

# SENSORES E ACTUADORES

## Actuação

J.R.Azinheira

Nov 2008

*Bibliografia: Sensores e Actuadores, J.R. Azinheira, 2002, IST-DEM  
(disponível na página da UC em 'Material de Apoio' -> 'Bibliografia Complementar')*

---

# ÍNDICE

---

- Cadeia de Medida
- Sensores do movimento
  - posição linear e angular, proximidade, velocidade e aceleração
- Grandezas mecânicas
  - forças, binários, pressão, nível
- Escoamentos e caudais
- Temperatura
- Cadeia de actuação e actuadores

# ÍNDICE

---

- Cadeia de Medida
- Sensores do movimento
  - posição linear e angular, proximidade, velocidade e aceleração
- Grandezas mecânicas
  - forças, binários, pressão, nível
- Escoamentos e caudais
- Temperatura
- Cadeia de actuação e actuadores

# Cadeia de actuação e actuadores

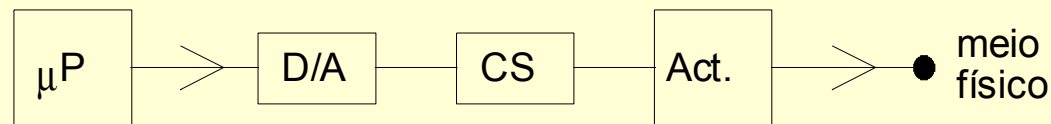
---

- Cadeia de actuação
  - introdução
  - conversão de potência
  - relés
- actuadores eléctrico-mecânicos
- actuadores eléctrico-flúidos
  - eléctrico-pneumático
  - eléctrico-hidráulico

# Cadeia de actuação

## introdução

- Cadeia de actuação
  - Similar à cadeia de medida
  - + fornece energia ao actuador (e eventualmente ao processo)
- Actuadores:
  - gerem movimento, posição e velocidade, forças e binários, etc
  - convertem um comando eléctrico numa acção mecânica:
    - com actuadores electromecânicos como motores eléctricos
    - através de um fluido sob pressão, com actuadores eléctrico-hidráulicos ou eléctrico-pneumáticos como cilindros ou motores



**fig. cadeia de actuação genérica**

# Cadeia de actuação introdução

## Exemplo integrado

- actuador eléctrico-hidráulico
- com sensor e servo-controlo
- entrada digital

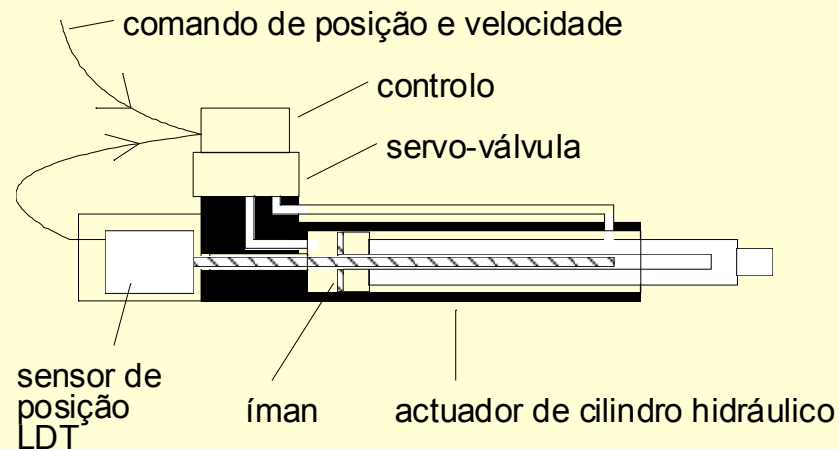


fig. servo-actuador electro-hidráulico

# Cadeia de actuação elementos específicos

---

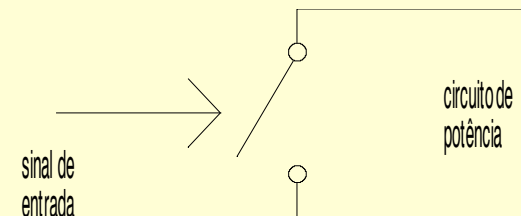
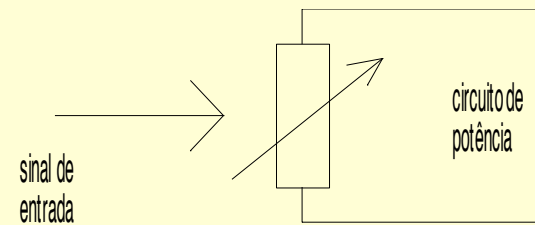
- conversão de potência
  - transístores
  - tirístores
  - amplificadores operacionais de potência
  - integrados lineares de potência
- relés
  - relés monolíticos
  - relés electromecânicos
  - relés comandados pelo computador

# Cadeia de actuação

## Transístores de potência

Transístores de potência são utilizados para dois fins diferentes:

- para amplificar o sinal de entrada, um pouco como uma válvula regulando um caudal
- como interruptor, para abrir/fechar o circuito de potência

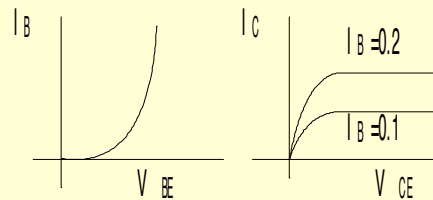
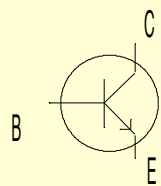




# Cadeia de actuação

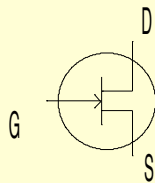
## Transístores de potência

- Bipolares ou de efeito de campo (FET)

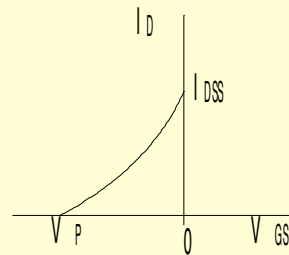


BJT (emissor comum)

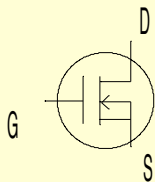
$$I_C = \beta I_B + I_{CE0}$$



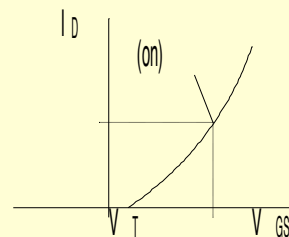
JFET



$$I_{DS} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$



MOSFET



$$I_{DS} = K (V_{GS} - V_T)^2$$

# Cadeia de actuação

## Transístores de potência

---

### Comentários:

- transístores bipolares: consumo mínimo à entrada
- FET: consumo de entrada muito reduzido
  
- resistências no estado ligado ( $R_{on}$ ) comparáveis até níveis de tensão da ordem da centena de Volt
- com tensões superiores, transístores bipolares têm resistência menor
  
- para baixas frequências (<10 kHz), os transístores bipolares apresentam perdas inferiores
- para as frequências altas os MOSFET são melhores

# Cadeia de actuação

## Transístores de potência

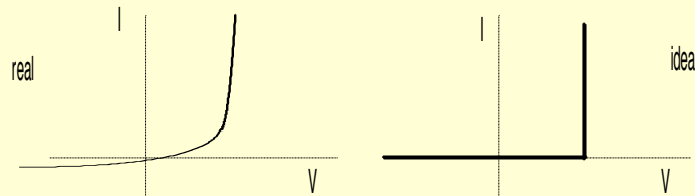
---

- Comentários:
  - O desenvolvimento dos MOSFET permite
    - transístores operando até o MHz
    - tensões da ordem de 500 V
    - em aplicações como o controlo de motores eléctricos em PWM
  - Novos transístores, bipolares com a entrada isolada (insulated gate bipolar transistors - IGBT) combinam as vantagens dos dois tipos, bipolares e FETs:
    - fracos consumos de entrada
    - grandes potências à saída (50 A, 1000 V).

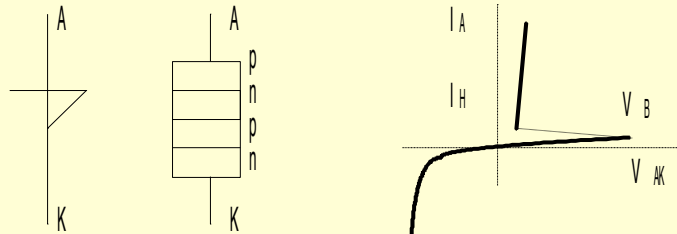
# Cadeia de actuação

## Tirístores

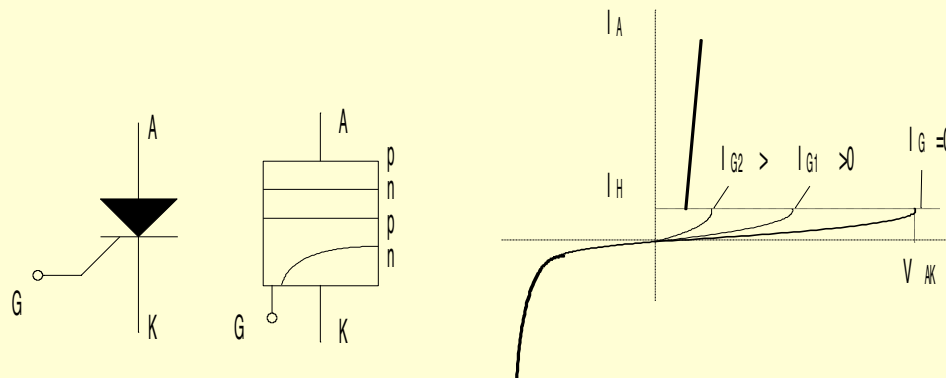
### princípio



díodo simples



díodo 4 camadas



SCR  
(silicon controlled  
rectifier)

# Cadeia de actuação

## Tirístores...

- Comentários:
  - SCR (silicon controlled rectifier): é um diodo controlado
    - tensões até 2 kV e correntes de 600 A
    - consumo dos sinais de controlo reduzido:
      - um sinal de entrada  $I_G = 50 \text{ mA}$ ,  $V_G = 1 \text{ V}$
      - permite controlar uma corrente de cerca de 100 A
    - tempo de transição da ordem de 1  $\mu\text{s}$  ao ligar e de 10  $\mu\text{s}$  ao desligar
  - **triacs** (triode ac switch) são equivalentes a dois SCRs, conduzindo nos dois sentidos, e são destinados ao **controlo de circuitos de potência ac**

# Cadeia de actuação

## Integrados de potência

- Integrados de potência:
  - AmpOp's de potência (power OpAmp - POP) admitem alimentações com tensões superiores a 44 V ( $> \pm 22$  V) e fornecem saídas com intensidades  $I_o > \pm 50$  mA
  - existem amplificadores operando com potências de 2 kW, intensidades de  $\pm 30$  V. O seu consumo atinge o kW. A banda de frequência de operação é normalmente limitada ( $< 1$  kHz)
- Circuitos integrados de potência (power integrated circuits - PIC) juntam interruptores de potência (como transístores, SCR's ou triacs) e a sua electrónica de controlo
  - permitem o controlo preciso de circuitos com até 20 A, 400 V

# Cadeia de actuação

## Relés

---

- Relés monolíticos (de estado sólido)
  - são integrados ou semicondutores
- Relés electromecânicos

# Cadeia de actuação

## Relés

- Relés integrados monolíticos (solid state relays -SSR):
  - dimensões inferiores,
  - mais rápidos (<2 ms),
  - consumo reduzido,
  - maior vida útil,
  - melhor comportamento ao serem ligados.
- Existem módulos integrados para controlar circuitos de potência ac (com triacs) ou dc (com POP's) a partir de tensões de nível lógico (TTL ou CMOS)



# Cadeia de actuação

## Relés

- relés electromecânicos:
  - boa isolamento entrada-saída,
  - vários contactos bem isolados entre si,
  - resistências de contacto inferiores àquelas dos integrados,
  - capacidades inferiores,
  - resistem melhor a transientes e a picos de corrente,
  - autorizam normalmente um funcionamento entre 75% e 125% do seu nominal;
  - com enrolamentos e logo características indutivas enquanto os integrados são essencialmente resistivos,
    - tempos de transição superiores,
    - geram altas tensões ao desligar, com a possibilidade de arco eléctrico entre os contactos.

# Cadeia de actuação

## Relés

---

### Relés electromecânicos:

- com contactos a base de prata ou ouro em função das tensões de operação;
- com contacto de mercúrio líquido;
- relés de armadura

# Cadeia de actuação

## Controlo por computador

### Com triac foto-acoplado e triac

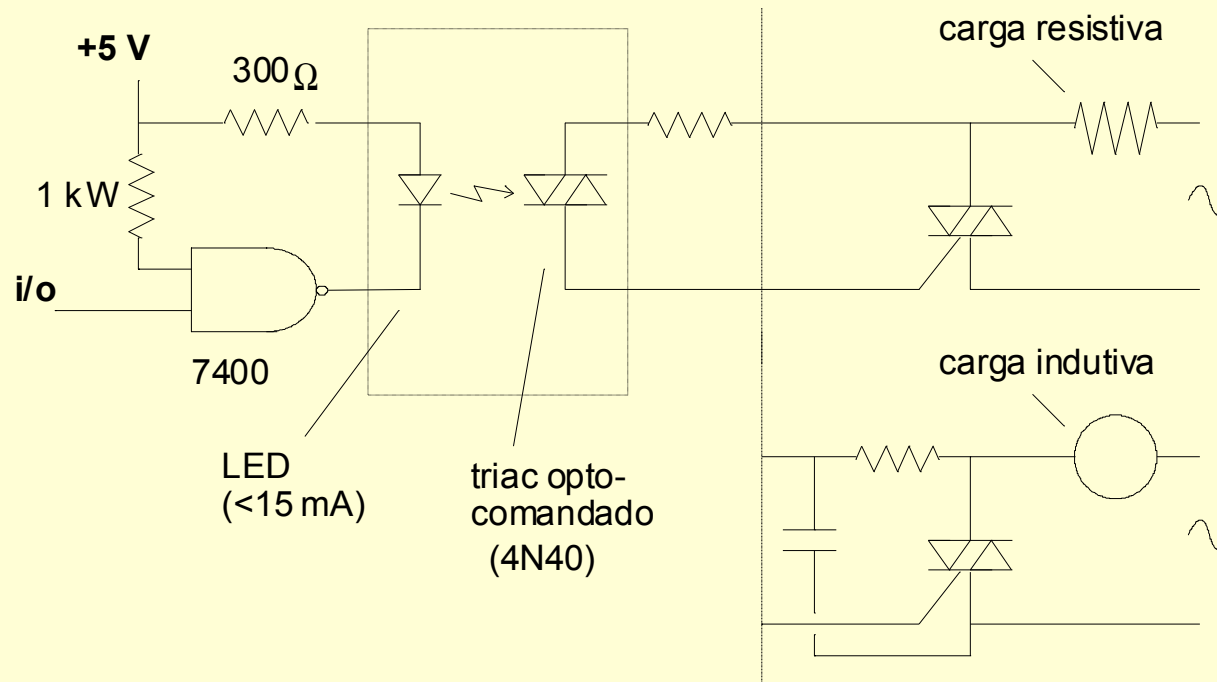


fig. relé comandado por computador



# Actuadores electromecânicos

---

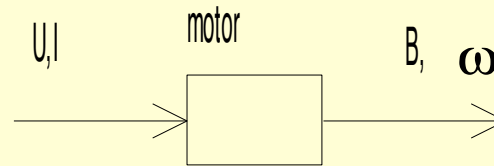
- introdução
  - posicionamento electromecânico
  - definições
  - motores dc
  - motores lineares
- motores ac
- solenóides

# Posicionamento electromecânico

- O movimento pode ser gerado por:
  - motores dc;
  - motores passo-a-passo (steppers), com binário limitado e potências inferiores a 3 kW;
  - motores ac de indução, para potências até 10 kW.
- Sensores:
  - posição: potenciométricos, codificadores, *resolvers*, magnéticos, laser.
  - Velocidade: taquímetros ou de efeito Hall.
- Conversão do movimento rotativo para linear via engrenagens, sem-fim, correntes, correias...
- Caixa redutora reduz a velocidade e aumenta o binário

# Motores eléctricos

- motor eléctrico:
  - é um sistema que converte energia eléctrica em energia mecânica.
  - o movimento gerado é usualmente de rotação  
mas existem igualmente motores lineares



- vários tipos de motores:
  - corrente de alimentação ac ou dc;
  - com íman permanente ou campo gerado;
  - com configuração eléctrica paralela, série, monofásica, trifásica...

# Motores eléctricos

- rendimento dos motores eléctricos varia
  - cerca de 30% para um pequeno motor universal
  - mais de 95% para alguns motores trifásicos
  - O rendimento é máximo no seu funcionamento nominal

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}}$$

- A definição da potência necessária depende do tipo de utilização:
  - contínua
  - cíclica
  - ocasional

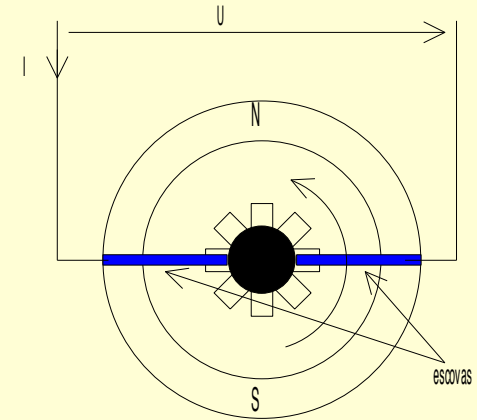
# Motores eléctricos dc

- Motores alimentados com corrente contínua (motores dc):
  - relação binário-velocidade muito versátil
  - operação contínua em gamas relativas de velocidade de 1:8
  - ajuste da velocidade de forma progressiva até anular ou inverter velocidade e binário
  - aceitam sobrecargas pontuais de até 500%
  - utilizáveis como travão, dissipando ou gerando energia eléctrica
  - elevada razão binário/inércia, permitindo uma resposta rápida ao controlo

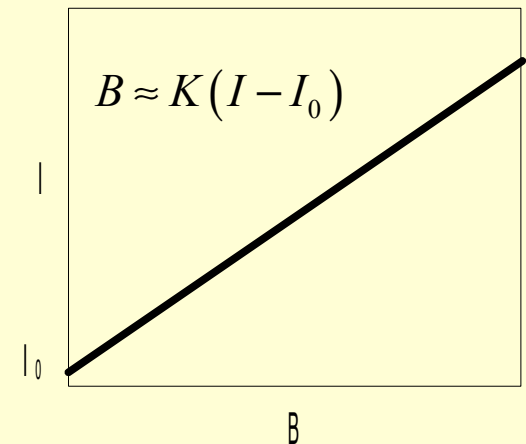


# Motor de íman permanente

- Motor de íman permanente
  - com comutação e escovas

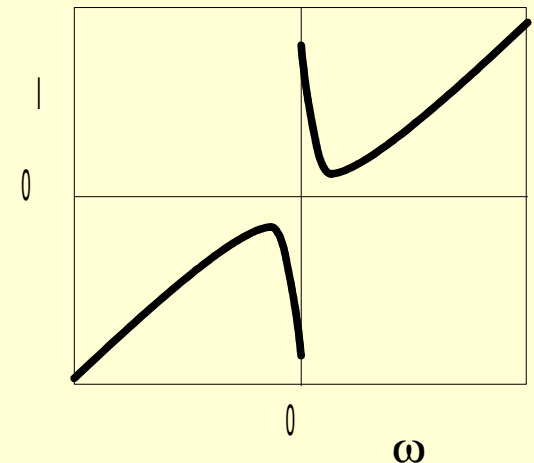
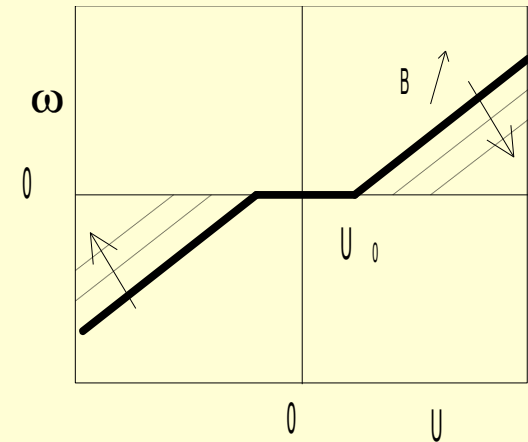


- Curvas:
  - corrente-binário
    - constante do motor  $K_t$  em Nm/A
    - para tensão constante



# Motor de íman permanente

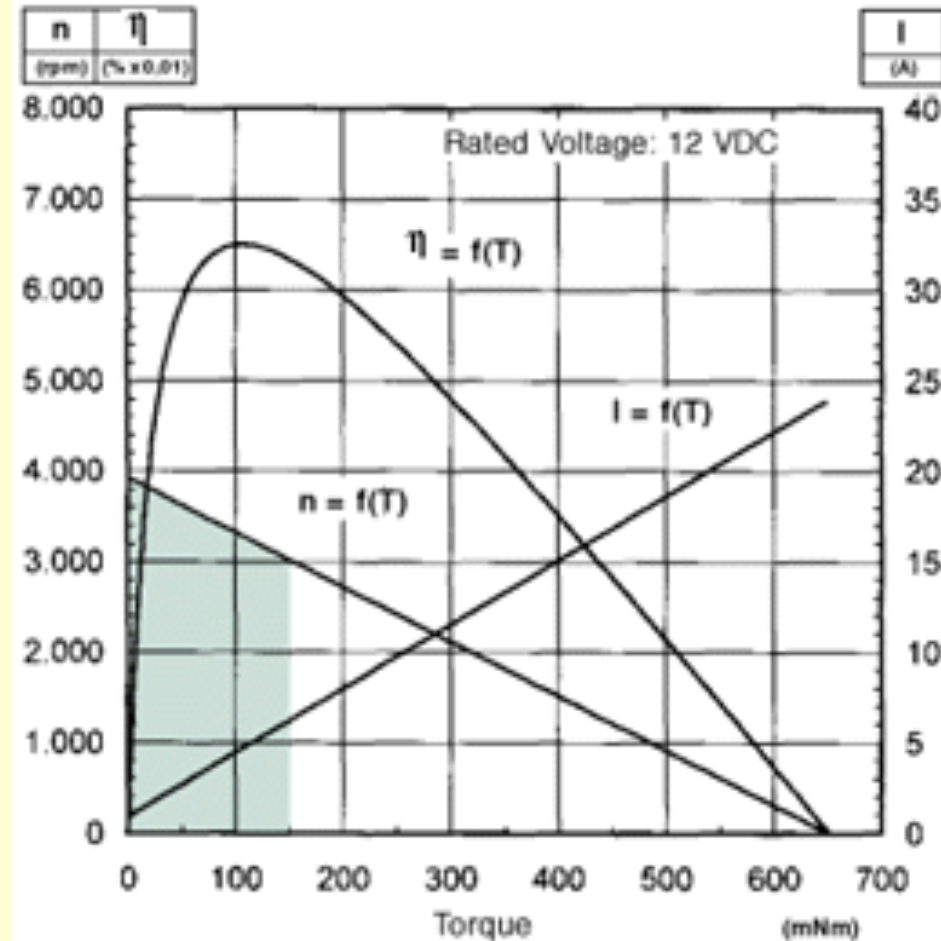
- tensão-velocidade
  - constante de velocidade  $K_V$  em V/RPM
  - zona morta  $U_0$ 
    - aumenta com binário crescente
  
- velocidade-corrente
  - arranque com corrente superior
    - atritos estáticos
  - depois crescente com a velocidade
    - para binário constante



# Motor de íman permanente

## Exemplo de um catálogo *Buehler*

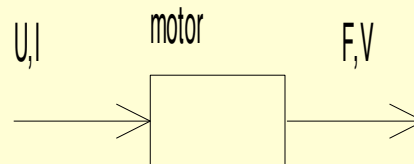
Rated Voltage	V	12
Rated Torque	mNm	150
Rated Speed	r.p.m.	3,000
Rated Output Power	W	47
Rated Current	A	6.2
Max. Allow. Const. Current *)	A	4.2
No Load Speed	r.p.m.	3,900
No Load Current	A	0.93
Stall Current	A	24.0
Stall Torque	mNm	640
Rotor Inertia	gcm <sup>2</sup>	180
Speed Regulation Constant	r.p.m./mNm	6
Torque Constant	mNm/A	28
Mech. Time Constant	ms	12.4
Electr. Time Constant	ms	1.05
Terminal Resistance	Ohm	0.5
Thermal Resistance	R <sub>th1</sub> K/W	4.8
Thermal Resistance	R <sub>th2</sub> K/W	4.6
Weight	g	765



Type: 1.13.044.235

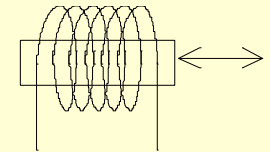
# Motores lineares

- sem peças móveis internas
- não necessita de engrenagens para conversão rotação-linear
- maior aceleração (vários  $g$ )
- tecnologia em desenvolvimento (rendimentos ainda baixos)

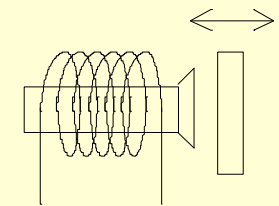


# Solenóides

- Solenóide: bobina com um núcleo ferro-magnético móvel
- Eléctro-íman: bobina com um núcleo fixo servindo para atrair um alvo ferro-magnético.
- A passagem de corrente no enrolamento:
  - gera um campo magnético
  - que exerce uma força sobre o núcleo ou o alvo
  - e provoca o seu deslocamento.
- O movimento tem obrigatoriamente uma amplitude reduzida, devido ao fraco alcance do campo magnético gerado



solenóide



electro-íman

# Solenóides

- Solenóides/electro-ímans são utilizados:
  - embraiagens, travões, relés, válvulas.
  - operação em modo dual, ligado/desligado (on/off),
  - mas algumas aplicações, usam o modo proporcional, com deslocação função da corrente aplicada ao enrolamento.
- Solenóides funcionam normalmente com movimento linear (fornecendo forças  $<1$  kN), mas existem versões com movimento rotativo.
- Tempos de resposta da ordem de 1 ms

# Actuadores eléctrico-fluidos

---

- introdução
  - energia pneumática e hidráulica
  - bombas
  - compressores
  - acumuladores
- controlo: os vários tipos de válvulas
- actuadores de fluido
  - cilindros
  - motores

# Actuadores eléctrico-fluidos

- circuito sob pressão
  - serve de intermediário
    - energia eléctrica: UI
    - energia fluídica: PQ
    - energia mecânica: FV
- série de componentes
  - para fornecer e regular a pressão
  - encaminhar o fluido
  - limpar o fluido: óleo corrosivo, gás com lubrificante
- solução comparativamente:
  - mais complexa
  - energia específica maior localmente porque mais distribuído



# Actuadores eléctrico-fluidos

## válvulas

As válvulas controlam a passagem do caudal

- em tudo ou nada
- ou proporcional:  $Q = f(I)$

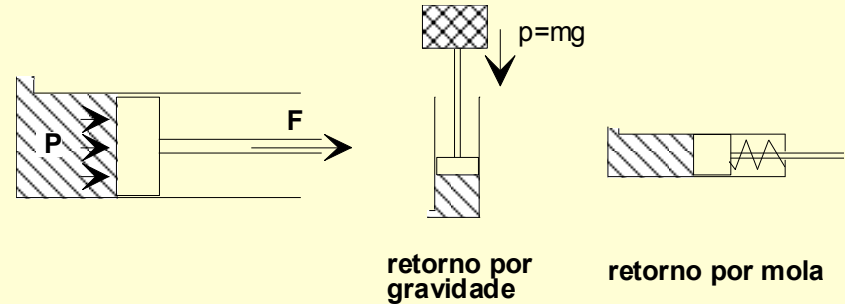
	<p>válvula direccional de corrediza longitudinal 5/2 (5 orifícios, 2 posições)</p>
	<p>válvulas de 2 posições e com 2 e 3 orifícios ou vias</p>
	<p>válvulas de 4 orifícios e com 2 e 3 posições</p>

# Actuadores eléctrico-fluidos

## cilindros

- Orgãos onde se efectua a conversão de energia flúidica para energia mecânica

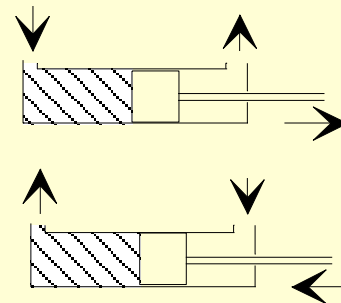
– cilindros de simples efeito



retorno por gravidade

retorno por mola

– cilindros de duplo efeito



cilindro de duplo efeito



cilindro de haste dupla

# Comparação

## Comparação actuador electromecânico-pneumático

motor eléctrico	motor a ar
<ul style="list-style-type: none"> <li>regulação em velocidade <math>\pm 10\%</math> ou complexa;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pela válvula utilizada, a regulação em velocidade efectua-se facilmente numa gama relativa de 1:30;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>sobrecargas ou bloqueio põem em perigo o motor;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>auto-arrefecido, o motor a ar aceita bem a variação de binário;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>a inversão do motor eléctrico é complexa e dissipa calor;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a inversão não levanta problemas;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>relação peso/potência melhor – a potência igual, é cerca de 3 vezes mais leve;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>sensível à temperatura ambiente;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pouco sensível à temperatura ambiente;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>sensível às condições ambientais;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pode trabalhar em ambiente perigoso sem ocorrência de arcos eléctricos;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>usa-se de forma contínua, sem situações de excepção;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>rendimento global elevado, de 45 a 70%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rendimento global baixo, de cerca de 20%.</li> </ul>

# Cadeia de actuação e actuadores

---

- Cadeia de actuação
  - introdução
  - conversão de potência
  - relés
- actuadores eléctromecânicos
- actuadores eléctrico-flúidos
  - eléctrico-pneumático
  - eléctrico-hidráulico

# ÍNDICE

---

- Cadeia de Medida
- Sensores do movimento
  - posição linear e angular, proximidade, velocidade e aceleração
- Grandezas mecânicas
  - forças, binários, pressão, nível
- Escoamentos e caudais
- Temperatura
- Cadeia de actuação e actuadores

# Sensores a Actuadores

## Monitorização e Controlo

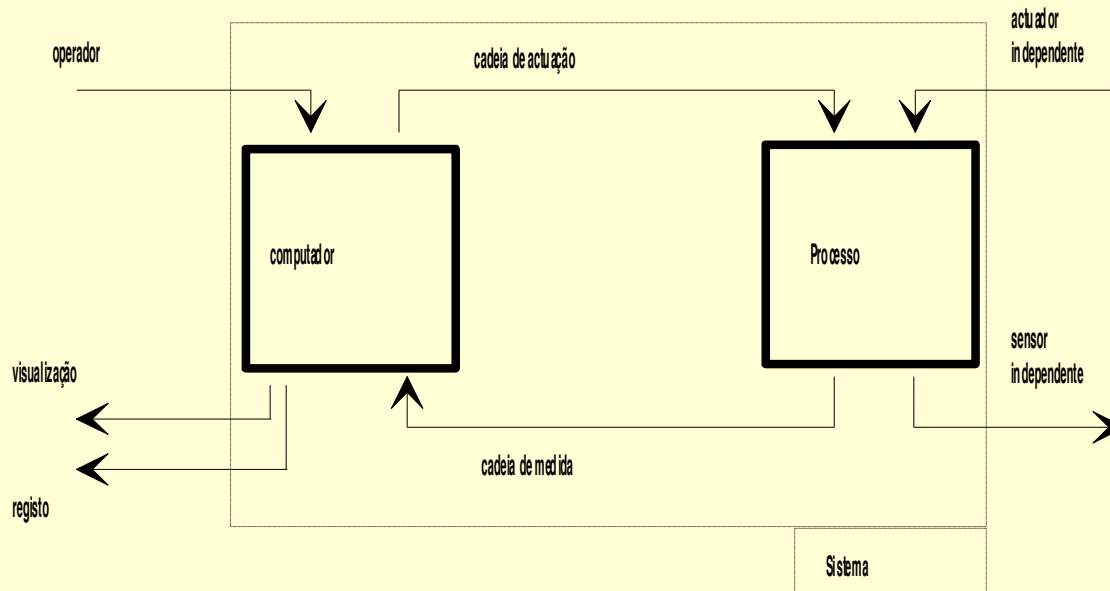


fig. um processo automatizado

- Cadeia de medida: monitorização
- Cadeia de actuação: controlo

# Sensores a Actuadores

Fim...