

SENSORES EM ROBÓTICA

PMR3502

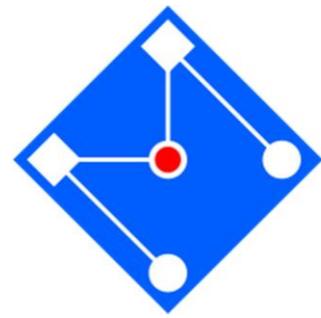
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

Arturo Forner-Cordero [aforner@usp.br]

Eduardo L.L. Cabral

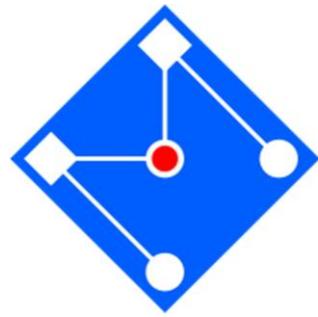
Thiago de Castro Martins

SUMÁRIO



- ❑ Objetivo: Estudar sensores utilizados pelos robôs para perceber o seu ambiente.
- ❑ Classificação dos sensores.
 - ❑ Precisam de alimentação?
 - ❑ Absolutos ou relativos?
- ❑ Características dos sensores
- ❑ Tipos de sensores.
 - ❑ Quê medem? Estado do robô ou estado do ambiente
 - ❑ Tipo de magnitude:
 - ❑ Mecânica: posição, orientação, distância, velocidades e acelerações. Forças, torques, contato
 - ❑ Térmica: temperatura
 - ❑ Radiação: ondas eletromagnéticas
 - ❑ Elétrica, magnética: tensão, corrente, densidade de fluxo, permeabilidade
 - ❑ Química: concentração de material

UTILIDADE DOS SENSORES

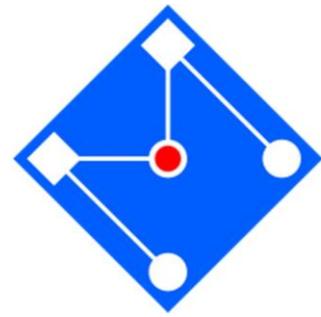


Porque não programar um robô para realizar suas tarefas sem a necessidade de sensores?

- Presença de incertezas;
- Ambientes são dinâmicos;
- Detecção e correção de erros;
- Prover habilidade de tomar decisões \Rightarrow autonomia.

Em geral, vemos que um controle em malha fechada vai precisar de sensores

EXEMPLO DE SENSORES NOS ROBÔS MÓVEIS



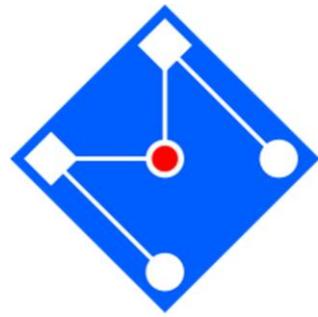
➤ Robô BibaBot da BlueBotics SA, Switzerland.

- Sistema inercial
- Encoders nas rodas
- Câmera Omnidirecional

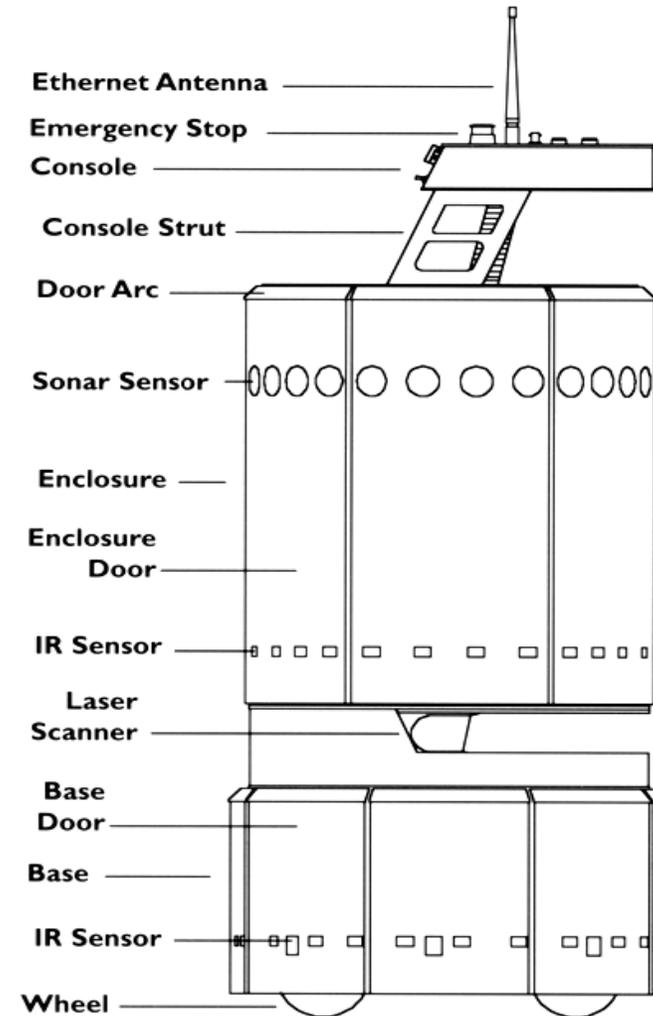


- Câmera com movimento de “pan” e “tilt”
- Sonares
- Scanners a laser
- Pára-choque com sensor de contato

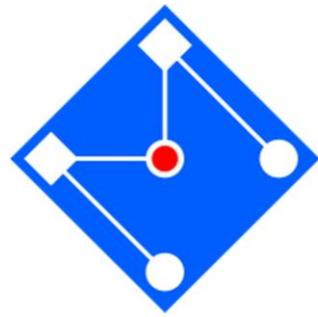
EXEMPLO DE SENSORES NOS ROBÔS MÓVEIS



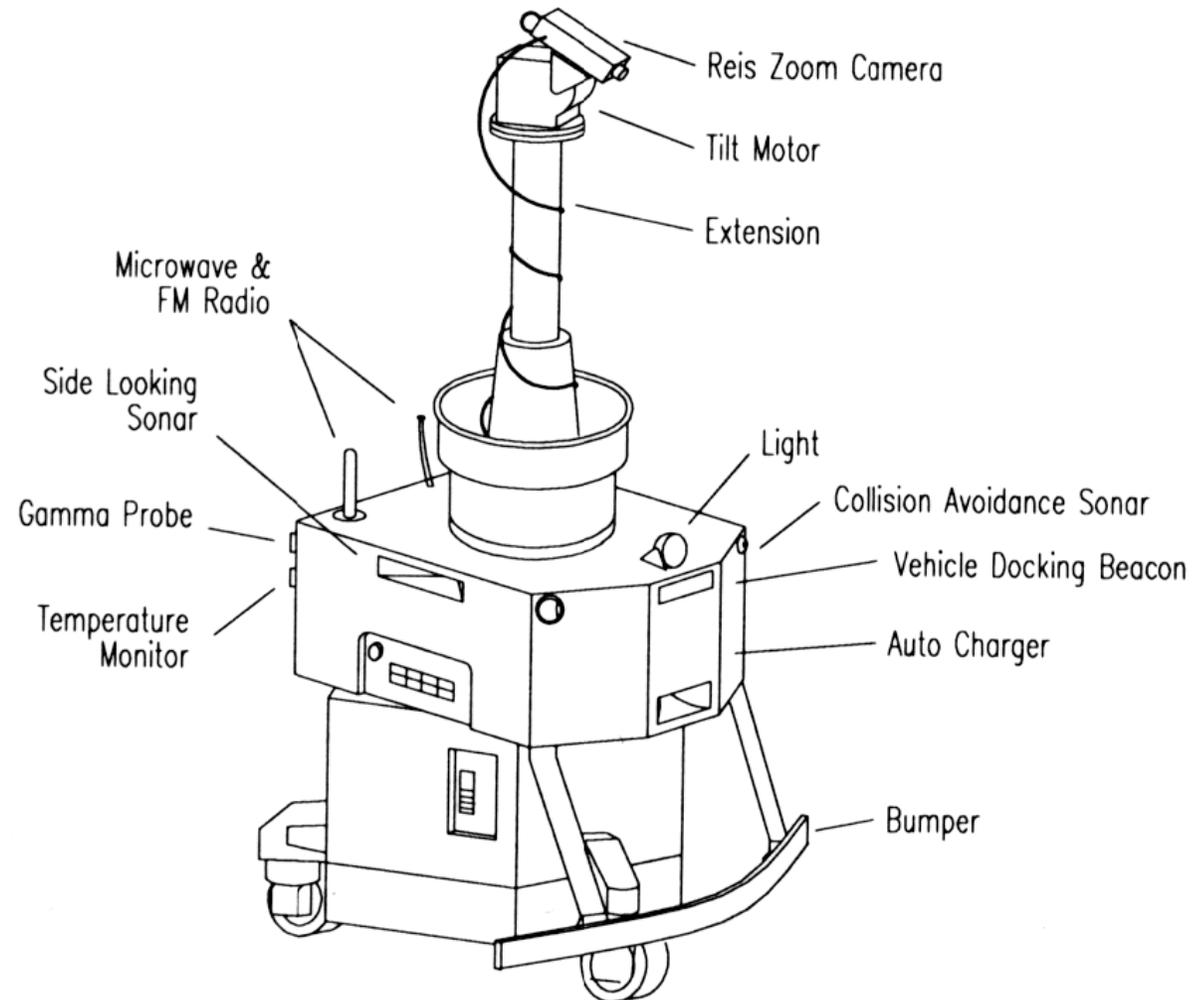
- Robô B21 da Real World Interface



EXEMPLO DE SENSORES NOS ROBÔS MÓVEIS



- Robô de monitoramento de segurança Savannah, da River Site.



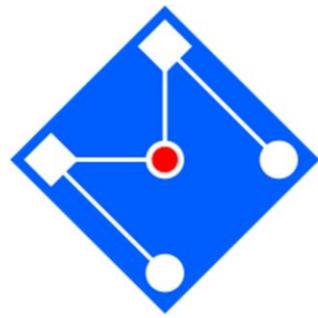
EXEMPLO DE SENSORES NOS ROBÔS MÓVEIS



- Robô Scorpion da Evolution Robotics.
 - Câmera Logitech QuickCam Pro 3000 (640 X 480 pixels).
 - Microfone para reconhecimento de sons e vozes.
 - Sensores infra-vermelho (20 ao todo):
 - Para choque com sensores de contato.



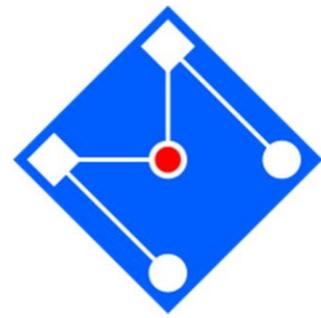
EXEMPLO DE SENSORES NOS ROBÔS MÓVEIS



- Robô PeopleBot da Activmedia Robotics



CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES



Sensores proprioceptivos/exteroceptivos:

- Sensores proprioceptivos medem grandezas internas do robô (ex. velocidade do motor, orientação do robô);
- Sensores exteroceptivos obtém informação do ambiente (ex. distância de objetos).

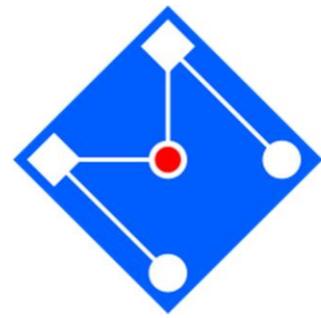
Sensores passivos/ativos:

- Sensores passivos usam fonte de energia externa (ex. sensor temperatura);
- Sensores ativos emitem energia e medem a reação (ex. sonar).

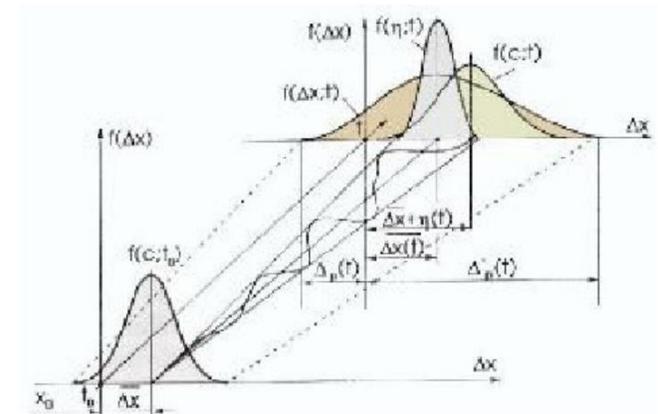
Sensores absolutos/relativos:

- Sensores absolutos fornecem uma medida absoluta
- Sensores relativos informam da magnitude e sentido da mudança

RELEMBRANDO CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES

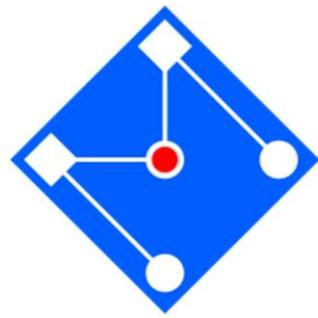


- Linearidade: Relação entre entrada e saída segue linha reta
- Histerese: Relação entre entrada e saída depende do aumento ou decrescimento
- Repetibilidade: Variabilidade da saída para a mesma entrada
- Resolução: Mínima mudança da entrada detectável
- Sensibilidade: Relação de variação da saída para a variação da entrada
- Ruído na saída
- Largura de banda ou velocidade de resposta
- Acurácia ou exatidão:
- Precisão:



Mazais et al.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DOS SENSORES



Intervalo de leitura:

- Limites inferior e superior de medida.

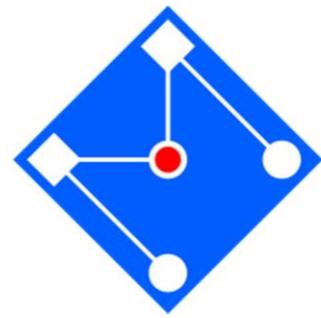
Intervalo dinâmico:

- Relação entre limites inferior e superior de medida, usualmente em decibel (dB);
- Ex. medida de potência entre 1mW e 20W ($20\log[20/0.001] = 43$ dB);
- Ex. medida de voltagem entre 1mV e 20V ($20\log[20/0.001] = 43$ dB);

Linearidade:

- Variação da saída do sinal em função do sinal de entrada;
- Linearidade não é muito importante quando o sinal é tratado em um computador após a medida.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DOS SENSORES



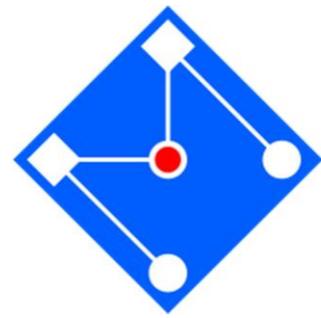
Frequência de corte ou largura de banda:

- Determina a velocidade que um sensor fornece um conjunto de medidas;
- Usualmente existe um limite superior que depende do sensor e da taxa de amostragem.

Resolução:

- Menor valor medido, ou diferença mínima entre dois valores de leitura;
- Usualmente o limite inferior do intervalo dinâmico é igual a resolução;
- Em geral para sensores digitais a resolução é igual à resolução do conversor A/D;
- Ex. intervalo de medida = $[0 \text{ 5V}]$, conversor A/D de 8 bit \Rightarrow Resolução = $5/256\text{V}$.

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO



Exatidão ou acurácia:

- É a diferença entre a medida do sensor e o valor real da grandeza medida (ou seja, o erro de medida);

$$\text{Exatidão} = \frac{m - v}{v}$$



onde m é o valor medido e v é o valor real.

Repetibilidade e precisão:

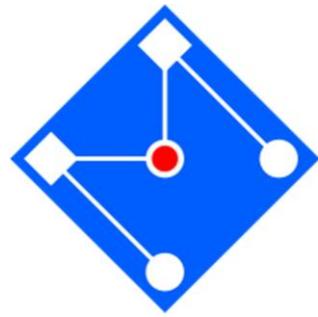
- É a capacidade de repetir a mesma medida para um mesmo valor da grandeza medida;

$$\text{Repetibilidade} = \frac{\text{range}}{\sigma}$$

onde σ é o desvio padrão da medida.



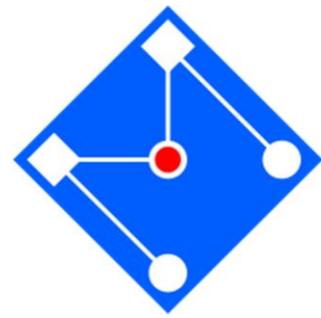
TIPOS DE SENSORES



Veremos a continuação diferentes tipos de sensores amplamente utilizados em robótica, organizados de acordo com a magnitude medida.

Posição e velocidade

SENSOR DE POSIÇÃO E VELOCIDADE



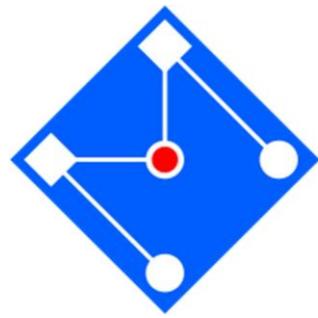
Existem diversos tipos de sensores de posição, de orientação e de velocidade linear e angular.

Tipo de sensor usado depende do tipo de veículo:

- Veículos terrestres \Rightarrow encoder para medir velocidade angular das rodas é o mais utilizado;
- Veículos aéreos \Rightarrow tubo de pitot para medir velocidade do ar, altímetro para medir altura etc;
- Embarcações \Rightarrow tubo de pitot para medir velocidade da água.

Nos robôs móveis são usados para medir posição angular e velocidade dos motores.

ENCODERS



Encoders medem posição e velocidade angular ou linear \Rightarrow nos robôs móveis são utilizados para medir velocidade, posição e direção de rotação das rodas.

Encoders são sensores proprioceptivos \Rightarrow medem grandeza interna.

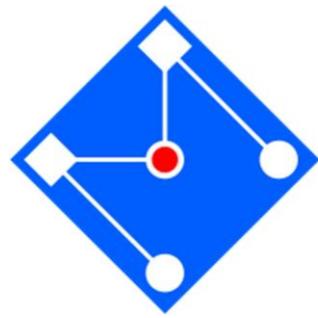
Tipo de encoders \Rightarrow incremental e absoluto:

- Para medir velocidade das rodas de um veículo usa-se encoder incremental;
- Encoder incremental \Rightarrow mede posição angular relativa, zero quando desligado;

Encoder absoluto:

- Permite obter posição absoluta da roda \Rightarrow não zero quando desligado;
- Muito pouco utilizado nos robôs móveis.

ENCODER



Encoders óticos

Luz atravessa grade e máscara que codifica o ângulo é captada por fotorreceptor:

- Absolutos

Código único para cada posição angular

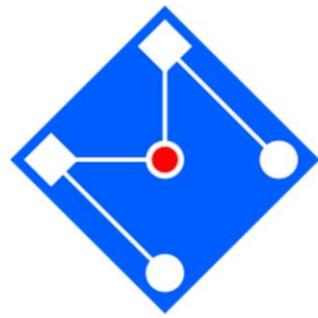
- Incrementais

Gera pulsos por cada incremento angular. Perde a referencia quando desligado

Encoders magneto-resistivos

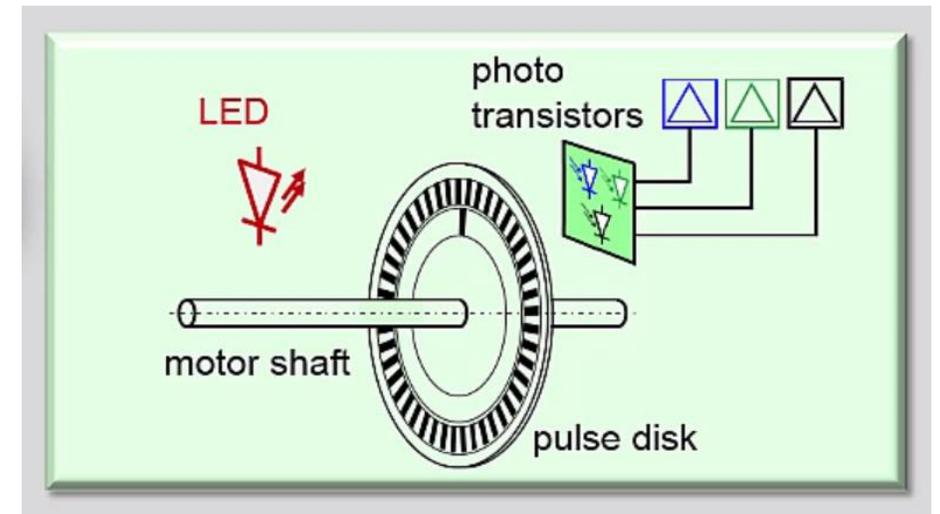
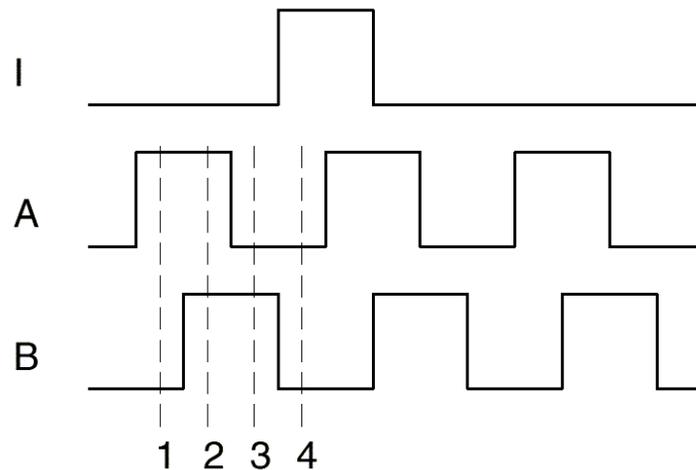
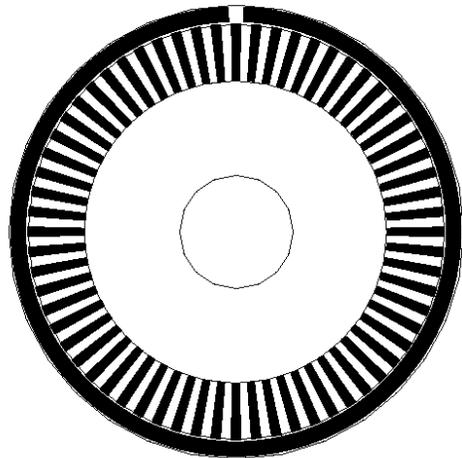
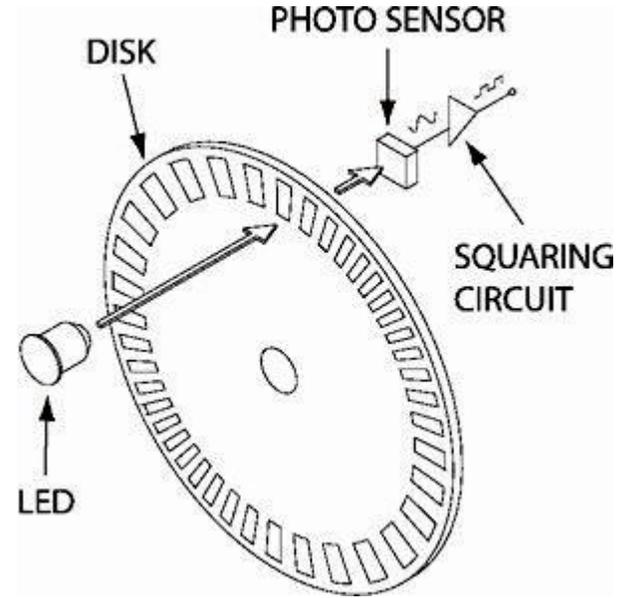
Encoders baseados em sensores Hall

ENCODER INCREMENTAL

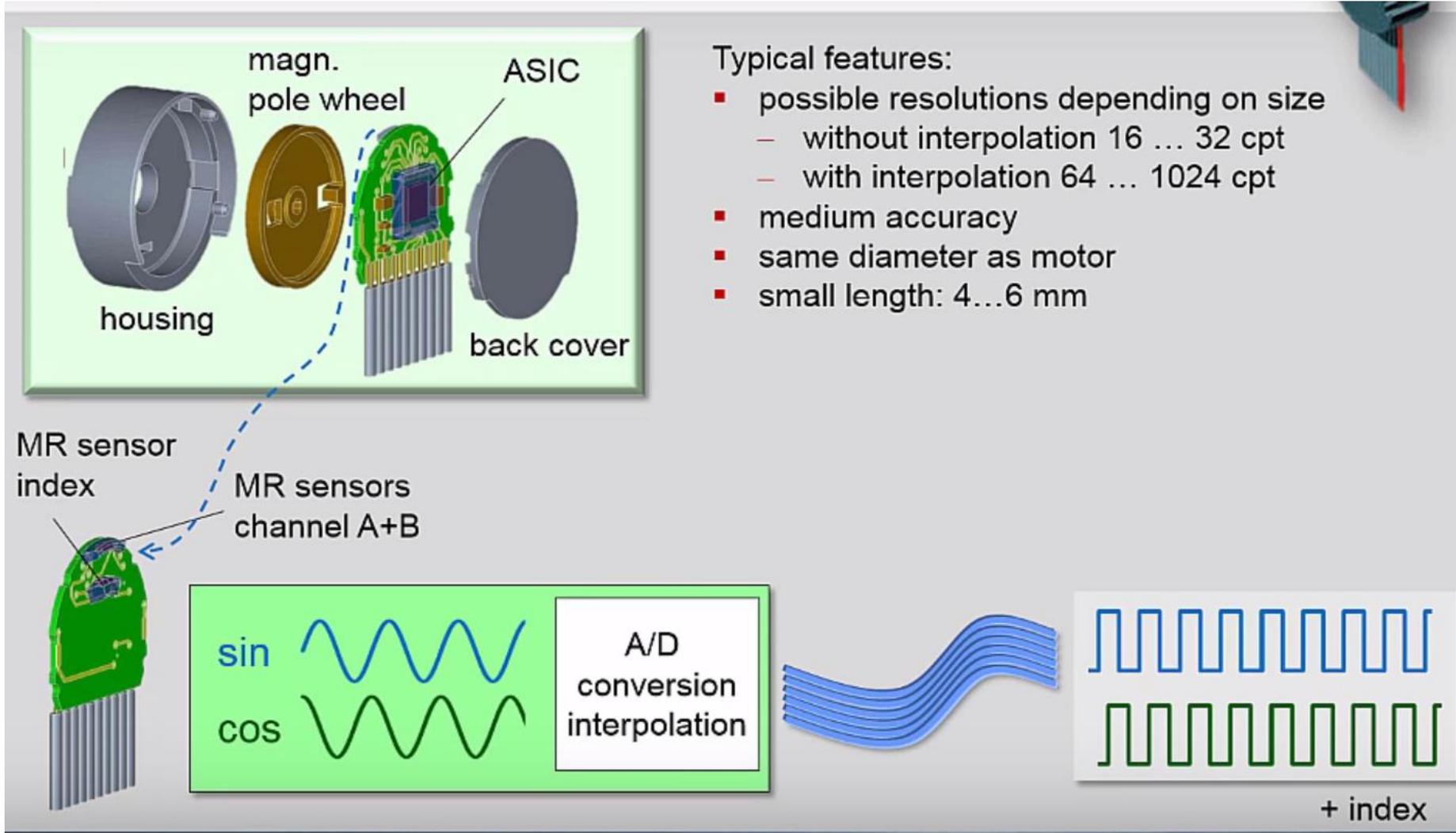
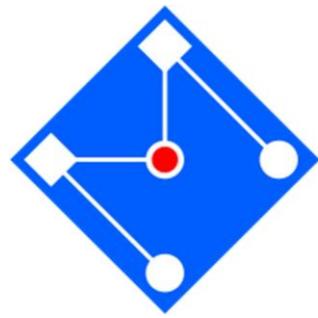


Princípio de funcionamento:

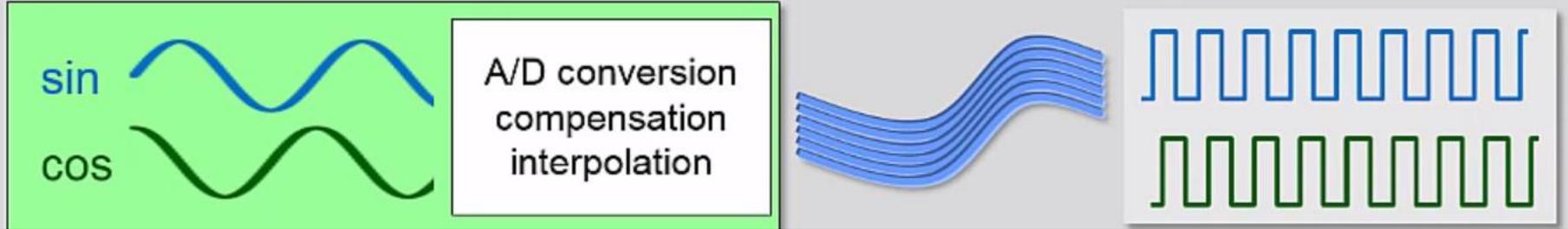
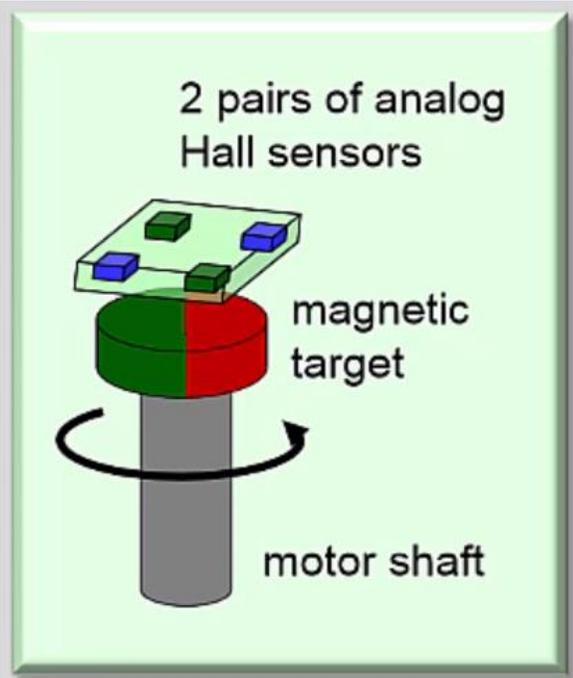
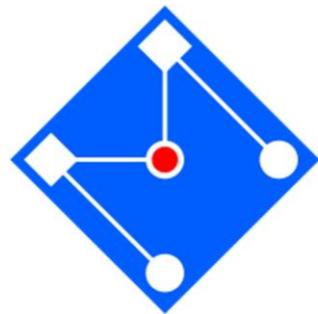
| State | Ch A | Ch B |
|----------------|------|------|
| S ₁ | High | Low |
| S ₂ | High | High |
| S ₃ | Low | High |
| S ₄ | Low | Low |

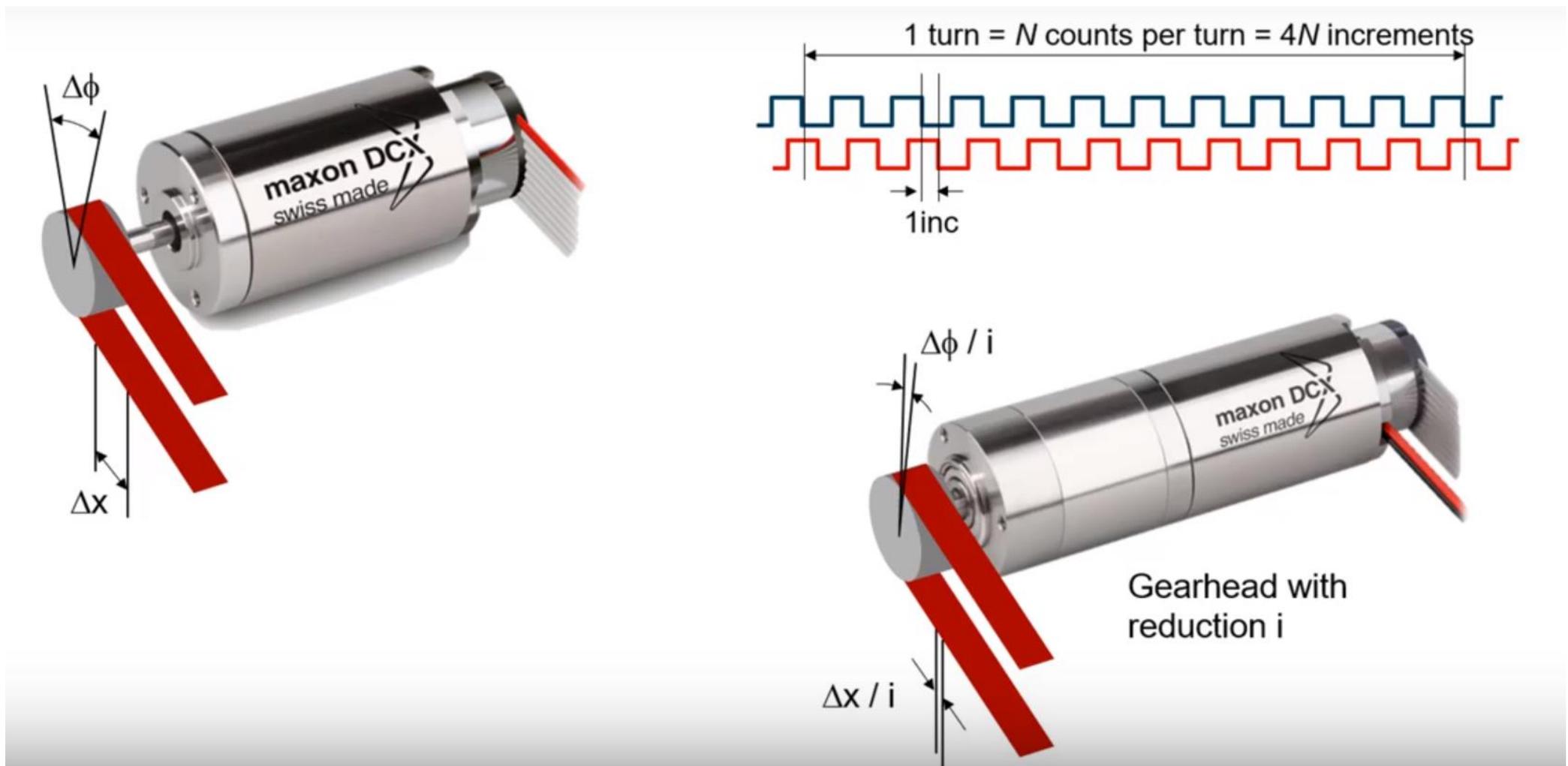
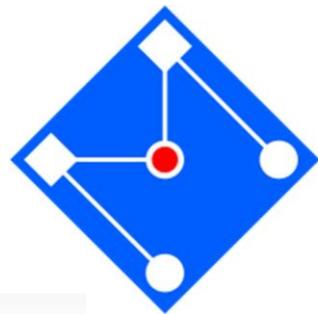


ENCODERS MAGNETO-RESISTIVOS

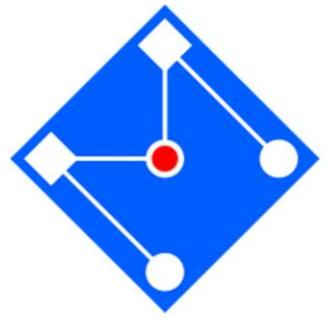


ENCODER MAGNÉTICO (SENSORES HALL)





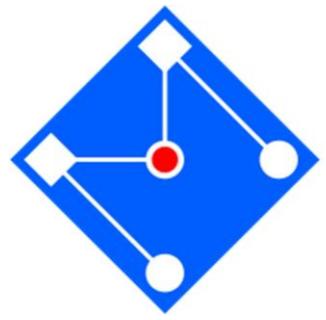
ENCODER



https://www.youtube.com/watch?v=Z9Q_ND9gQug

Maxon motors

ENCODER INCREMENTAL



Resolução de um encoder incremental:

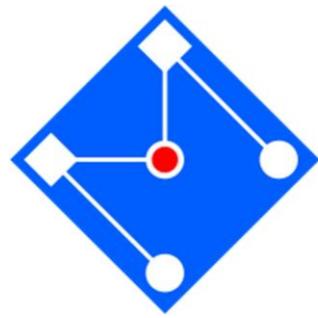
$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{4N_{cpt}} ; N_{cpt} \text{ Numero de contas por volta (counts per turn)}$$

- Pode-se medir as transições dos pulsos;
- Cada ciclo gera 4 contagens;
- Resolução aumenta 4 vezes em relação ao número de ciclo.

Pode-se integrar o sinal dos encoders das rodas para obter estimativa de posição/orientação do robô \Rightarrow **odometria**.

Estimativa de posição e orientação do robô em relação à um sistema de coordenadas fixo é boa somente para pequenos movimentos.

ENCODER INCREMENTAL



Dado um encoder de N_{cpt} contas por volta:

- Variação da posição angular em um período de amostragem:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi n}{N_{cpt}} \text{ (rad)}$$

- Cálculo da velocidade angular:

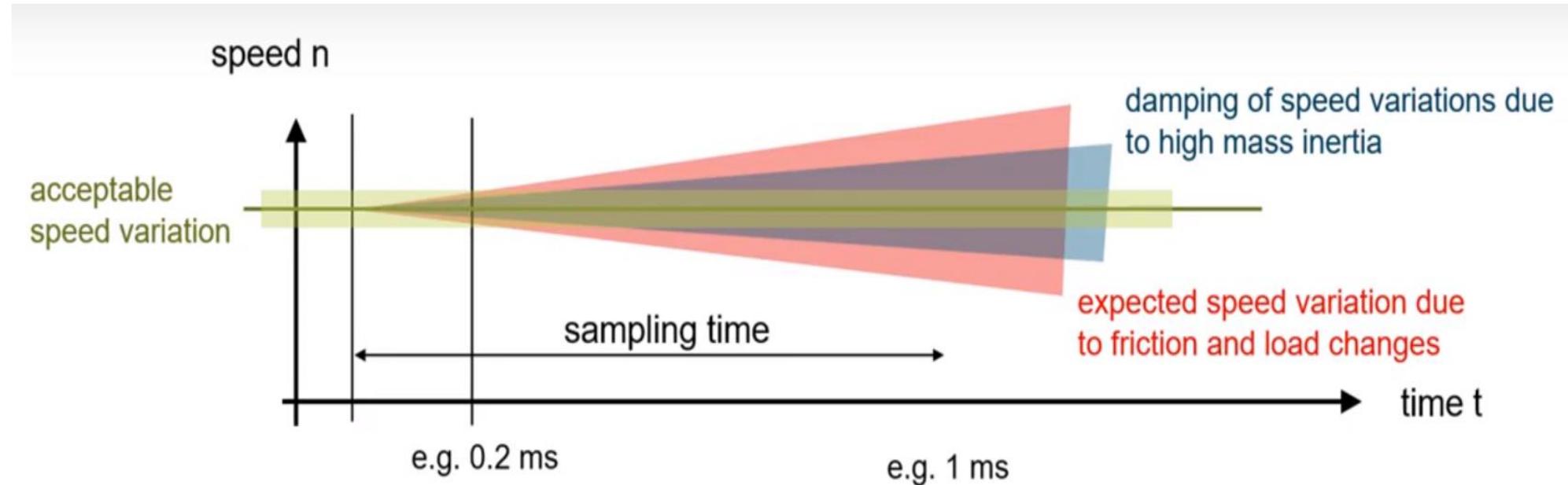
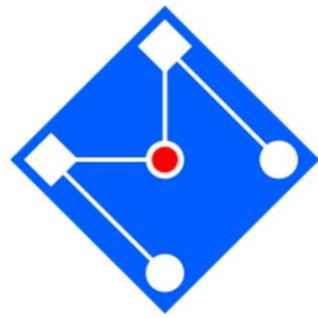
$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi n}{TN_{cpt}} \text{ (rad/seg)}$$

- n número de contagem de pulsos em um intervalo de tempo T (segundos);

N_{cpt} = número de contas por volta do encoder;

T = período de amostragem.

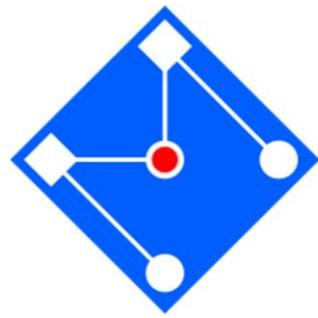
ENCODER INCREMENTAL. CALCULO DA VELOCIDADE



Aumentar a frequência de amostragem:

- Reduz a variação de velocidade;
- Diminui o número de contagens aumentando o erro de quantização

ENCODER INCREMENTAL



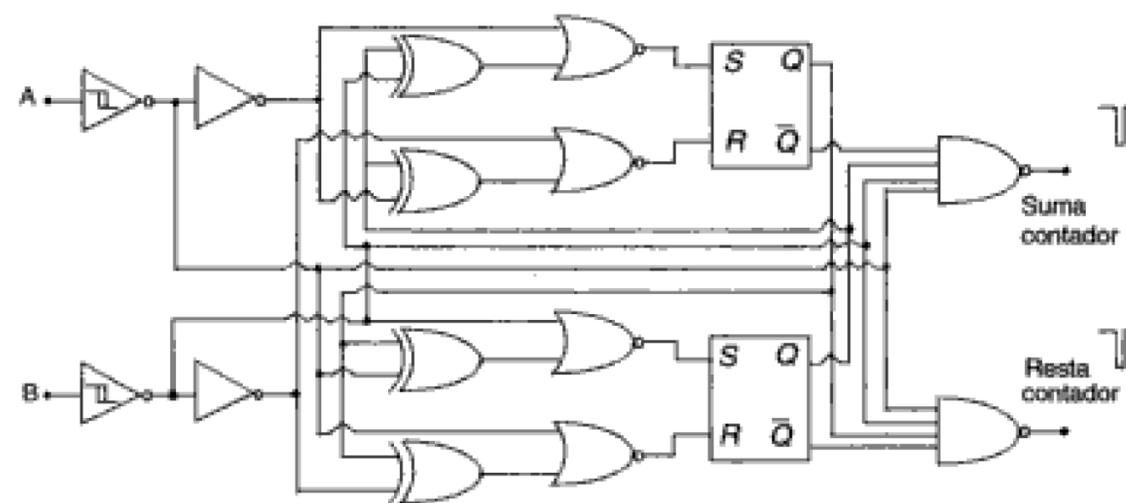
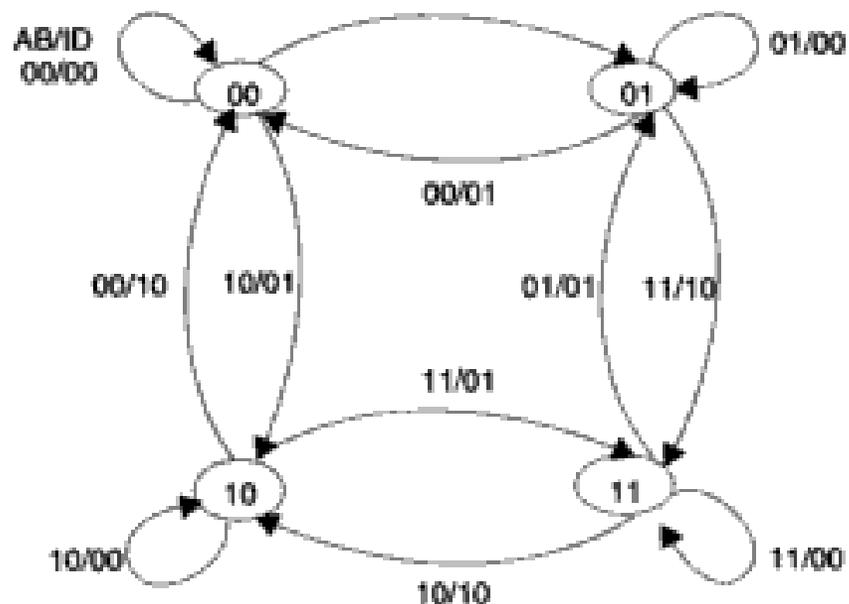
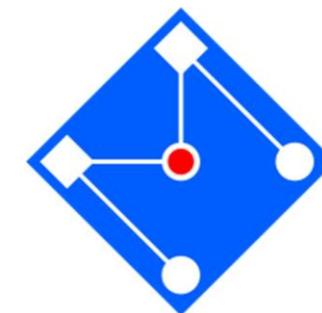
Vantagens do encoder:

- Barato, simples, robusto;
- Diversas resoluções \Rightarrow desde altas até baixas, fácil de obter um modelo adequado para o que se deseja;
- Fácil de obter um modelo adequado para o que se deseja.

Desvantagens do encoder:

- Para ter boa resolução na medida de velocidade \Rightarrow necessário alta resolução;
- Encoder com pequeno número de contatos provoca erros de quantização

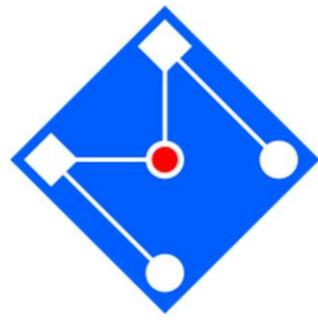
DECODER



Máquina de estados e circuito digital para determinar o sentido de giro e contagem para calcular o ângulo.

É necessário definir a origem do ângulo, pois a referência é relativa.

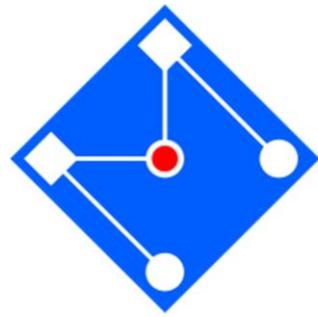
ENCODERS - EXEMPLO



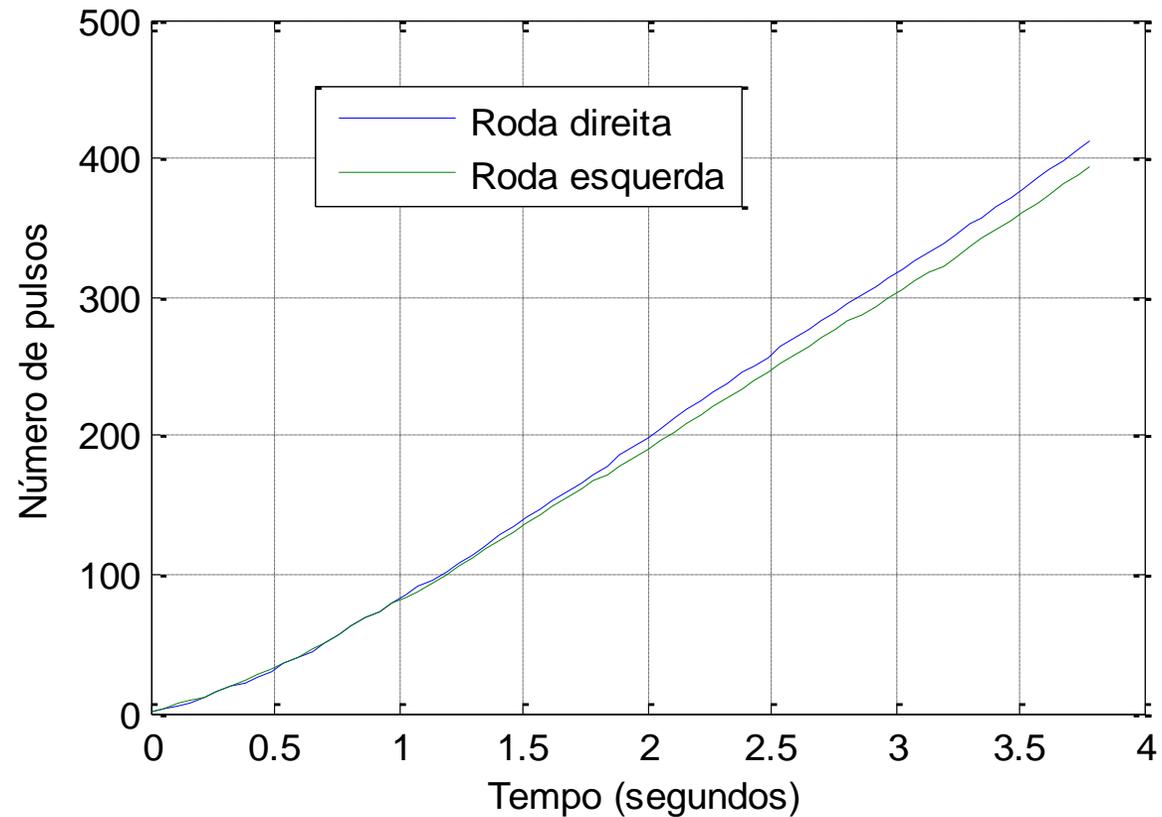
Demonstração dos sinais de um encoder:

- Robô de duas rodas diferenciais \Rightarrow um encoder em cada roda.
- Resultados:
 - Medidas fornecidas pelos encoders;
 - Cálculo da posição e velocidade angular das rodas do robô;
 - Cálculo das estatísticas dos sinais de velocidade das rodas do robô.
- Dois casos \Rightarrow robô se movimentando em linha reta e em círculo no sentido horário.
- Para cada movimento do robô:
 - Adquiridas as sequências de medidas do encoders das rodas direita e esquerda;
 - Frequência de amostragem utilizada $\Rightarrow f_a = 18,5\text{Hz}$;
 - Número de contagens do encoder $\Rightarrow 24$.

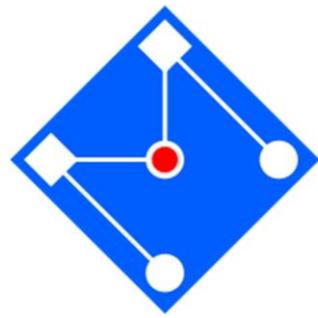
ENCODERS - EXEMPLO



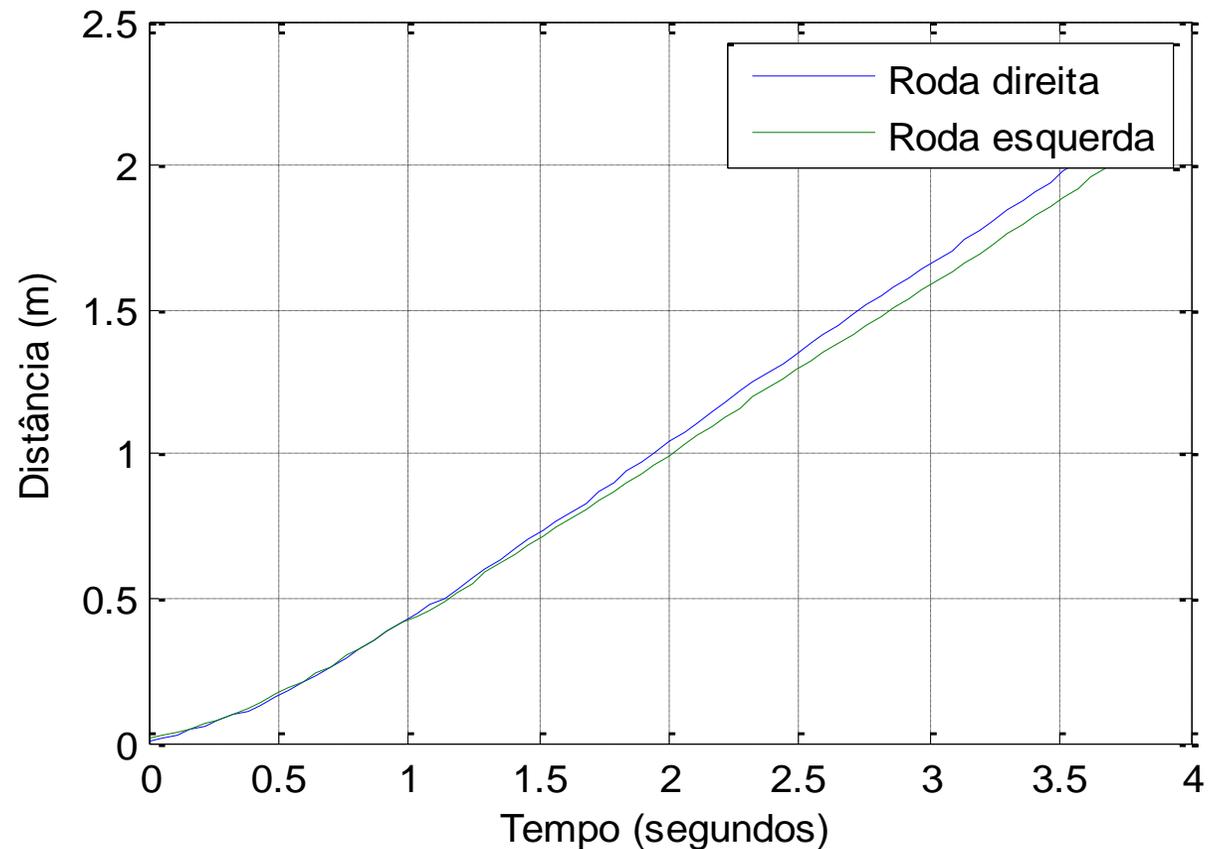
- Sinais adquiridos pelos encoders (robô movimentando em linha reta):



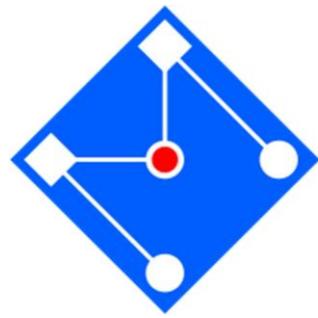
ENCODERS - EXEMPLO



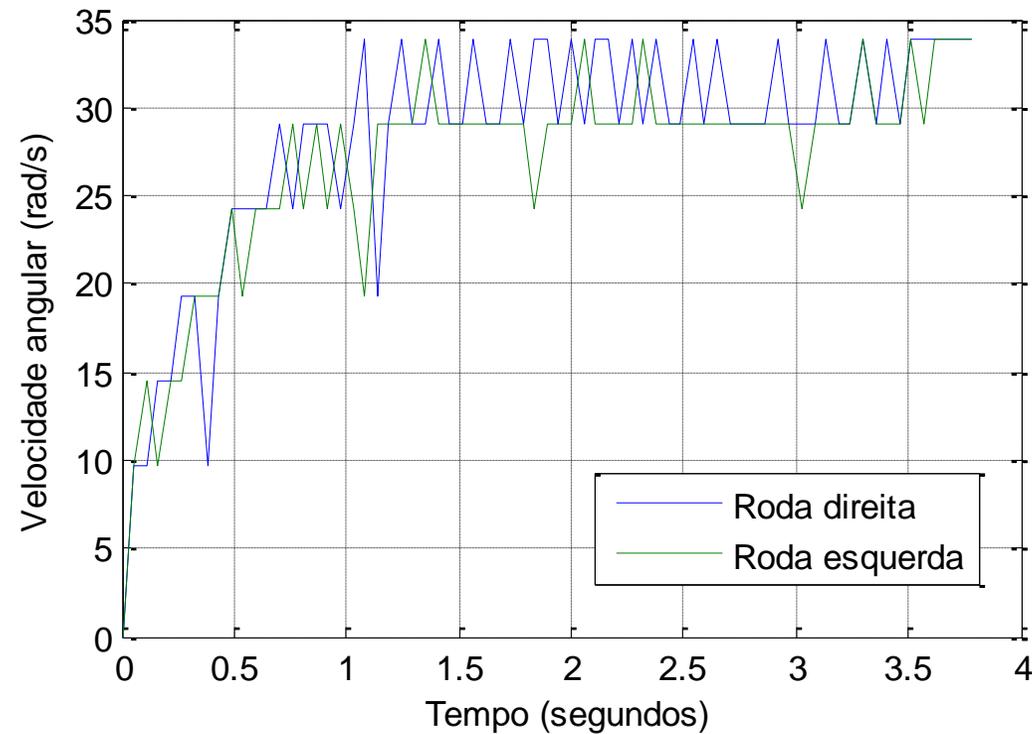
- Posição das rodas em função do tempo (robô movimentando em linha reta):



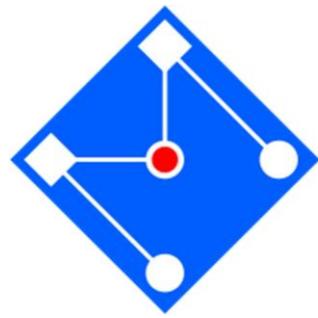
ENCODERS - EXEMPLO



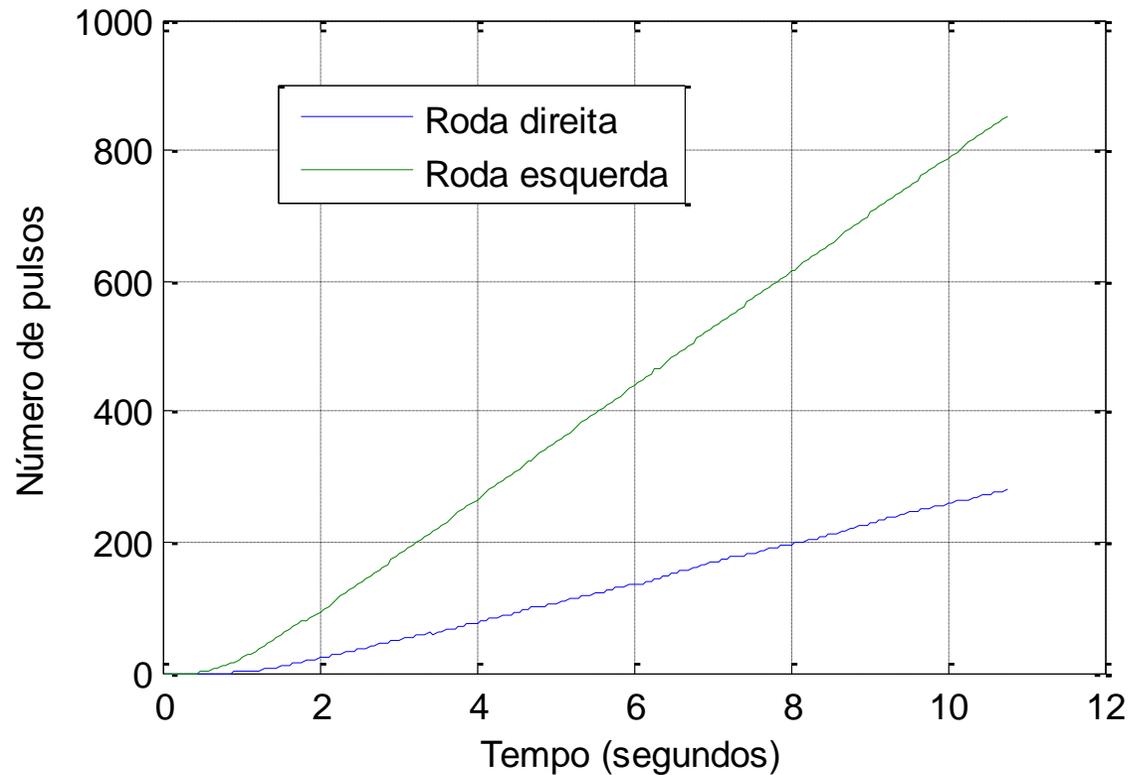
- Velocidades angulares das rodas em função do tempo (robô movimentando em linha reta):



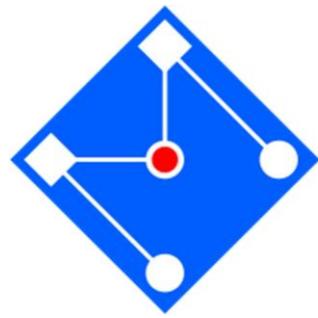
ENCODERS - EXEMPLO



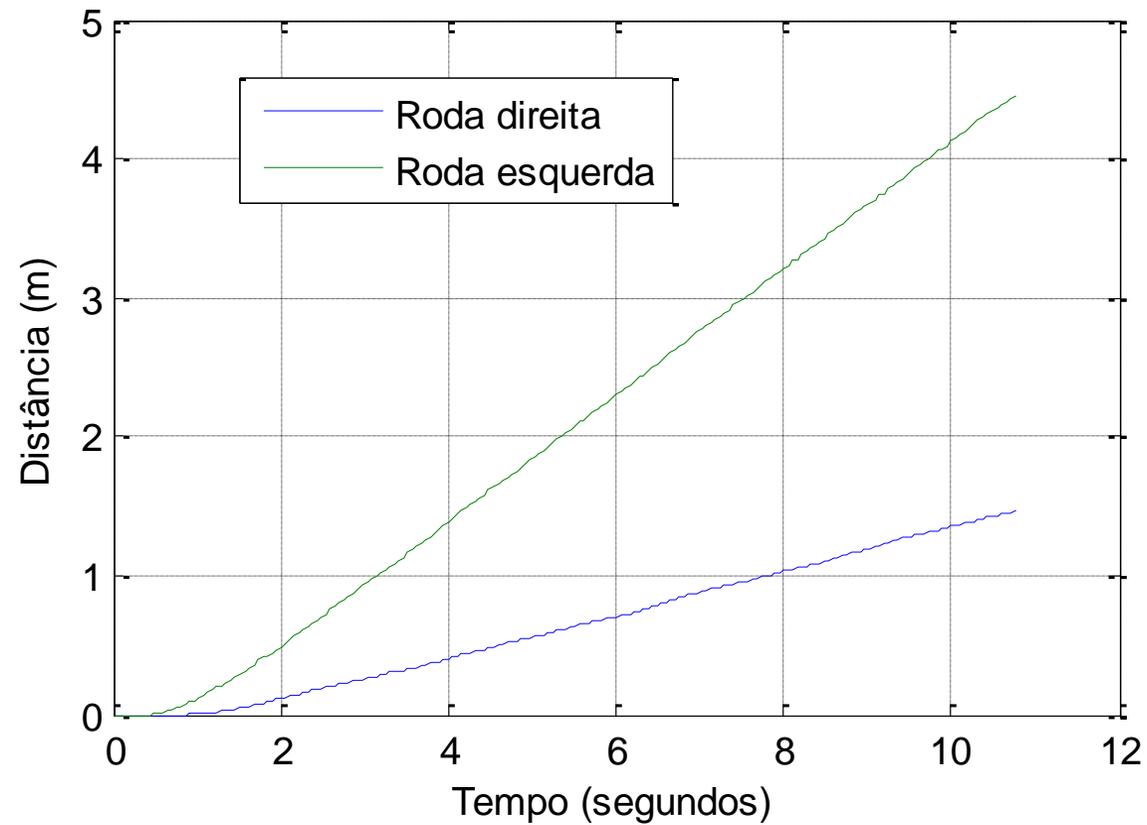
- Sinais adquiridos pelos encoders (robô movimentando em círculo):



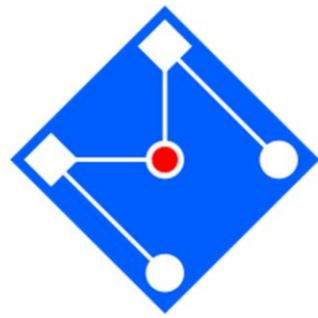
ENCODERS - EXEMPLO



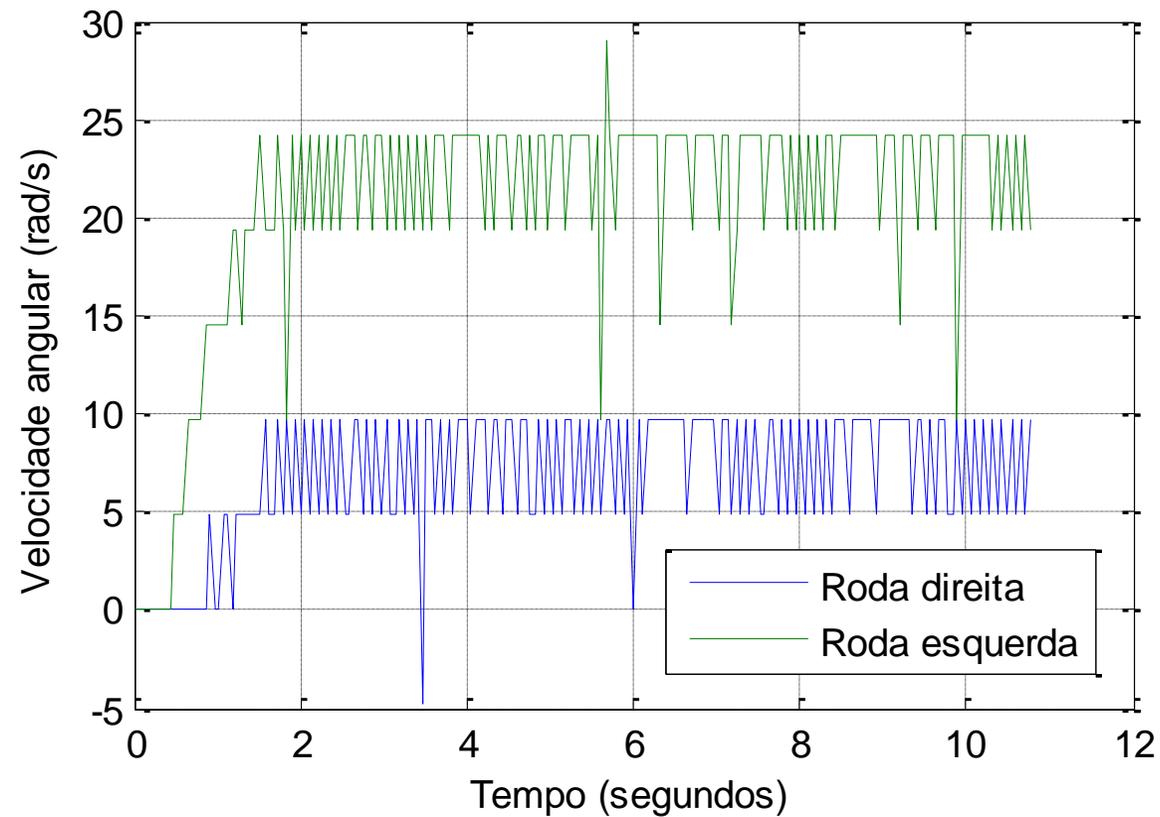
- Posição das rodas em função do tempo (robô movimentando em círculo):



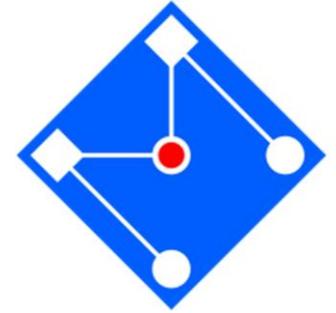
ENCODERS - EXEMPLO



- Velocidades angulares das rodas em função do tempo (robô movimentando em círculo):



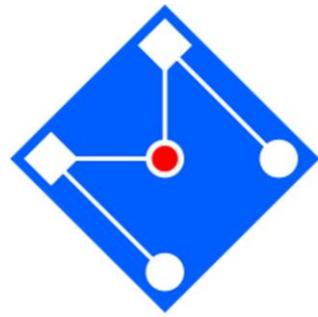
ENCODERS - EXEMPLO



- Estatísticas dos sinais dos encoders:
 - Cálculo das estatísticas das velocidades angulares calculadas usando os sinais dos encoders;
 - Parâmetros calculados \Rightarrow média e desvio;

| Condição | Roda | Valor médio | Desvio padrão |
|--------------------|----------|-------------|---------------|
| Robô em linha reta | Direita | 31,42 | 2,45 |
| | Esquerda | 29,65 | 2,22 |
| Robô em círculo | Direita | 7,70 rad/s | 2,62 rad/s |
| | Esquerda | 22,68 rad/s | 2,84 rad/s |

SENSORES DE CONTATO



Utilizados para verificar contato, tipos de superfície e esforços no contato.

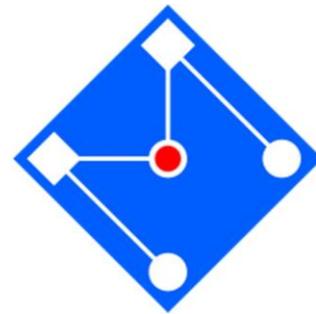
Sensores de contato:

- Podem detectar e medir a força de contato \Rightarrow sensor de força com “strain-gauges”;
- Podem ser do tipo binário tocou ou não tocou \Rightarrow para-choque, micro-chaves, sensor de anel, placas de contato.

Tato:

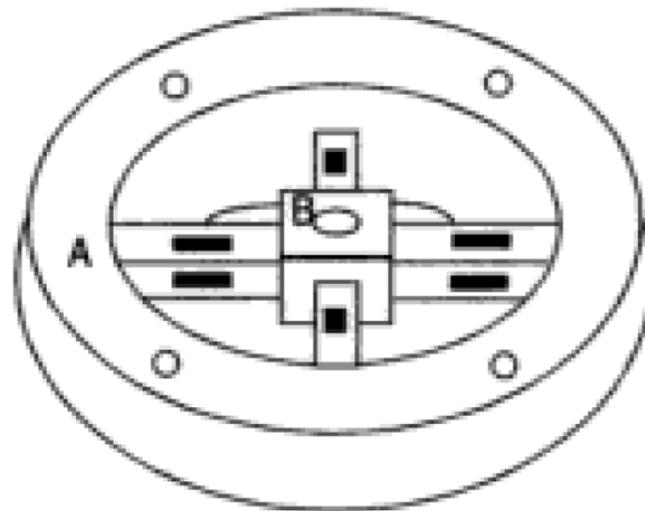
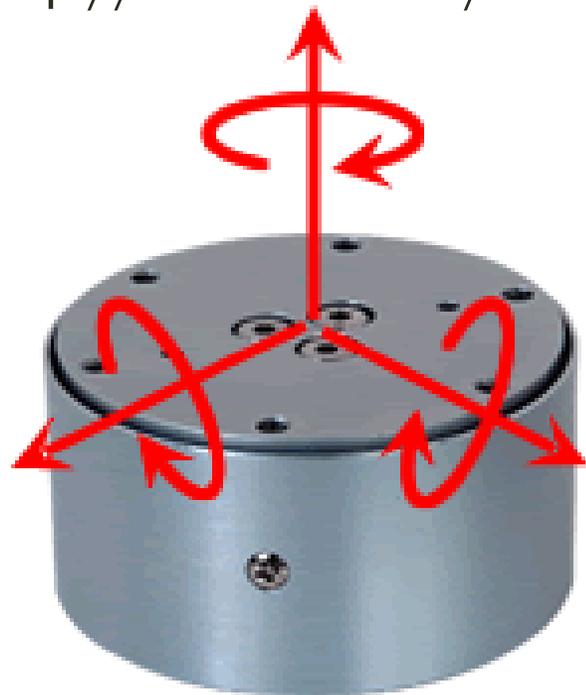
- Consiste na detecção e medição da distribuição espacial de forças;
- Pode ser considerado como sendo um conjunto coordenado de sensores de contato.

SENSORES DE FORÇA E TORQUE

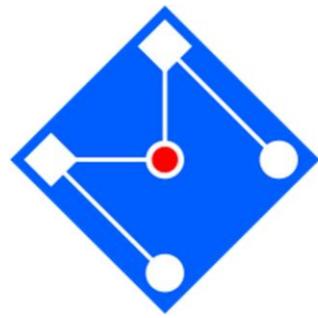


Exemplo de sensor de força e momento de contato:

- Sensor de 6 graus de liberdade \Rightarrow mede forças e momentos nas 3 direções.
- <http://www.ati-ia.com/index.aspx>

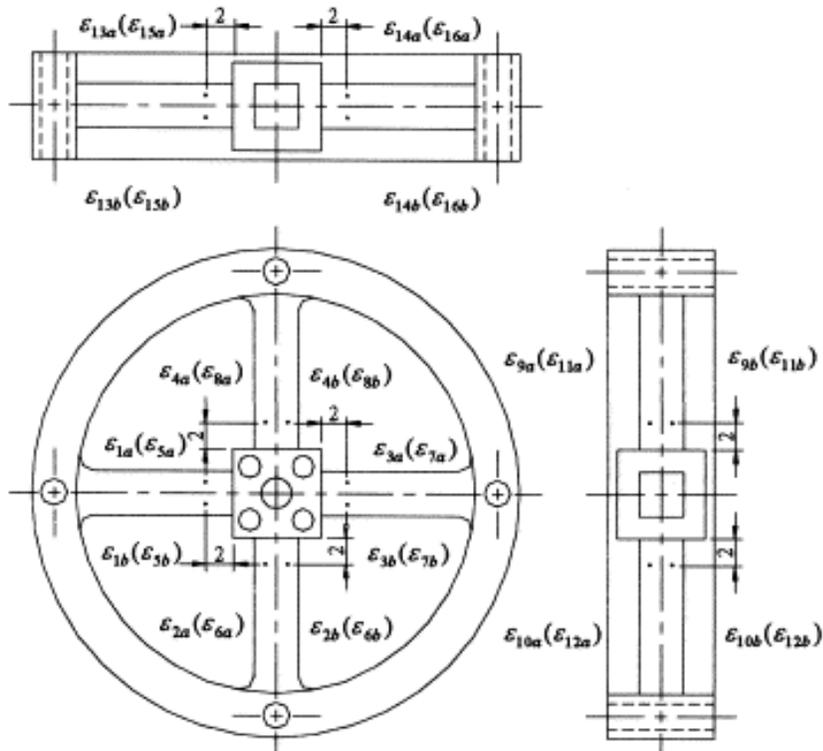


CALIBRAÇÃO SENSOR DE FORÇA E TORQUE



Aplicar forças conhecidas sobre o sensor.

Obter as forças a partir das deformações de cada extensômetro.



$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{21} & \cdots & h_{16} \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ h_{n1} & h_{n6} & \cdots & h_{n6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_6 \end{bmatrix}$$

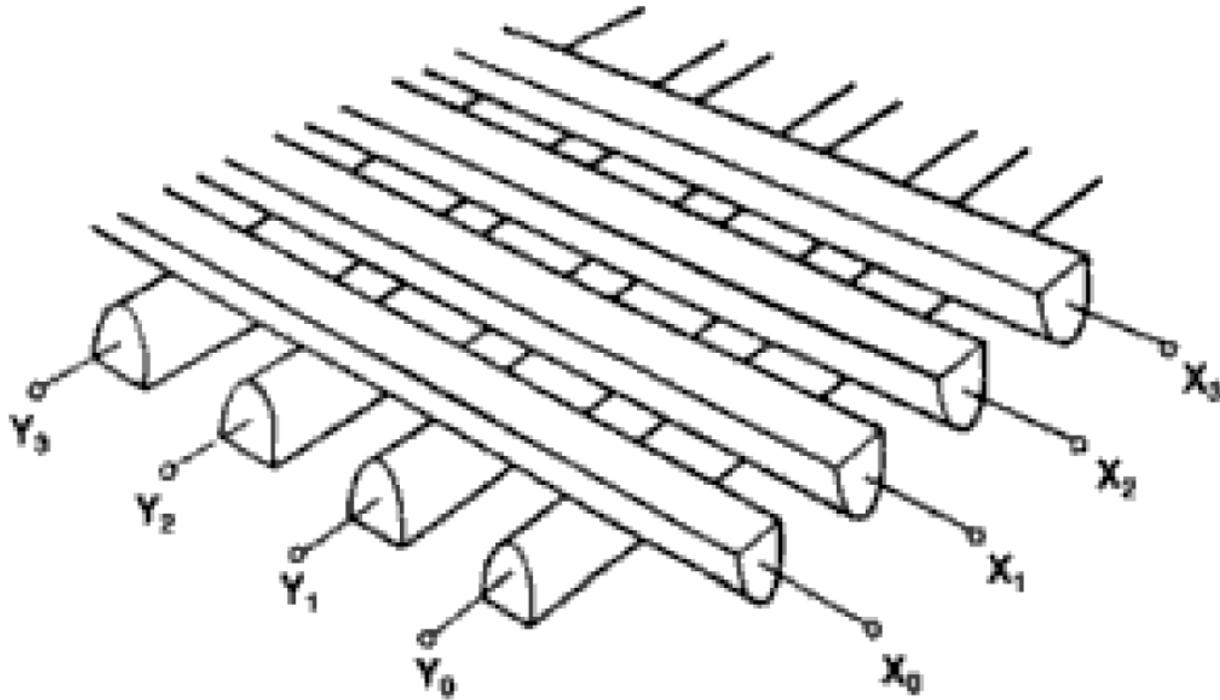
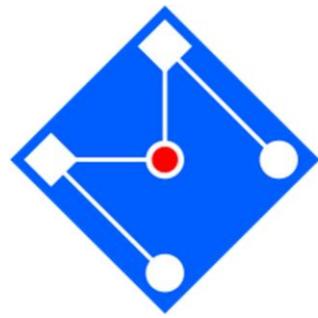
$$V = H \cdot F$$

$$F = H^+ \cdot V;$$

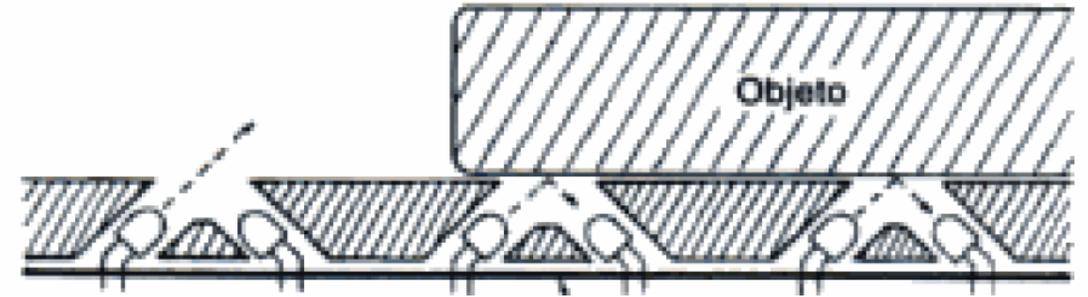
Onde a pseudoinversa:

$$H^+ = (H^+ H)^{-1} \cdot H^T;$$

SENSORES DE CONTATO

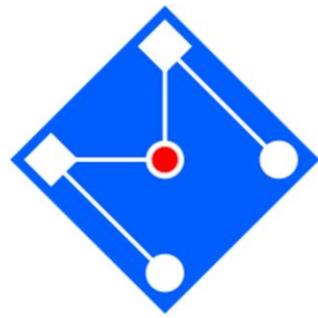


Sensor baseado em matriz de barras de silicóna tátil ortogonais sobre barras metálicas: a resistencia muda com pressão



Sensor tátil ótico baseado em detetores óticos de reflexão

QUE VIMOS ATÉ AGORA?



Robôs móveis autônomos usam sensores para perceberem o ambiente ao seu redor.

Existem diversos tipos de sensores que oferecem níveis diferentes de desempenho, custo, erros etc.

Os sensores podem ser classificados de forma geral como *proprioceptivos* (internos) ou *exteroceptivos* (externos) e *ativos* ou *passivos*.

Encoders \Rightarrow sensores internos usados para:

- Controle do robô;
- Odometria \Rightarrow estimativa da pose do robô.

Sensores de contato e tato.