonseca, Nuno Lau e Artur Pereira

Arquitectura de robôs:

- **Sensores**
- **Atuadores**
- **Locomotion**

Um atuador pode ser amplamente definido como um dispositivo ativo que converte uma fonte de energia primária em movimento físico.

Dada esta definição, os atuadores podem ser geralmente classificados considerando:

1. O tipo de **energia primária** que é utilizada para gerar movimento no atuador
2. O tipo de **movimento gerado**

Para cada um dos tipos de classificação acima também é possível classificar os atuadores de acordo com o tipo de tecnologia (princípio físico da transformação de energia em movimento físico).

NOTA: alguns dispositivos que são classificados como atuadores distintos podem, na verdade, ser uma versão mais sofisticada de

Atuadores em robótica móvel

atuadores simples (por exemplo, através da integração do sistema de controle no nível do atuador).

Classificação dos atuadores de acordo com o **tipo de energia primária** que é usado para gerar movimento no atuador:

1. Elétrica. Transformar a energia elétrica primária, geralmente armazenada em baterias (...recarregáveis), no movimento pretendido. Como veremos, existem diferentes tecnologias, dependendo das características da aplicação específica do atuador. Na robótica móvel, os actuadores eléctricos representam a principal classe de actuadores utilizados devido à sua diversidade e adaptabilidade a cada tipo de aplicação.



Exemplo de um pequeno motor eléctrico DC

Classificação dos atuadores de acordo com o **tipo de energia primária** que é usado para gerar movimento no atuador:

2. Pneumático. Alimentado por energia armazenada como ar comprimido (ou outro gás comprimido). Estes atuadores são utilizados em situações em que **se deseja movimentos precisos e fáceis de controlar**, mas onde a força necessária não é um critério crítico.

Requer pressões muito elevadas e, portanto, um recipiente extremamente robusto e pesado.

Menos eficiente na conversão de energia do que as soluções elétricas, sendo portanto menos comum em aplicações de robótica móvel.



Exemplo: pistões pneumáticos

Atuadores em robótica móvel

Classificação dos atuadores de acordo com o **tipo de energia primária** que é usado para gerar movimento no atuador:

3. Hidráulica. Eles utilizam o fluxo e a pressão de um fluido para converter a energia primária em movimento ou torque linear e/ou rotacional.

Tais actuadores são utilizados apenas em **situações em que a força necessária é extremamente elevada**. Eles também requerem **estruturas mecânicas pesadas e volumosas**.

Tipicamente encontrado em grandes máquinas, tais como robôs móveis autónomos que trabalham em minas. No campo



Atuadores em robótica móvel

dos robôs abrangidos por este curso, este não é um tipo relevante de atuador.

Classificação dos atuadores de acordo com o tipo de **movimento** gerado pelo atuador:

1. **Rotary.** A energia primária é convertida em movimento rotativo, que por sua vez pode ser contínua, posicional ou uma fonte de aplicação de força (torque).
2. **Linear.** A energia primária é convertida em movimento linear. A finalidade deste movimento também pode incluir a aplicação direta de uma força, o posicionamento de um elemento mecânico ou a execução de um movimento repetitivo contínuo (*sistema de reciprocidade*).

NOTAS:

1. Quando o objetivo é a aplicação direta de uma força, é comum encontrar soluções onde a energia primária aplicada ao atuador é parcialmente armazenada em um dispositivo mecânico (por exemplo, uma mola) para que a configuração original possa ser restaurada quando a fonte de energia primária é removida. Os elementos de armazenamento de energia passiva também podem ajustar as posições alvo com base em forças externas (**actuadores em conformidade, em oposição a actuadores rígidos**).

2. Em alguns casos, a própria fonte de energia primária dos actuadores eléctricos, pneumáticos e/ou hidráulicos pode, de facto, ser de natureza diferente, particularmente quando a potência necessária é muito significativa.

Um exemplo do que é dito acima é a utilização de um motor de combustão interna no qual a energia primária, derivada da combustão de hidrocarbonetos, é por sua vez convertida em

Atuadores em robótica móvel

energia elétrica, pneumática ou hidráulica.

Exemplo de hidrocarbonetos como fonte primária

BigDog por Boston Dynamics

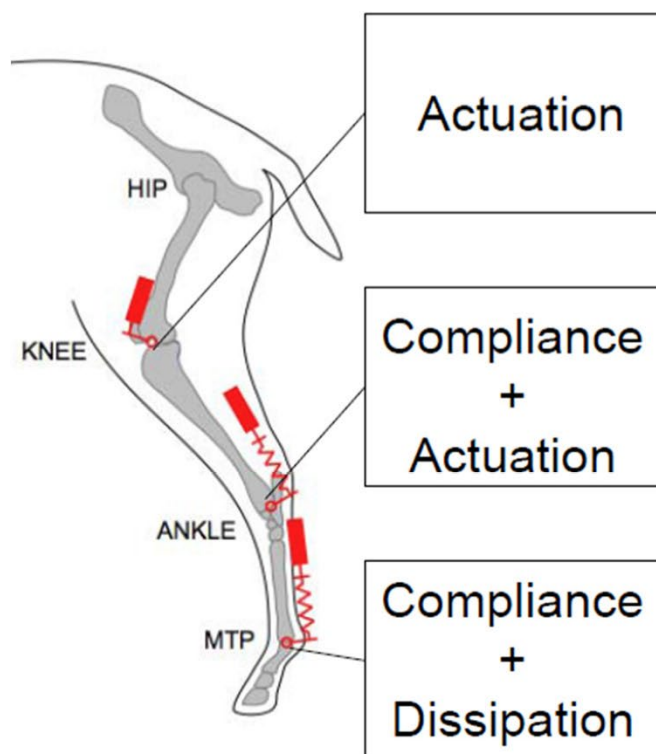
- alimentado por um motor de **dois tempos**, **um cilindro** e 15-HP de karting a mais de 9.000 RPM.
- **motor aciona uma bomba hidráulica** que, por sua vez, aciona os atuadores das pernas hidráulicas.
- Cada perna tem quatro atuadores
 - Cada unidade de atuador consiste de um cilindro hidráulico, uma servo-válvula, um sensor de posição e um sensor de força.

http://www.bostondynamics.com/img/BigDog_Overview.pdf



Multi-jointed Legs

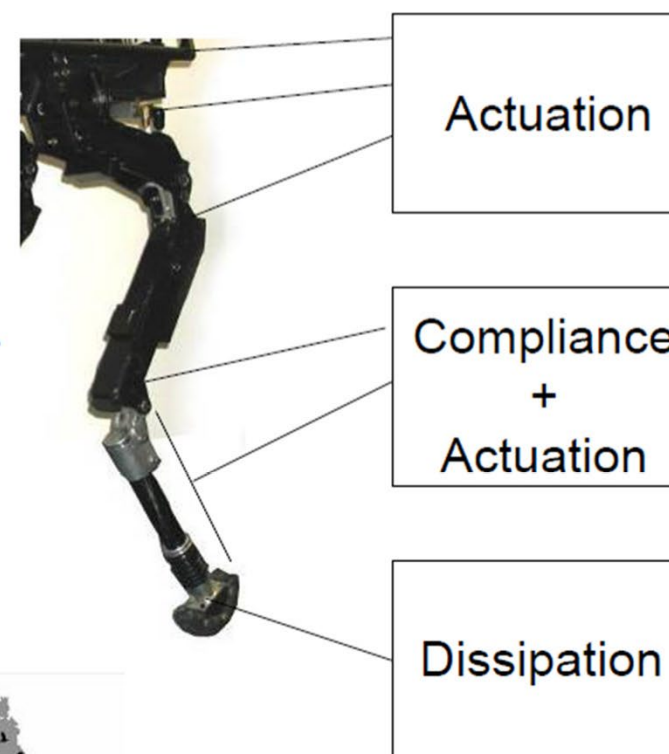
Animal



Less actuation
More compliance



BigDog



http://www.bostondynamics.com/img/BigDog_Overview.pdf

Atuadores em robótica móvel



Os atuadores rotativos mais comuns usados em robôs móveis autônomos (se excluirmos os robôs muito grandes) usam eletricidade como sua principal fonte de energia.

Estes actuadores, são normalmente referidos como "accionadores" ou "motores".

Por serem um componente essencial no mecanismo de locomoção dos robôs, eles podem, por sua vez, ser de vários tipos em relação à forma como a energia elétrica é transformada em energia mecânica.

Dada a sua relevância na robótica móvel inteligente, existem três tipos que devem ser destacados:

- **Motores CC escovados**
- **Motores CC Brushless**
- **Motores de passo**

Atuadores

Rotativos

Independentemente dos seus tipos, os motores eléctricos podem caracterizar-se por um conjunto de atributos cujos valores podem ser mais ou menos importantes de acordo com a sua aplicação. Em geral, é a aplicação específica que determina as características requeridas do motor e, portanto, a sua seleção final. Alguns dos parâmetros mais importantes a considerar são:

- Tensão nominal de alimentação [V] - Alcance(3 ... 48)*
- Resposta de torque em função da velocidade de rotação [Nm/min⁻¹]
- Binário de paragem [Nm] - Alcance(mNm ... 100sNm)
- Torque máximo de serviço estável (BMrc) [Nm] - Alcance(mNm ... 100sNm)
- Corrente típica em serviço estável [A] - Gama(mA ... 100A)
- Velocidade angular nominal sem carga [min⁻¹] - Alcance(0,1 ... 50.000RPM)**
- Velocidade angular nominal em serviço estável (VAnrc)] - Alcance(0,1 ... 35.000RPM)**
- Potência nominal (digite: BMrc * VAnrc) [W]] - Alcance(mW ... 500W)

* *Números indicativos para aplicações de robótica móvel*

** *A velocidade de rotação do eixo principal depende muitas vezes da caixa de engrenagens mecânica que está acoplada ao motor*

Podemos também considerar outros parâmetros, tais como

- Corrente de arranque [A] - Gama(mA ... >100A)
- Corrente de pico [A] - Faixa(mA ... >100A)
- Constante[s] de tempo mecânica[s] - Alcance(ms ... >100ms)
- Inércia do rotor [gcm^2] - Alcance(0.1 ... >2500 gcm^2)
- Volume do motor [cm^3] - Alcance(2cm^3 ... > 200cm^3)
- Peso [Kg] - Gama(<10g ... >10Kg)

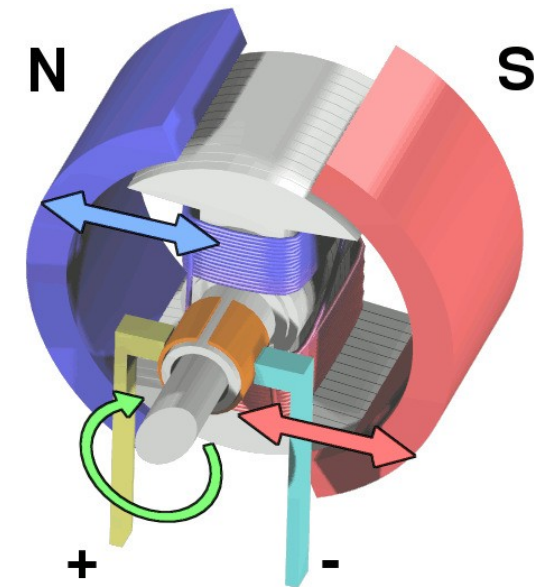
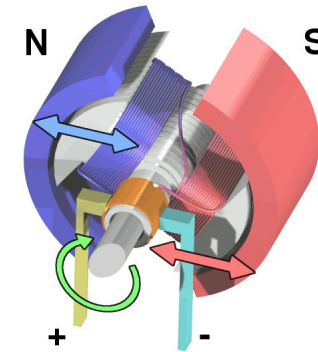
Dependendo da tecnologia e da aplicação, podemos também ter de considerar outros parâmetros, como por exemplo:

- Eficiência [%]
- Número de pólos
- Características magnéticas do rotor e/ou do estator do motor
- Configuração mecânica do rotor (inrunner ou outrunner)
- Geometria do motor (por exemplo, motores planares)

Motores CC escovados

Na versão mostrada na imagem, existem dois pólos (**ímãs permanentes**) que constituem o **estator**.

O **rotor** inclui duas bobinas enroladas em torno de armaduras ferromagnéticas que, quando atravessadas por corrente, geram um campo magnético que, em conjunto com o campo dos ímãs permanentes, gera uma **força rotacional**.



http://en.wikipedia.org/wiki/Brushed_DC_electric_motor

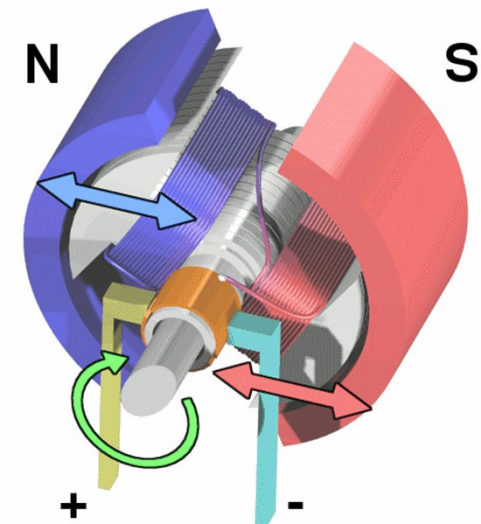
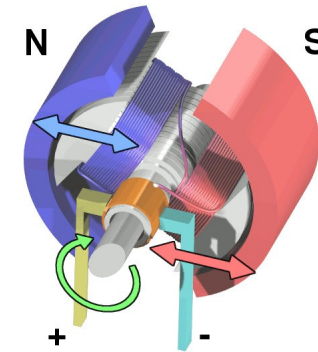
Motores CC escovados

Comutação do sentido do fluxo de corrente

para garantir que o torque permaneça na mesma direção **é realizado mecanicamente** (pelas chamadas **escovas**).

Numa versão simples como a da imagem (apenas dois pólos) existe um ponto de equilíbrio que cancela as forças (imagem inferior no slide anterior). Um motor nesta configuração não pode arrancar por si só.

Em soluções reais, o número de bobinas no rotor blindado é, no mínimo, igual ou superior a três.

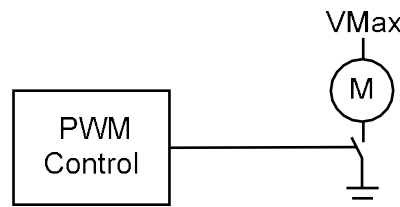
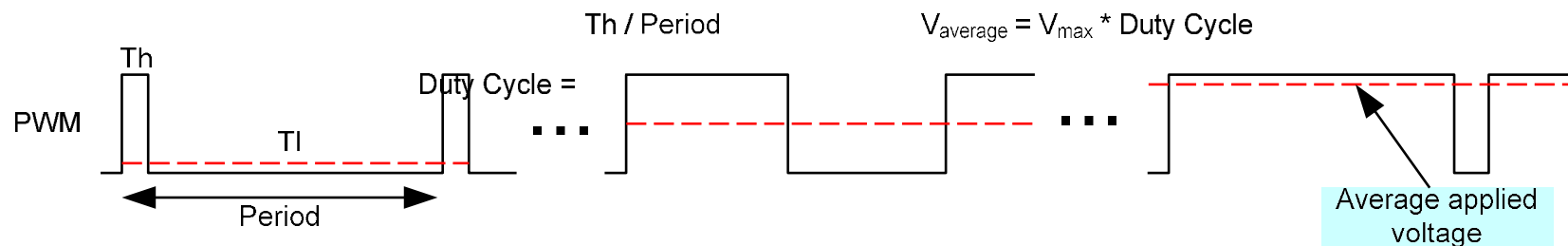


http://en.wikipedia.org/wiki/Brushed_DC_electric_motor

Motores CC escovados

O **controle de velocidade** dos motores CC pode ser realizado **variando** diretamente **a tensão aplicada aos terminais**.

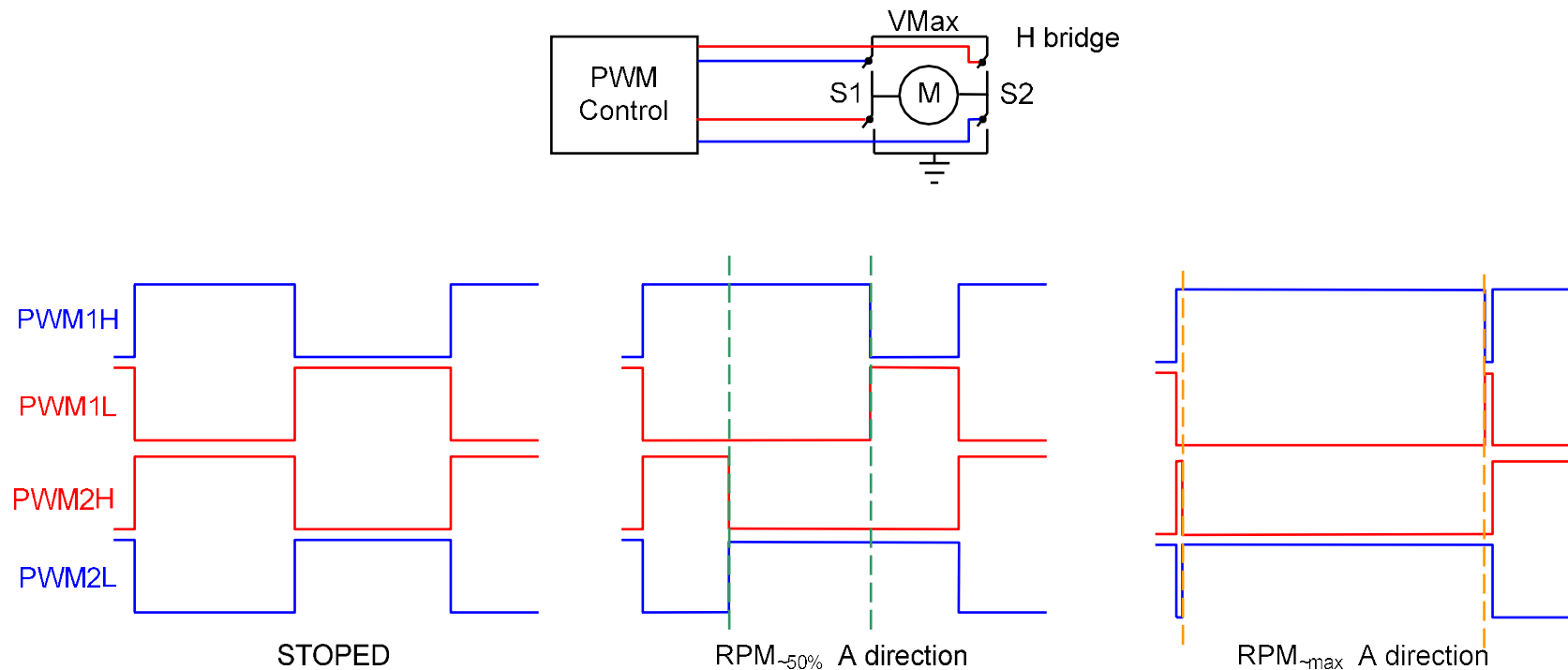
Como a maioria dos controladores de corrente são digitais, esta variação de tensão é feita pela modulação da largura do impulso de uma tensão constante (controlador **PWM**) que é aplicada a uma frequência fixa nos terminais do motor.



Motores CC escovados

Para **alterar o sentido de rotação** de um motor CC, a polaridade da **tensão** aplicada **deve ser invertida**.

Para isso é normalmente utilizado um circuito de ponte-H, permitindo o controle total do motor, em termos de velocidade e sentido de rotação.



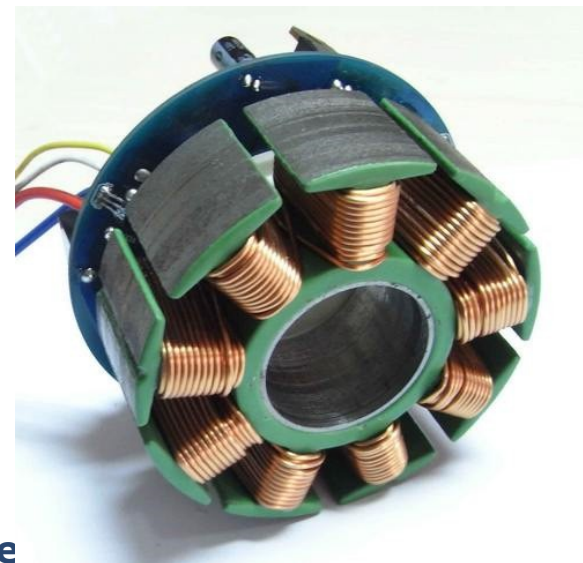
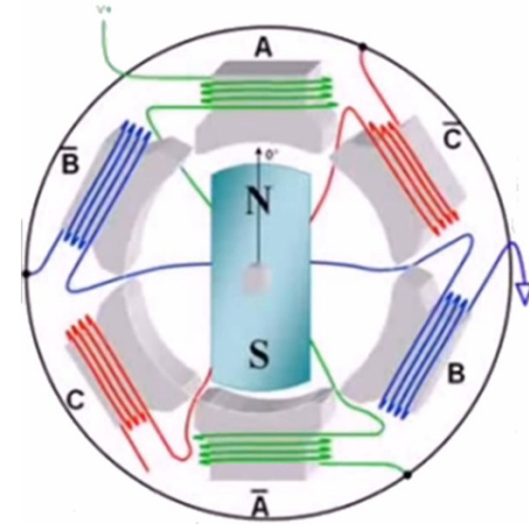
Motores DC BrushLess (BLDC)

Um motor CC sem escovas usa **ímãs permanentes, montados no rotor**, e uma armadura fixa sobre a qual está montado um grupo de pares de pólos eletromagnéticos.

Estes **pólos são excitados por uma tensão aplicada externamente**.

Esta configuração **elimina a necessidade de um** sistema de **comutação mecânica (escovas)**

No entanto, **requer um sistema de controle eletrônico que garanta a correta comutação seqüencial dos pólos**, a fim de gerar o torque necessário que produza a rotação correta do rotor.



Motores DC BrushLess (BLDC)

Os motores BLDC **não** requerem praticamente **nenhuma manutenção mecânica** e apresentam maior **eficiência** quando comparados com os motores escovados.

Em contraste, controlar um BLDC é mais complicado, especialmente porque **requer um mecanismo para fornecer informações sobre a posição absoluta do rotor** (sensores de efeito Hall ou medições de campos eletromagnéticos). O # de pares de transístores deve ser igual a $2 * \# \text{ pólos}$ (ou $4 * \# \text{ pólos}$ para controle bidirecional).



800W Out-runner a 9.000RPMs

As configurações mecânicas para soluções BLDC incluem rotores internos (in-runners), rotores externos (out-runners) ou rotores sobrepostos e estatores (motor planar).

Motores DC BrushLess (BLDC)

Do ponto de vista eléctrico, a interligação dos pólos também pode adoptar configurações triangulares ou estelares.

Motores Stepper

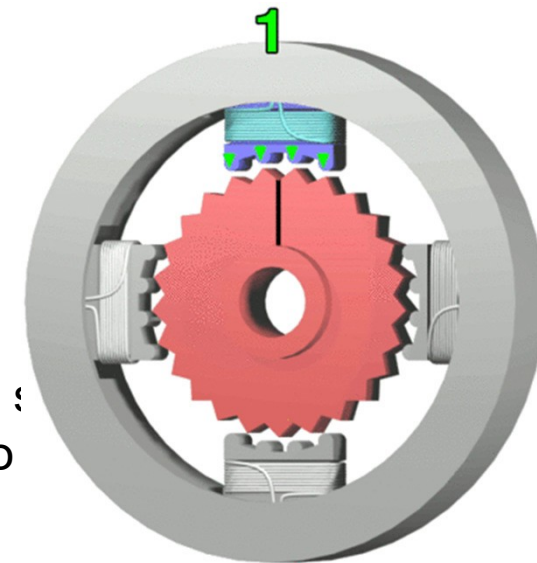
O motor passo-a-passo consiste num **rotor contendo vários ímanes dispostos numa peça central de ferro**, e um **conjunto de bobinas eléctricas dispostas sobre a periferia dos materiais ferromagnéticos**, que também é **dentado**.

Quando uma **corrente** é injetada em uma das bobinas, ela **gera um campo magnético** que atrai um subconjunto dos ímãs permanentes até que seus **dentes fiquem alinhados**.

Nesta configuração, **os dentes das outras bobinas** são **ligeiramente fora de fase** em relação aos dentes do

Assim, ao mudar a corrente para a próxima bobina, é gerado um novo binário para acionar um novo alinhamento.

Ao **alimentar sequencialmente as bobinas**, pode-se gerar um movimento rotativo a uma velocidade controlada ou colocar o rotor em um ângulo fixo



Motores Stepper

desejado.

Breve comparação entre os três tipos de motores

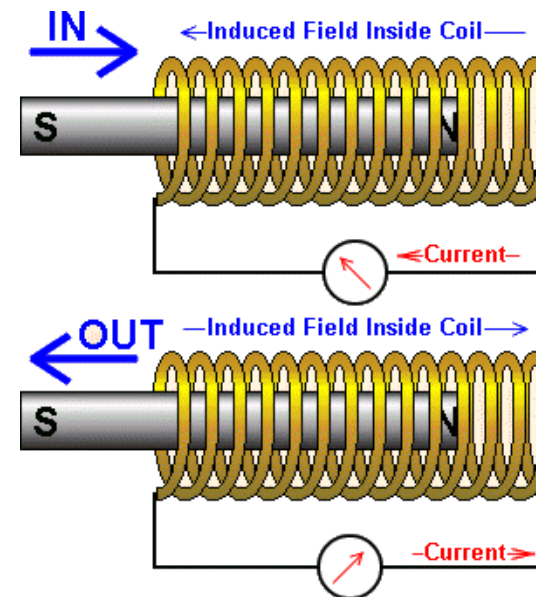
DC Escovado	Brushless DC	Motores Stepper
+ barato	+ eficácia	+ muito preciso (pode ser usado em circuito aberto)
+ simples de controlar	+ grande variedade de velocidades de rotação	+ bom para topologias planares
+ ampla gama de potências	+ manutenção	+ útil em aplicações de posicionamento
+ arranque muito simples	+ potência vs. volume	+ manutenção
-	+ bom para topologias planares - preço	+/- compromisso razoável entre complexidade e controle
- desgaste mecânico	- controle complexo	-- preço
- eficiência	- arranque complexo e/ou necessidade de sensores de posição precisos	-- eficiência
- potência vs. volume		- vibrações mecânicas

Um solenóide é normalmente construído a partir de um enrolamento (**bobina**) montado em torno de um **êmbolo móvel** dentro de uma caixa de ar.

O êmbolo é constituído por um material ferromagnético ou um íman permanente (que é o caso da imagem abaixo).

Quando uma **corrente é aplicada à bobina é produzido um campo magnético** que, por sua vez, cria um campo dipolo no êmbolo que gera uma força para **alinhar o seu centro geométrico com o centro da bobina**.

Nas situações em que o êmbolo é um íman permanente, a direcção da corrente e a posição inicial do êmbolo gera uma força que pode ser repulsiva ou atractiva.



Solenóides

Na maioria dos casos, o solenóide parte de uma posição em que o êmbolo é deslocado geometricamente em relação ao centro e é rapidamente atraído na direção oposta quando a bobina é energizada.

A fim de manter a força exercida, o êmbolo é travado mecanicamente antes de atingir o ponto de equilíbrio.

Para reiniciar as condições iniciais, um elemento passivo (por exemplo, mola) que acumula a energia resultante do turno, empurra o êmbolo novamente para a posição inicial quando a energia é retirada.

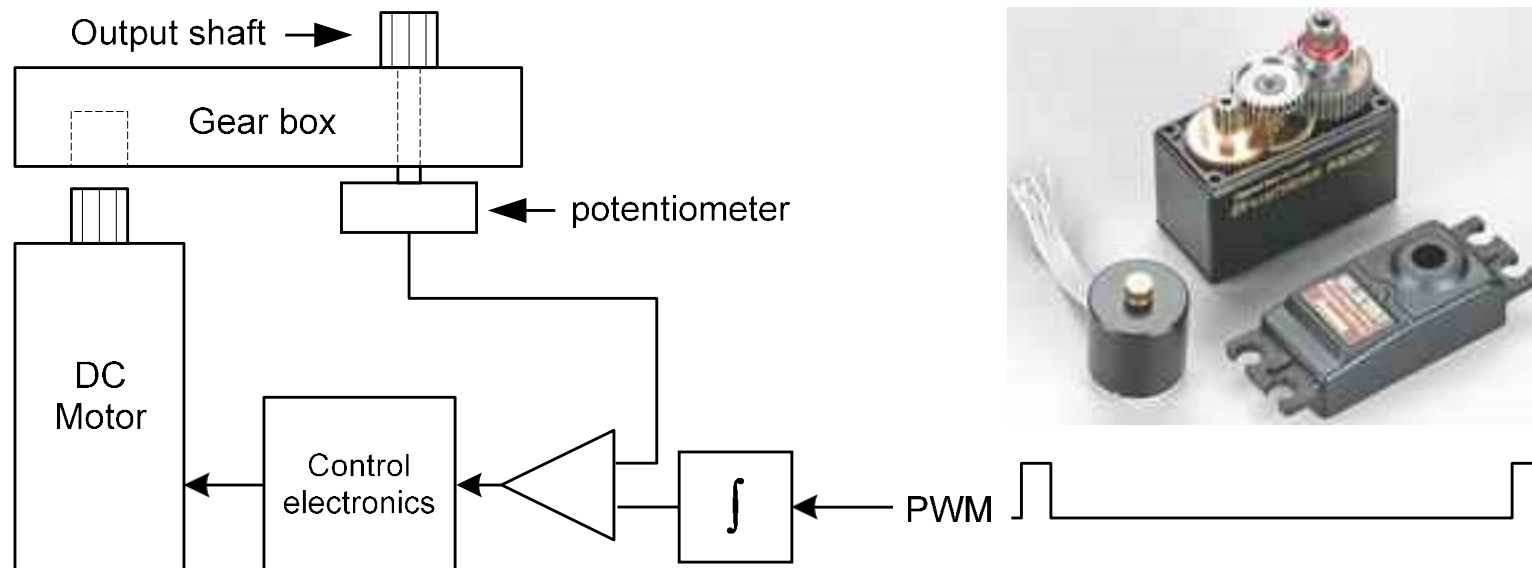


Servo Motores

Servo (ou **servo motor**) é o nome dado a uma combinação de um **motor DC (ou BLDC)**, uma **caixa de redução** e um **laço de controle eletrônico**.

Os servos destinam-se, normalmente, a aplicações de **posicionamento angular** que requerem **boa precisão** (que também podem ser transformadas em movimento linear)

Nos servos mais simples, o controlo é efectuado através da aplicação de um sinal PWM ao servo. O circuito de retorno inclui um potenciômetro que indica a posição angular do eixo de saída.



Servo Motores

Os principais parâmetros a considerar ao escolher um servo são:

- Torque máximo disponível
- Faixa de velocidade angular
- Ângulo máximo coberto (ou rotação livre)
- Resolução angular
- Materiais das caixas de velocidades
- Tipo de controle
- Dimensão e peso

Por exemplo - No caso dos servos Dynamixel, o controle é realizado através de comandos digitais enviados através de um barramento digital multidrop, permitindo, entre outros, um controle preciso (dentro de alguns limites) de parâmetros como ângulo final, velocidade angular e torque máximo a ser aplicado.

Servo Hobby



Servo industrial

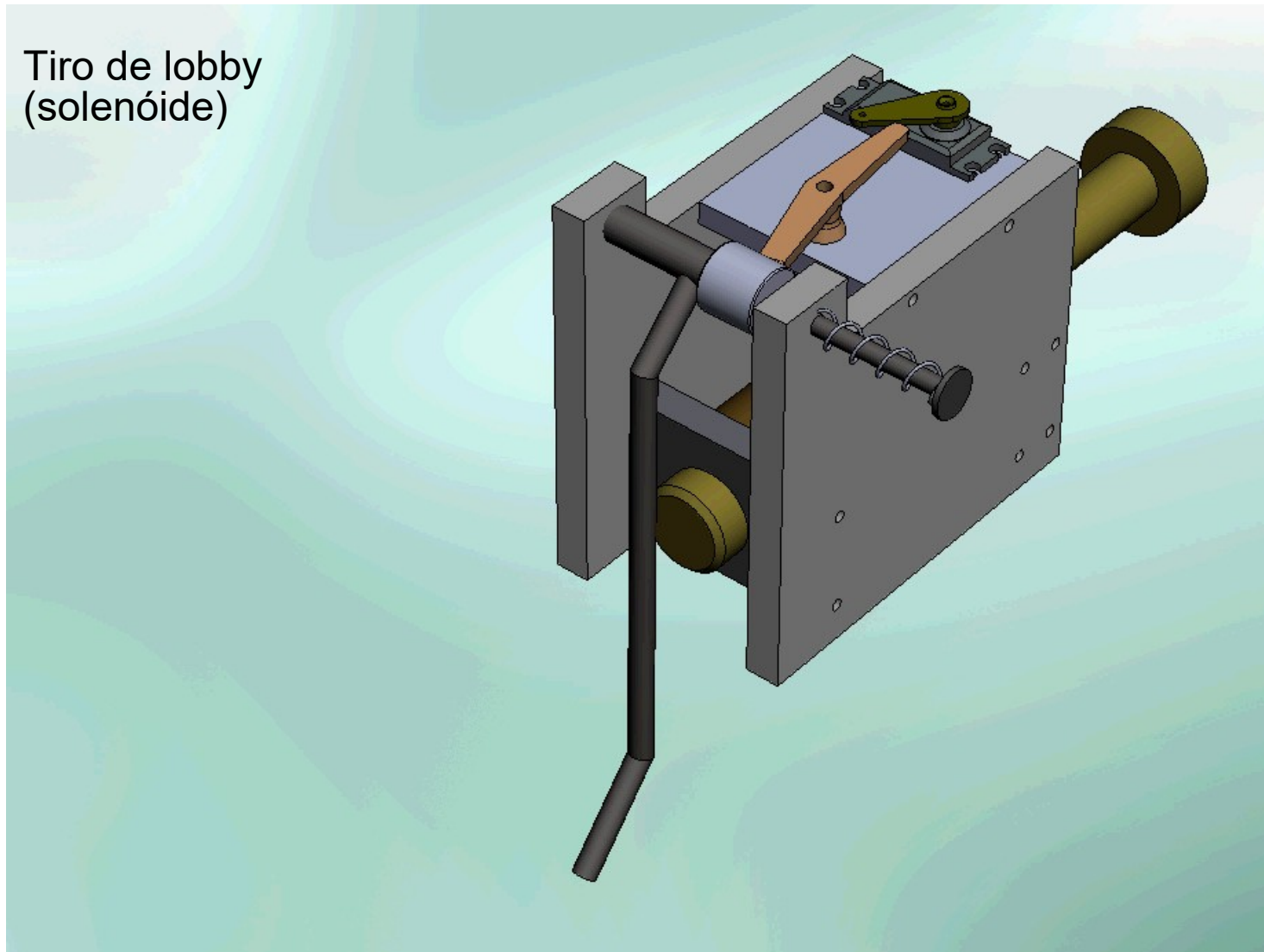


servo Dynamixel

Combinação de atuadores - exemplo

(CAMBADA)

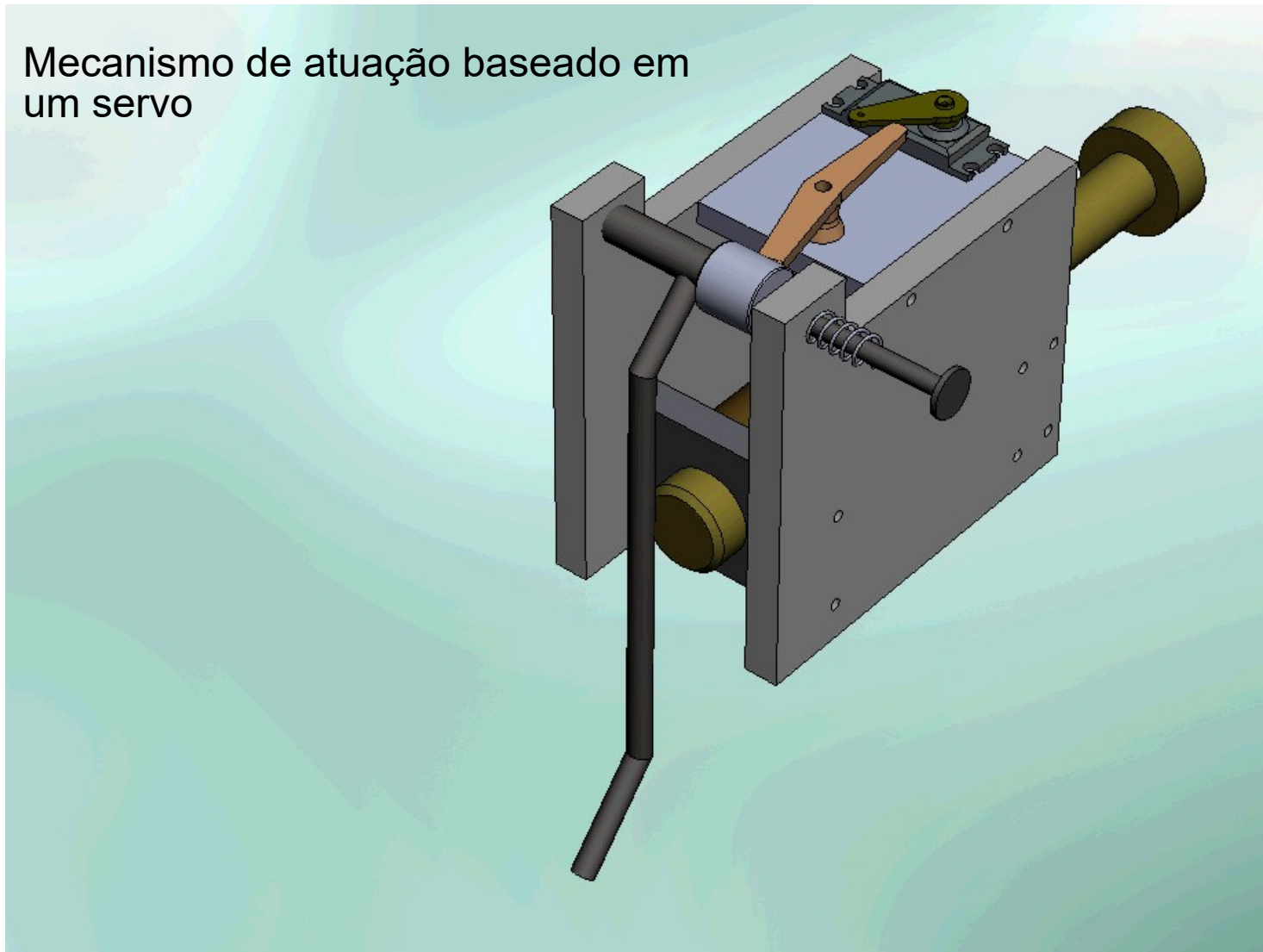
Tiro de lobby
(solenóide)



Combinação de atuadores - exemplo

(CAMBADA)

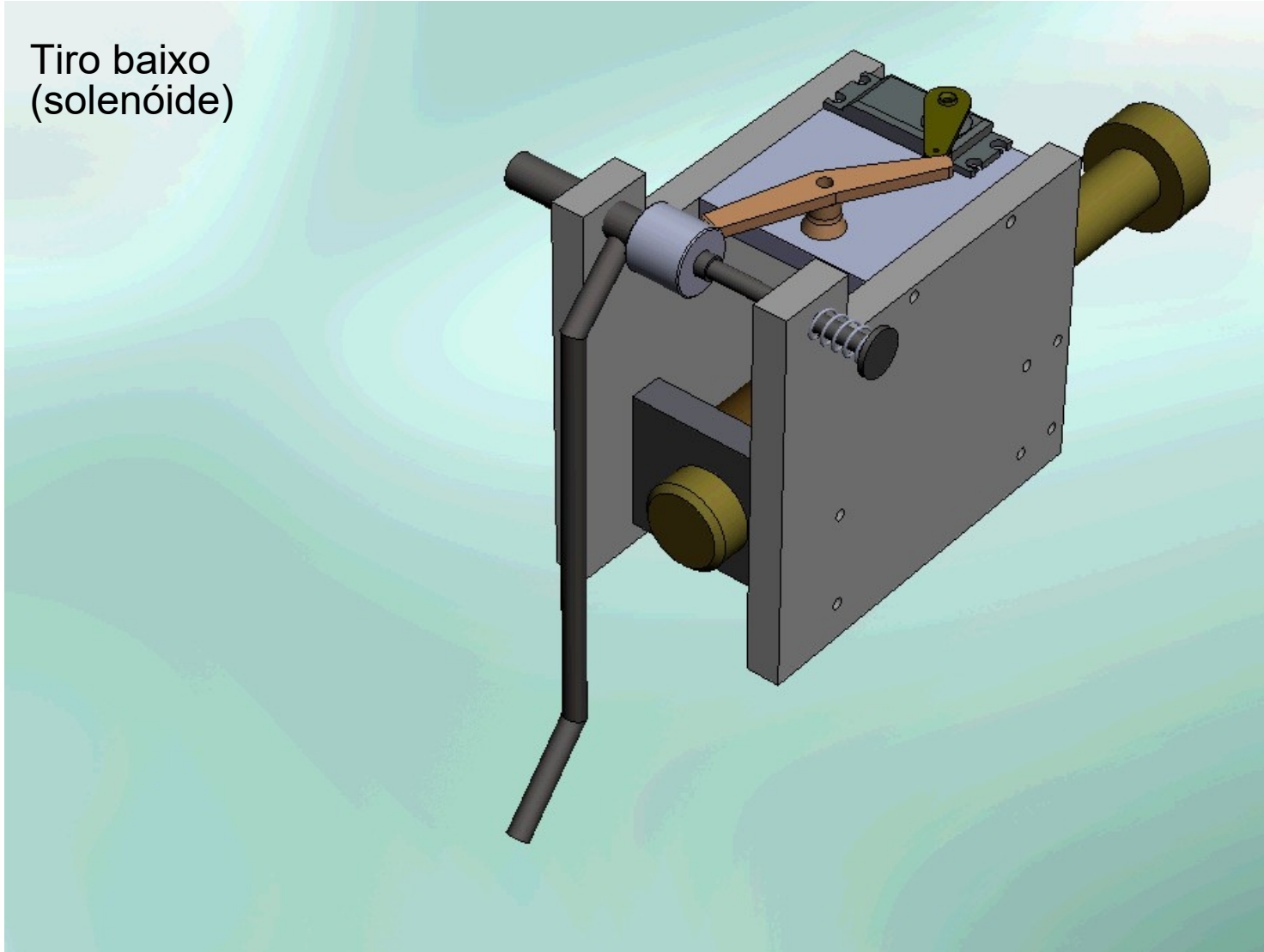
Mecanismo de atuação baseado em um servo



Combinação de atuadores - exemplo

(CAMBADA)

Tiro baixo
(solenóide)

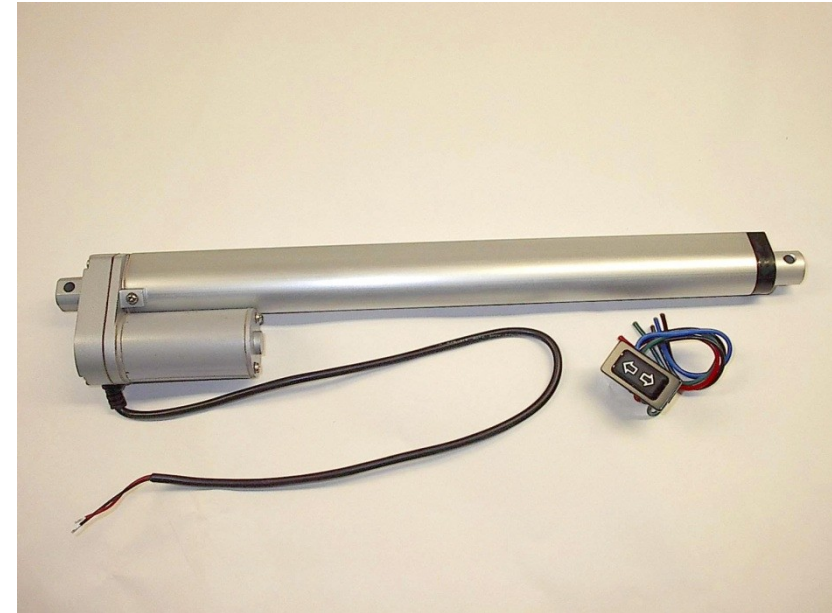


Atuadores Lineares

Um atuador linear normalmente compreende um motor CC associado a um parafuso sem-fim no qual, ou do qual, o elemento atuador é movido.

Dependendo da direcção de rotação do motor CC, o elemento actuador aproxima-se ou afasta-se do limite original de movimento. A inclusão de um potenciómetro e/ou interruptores de fim de curso é comum neste tipo de actuadores.

Igualmente comuns são os atuadores lineares que utilizam energia pneumática ou hidráulica. Nestes casos, o atuador está associado a um pistão que está sujeito a pressões positivas ou negativas para acionar o movimento desejado.



Outros actuadores

Músculos artificiais pneumáticos - também conhecidos como **músculos do ar** - baseiam-se no alongamento e contração de um tubo elástico através da variação da pressão do ar dentro do mesmo. As contracções podem aumentar até cerca de 40% da dimensão original.

Músculo do fio - com base num composto conhecido como Nitinol ou Flexinol, este tipo de fio pode **encolher (até cerca de 5%) quando sujeito a uma corrente eléctrica**. Pode ser usado em aplicações de pequenas dimensões.

Os **polímeros eletroativos** - baseados em materiais plásticos (EAPs ou EPAM: electroactive Polymer Artificial Muscle) **podem expandir-se substancialmente devido a um sinal eléctrico aplicado**. Este tipo de atuador não suporta, no entanto, grandes cargas mecânicas.

Motores piezo-eléctricos - utilizados em micro e nano robótica, utilizam o princípio piezo-eléctrico para produzir



Outros actuadores

vibrações electro- mecânicas (dezenas de kilohertz) que podem ser transformadas em movimento rotacional ou linear.

Outros actuadores

