

## **Robótica**

## Curso Técnico em Mecatrônica - Robótica

© SENAI-SP, 2003

Trabalho organizado e atualizado a partir de conteúdos extraídos da Intranet por Meios Educacionais da Gerência de Educação e CFPs 1.01, 1.09, 1.23, 3.01, 5.01, 6.01 da Diretoria Técnica do SENAI-SP.

### Equipe responsável

Coordenação	Airton Almeida de Moraes
Seleção de conteúdos	Nelson Massaia Júnior
Capa	José Joaquim Pecegheiro

*Material para validação*  
*Críticas e sugestões: [meiosedu@sp.senai.br](mailto:meiosedu@sp.senai.br)*

SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial Departamento Regional de São Paulo Av. Paulista, 1313 - Cerqueira César São Paulo - SP CEP 01311-923
Telefone	(0XX11) 3146-7000
Telefax	(0XX11) 3146-7230
SENAI on-line	0800-55-1000
E-mail	<a href="mailto:senai@sp.senai.br">senai@sp.senai.br</a>
Home page	<a href="http://www.sp.senai.br">http://www.sp.senai.br</a>

---

# Sumário

Robótica e automação industrial	5
Robô industrial	15
Sensores	49
Visão robótica	65
Tipos de robôs	75
Programação de robôs industriais	85
Segurança com robôs industriais	89
Manutenção	97
Referências bibliográficas	101



# Robótica e automação industrial

**Robô.** [Do fr. Robot < tcheco *robot*, “*trabalhador forçado*”, termo criado por Karel Capek, escritor tchecoslovaco (1890-1938).] S.m. Mecanismo automático, em geral com aspecto semelhante ao de um homem, e que realiza trabalhos e movimentos humanos. (Dicionário Aurélio)

A palavra Robô é derivada da palavra tcheca *robot*, que significa trabalhador compulsório, escravo, servo. Foi usada pela primeira vez pelo escritor tcheco Karel Capek no conto R.U.R – Rossum’s Universal Robots, de 1921, para designar dispositivos mecânicos que, tendo aparência humana, mas sem sentimentos humanos, realizavam tarefas automáticas, repetitivas.

Nesse conto, estes robôs, eventualmente, faziam mais do que isso, destruindo seus criadores. Este tipo de robô humanóide é muito explorado na ficção científica. Hoje em dia, são as pesquisas japonesas que buscam desenvolver robôs-andróides, cada vez mais parecidos com os seres humanos, tanto do ponto de vista estético, quanto do comportamental.

## Robótica

Atualmente, a maioria dos robôs em uso está muito próxima de um dispositivo chamado “manipulador”, que consiste em um braço mecânico controlado por uma pessoa ou automaticamente.

Aqui, abordaremos os robôs de uso industrial, utilizados na automação de tarefas comuns ao chão de fábrica, cujo surgimento e utilização se deveu à integração de dispositivos eletromecânicos de alta precisão com dispositivos eletrônicos de controle altamente miniaturizados. Talvez, o primeiro robô digno deste nome tenha sido o modelo experimental SHAKEY do Instituto de Pesquisas de Stanford produzido em 1960.

Ele era capaz de empilhar blocos se valendo de uma câmera que simulava o sentido da visão.

Desde então, o desenvolvimento dos Robôs se deveu, em primeiro lugar, a uma demanda de diversos setores industriais por dispositivos que permitissem automatizar processos produtivos e, em segundo lugar, a um desenvolvimento vertiginoso da microeletrônica e da eletromecânica, áreas cujas tecnologias eram e são necessárias para a criação e produção de Robôs cada vez melhores.

### **Objetivos da robótica**

Abaixo estão enunciados apenas alguns dos principais objetivos da robótica:

- Aumento da produtividade através da otimização da velocidade de trabalho do robô e a conseqüente redução de tempo na produção;
- Otimização do rendimento de outras máquinas e ferramentas alimentadas ou auxiliadas por robôs;
- Diminuição dos prazos de entrega de produtos;
- Realização de trabalhos não desejados, tediosos (alimentar máquina-ferramenta) ou perigosas e hostis (ambientes com temperaturas elevadas e presença de materiais tóxicos, inflamáveis e radioativos).

### **Tipos de robôs**

Um Robô Industrial é um dispositivo eletromecânico projetado para realizar diferentes tarefas, repetidamente, movendo peças, ferramentas e dispositivos especiais entre pontos diversos, realizando trajetórias de acordo com uma programação prévia, imitando os movimentos de um ser humano.

Esta definição envolve três tipos de Robôs:

- Robô Fixo – Também chamado de Braço Mecânico, é montado sobre uma base a qual lhe serve de sustentação física e de referência de movimentos. É o tipo mais comum de Robô e o mais usado em aplicações industriais;
- Robô Móvel – Também chamado de Carro ou AGV (Automatically Guided Vehicle = Veículo Guiado Automaticamente), pois pode se locomover com certa autonomia obedecendo a um controle.
- Robô humanóide - Também chamado de andróide por seu aspecto humano: anda sobre duas pernas (o que permite subir e descer escadas), possui dois braços (o que permite manipular objetos da mesma maneira que o ser humano) e tem dois sistemas de captação de imagem na parte frontal da cabeça (o que lhe dá visão estéreo e o mesmo ponto de vista de um ser humano). Por estas características pode substituir um ser humano sem necessidade de adaptação do ambiente.

### Classificação dos Robôs

- **Robô de 1ª geração:** robô que não se comunica com outros robôs;
- **Robô de 2ª geração:** robô que se comunica com outros robôs;
- **Robô de 3ª geração:** utiliza inteligência artificial, software que permite a tomada de decisão (sistema especialista / lógica fuzzy).

### Robô Industrial

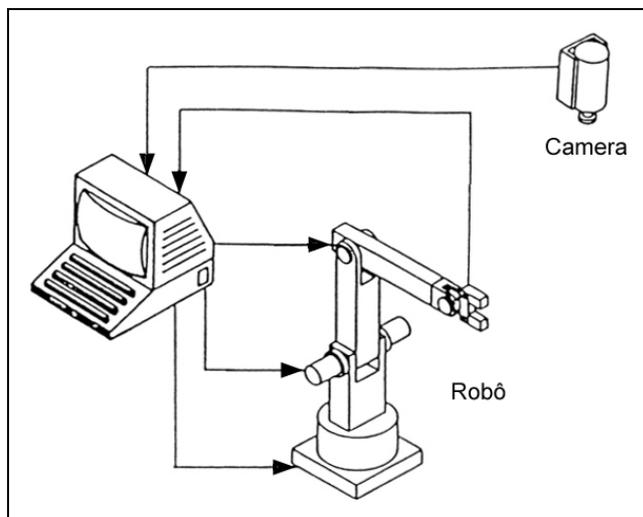


O **braço mecânico** é popularmente identificado como o robô propriamente dito. É composto das partes mecânicas e elétricas necessárias para que haja movimento.

Mas, para que haja flexibilidade de movimentos e para controlar estes movimentos do braço mecânico é necessário um **controlador** (Computador).

Este controlador deve ser ligado aos atuadores e aos sensores do braço mecânico e age como o cérebro do sistema. A figura abaixo ilustra este sistema.

É importante notar que num robô industrial, a potência requerida pelos atuadores exige a inclusão de um módulo de **acionamento** entre o controlador e o manipulador.



## Automação Industrial

A automação e a robótica são duas tecnologias intimamente relacionadas.

Pode-se definir a automação como uma tecnologia que utiliza sistemas mecânicos, elétricos e computacionais na operação e no controle da produção.

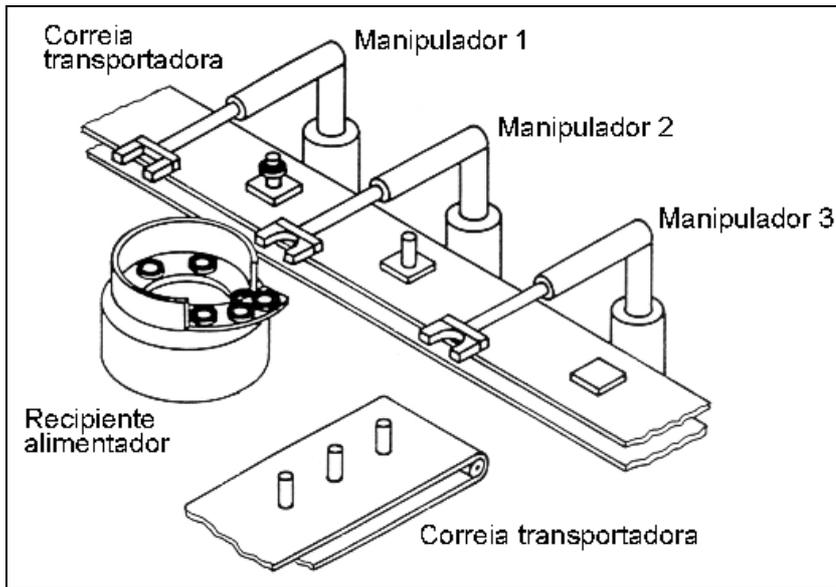
A robótica já foi definida como a tecnologia que utiliza sistemas mecânicos que, controlados por circuito eletrônicos mediante programação, executam tarefas que imitam movimentos humanos.

Um sistema de automação pode ter robôs trabalhando sozinhos ou junto a seres humanos, como também pode ser um processo automático, em que não existem robôs.

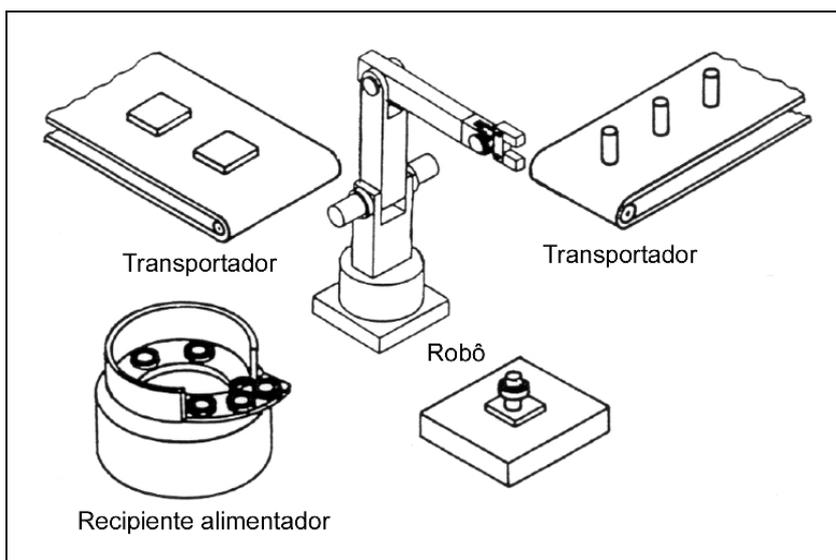
### Classes de automação industrial

- Fixa ou Automatização Dura:  
Volume de produção muito elevado com pequena variedade, onde máquinas funcionam sem a intervenção humana.

Por exemplo: Um processo mecânico com broca automatizado:



- Programável: Similar a fixa, porém, o processo pode ser reprogramável para executar a mesma tarefa de outra maneira. Tem como característica o baixo volume de produção e uma grande variedade de produtos a serem fabricados. Exemplo: Um CNC que movimenta a máquina.
- Flexível: semelhante a programável, porque ambas constituem-se de máquinas que são automáticas e reprogramáveis. A diferença é que a automação flexível pode executar diferentes tipos de tarefas com diferentes tipos de aplicação.

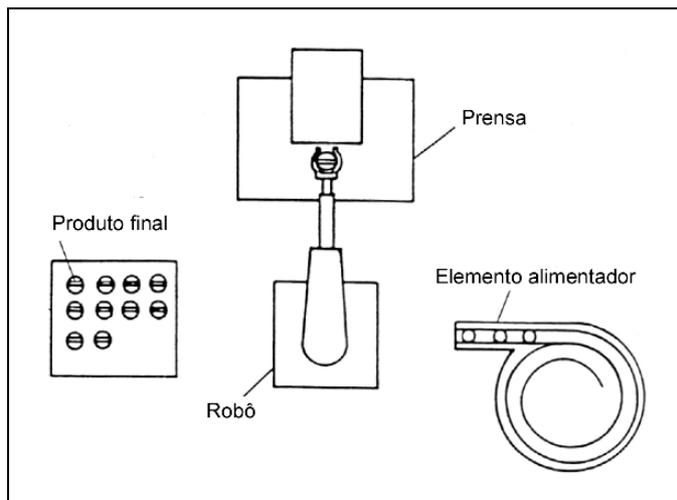


## Aplicações de robôs

### Abastecimento de prensas

Características da tarefa:

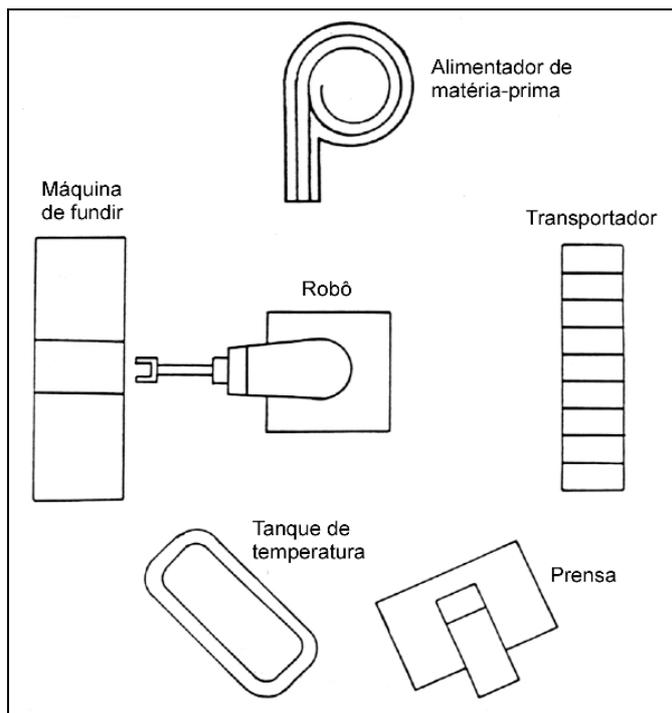
- Perigo (peças e partes em movimento contínuo);
- Manipulação de cargas pesadas;
- Barulho elevado;
- Atividade monótona.



### Manipulação de Moldes

Características da tarefa:

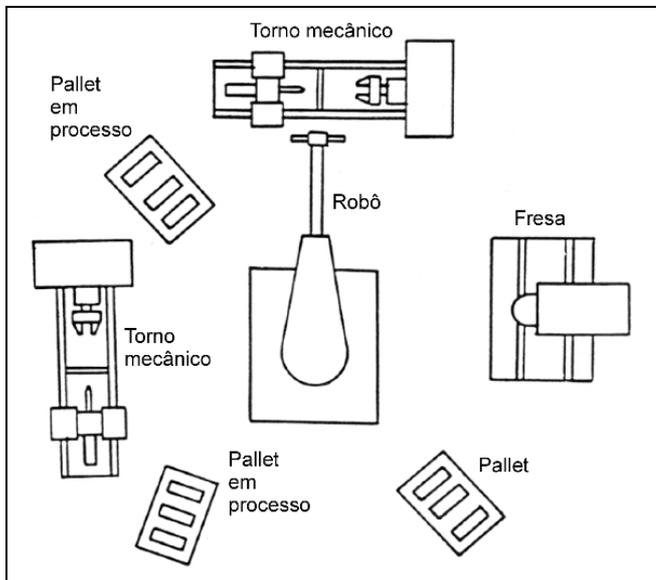
- Operação com máquinas injetoras;
- Perigo (temperaturas elevadas).



### Abastecimento de Máquinas Ferramenta

Características da tarefa:

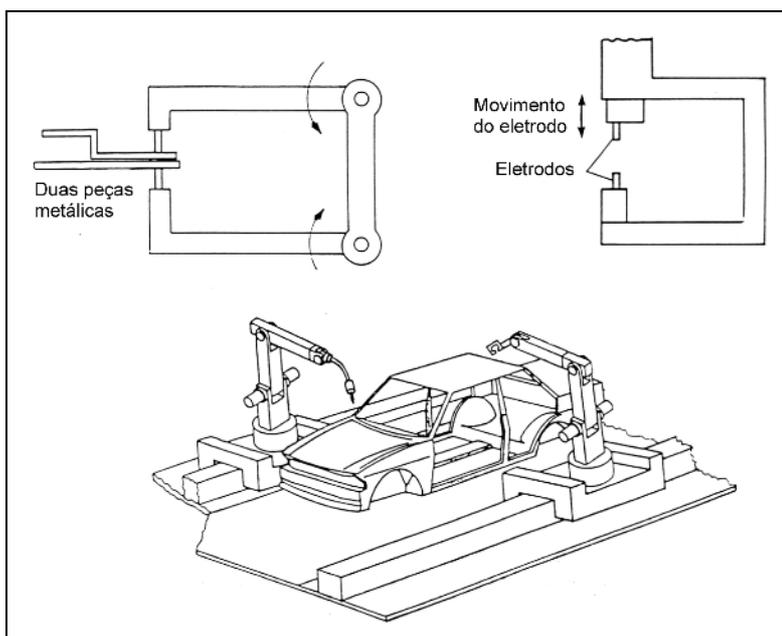
- Operação de máquinas operatrizes;
- Otimização do tempo;
- Necessidade de sincronismo (máquina e robô).



### Solda Ponto

Características da tarefa:

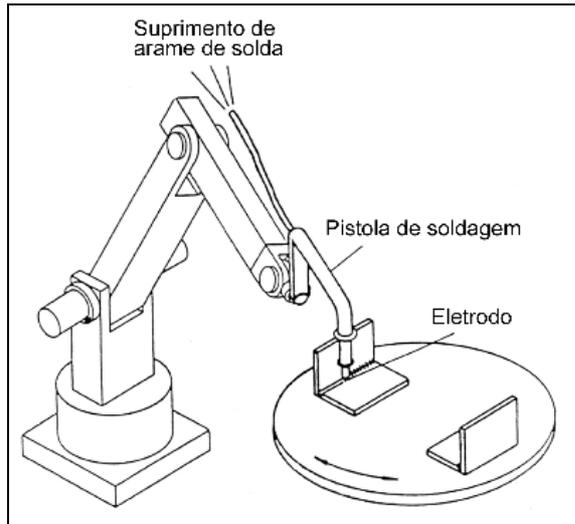
- Dificuldade de solda (qualidade);
- Atividade monótona;
- Alta precisão (o eletrodo deve ficar perpendicular às peças);
- Perigo (faíscas);
- Barulho elevado.



## Solda Elétrica

Características da tarefa:

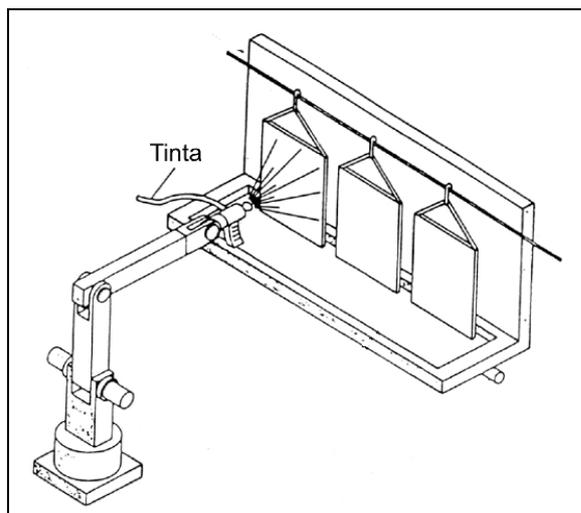
- Dificuldade da solda (qualidade);
- Atividade monótona;
- Alta precisão (movimento em velocidade constante ao longo do contorno da peça);
- Perigo (temperatura e faíscas);
- Barulho elevado.



## Pintura Spray

Características da tarefa:

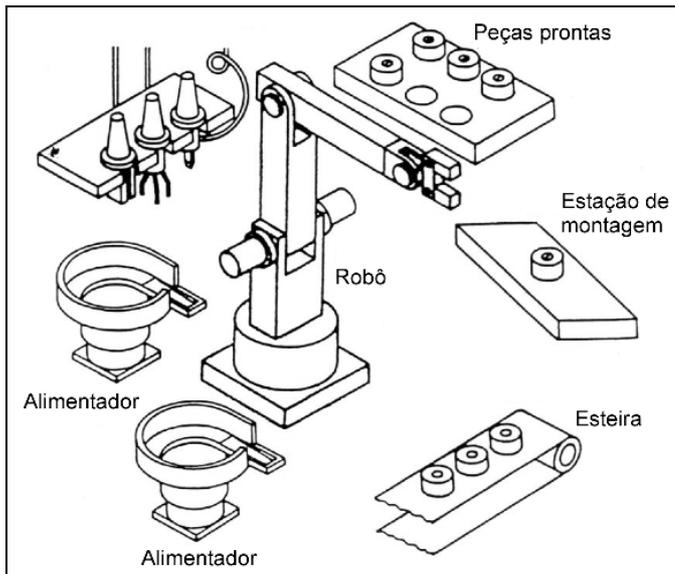
- Perigo (ar poluído com tinta);
- Precisão (qualidade e uniformidade da pintura).



## Montagem

Características da tarefa:

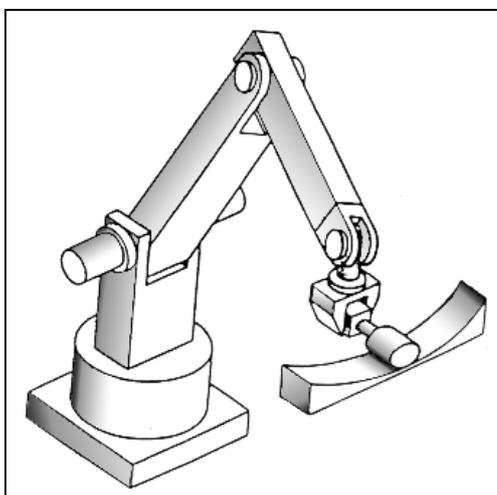
- Aplicação complexa para os robôs, pois exige grande flexibilidade;
- Troca automática do atuador final, para lidar com peças de tamanhos e formas variadas;
- Detecção de impacto e controle de força;
- Utilizado na manipulação de elementos delicados;
- A integração humana é necessária.



## Acabamento

Características da tarefa:

- Lixar, polir e retificar superfícies;
- Rebarbar moldes e peças;
- Necessidade de movimentos constantes para o acabamento ser homogêneo;
- Atividade monótona;
- Perigo (poeira).



Em determinadas aplicações, a trajetória percorrida pelo robô durante a atividade deve ser analisada e levada em consideração.

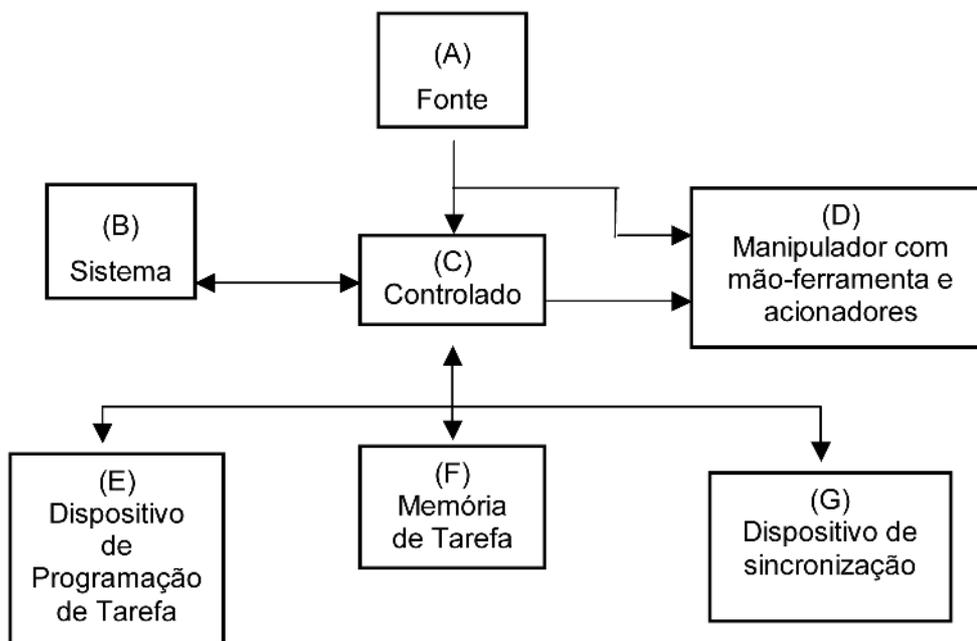
Nas atividades de montagem, solda ponto e abastecimento de prensas, a trajetória não influencia no resultado final. Já nas atividades de pintura e solda elétrica, a trajetória para a realização da atividade é importante, pois não podemos pintar um carro, por exemplo, em zig-zag ou soldar duas peças de forma aleatória.

# Robô industrial

Dentre os três tipos de robôs, industrial, móvel e humanóide, o foco deste trabalho são os robôs industriais. Aqui vamos estudar sua construção, programação e integração em sistemas de produção automática.

No âmbito dos equipamentos industriais, os robôs industriais se inserem na classificação das máquinas automáticas programáveis. Por isso devemos organizar nosso estudo partindo das partes que o compõem.

## Partes do sistema robótico



- A** - Fornece a energia na forma adequada para os acionadores do robô;
- B** - Conjunto de sensores que permitem ao robô reconhecer suas mudanças de condições;
- C** - É o responsável pela coordenação e execução das funções a serem desempenhadas pelo robô;
- D** - Estrutura mecânica composta de engrenagens, elementos de transmissão e acionadores, possuindo graus de liberdade suficientes para a execução das tarefas destinadas ao Robô.
- E** - Unidade de entrada e saída com funções tais que, facilitem a programação do robô por um operador.
- F** - É o meio de armazenamento utilizado pelo controlador para guardar programas de novas tarefas ou a partir de programas anteriormente guardados executar uma tarefa já aprendida.
- G** - São dispositivos e funções que permite a coordenação das ações do robô com máquinas e/ou eventos externos.

## **Efetadores**

Um órgão terminal ou um efetador é um dispositivo que é fixado no punho do braço de um robô de uso geral que lhe permite realizar uma tarefa específica. É às vezes chamado de “mão” do robô.

A maioria das máquinas de produção exige dispositivos e ferramentas especificamente desenhados para uma determinada operação e o robô não é exceção à regra.

A empresa que instala o robô poderá realizar ela mesma os serviços de engenharia ou contratar os serviços de uma empresa especializada.

Existe uma ampla variedade de órgãos terminais necessários para a realização de várias tarefas, e podem ser divididos em duas categorias principais:

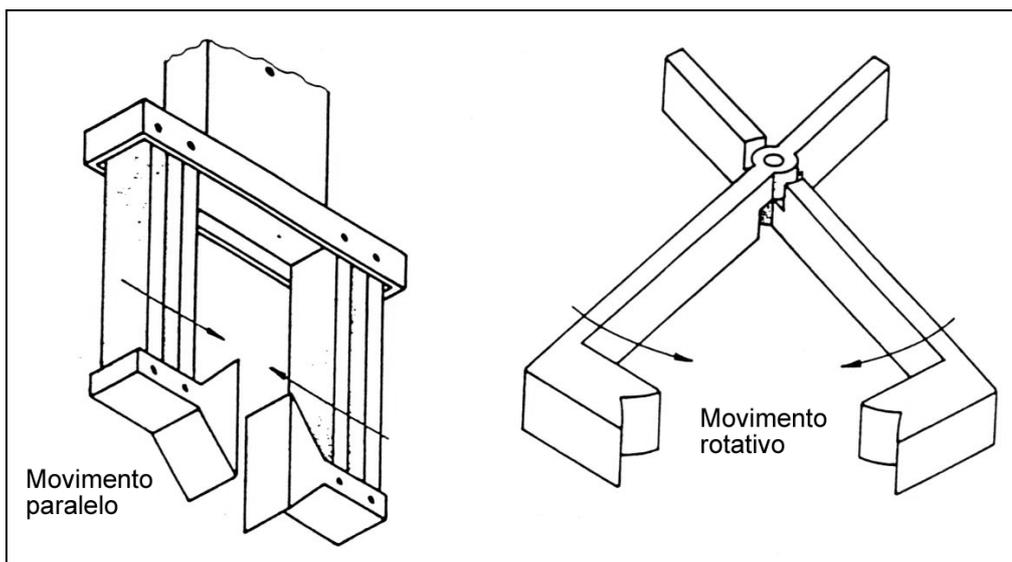
- Garras;
- Ferramentas.

## Garras

As garras são efetadores destinados a pegar e segurar objetos para seu deslocamento dentro do espaço de trabalho do manipulador.

Podem ser pequenos e frágeis, como é o caso de componentes eletrônicos que são montados numa placa pelo robô, ou pesados e robustos, como carros que são colocados de uma parte para outra de uma linha de produção.

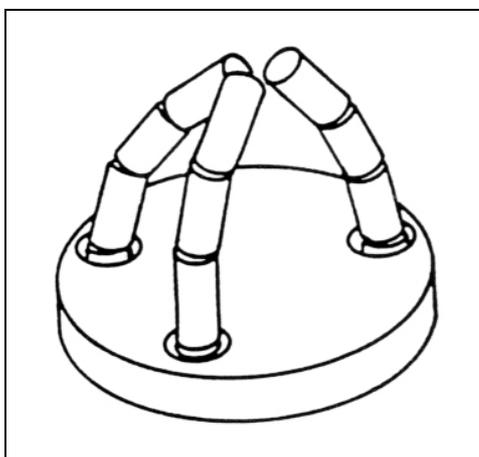
O acionamento pode ser elétrico, pneumático ou hidráulico (para grandes esforços).



- **Garra de 3 membros**

É similar a garra de dois membros, mas permite maior segurança ao manipular os objetos, que podem ser esféricos ou triangulares.

A figura abaixo apresenta uma garra de três membros, cujos dedos são retráteis, constituídos por várias conexões.

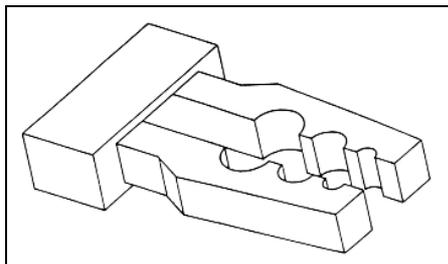


- **Garra para objetos cilíndricos**

Possui dois dedos com depressões circulares capazes de agarrar objetos cilíndricos de diversos tamanhos.

Uma desvantagem evidente desta garra é a sua limitação de abertura, que impossibilita a manipulação de objetos maiores que a sua abertura total.

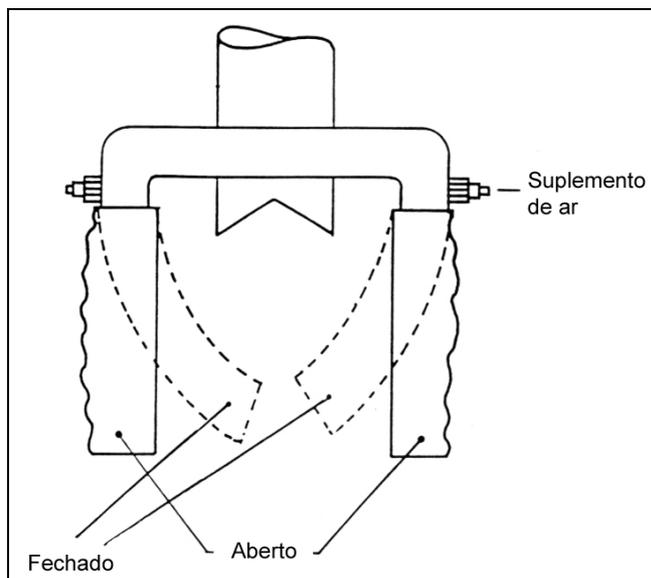
A figura a seguir ilustra uma garra para objetos cilíndricos de até 3 diâmetros diferentes.



- **Garra para objetos frágeis**

Para manipularmos um objeto frágil, sem danificá-lo, os dedos da garra devem exercer um grau de força controlado que não se concentrasse em apenas um ponto do objeto.

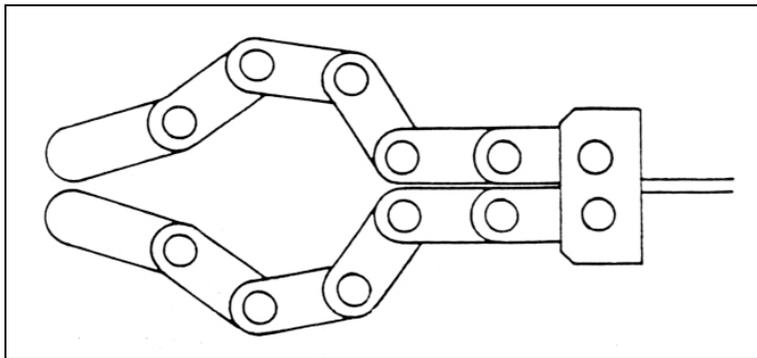
Muitas garras têm sido projetadas com esta finalidade, das quais uma é ilustrada a seguir, na qual temos dois dedos flexíveis que se curvam para dentro quando inflados pelo ar, que é aplicado de forma controlada, cuja expressão determina a força com que o objeto é agarrado.



- **Garra de juntas**

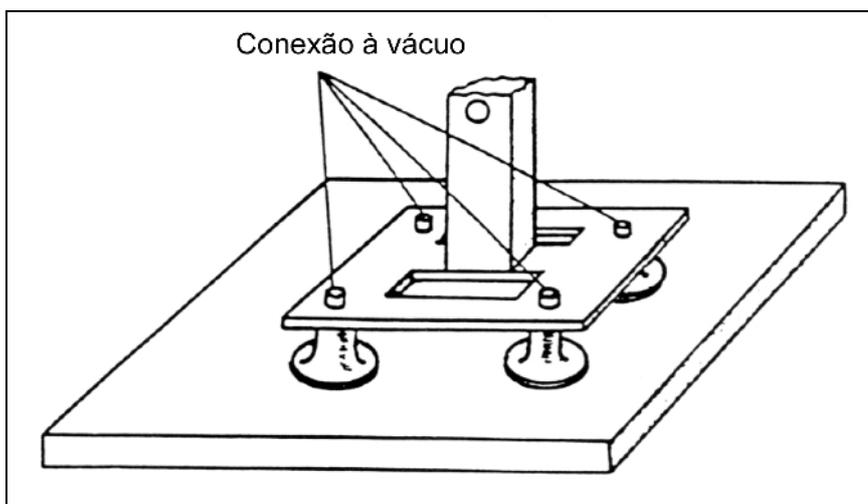
Essas garras são desenvolvidas para manipularem objetos de vários tamanhos e de superfícies irregulares. As conexões são movidas através de paredes de cabos. Um cabo flexiona a junta e a outra a estende.

Para pegar um objeto, as juntas dos dedos envolvem este objeto e seguram firmemente. Quanto menor o tamanho das juntas dos dedos, maior é a firmeza e a capacidade de manipular objetos irregulares.



- **Garras a vácuo ou ventosas**

São órgãos terminais empregados para apanhar peças delicadas, como no caso de peças injetadas em termoplásticos (injetoras). São ligadas a uma bomba de vácuo através de uma eletroválvula. Quando a eletroválvula é acionada, o ar é puxado pela bomba, criando um vazio na ventosa que adere a peça. É necessário que as peças a serem manuseadas estejam limpas, lisas e planas, condições necessárias para formar um vácuo perfeito entre o objeto e as ventosas.



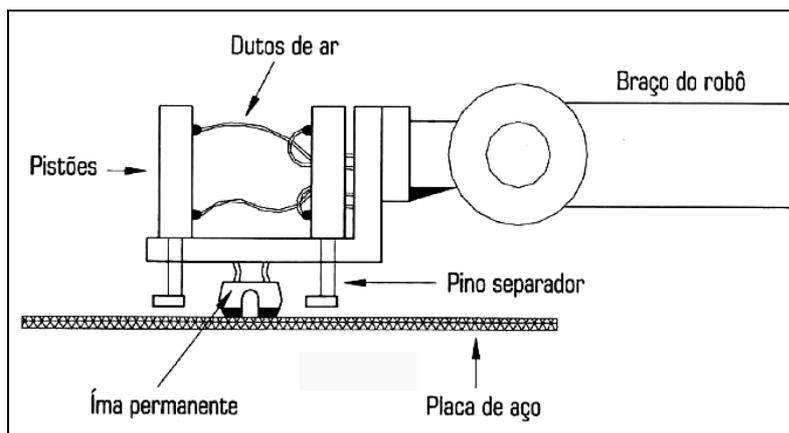
- **Garras magnéticas**

São similares em seu formato às garras a vácuo e são um meio razoável para manipular materiais ferromagnéticos. Assim como, no caso das garras a vácuo, as peças a serem transportadas pelas garras magnéticas devem apresentar pelo menos uma superfície limpa.

Algumas vantagens no uso de garras magnéticas são:

- tempo de pega muito rápido;
- variações razoáveis nos tamanhos das peças são toleradas;
- não necessita de um projeto específico para cada tipo de peça;
- permite manusear peças metálicas com furos.

A grande desvantagem está no fato de somente manusear peças de material ferromagnético.



## Ferramentas

Em muitas aplicações, o robô é utilizado para manipular uma ferramenta, ao invés de uma peça.

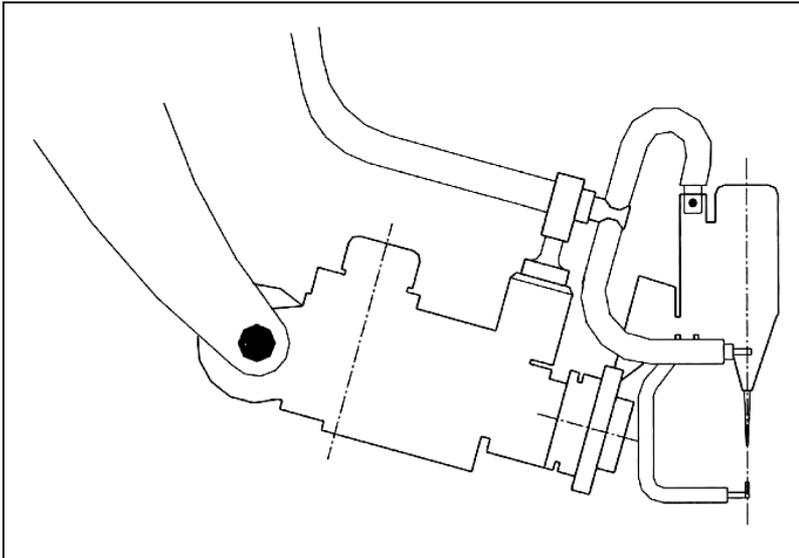
O robô deve movimentar a ferramenta sobre o objeto a ser trabalhado.

O uso de uma garra permite que as ferramentas sejam trocadas durante o ciclo de trabalho, facilitando o manuseio de várias ferramentas.

Na maioria das aplicações de robôs nas quais uma ferramenta é manipulada, a ferramenta é presa diretamente no punho do robô, sendo nesses casos, a ferramenta o órgão terminal.

Alguns exemplos de ferramentas usadas como efetadores em aplicações robóticas:

- Maçaricos para soldagem a arco;
- Bicos para pintura por pulverização;
- Mandris para operações como: furação, ranhuramento, polimento, retifica e etc;
- Aplicadores de cimento ou adesivo líquido para montagem;
- Ferramentas de corte por jato d'água e laser;
- Ferramentas para soldagem a ponto.



Em todos os casos o robô controla a atuação das ferramentas.

### **Alternador automático de garras**

É um adaptador que permite a troca rápida de garras de mesma conexão (pneumáticas, hidráulicas, etc.).

Como desvantagens, esse tipo de alternador possui o acréscimo de peso ao braço do robô, custo elevado e desperdício de tempo na troca de garras.

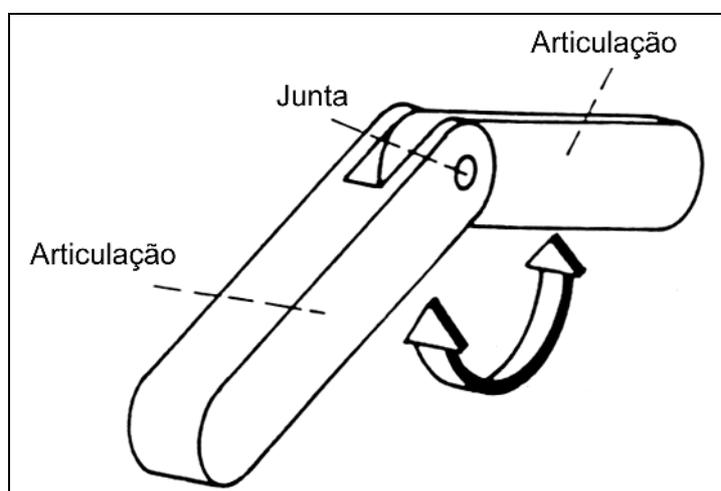
### **Base**

A base é o elemento de fixação do braço mecânico em uma superfície (solo, parede, teto) ou à Estação de Trabalho em um determinado setor da fábrica. Ela sustenta todo o braço mecânico e serve como ponto de apoio e de referência para todos os seus movimentos. Possibilita o movimento de rotação do Braço Mecânico.

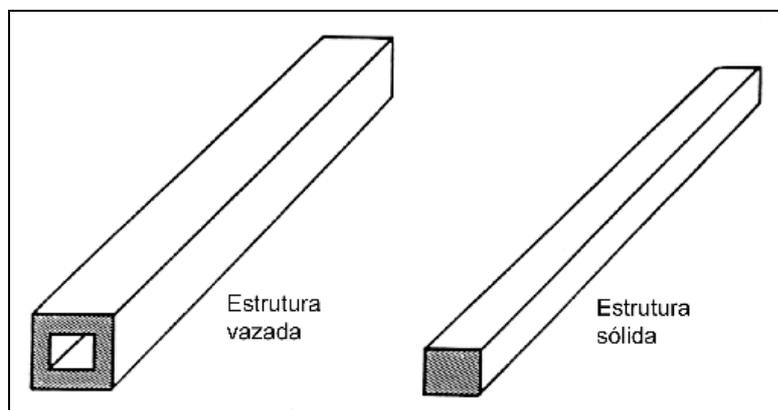
## Ligamentos

Ligamento ou Elo são os termos mais adequados para definirmos o termo “Link”. Link é nome dado à haste que interliga duas Juntas. Em robôs industriais, os links são recobertos com capas de ligas metálicas que os tornam mais resistentes aos rigores do ambiente e também mais “pesados”. Os links são estruturas leves de perfis metálicos muitas vezes vazados para se tornarem mais “leves” sem comprometimento da rigidez.

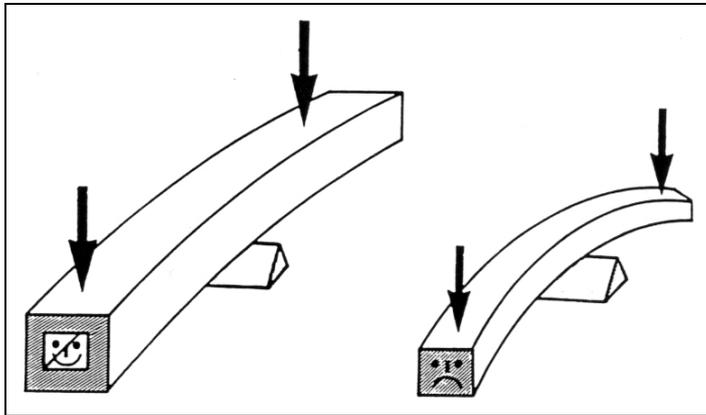
Um braço com baixa rigidez reduz a precisão do robô, devido às vibrações e reações à pressão. O conjunto de links forma o “esqueleto” do Robô. O volume de “Envelope de Trabalho” de um Robô depende muito da dimensão de seus links.



Para incrementar a rigidez no braço, sem aumentar o seu peso, formas estruturais como a armação oca, são frequentemente usadas. Um braço com esse tipo de construção tem uma maior rigidez em relação ao seu peso, do que um braço de construção sólida.



Mesmo assim, os braços apresentam-se muito pesados, em relação às cargas que podem mover. A maioria dos robôs mantém a razão entre a carga movimentada e o peso do braço na ordem de 1:20, enquanto que no braço humano temos a razão de 1:1.

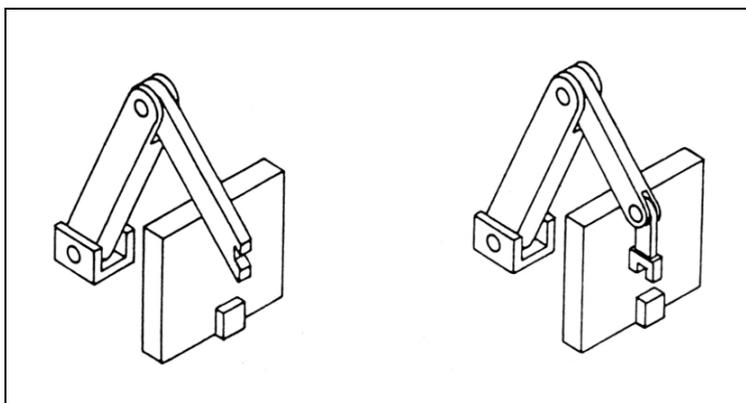


### Juntas

Junta é o nome dado ao ponto de ligação entre dois Links. É a junta que permite que exista movimento relativo entre os dois links que ela interliga. A primeira junta de um Braço Mecânico é ligada a sua base. Além desta, as outras juntas de um Braço Mecânico são denominadas analogamente as de um braço humano: “Shoulder” (ombro), “Elbow” (cotovelo), “Wrist” (pulso) e, assim por diante.

Geralmente, quanto maior o número de juntas no braço, maior é a sua destreza. Na figura a seguir, nota-se que o robô com duas juntas não consegue alcançar o objeto atrás da parede. Entretanto, uma junta adicional no braço, capacita-o a superar esse obstáculo.

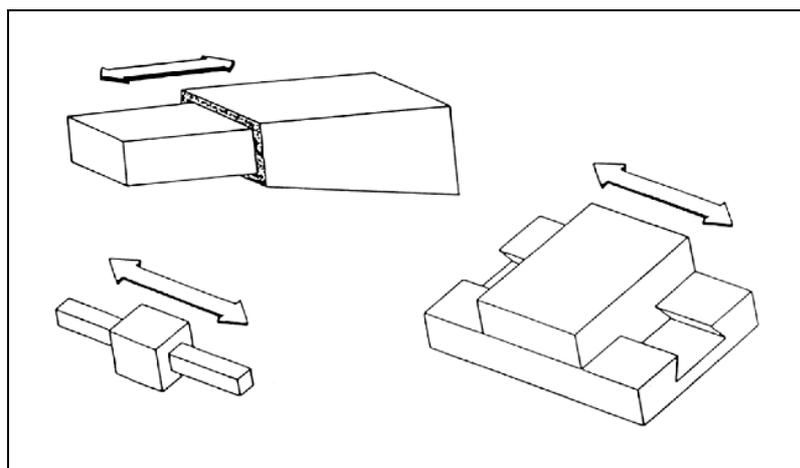
O número de juntas determina o que se chama “Graus de Liberdade” de um Robô. Isto quer dizer que um Robô tem mais liberdade de movimentos se tiver mais juntas, o que é bem coerente. Cada junta corresponde a um grau de liberdade.



Há três tipos de juntas:

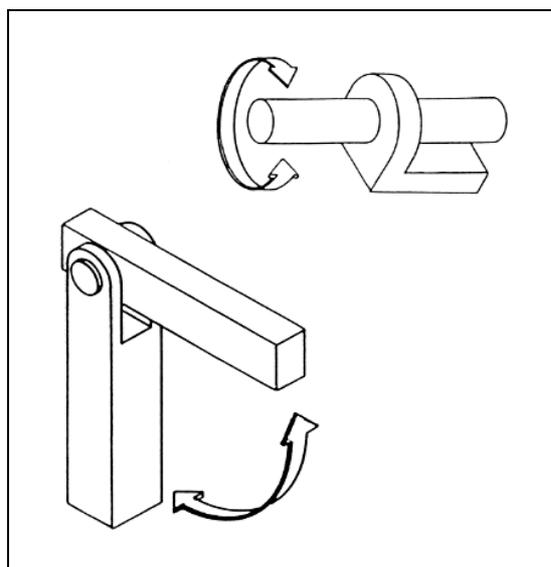
- **Junta prismática**

Permite o movimento linear entre dois links adjacentes. É composta de dois links encaixados interna ou lateralmente. A Figura 26(c) ilustra uma junta prismática de encaixe lateral enquanto que as Figuras 26(a) e 26(b) ilustram junta prismática de encaixe interno. Devido ao seu tipo de construção, este tipo de junta é bastante rígido.

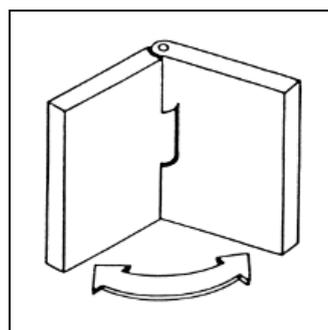


- **Junta de revolução**

Permite o movimento de rotação entre dois links adjacentes. É composta de um eixo ou dobradiça que conecta dois links. A Figura (c) ilustra uma junta de revolução tipo dobradiça enquanto que as Figuras (a) e (b) ilustram juntas de revolução tipo eixo rotativo.



*Tipo eixo rotativo*



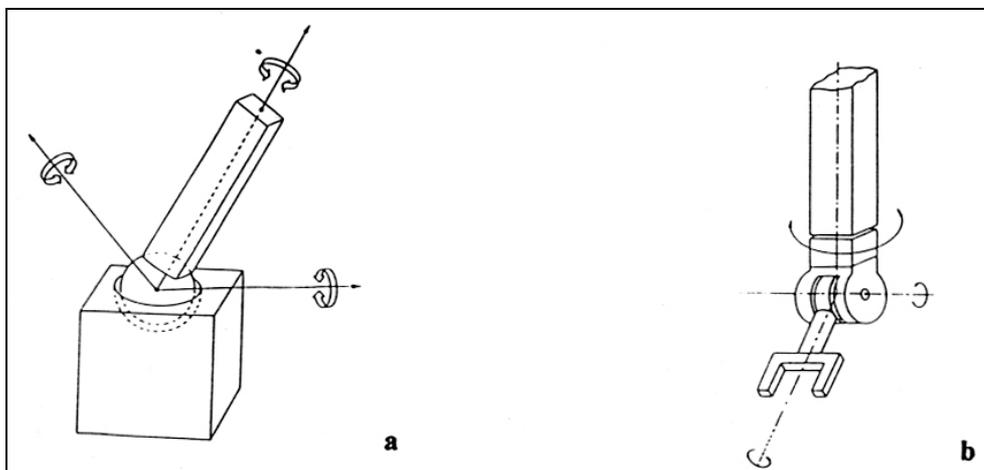
*Tipo dobradiça*

- **Junta de encaixe esférico**

Funciona como uma combinação de três juntas de revolução permitindo um movimento combinado de três eixos de movimento (X, Y e Z). Este tipo de junta é aplicada pouquíssimas vezes em projetos de robôs já que sua construção é difícil e seu controle, complexo. Quando o seu uso é necessário, costuma-se projetar três juntas de revolução separadas, mas cujos movimentos se interseccionam num único ponto.

A Figura (a) exemplifica a estrutura de uma junta de encaixe esférico.

A Figura (b) ilustra o seu equivalente constituído de três juntas de revolução em um único eixo. Juntas esféricas existem no corpo humano, entre o ombro e antebraço, entre o fêmur e a bacia e entre a bacia e as costas.



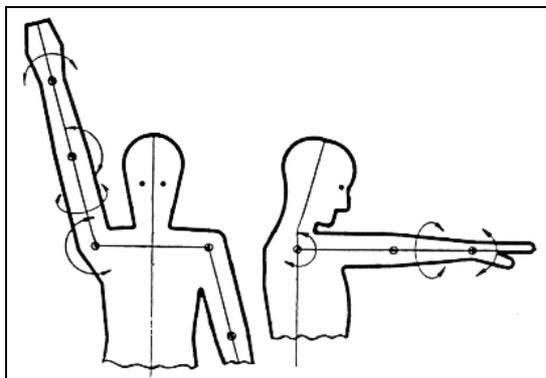
### **Graus de liberdade**

O número de graus de liberdade que um manipulador possui, é equivalente ao número de variáveis de posições que devem ser especificadas para posicionar todas as partes do mecanismo.

Em outras palavras, se refere ao numero de maneiras diferentes segundo as quais um braço de robô pode se mover.

É importante deixar claro que mão-ferramenta não possui grau de liberdade.

Em termos de comparação, o braço humano, do ombro ao pulso (sem incluir as juntas da mão), tem sete graus de liberdade.

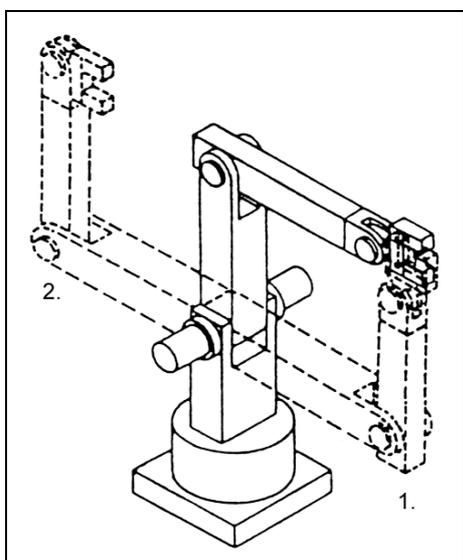


## Punho

Em muitas aplicações não é suficiente que o robô apenas alcance a peça a ser trabalhada, ele deve também posicionar o atuador final numa certa disposição em relação à peça.

Esta capacidade pode ser adquirida, adicionando-se juntas ao punho do braço, o que proporciona mais graus de liberdade.

A figura a seguir mostra uma posição inicial do braço e duas mudanças possíveis na localização e orientação do atuador final. A posição 1 mostra uma mudança na orientação do atuador final sem mudança de localização, enquanto que a posição 2 mostra uma mudança na localização sem mudança de orientação.



## Características de robôs Industriais

### Velocidade de movimento

Depende muito da estrutura mecânica do robô, de seu sistema de acionamento e sistema de controle e da carga controlada, podendo atingir valores de até 120°/s para movimentos rotacionais e até 3m/s para movimentos translacionais.

### Capacidade de carga ou “Payload”

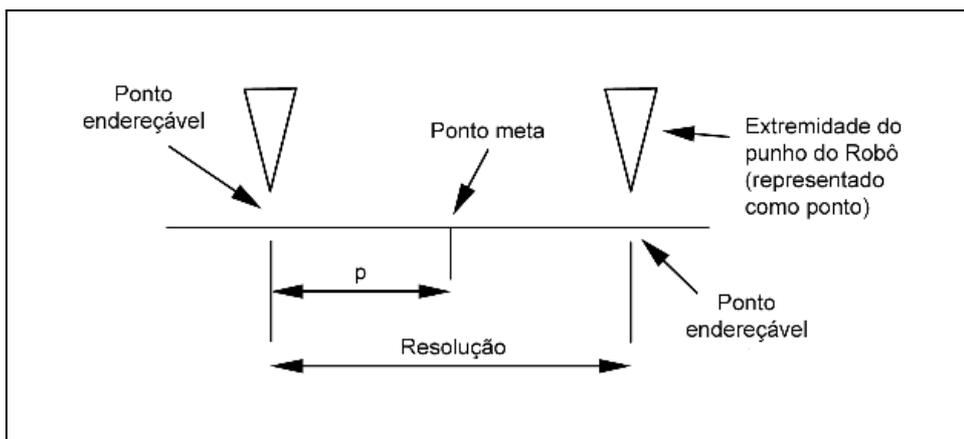
É o peso máximo que um robô consegue manipular mantendo as suas especificações.

Nos robôs atuais esta capacidade de carga varia desde algumas gramas até aproximadamente 500 kg, dependendo do robô.

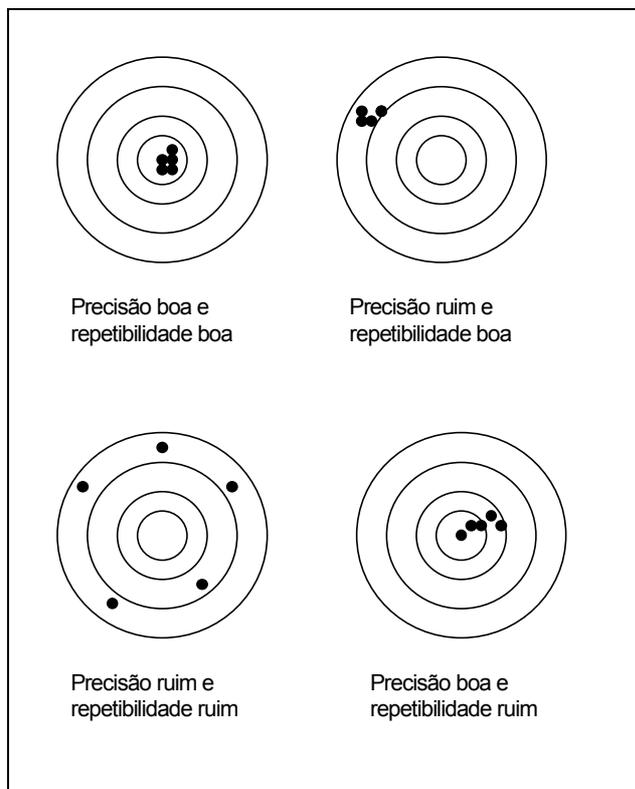
### Precisão de movimento

A precisão de movimento é definida em função de três características:

- a. **Resolução espacial:** É o menor incremento de movimento em que o robô pode dividir seu volume de trabalho. É normalmente dependente da capacidade de carga do robô, e varia desde alguns milímetros até alguns centésimos de milímetro nos mais precisos.
- b. **Precisão:** Refere-se à capacidade de um robô de posicionar a extremidade de seu punho em um ponto meta desejado dentro de seu volume de trabalho.

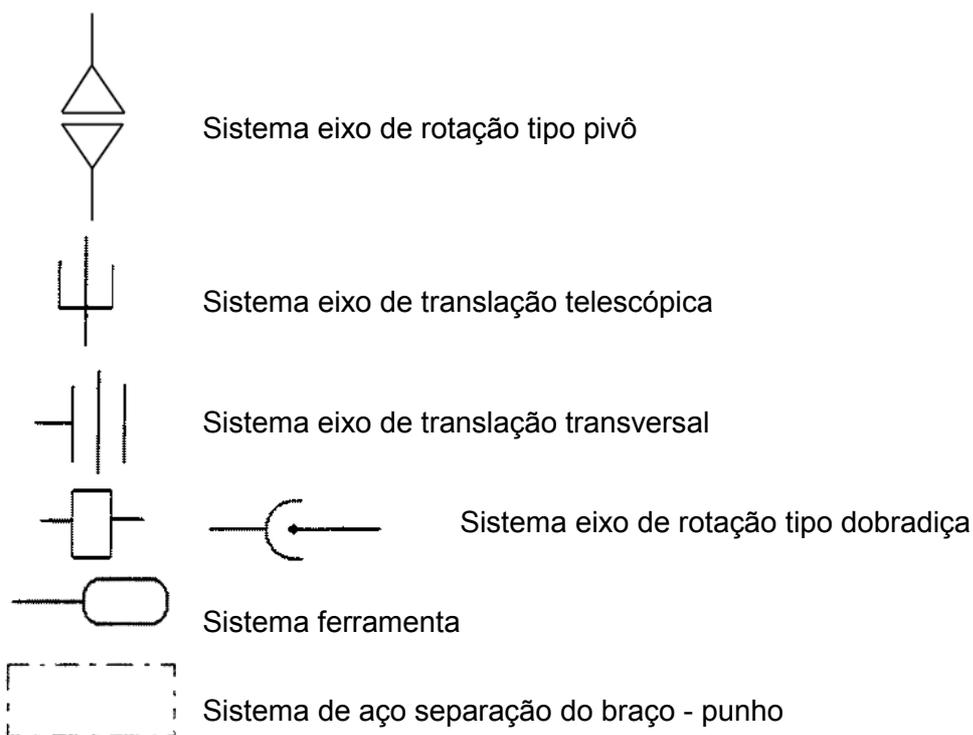


- c. **Repetibilidade:** É a capacidade do robô de posicionar seu punho ou órgão terminal ligado ao seu punho num ponto meta no espaço previamente indicado.



### Cadeia cinemática

Simbologia utilizada para representação da “cadeia cinemática”

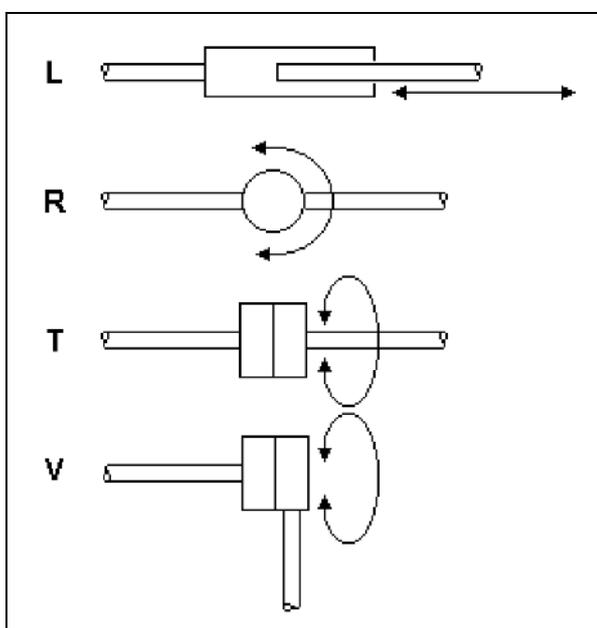


## Notação

O Esquema de Notação baseia-se no movimento que as juntas de um robô podem realizar e não exatamente no tipo da junta.

- Um movimento linear entre ligamentos alinhados recebe a notação **L**;
- Um movimento de rotação tipo dobradiça recebe a notação **R**;
- Um movimento de rotação tipo pivô recebe a notação **T**;
- Um movimento de rotação tipo dobradiça entre ligamentos perpendiculares recebe a notação **V**.

A figura a seguir ilustra essas juntas com suas notações.



## Acionamentos

No corpo humano são os músculos que 'acionam' as várias partes do braço. Os robôs também necessitam de unidades de acionamentos que proporcionem os movimentos das juntas nos braços mecânicos.

De acordo com seu torque e momento o Robô poderá mover cargas de massa maior ou menor, com velocidades variáveis.

Pode-se dividir os acionamentos em dois tipos: eletromagnéticos (motores) e hidropneumáticos (cilindros).

### Acionadores eletromagnéticos

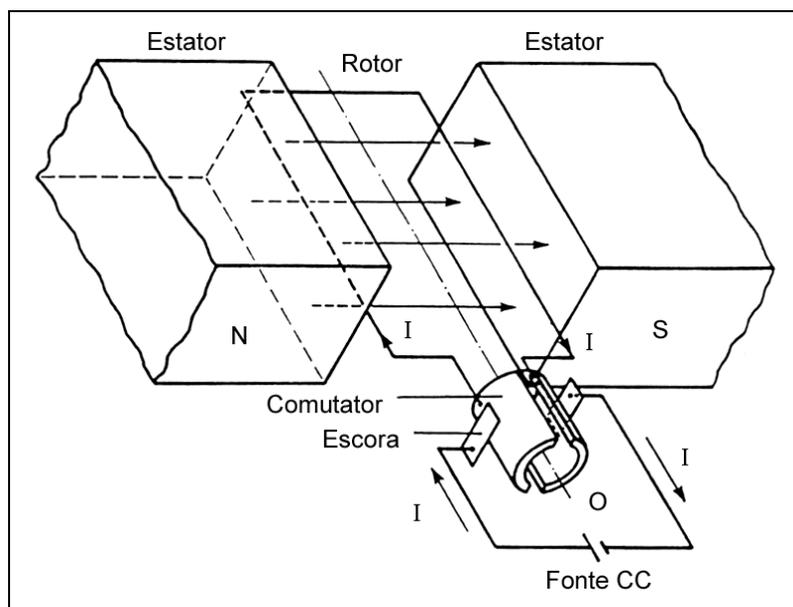
Os motores elétricos mais comumente usados em braços mecânicos são os Motores CC (DC Motors ou Motores de Corrente Contínua) e os Motores de Passo (Stepping Motors, Stepper Motors ou Step Motors).

Isto ocorre devido a relação custo/benefício de sua utilização: pois são motores relativamente baratos, com tamanho reduzido, de pequeno a médio torque e de fácil controle.

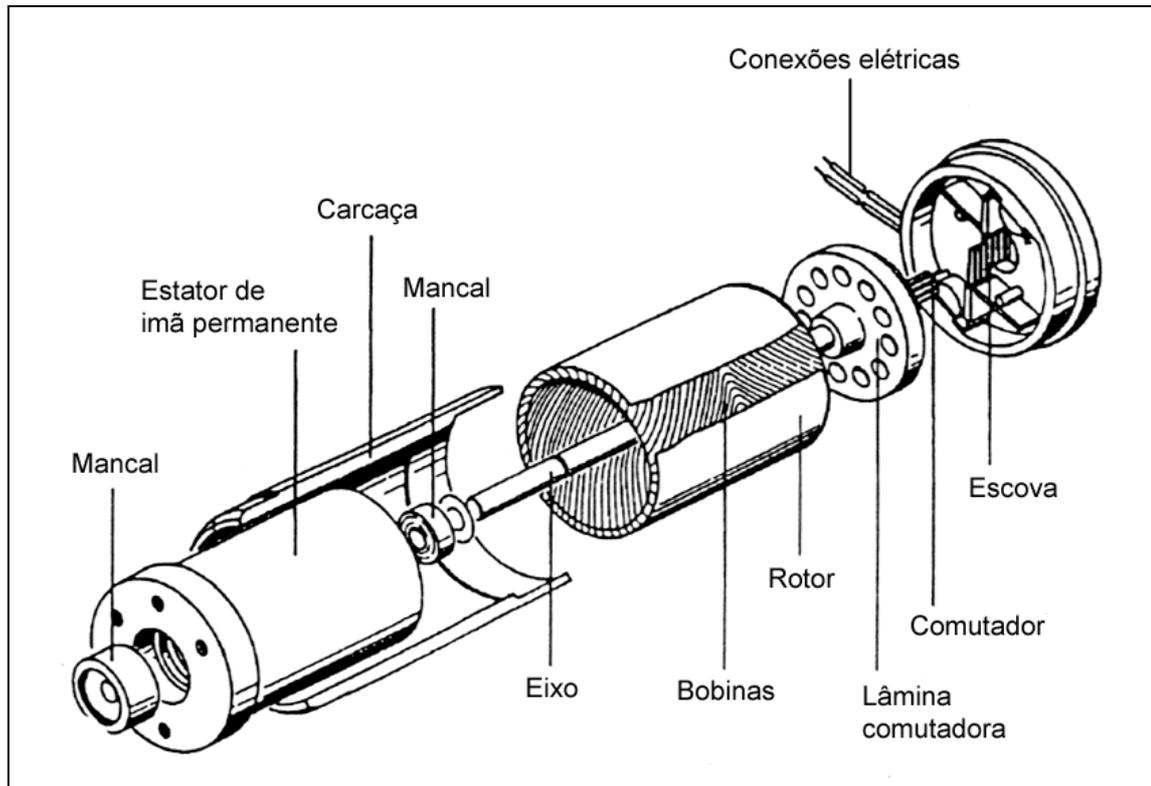
Já, os Motores CA (Motores de Corrente Alternada, também chamados Motores Síncronos) são caros, com torque alto, e precisam de alimentação trifásica, gerada por Inversores de potência elevada e não serão descritos aqui.

### Motores CC

Vale relembrar que o princípio de funcionamento de um Motor CC baseia-se no fato de que um condutor percorrido por uma corrente elétrica sofre o efeito de uma força (que tende a movimentá-lo), se estiver submetido a um campo magnético.



Fisicamente, um motor CC é constituído por:



- Estator – normalmente é um ímã permanente preso à carcaça do motor e que produz um campo magnético constante e permanente.
- Rotor – é o elemento móvel, constituído por um núcleo de chapas de ferro laminado onde são enroladas muitas voltas de fio condutor esmaltado. Suas extremidades são ligadas às duas metades do comutador. O rotor gira sobre um eixo onde deve ser conectada a carga a ser rotacionada.
- Escovas – também conhecidas como carvões. São os elementos de contato elétrico que conduzem a alimentação externa, de tensão contínua, ao comutador, que vai alimentar os enrolamentos do rotor, alternando a polaridade enquanto o motor estiver girando.

Para aplicações em robótica os Motores CC precisam apresentar características especiais:

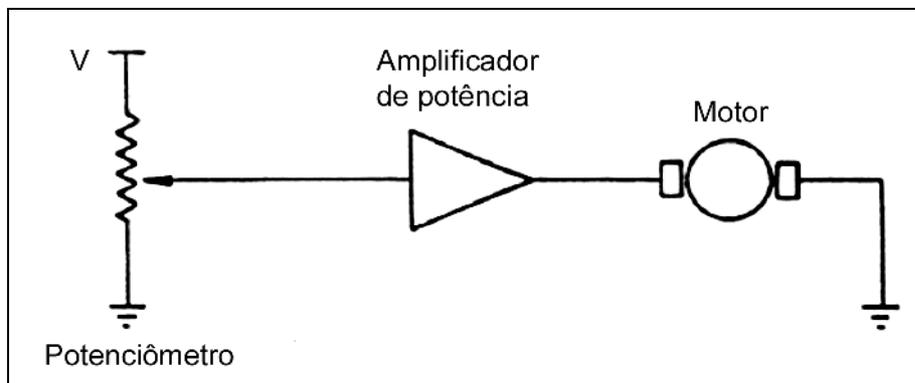
- Operar em diferentes velocidades sempre com a mesma precisão;
- Acelerar e desacelerar numa taxa precisa;
- Gerar o torque necessário para manter velocidade e/ou posição mesmo com mudanças na carga;
- Executar paradas e mudanças de direção repentinas.

### Resumindo

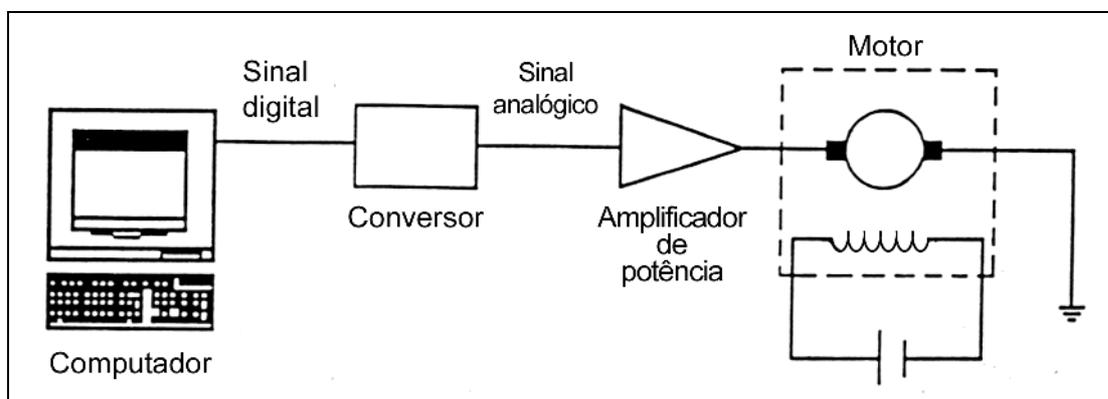
Um Motor CC precisa ter um controle de velocidade e posicionamento que lhe garanta um grande torque na partida e na frenagem aliado a uma baixa inércia. Para conseguir isso, além da construção especial do motor, temos dois modos de acionar os motores CC: o Analógico (também chamado de Linear ou Contínuo) e o Digital (também conhecido como PWM ou por “Duty Cycle”).

### Modo linear

Fornece tensão contínua para controle da velocidade (ou corrente contínua para controle do torque) cujo valor pode ser continuamente modificado para alteração da velocidade (ou torque). A Figura abaixo ilustra, genericamente, e em blocos, o acionamento linear.



Já na aplicação em robótica, o controle não pode ser manual, como sugere a figura anterior, mas automático e programável. Portanto, o esquema ilustrado pela figura a seguir é mais real: um computador fornece o controle digitalmente. Esse controle é convertido para tensão (ou corrente) analógica que é, então, aplicado ao Motor CC.



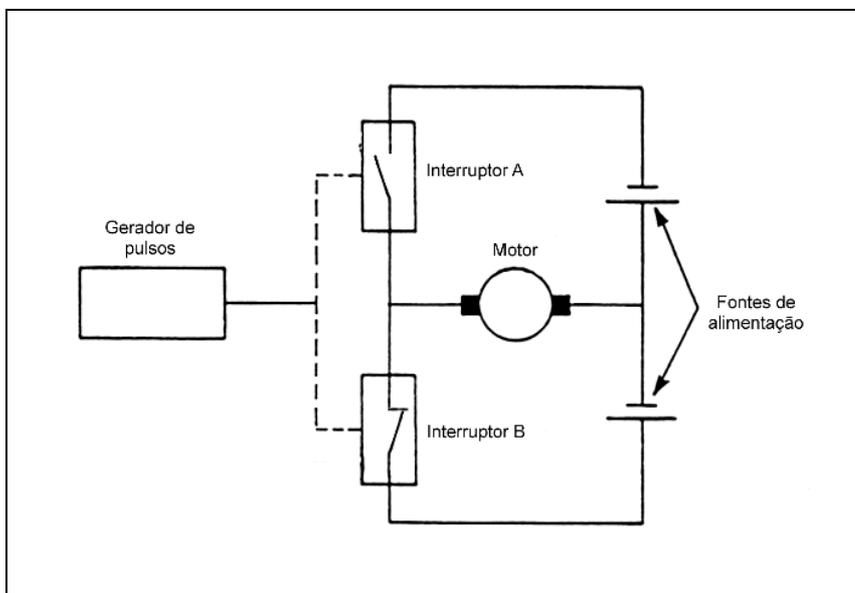
Tanto no controle manual (implementado usando circuitos discretos) como no automático (implementado por software) são utilizados os algoritmos de controle PID.

### Modo digital

Muito mais conhecido como Controle PWM (Pulse Width Modulation = Modulação de Largura de Pulso). O modo linear faz os transistores dos amplificadores de potência de saída que alimentam os motores operarem na região linear, onde a dissipação de potência é mais alta.

Por isso esses transistores aquecem em demasia causando desperdício de energia e redução da sua vida útil. O controle PWM faz os transistores dos amplificadores de potência de saída operarem como chaves, controlando o tempo em que eles ficam conduzindo e cortados.

O diagrama simplificado da figura abaixo ajuda a entender como funciona este acionamento.



Para que o sistema funcione corretamente usa-se uma frequência de operação (da ordem de 40 KHz), maior do que a frequência de trabalho do Motor CC. As chaves A e B são ativadas por níveis diferentes de tensão (0 e 1), de forma que, enquanto uma conduz a outra está aberta.

Aplicando-se um sinal quadrado (sinal de chaveamento) periódico nas duas chaves ocorre um “liga/desliga” alternado entre elas. Desse modo o motor recebe, ora tensão positiva, ora tensão negativa.

Se a duração dos dois níveis for a mesma, a tensão média enviada ao motor é nula e o motor permanece parado, porém energizado.

Se a duração de um dos níveis aumentar em relação ao outro, o motor receberá um valor de tensão médio diferente de 0 volts. Neste caso uma das chaves (transistores) irá conduzir durante um intervalo de tempo maior do que a outra produzindo uma corrente média resultante num determinado sentido.

Isso imprime uma rotação ao motor, que será tanto mais rápida, quanto maior for a tensão média resultante.

A fórmula para se calcular o ciclo de trabalho (duty cycle) é a seguinte:

$D = \frac{T_p}{T}$  onde  $T_p$  é a duração do pulso positivo e  $T$  é o período total do sinal de chaveamento (constante).

Na prática, as chaves são substituídas por transistores de potência ou tiristores.

É preciso esclarecer que não é necessário que o motor seja especial para ser controlado por PWM, mas que alguns Motores CC são construídos de modo a facilitar seu controle de velocidade e posicionamento tanto linear como digitalmente.

Estes motores trazem embutidos sensores de velocidade (tacômetros ou tacogeneradores) e/ou de posição (potenciômetros sem fim-de-curso).

Este tipo de Motor CC recebe o nome de Servo Motor. Como a aplicação é em robótica, o controle deve ser automático, ou seja, o gerador dos pulsos PWM deve ser um computador ou um circuito.

### **Motores de passo**

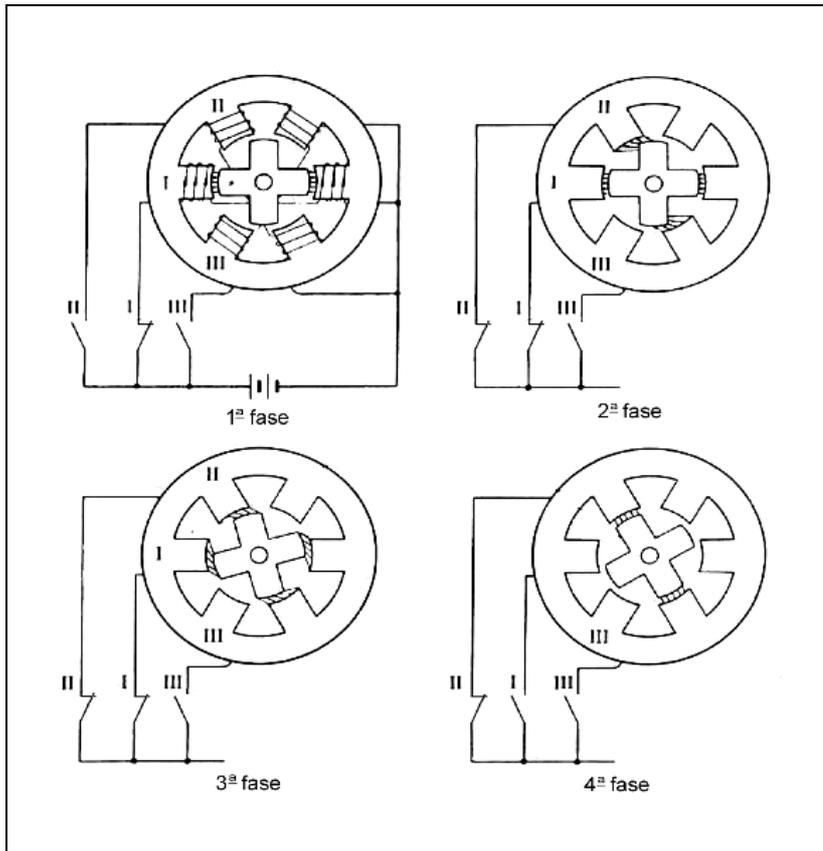
É um tipo singular de atuador e é usado na maioria das vezes em periféricos de computadores.

São motores que convertem sinais elétricos lógicos (pulsos) em movimento mecânico, com um ângulo de rotação por pulso definido e constante, sendo o movimento produzido denominado **Passo**.

Os motores de passo podem ser vistos como motores elétricos sem comutadores, sendo que, todos os seus enrolamentos fazem parte do estator.

O rotor é um ímã permanente ou nos casos dos motores de relutância variável, um bloco dentado de algum material magnetizado suavemente.

A figura abaixo exemplifica o funcionamento através de um circuito com três chaves:



São usados na robótica, basicamente em serviços leves, como por exemplo, em órgão terminal, e também em sistemas de malha aberta (sistema sem realimentação).

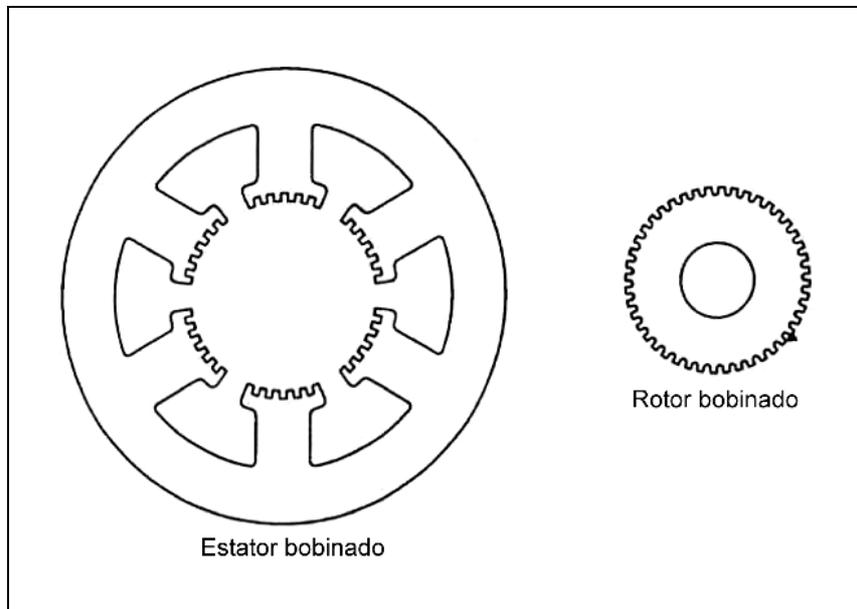
O torque máximo se obtém quando os pólos estão alinhados e é conhecido como **torque de retenção do motor**.

O aumento da resolução de um motor de passo é possível usando-se uma técnica conhecida como meio-passo ou micropasso. Conforme a figura anterior, ao energizarmos duas fases ao mesmo tempo, o rotor irá buscar uma posição intermediária, mas isso reduz o torque de retenção.

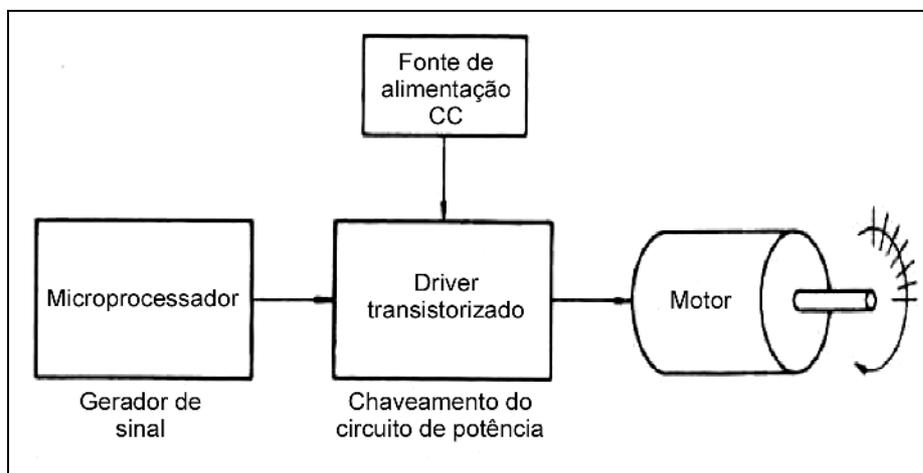
Cálculo do número de graus/passo:

$$\Theta = 360^\circ / (N_r \times N_F \times p)$$

Onde:  $\Theta$  = Graus/passos  
Nr = N.º de dentes do rotor  
Nf = N.º de fases  
 $p$  = N.º de pares de pólos/fase



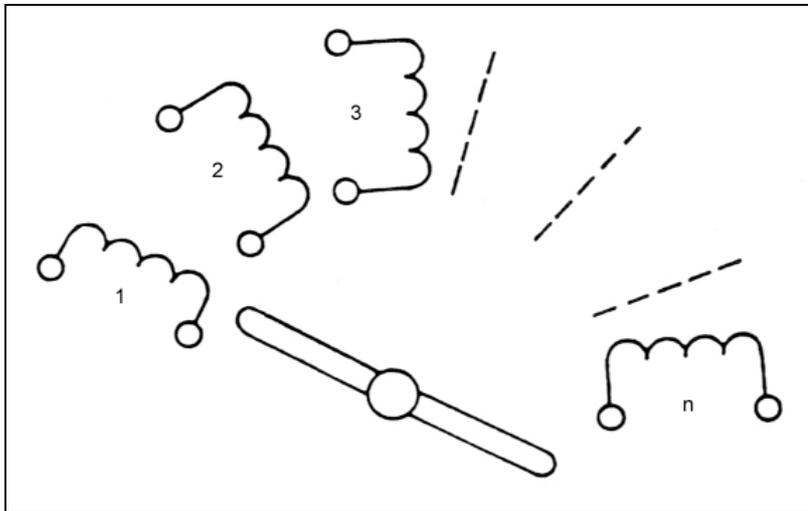
O controle de um motor de passo é feito basicamente conforme o esquema a seguir:



Se os enrolamentos forem comutados muito rapidamente, por exemplo, será possível que o motor não acompanhe os sinais de comando e apresente desempenho anormal, em alguns casos oscilante, em outros estacionário (chamado de 'patinação' ou 'deslizamento').

## Resumindo

Um Motor de Passo pode ser facilmente controlado bastando apenas comutar a alimentação de seus enrolamentos numa seqüência correta para se determinar sua velocidade e posição. Exemplo neste esquema simplificado:



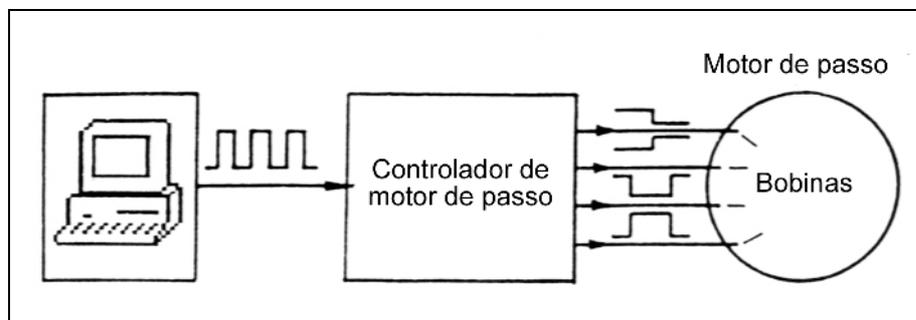
Pode-se utilizar três modos de acionamento para se mover qualquer tipo de Motor de Passo:

- Modo A – apenas um enrolamento é alimentado a cada passo. Obtém-se um movimento full-step (passo completo) com baixo torque.
- Modo B – a cada passo, dois enrolamentos são alimentados ao mesmo tempo para se obter um movimento full-step com alto torque.
- Modo AB – a cada passo alternam-se um acionamento Modo A e um Modo B para se criar passos intermediários e dobrar a resolução do Motor de Passo (movimento half-step).

O circuito excitador (driver de potência de saída) para alimentação dos enrolamentos (ou fases) de um motor de passo pode ter duas configurações:

- Unipolar – composto de um transistor por fase, este circuito simples permite circulação de corrente num único sentido pelos enrolamentos do motor e por isso é chamado Unipolar.
- Bipolar – composto por um par de transistores por fase, em ligação ponte, para permitir circulação de corrente nos dois sentidos dos enrolamentos do motor de passo. É mais caro e complexo, mas produz maior torque já que faz a corrente circular por todo o enrolamento e não apenas em metade dele.

Na aplicação em robótica, o controle do motor de passo deve ser automático, ou seja, o gerador das combinações de fases ou dos pulsos para o gerador de fases deve ser um computador conforme o diagrama em blocos mostrado a seguir.



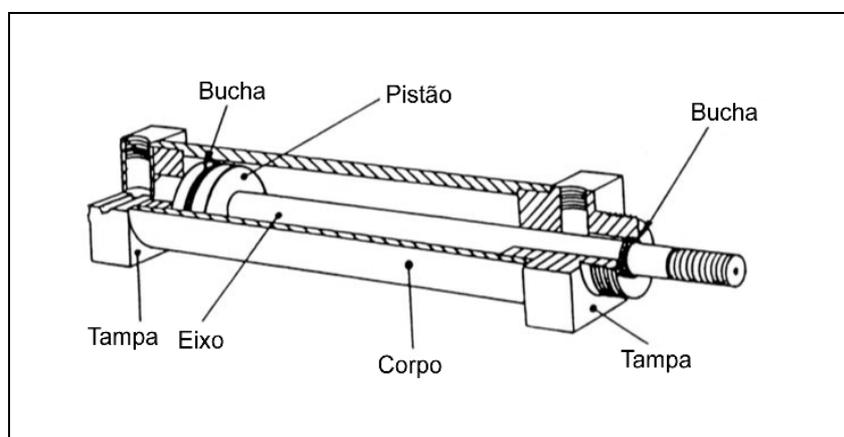
### Acionadores hidropneumáticos

São acionadores que se movimentam devido à pressão de um fluido. Se for um líquido (água ou óleo) temos os **acionadores hidráulicos** propriamente ditos e se for um gás (ar ou qualquer outro) tem-se os **acionadores pneumáticos**. Assim como os acionadores eletromagnéticos são os motores elétricos, os acionadores hidropneumáticos são os Cilindros.

### Cilindro

É, normalmente, um atuador linear e não rotativo como os motores (embora também sejam encontrados cilindros rotativos). Para movimentá-lo, deve-se injetar fluido pressurizado em seu interior.

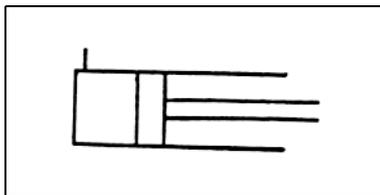
A pressão deste líquido ou deste gás faz com que o pistão se mova no interior do cilindro, transmitindo este movimento para o exterior através do eixo do pistão. Observemos o esquema de um cilindro em corte.



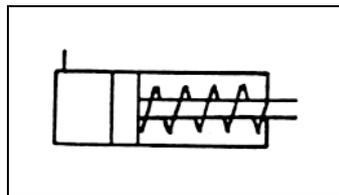
Fisicamente, um cilindro é constituído por:

- Corpo ou Caneca – Dentro dele o pistão pode se mover linearmente sem nenhum obstáculo.
- Pistão – É o elemento móvel com diâmetro adequado às dimensões da parte interna do corpo do cilindro. E é preso ou ligado a um eixo que se projeta para fora do corpo.
- Eixo do pistão – Haste maciça de seção retangular ou circular. De um lado é preso ao pistão e de outro passa pelas aberturas das tampas do cilindro.
- Tampas – São dois elementos de vedação do cilindro, montadas nas suas duas extremidades. Possuem furos para a entrada e saída de fluído do cilindro e aberturas para a movimentação do eixo do cilindro.
- Buchas – Elementos de vedação montados no pistão, nas aberturas das tampas para passagem do eixo do pistão e nos furos de admissão de fluídos das tampas do cilindro. Vedam os compartimentos do cilindro contra vazamentos de fluidos.

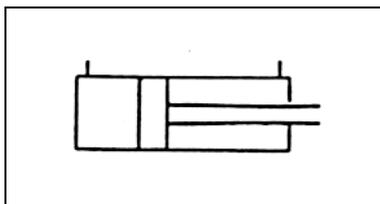
Existem vários tipos de cilindros de ação linear e são classificados de acordo com o tipo de operação ou movimento que produzem.



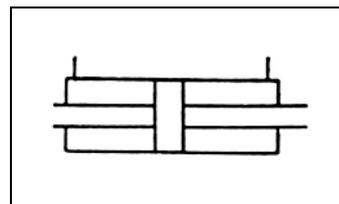
*Cilindro de ação única*



*Cilindro de ação única com mola de retorno*



*Cilindro de ação dupla com eixo único*



*Cilindro de ação dupla com eixo duplo*

A Fonte de Força de um cilindro deve fornecer a ele líquido ou gás sob pressão controlada.

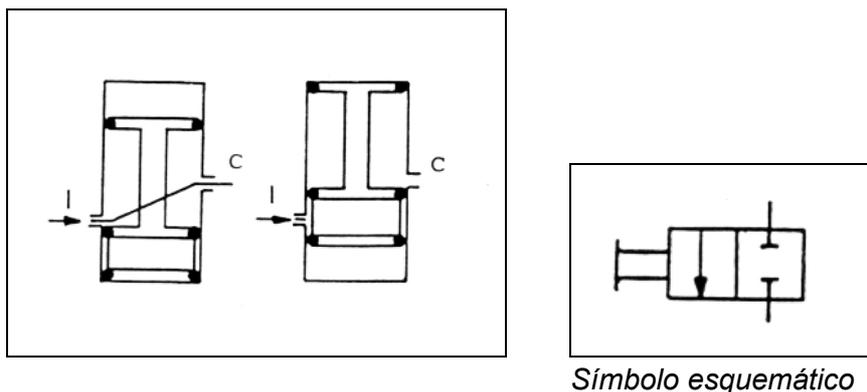
O dispositivo que faz isto é chamado Válvula. A válvula controla a vazão e a direção do fluído podendo injetá-lo, drená-lo ou parar seu fluxo pelo interior do cilindro.

Basicamente, existem dois tipos de controle e um tipo de válvula para cada um deles:

### Válvula direcional

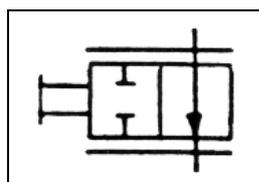
Atuação On/Off (=aberta/fechada). Um solenóide ou eletroímã abre e fecha a válvula para vazão única. Durante o tempo de atuação da válvula, o cilindro se enche ou se esvazia fazendo com que o eixo do pistão se movimente.

A Figura a seguir ilustra, de maneira simplificada, a operação de uma Válvula Direcional de duas posições e duas conexões.



### Válvula proporcional

Ao contrário da Válvula Direcional, esta possui ação contínua. Um sinal elétrico variável pode fazer com que o fluxo de fluido varie continuamente mantendo uma regulação constante e linear. Este tipo de válvula possibilita, além do controle da direção do fluxo, o controle de sua taxa de variação. O controle analógico que ativa esta válvula pode ser do tipo PID. A Figura abaixo ilustra seu símbolo esquemático.



### Resumindo

A maioria dos robôs atuais utiliza acionadores eletromagnéticos em vez dos hidropneumáticos, principalmente devido ao alto grau de precisão e simplicidade de controle dos motores elétricos. Porém muitos robôs acionados eletricamente possuem garras pneumáticas.

As principais vantagens dos acionadores eletromagnéticos são:

- Controle preciso e eficiente;
- Estrutura simples e fácil manutenção;
- Baixo custo.

Desvantagens:

- Não mantém momento constante em velocidades variáveis de revolução;
- Sujeito a danos provenientes de cargas pesadas que podem travar o motor.

As principais vantagens dos acionadores hidráulicos são:

- Mantém momento constante sob uma larga faixa de velocidades, durante um longo período de tempo sem causar danos, mesmo parado.

Desvantagens:

- Manutenção cara e extensiva;
- Necessita de válvulas precisas e conseqüentemente caras;
- É sujeito a vazamentos de óleo no sistema.

As principais vantagens dos acionadores pneumáticos são:

- Permitem operação em velocidades altas;
- Baixo custo;
- Manutenção fácil;
- Mantém momento constante sob uma larga faixa de velocidades, durante um longo período de tempo sem causar danos, mesmo parado.

Desvantagens:

- Não possuem alta precisão;
- São sujeitos a uma vibração momentânea no braço, quando o cilindro é acionado.

Resumindo, o acionamento eletromagnético é melhor em aplicações que envolvem:

- Alta precisão de posição;
- Transferências de cargas médias;
- Ambiente pequeno o bastante para não suportar reservatórios de ar ou óleo.

Já, o acionamento hidráulico trabalha melhor em situações que envolvem:

- Transferência de cargas grandes;
- Precisão média em localização e velocidade.

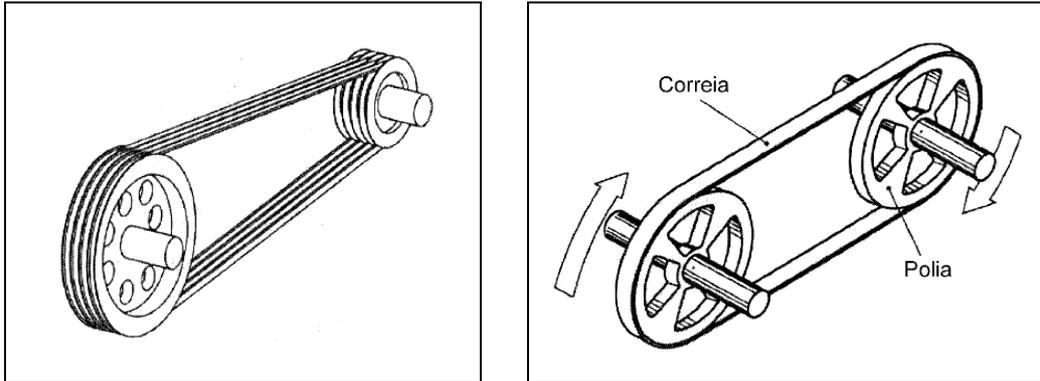
Enquanto que o acionamento pneumático é preferido em aplicações que envolvem:

- Baixa precisão;
- Baixo custo;
- Altas velocidades;
- Transferência de cargas médias.

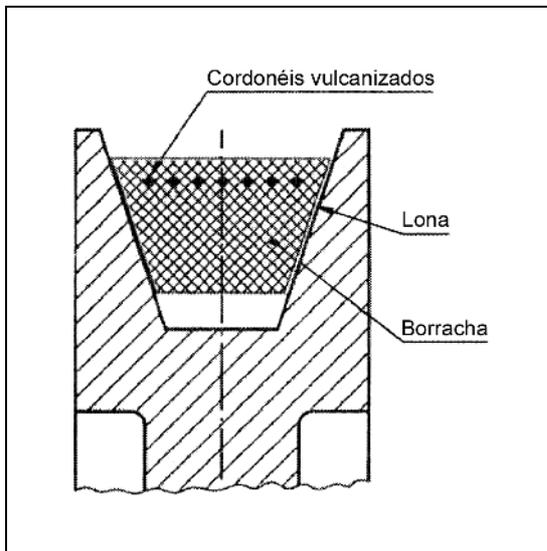
## Sistemas de transmissão

### Correias

Sistema que pode ser utilizado para transmissão de movimento a um ponto distante do atuador. São cintas de borracha, acopladas a duas peças circulares normalmente chamadas de polias, uma delas possui movimento enquanto a outra é movida pelo movimento da correia.



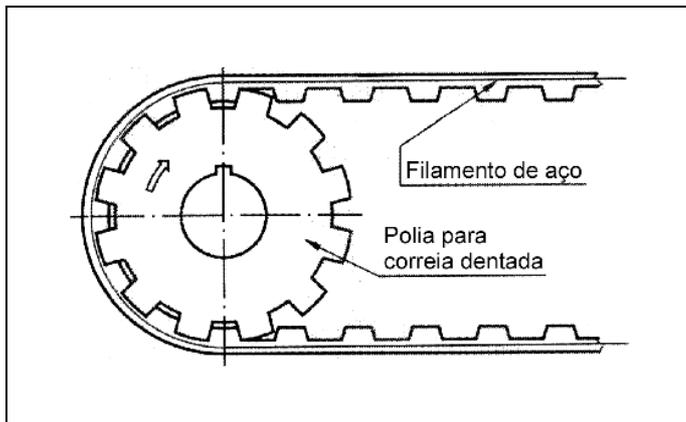
As mais usadas são planas, trapezoidais e dentadas. A correia em “V” ou trapezoidal é inteiriça, fabricada com seção transversal em forma de trapézio. É feita de borracha revestida de lona e possui no seu interior por cordonéis vulcanizados para suportar as forças de tração.



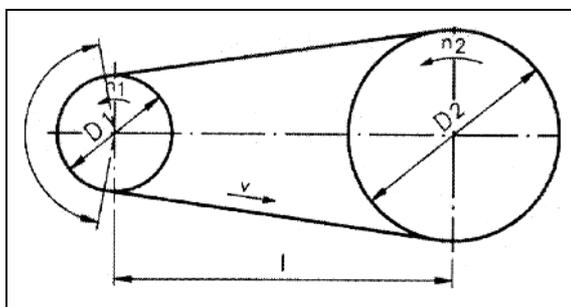
A preferência da utilização da correia trapezoidal em relação à correia plana é:

- Baixo deslizamento;
- Permite o uso de polias bem próximas;
- Elimina os ruídos e os choques, típicos das correias emendadas.

Utiliza-se a correia dentada quando não se pode ter nenhum tipo de deslizamento,



Para que o funcionamento seja perfeito na transmissão por polias e correias é necessário obedecer alguns limites em relação ao diâmetro das polias e ao número de voltas em relação a unidade de tempo, conhecidos como **relações de transmissão**.

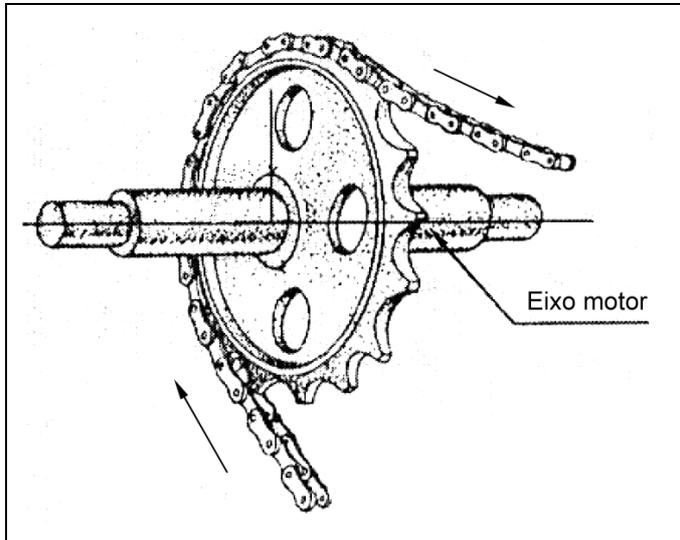


$$l = \frac{D_2}{D_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

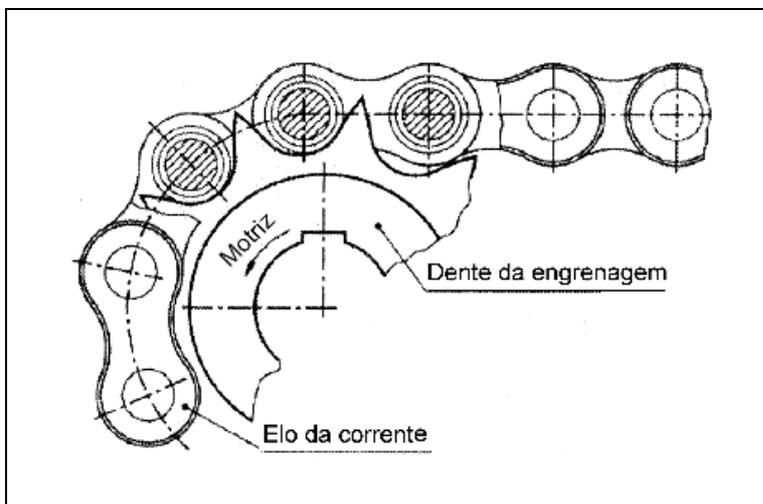
Onde :  $D_1$  é o diâmetro da menor polia  
 $D_2$  é o diâmetro da maior polia  
 $n_1$  é o numero de rpm da polia menor  
 $n_2$  é o numero de rpm da polia maior

### Correntes

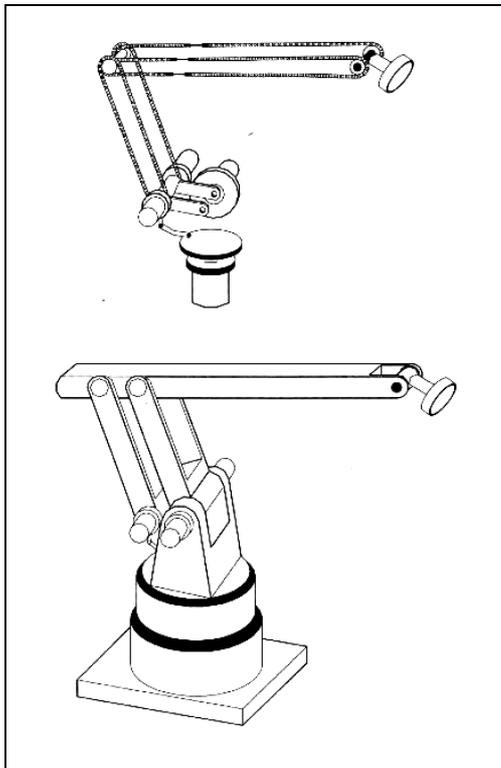
São semelhantes às correias, porém, nelas a transmissão ocorre por meio do acoplamento dos elos da corrente com os dentes da engrenagem.



A junção desses elementos gera uma pequena oscilação durante o movimento, mas proporciona maior capacidade de tração.

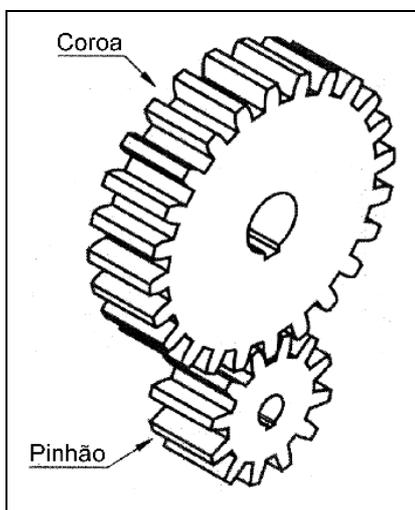


Sua utilização em órgãos terminais não é aconselhável, pois não possui a capacidade de escorregamento como nas correias de borracha.



### Engrenagens

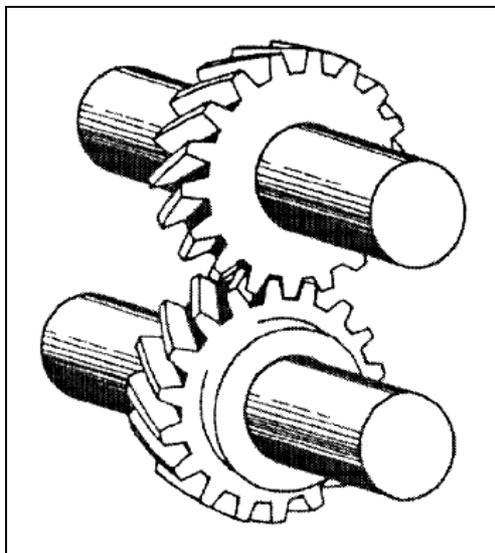
São rodas com dentes padronizados que servem para transmitir movimento e força entre dois eixos. Muitas vezes as engrenagens são usadas para variar o número de rotações e o sentido de rotação de um eixo para o outro. Quando um par de engrenagens tem rodas de tamanho diferentes, a engrenagem maior chama-se coroa e a menor chama-se pinhão.



Em função do tipo de aplicação as engrenagens podem ser:

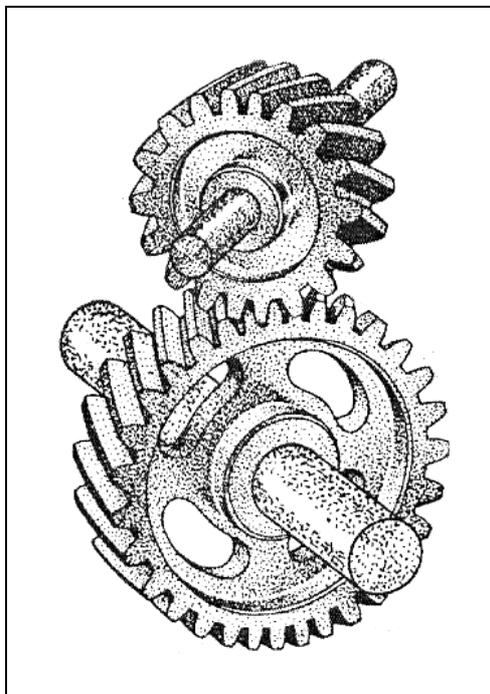
- **Cilíndricas com dentes retos**

Servem para transmitir rotação entre eixos paralelos:



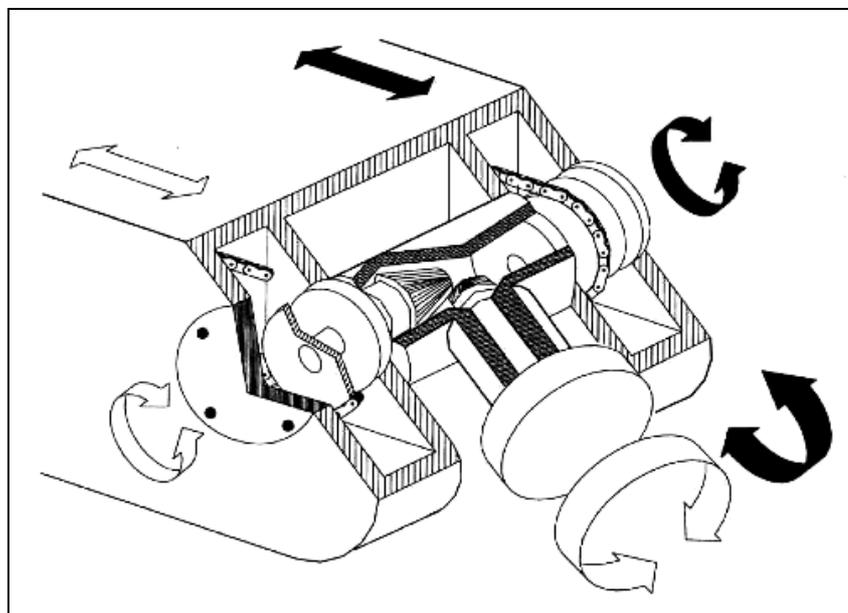
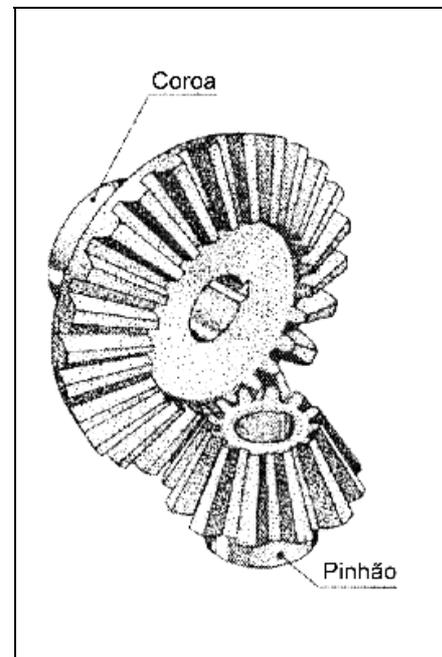
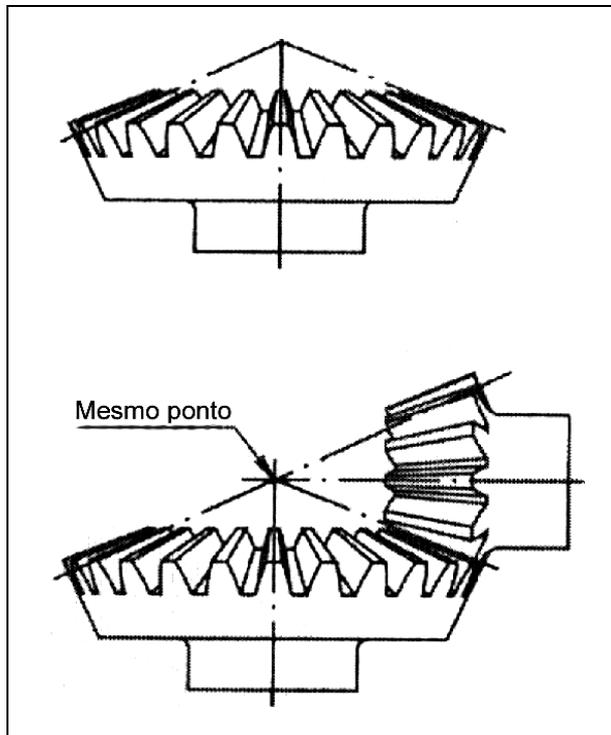
- **Cilíndricas com dentes helicoidais**

Servem para transmitir a rotação entre eixos paralelos e eixos reversos, produzem menos ruído em relação aos de dentes retos.



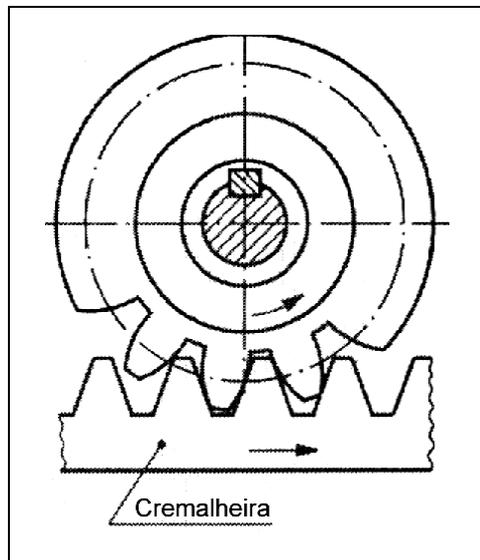
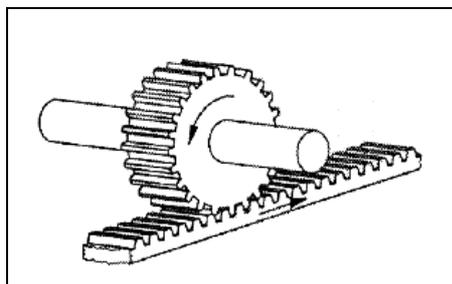
- **Cônicas**

Servem para transmitir a rotação entre eixos concorrentes (eixos que vão de encontro a um mesmo ponto quando prolongados).



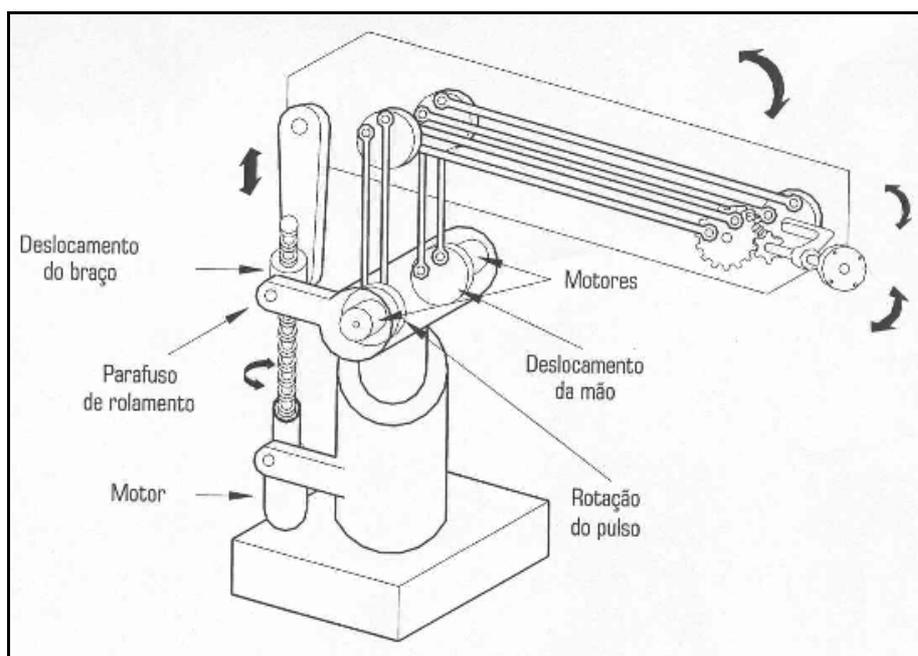
- **Cremalheira**

É uma barra provida de dentes, destinada a engrenar uma roda dentada. Com esse sistema pode-se transformar um movimento de rotação em movimento retilíneo e vice-versa



### **Barras**

Consistem em uma barra de metal acoplada ao atuador ou a outro meio de transmissão de movimento e à junta a ser movimentada. Se a barra se movimenta pela a ação do atuador, também irá movimentar a junta. É muito utilizada em Robôs do tipo Articulado (denominados raramente de Revóluto), pois possui alta capacidade de tração e manutenção muito simples.



# Sensores

Sensores são transdutores, ou seja, conversores de grandezas físicas em sinais elétricos correspondentes. Um robô é equipado com sensores para monitorar a velocidade com que se move, a posição em que se encontra, a localização de uma peça a ser manipulada, as dimensões da peça, a aproximação de um ser humano, e o impacto com um obstáculo.

A robótica não pode prescindir do uso de sensores. Por meio de sensorização se garante que o manipulador está executando o movimento ativado pelo controlador e que foi definido pela programação.

Há diversos tipos de sensores e, de acordo com a grandeza que se deseja monitorar, deve-se empregar o mais adequado. São eles que iremos estudar.

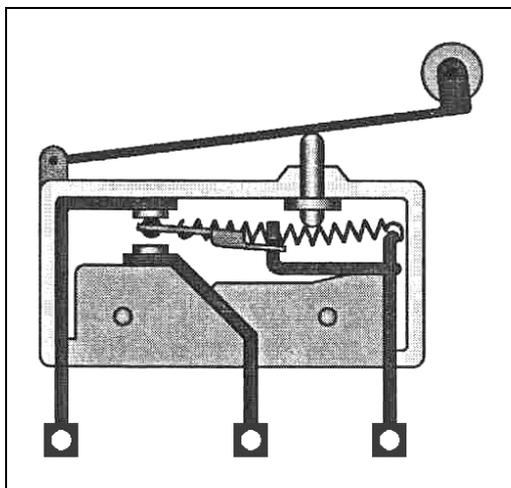
## **Sensor de limite mecânico** (chave de fim de curso)

Através dos detetores de limite detectam-se certas posições finais de partes de máquinas ou outras unidades de trabalho. Ao escolher tais elementos de introdução de sinais, têm-se em mira, a carga mecânica, a segurança de acionamento e a precisão do ponto de comando.

As chaves de fim de curso podem ser de ação Rápida ou Proporcional:

- Nas de ação rápida, a velocidade de acionamento não tem importância, pois a um certo ponto do percurso de acionamento, o contato é instantaneamente acionado;

- Nas proporcionais, abrem-se ou fecham-se os contatos à mesma velocidade com que se efetua o acionamento. Esse acionamento pode ser feito através de uma peça fixa (tucho) ou móvel (roletes).

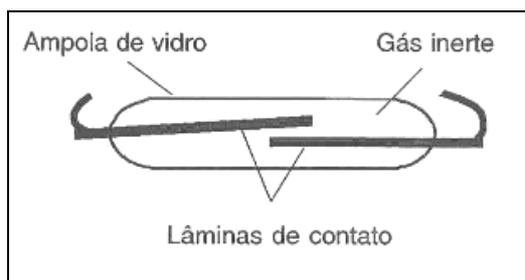


### Sensor de limite por aproximação

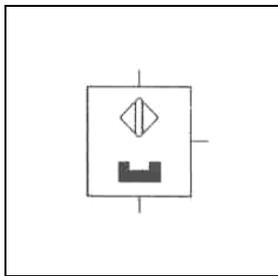
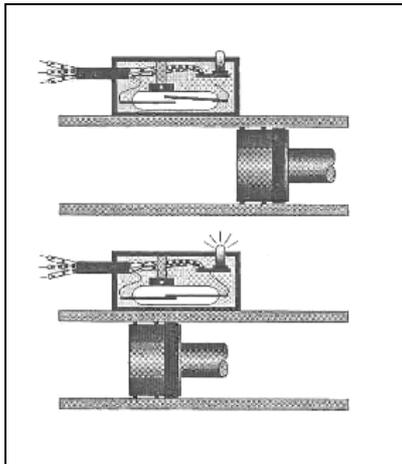
Chave eletrônica semelhante a uma Fim de Curso, que por não possuir nem contatos nem atuadores mecânicos, apresentam precisão milimétrica de acionamento. E por isso podem ser usadas em máquinas/processos em que se exige precisão na repetição do ponto de acionamento e de deslizamento.

### Contato “Reed” (acionamento magnético)

Esse tipo de acionamentos é especialmente vantajoso quando se necessita de um alto número de ciclos, e quando não há espaço suficiente para a montagem de chaves Fim de Curso convencionais, ou quando são solicitados sob condições ambientais adversas (poeira, umidade, etc.). Ao aproximar um ímã do sensor de acionamento magnético, o campo magnético atravessa a ampola, fazendo com que as duas lâminas em seu interior se juntem e estabeleçam contato elétrico.



Ao se remover o ímã, esse contato é imediatamente desfeito.

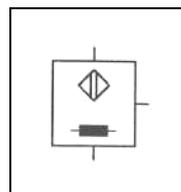
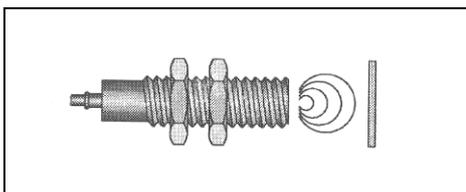


*Símbolo gráfico*

### **Sensor de proximidade indutivo**

Em sistemas automáticos de manufatura é freqüentemente necessária a detecção de partes móveis ou objetos, assim como, tarefas de contagem, que não possibilitam o uso de chaves de Fim de Curso convencionais. Estes sensores requerem contato físico ou proximidade excessiva e não possuem resistência, peso ou dureza suficiente. Nesses casos empregam-se os sensores de proximidade indutivos.

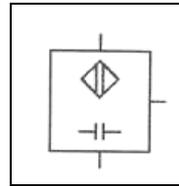
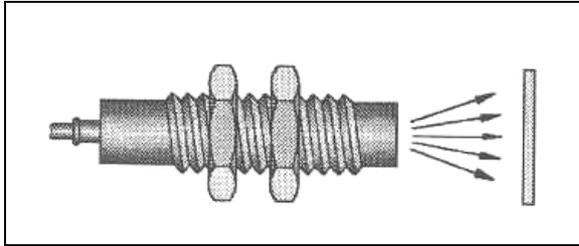
Os sensores de proximidade indutivos somente atuam na presença de metais, efetuando a comutação eletrônica quando um objeto metálico entra dentro de um campo eletromagnético de alta frequência. Podem ser de corrente alternada ou de corrente contínua.



*Símbolo gráfico*

### Sensor de proximidade capacitivo

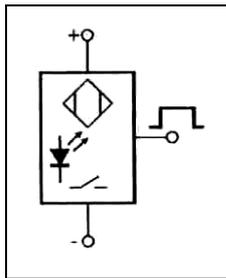
Os sensores de proximidade capacitivos efetuam a comutação quando qualquer tipo de material corta a face sensível do sensor (mesmo que não seja metal). Ex.: vidro, madeira, granulados, pó, líquidos, etc.



*Símbolo gráfico*

### Sensor óptico

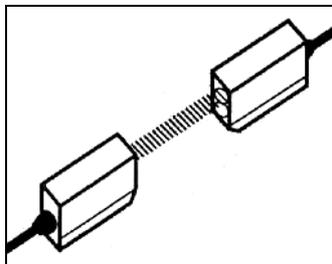
Tem como princípio de funcionamento a emissão e recepção de irradiação infravermelha que detecta qualquer material que reflita, absorva ou desvie a luz.



Podemos citar três tipos de sensores ópticos:

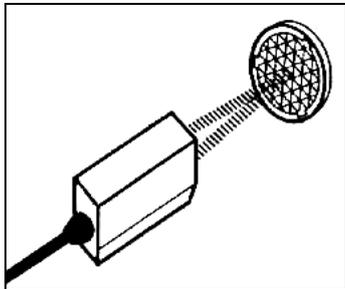
#### Ópticos alinhados

Formados por um conjunto de dois elementos – emissor e receptor – colocados frente a frente. São acionados quando o feixe de luz for interrompido.



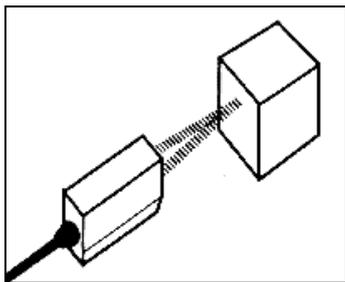
### Ópticos reflexivos

São aqueles em que o emissor e receptor estão juntos em uma só unidade. O feixe de luz é direcionado para um espelho prismático, produzindo uma atuação semelhante a do sensor óptico alinhado.



### Reflexão difusa

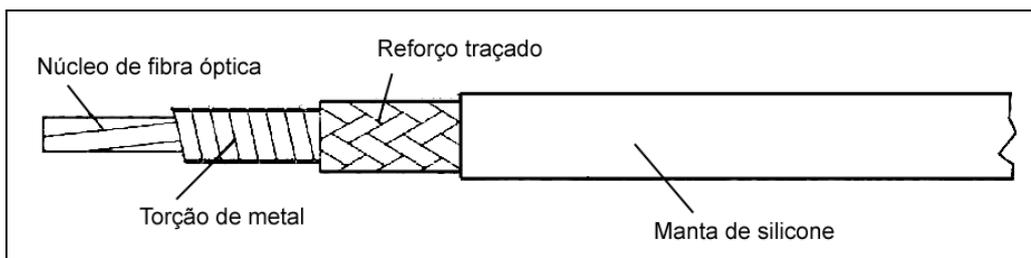
Os raios infravermelhos emitidos pelo emissor refletem sobre a superfície do objeto e retornam ao receptor provocando o seu chaveamento.



### Sensor fotoelétrico com fibra ótica

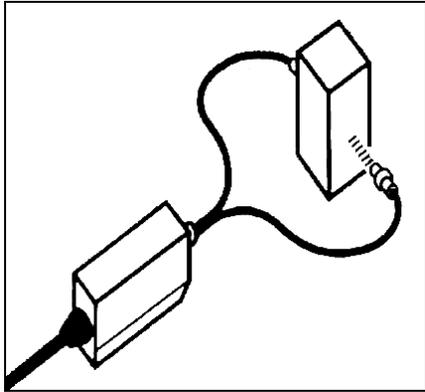
Apresentam a vantagem de detectar objetos com dimensões reduzidas tais como: terminais, de componentes eletrônicos, furos de centralização em placas, marcas em materiais de embalagem, etc.

A fibra ótica consiste em um guia de luz formado por um ou mais fios de vidro de alta densidade óptica encapados com material de baixa densidade, o que transforma o conjunto em “condutor” de luz.

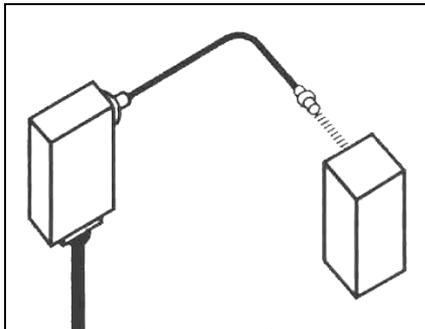


A fibra ótica pode ser aplicada em dois sistemas:

**Por Barreira**, ou seja, a fibra ótica é composta de dois cabos, sendo um o transmissor e outro o receptor de luz. O objeto é detectado quando o feixe de luz é interrompido.



**Por Difusão**, ou seja, o cabo é composto por dois condutores, dos quais um é procedente do transmissor e o outro do receptor de luz. A detecção acontece quando o objeto é aproximado da ponta sensora.

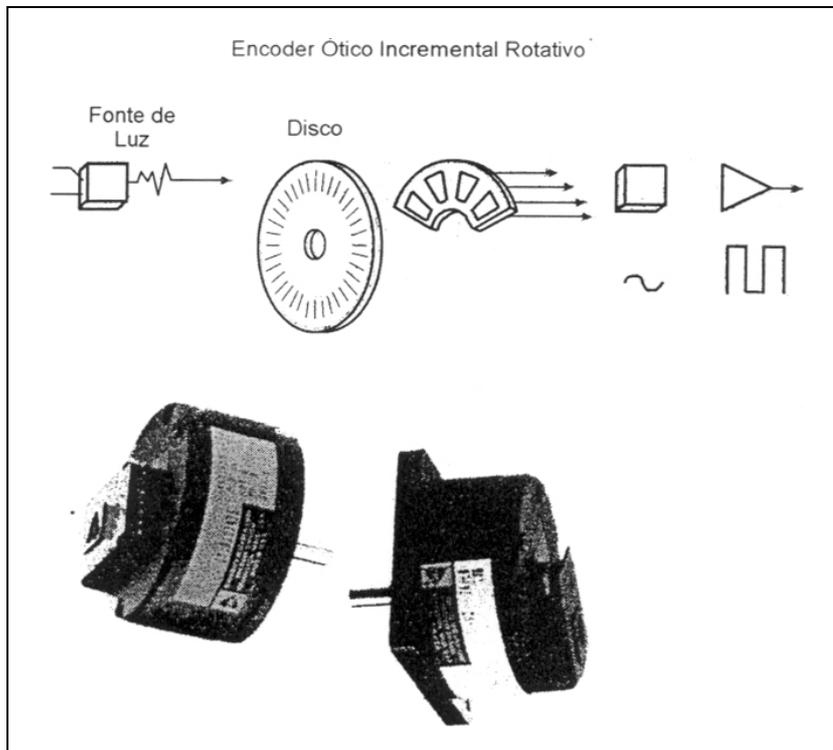


### Encoder linear e rotativo

Os encoders são dispositivos usados para servoposicionamento dos eixos do robô. São eles que fornecem os dados de posição para o controle de acionamento dos motores.

Um encoder é um dispositivo eletro-mecânico que pode monitorar movimentos ou posições.

Um encoder típico usa sensores óticos para fornecer uma série de pulsos que são traduzidos em movimento, posição ou direção.



O disco do diagrama é bem fino e um LED fixo é montado para que sua luz seja continuamente focada através das fendas do disco. Um fototransistor é montado do outro lado do disco para detectar a luz do LED. O disco é montado no eixo do motor ou do dispositivo que terá sua posição medida. Quando o eixo girar o disco girará também. A luz do LED focada no fototransistor irá produzir um trem-de-pulsos.

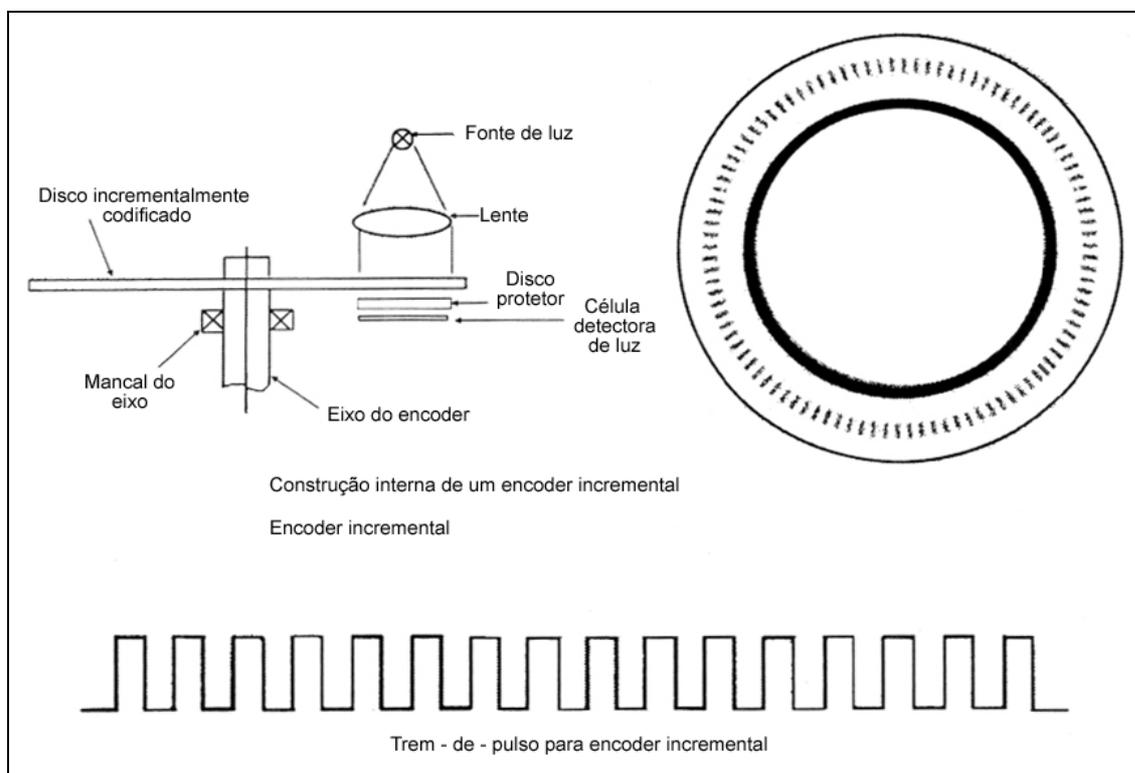
Nesse tipo de encoder, utilizado desde as primeiras aplicações, o tamanho das fendas no disco metálico limitou a precisão que poderia ser obtida. Se mais fendas fossem abertas no disco, a resolução do encoder aumentaria, mas ele se tornaria muito frágil para uso industrial. Os modernos discos de encoder são feitos de vidro com segmentos opacos (barras) gravados neles.

Assim que o disco do encoder gira, os segmentos opacos bloqueiam a luz e, onde o vidro é limpo, a luz passa fornecendo um trem-de-pulsos similar ao disco de encoder que possui furos. Encoders típicos de vidro possuem de 100 a 6000 segmentos. Isto significa que estes encoders podem fornecer  $3,6^\circ$  de resolução, para um encoder de 100 segmentos, a  $0,06^\circ$  de resolução para um encoder com 6000 segmentos.

Se o eixo do encoder é conectado a um eixo de acionamento de um motor que por sua vez é conectado a um fuso de esferas ou uma engrenagem de redução, o número de graus de resolução pode ser convertido em posição linear.

O segundo trem-de-pulsos é desenvolvido neste tipo de encoder colocando-se uma segunda fonte de luz e um segundo sensor a um ângulo diferente do primeiro set. Como a posição da segunda fonte de luz é diferente da primeira, o segundo trem-de-pulsos será deslocado do primeiro como se existissem dois sets de furos. Isto permite ao disco do encoder fornecer ambas informações de incremento e de rotação com um único set de barras opacas gravadas.

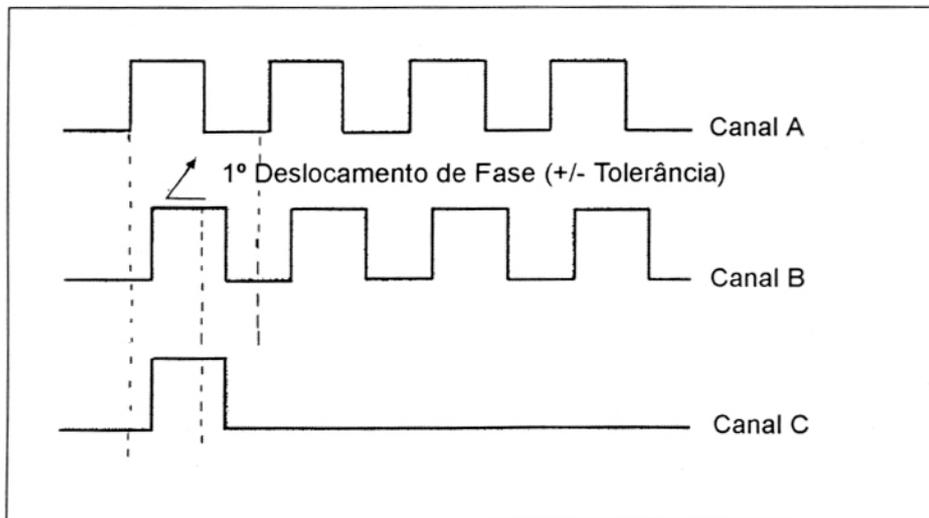
O segundo trem-de-pulsos é usado junto com o primeiro para determinar a direção de rotação para o disco de encoder.



### Encoder rotativo incremental

Um encoder com um único set de pulsos (canal) não seria útil, pois ele não seria capaz de indicar a direção de rotação.

A maioria dos encoders incrementais possui um segundo set de pulsos que é defasado do primeiro set de pulsos (canais A e B); além disso, ele gera um pulso adicional para indicar cada vez que o encoder fez uma volta completa (canal C).



Uma vez que os dois sets de pulso são gerados defasados, é possível determinar em que direção o eixo está girando através da quantidade de deslocamento de fase entre o primeiro e o segundo set de pulsos. O pulso gerado a cada revolução completa do encoder é também chamado **pulso de comando**. Ele é usado para contar as voltas completadas pelo eixo onde o encoder estiver conectado.

Já que um encoder incremental somente fornece trens-de-pulsos, um **home switch** deve ser usado com este tipo de encoder para garantir que o sistema seja referenciado para uma posição de origem: o atual **home position** (ou ponto de referência).

### Encoder rotativo absoluto

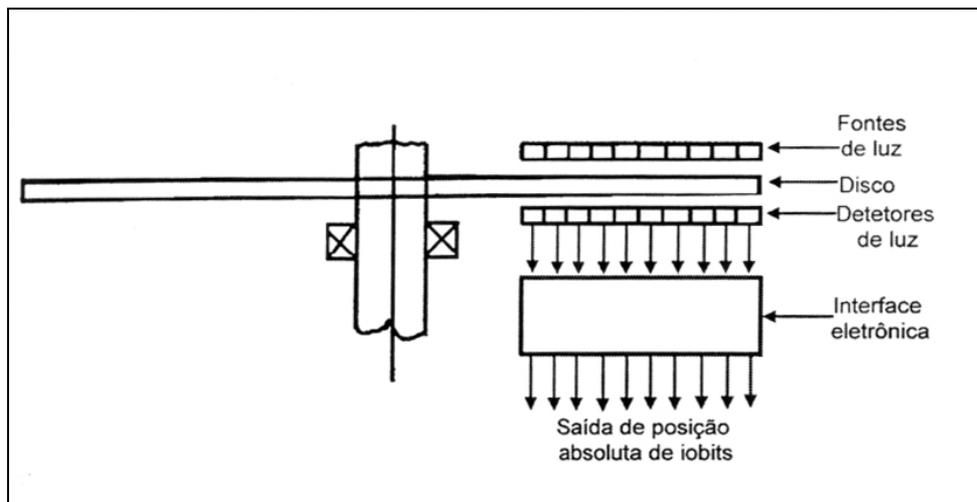
Uma das maiores desvantagens do encoder incremental é que o número de pulsos que é contado é armazenado em um buffer ou contador externo. Se uma falta de energia ocorre, a contagem será perdida.

Isto significa que se uma máquina com um encoder tem sua alimentação elétrica interrompida à noite ou para manutenção, o encoder não mais saberá sua exata posição quando a energia for restaurada.

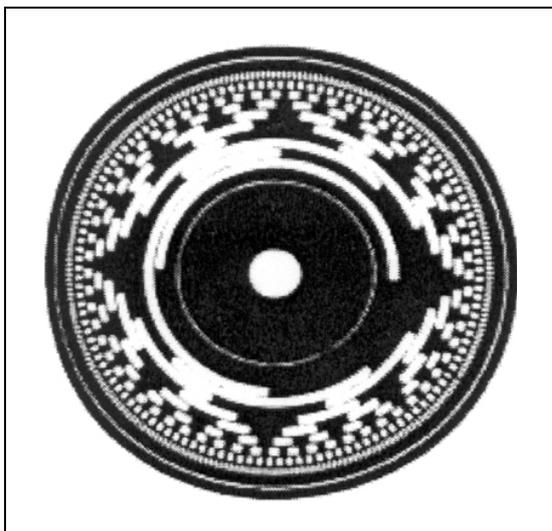
O encoder necessita de um switch de referência (home position switch ou home detection) para indicar a posição correta da máquina.

O encoder incremental usa uma rotina de referência (ou home routine) que força o motor a se mover até que um switch seja acionado, quando o buffer ou contador é zerado e o sistema sabe onde está com relação a pontos fixos de posição.

O **encoder absoluto** foi projetado para corrigir esse problema de tal modo que a máquina sempre saberá sua posição.



Este tipo de encoder possui segmentos opacos e transparentes como o encoder incremental. Estes segmentos formam múltiplos grupos em círculos concêntricos no disco de encoder semelhante a um alvo.



Os círculos concêntricos começam no meio do disco do encoder e à medida que se dirige de dentro para fora, cada círculo passa a ter o dobro de número de segmentos que o círculo interno anterior. O primeiro anel, que é o mais interno, tem um segmento opaco e outro transparente.

O segundo anel tem dois segmentos opacos e dois transparentes, o terceiro tem quatro de cada segmento e assim por diante. Se o encoder tem 10 anéis, seu anel mais externo terá 512 segmentos, se forem 16 anéis terá 32767 segmentos.

$2^n$  = no. de segmentos (n = N.º. de anéis)

Desde que cada anel do encoder absoluto tem o dobro do número de segmentos do anel anterior, os valores formam números para um sistema de contagem binária.

Nesse tipo de encoder haverá uma fonte de luz e um receptor para cada anel no disco do encoder. Isso significa que o encoder com 10 anéis tem 10 sets de fontes luminosas e receptores e o encoder com 16 anéis também 16 fontes de luz e receptores.

A vantagem do encoder absoluto é que ele pode fazer a contagem decrescente de modo que o disco faça uma revolução durante o trajeto completo da máquina. Se o comprimento do trajeto da máquina é 200mm e o encoder tem 16 bits de resolução, a resolução será  $200/65536$ , que é 0,00305mm.

Se o trajeto para a máquina é maior, por exemplo, 200cm, usaremos um encoder para cobrir cada centímetro do trajeto e um segundo para cobrir posições dentro de 1cm. Isto significa que um encoder contará uma volta completa para a distância de 200 cm enquanto o outro contará uma volta completa para a distância de 1cm.

Uma vez que o encoder absoluto produz somente um número distinto ou código binário padrão para cada posição dentro de seu range, ele sabe onde estará em cada ponto entre os pontos extremos de seu trajeto. Por isso, não necessitará ser deslocado para o home position da máquina toda vez que a energia elétrica for desligada.

### **Encoder linear**

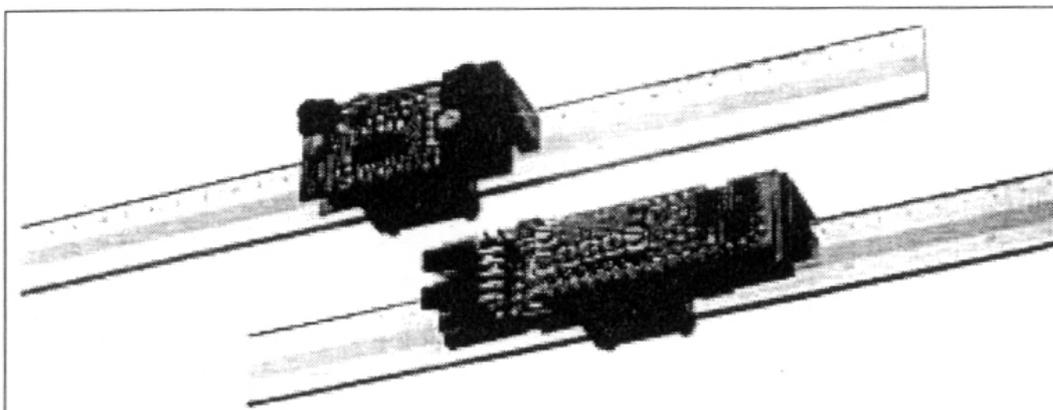
Este tipo de encoder tem operação similar ao encoder absoluto rotativo. O encoder linear tem duas peças idênticas de vidro retangular que são gravadas com segmentos opacos e transparentes.

Uma das peças de vidro é fixada e a outra se move por um braço deslizante que é preso à parte móvel de uma máquina ou robô. Quando a máquina ou robô se move, o braço move a peça deslizante de vidro em frente da peça fixa.

A cada ponto ao longo de seu movimento, os segmentos opacos e transparentes de vidro criarão um único padrão de luz (segmentos on/off) que serão decodificados em um número binário que indicará a posição da parte móvel da máquina ou robô.

A principal vantagem desse tipo de encoder é que o tamanho das placas de vidro será o mesmo da distância total do trajeto da máquina. Isso garante que a máquina saberá exatamente onde estará a cada ponto ao longo de sua trajetória, mesmo que sua alimentação elétrica seja descontínua.

A figura abaixo mostra um encoder que tem resolução abaixo de 0,0000001 in ou 0,1 micron.



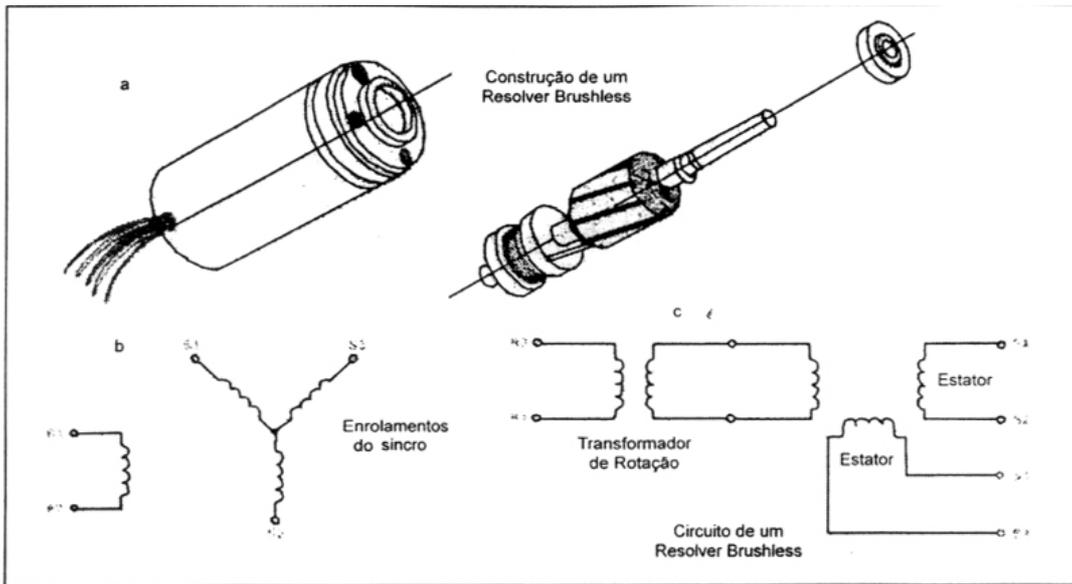
Por esta figura, se pode observar que esse tipo de encoder é projetado mais especificamente para trajetos lineares do que para trajetos rotativos.

Estes encoders são necessários para usinagem de precisão, solda ou aplicações que usem lasers.

### **Resolver**

Um **resolver** é um transdutor que usa um enrolamento de estator e um de rotor para produzir formas de onda para medir o ângulo de um eixo.

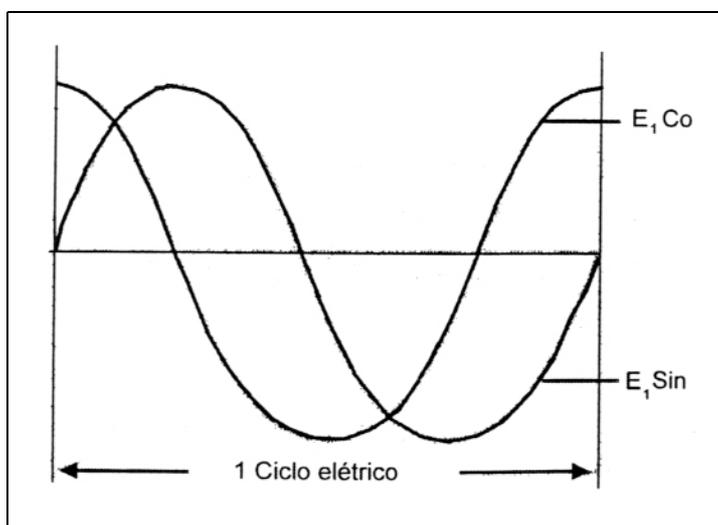
O termo genérico para todos estes tipos de transdutores é síncro.



A figura acima mostra em (a) um exemplo de um resolver com o rotor removido do estator. Em (b) podemos ver um estator que usa três enrolamentos conectados em Y.

Em (c), vemos um estator que usa dois enrolamentos montados com  $90^\circ$  de diferença um do outro. Quando um transdutor usa três bobinas conectadas em Y, é geralmente denominado síncro; quando o estator tem dois enrolamentos é geralmente denominado resolver.

Na operação do resolver, o rotor é excitado com uma tensão **AC**. O estator e o rotor funcionarão como um gerador e uma tensão será produzida entre os enrolamentos  $S_1$  e  $S_3$  e outra tensão, defasada de  $90^\circ$ , será produzida entre os enrolamentos  $S_2$  e  $S_4$ .



Cada forma de onda representa uma revolução completa do eixo do rotor (360°)

Uma das primeiras aplicações de resolveres foi para indicar o posicionamento de canhões em destróieres. Nesses primeiros resolveres, a soma de duas tensões era enviada a um amplificador cuja saída era conectada diretamente ao motor.

Nessa configuração, uma tensão de setpoint também era enviada ao amplificador ativando o motor que começaria a movimentar as armas. Isso giraria o eixo do resolver até que a sua tensão de saída fornecesse uma quantidade de tensão igual a do set point.

Desde que a tensão de set point e a tensão do resolver estivessem fora de fase, as duas tensões se cancelariam quando fossem iguais o que significaria que a tensão resultante enviada ao motor seria zero e o motor pararia de se mover. Foi importante também nessas primeiras aplicações que o suporte (plataforma) do canhão pudesse fazer somente uma revolução.

Esses primeiros resolveres não foram muito úteis, sem modificações, em aplicações onde o eixo do motor dava várias voltas.

A primeira inovação tecnológica incorporada aos resolveres permitiu sua utilização em sistemas que dão múltiplas voltas. Um resolver moderno pode determinar a posição do rotor dentro de um ângulo qualquer em uma revolução.

Para determinar a posição de um eixo do motor o resolver deve ser preso a ele diretamente ou através de um conjunto de engrenagens. Quando engrenagens são usadas, um resolver menos preciso e um mais preciso podem ser usados para determinar o posicionamento do eixo em qualquer lugar ao longo do movimento inteiro.

O encoder menos preciso é montado (engrenado) para fazer somente uma revolução sobre o range inteiro do trajeto e o resolver mais preciso é engrenado para fazer uma revolução a cada 200 cm, por exemplo.

Resolveres são tipicamente usados em aplicações robóticas e máquinas-ferramenta onde a posição do eixo de um robô ou de uma máquina deve ser determinada continuamente.

Um outro avanço na tecnologia de resolveres ocorreu quando amplificadores operacionais (AO) se tornaram mais refinados.

O AO tem a capacidade de comparar a tensão entre duas formas de onda dos estatores e determinar a posição exata do eixo de rotação dentro de 0,001 graus.

O AO pode também ser usado para detectar se a forma de uma onda está adiantada ou atrasada com relação à outra. Isto indica se a rotação do eixo está no sentido horário ou anti-horário.

Problemas com um resolver são simples de serem solucionados porque ele atua como um gerador e seus enrolamentos como um transformador.

Um problema comum é o rompimento de fios dos enrolamentos. O teste mais simples para o resolver é aplicar uma tensão de excitação CA nos terminais  $R_2$  e  $R_4$  do rotor.

Se a tensão de excitação estiver presente, a tensão deve estar presente entre os terminais  $S_1 - S_3$  e  $S_2 - S_4$  do estator porque a relação entre os enrolamentos do rotor e os do estator é essencialmente a mesma entre os enrolamentos do primário e do secundário de um transformador.

Esta relação estará presente se o eixo do rotor estiver girando ou não. Quando o resolver está girando, a forma de onda da tensão de estator será uma senóide, como a de um alternador CA, que pode ser medida em um osciloscópio.

Se uma tensão de excitação estiver presente mas uma ou ambas as tensões do estator não estiverem presentes, os enrolamentos do rotor ou do estator estarão abertos. Pode-se desconectar o resolver e testar ambos os enrolamentos do rotor ou do estator quanto a sua continuidade. Se qualquer um dos enrolamentos estiver aberto, o resolver deve ser substituído.

O segundo tipo de problema que ocorre com o resolver é em função dos fios que ligam os enrolamentos do estator e do rotor ao circuito de controle do resolver que podem estar abertos.

Vistos que o resolver deve ser montado próximo ao eixo do motor e o circuito de detecção é mostrado próximo aos controles, a quantidade de fios entre os dois pode ser significativa e podem ter dois ou mais terminais de conexão entre eles.

Os fios podem se soltar em qualquer um destes conectores ou eles podem estar interrompidos em algum ponto entre eles. Deve-se determinar se a fiação tem algum problema pelo teste da tensão de excitação na fonte (circuito de controle de resolver) e no resolver.

Se houver tensão na saída do circuito, um dos dois fios pode estar interrompido. O circuito do estator pode ser testado de maneira similar, exceto se a tensão for desenvolvida no estator e ele usa os fios para chegar ao controlador.

Nesse caso a tensão deve ser testada no estator e então no controlador. Se a tensão estiver presente no estator, mas não no controlador, há indícios de que o fio esteja interrompido.

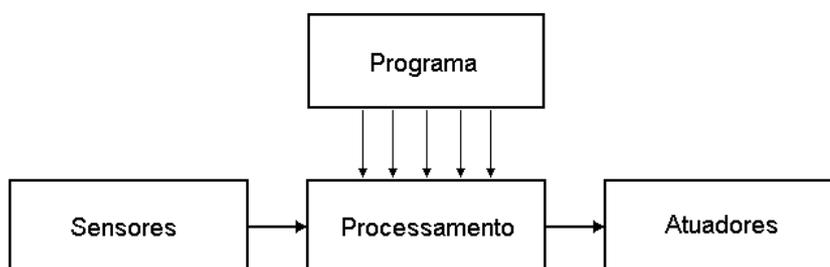
# Visão robótica

Os sistemas de visão de máquina poderiam ser tratados juntamente com os outros tipos de sensores não fosse o grau de sofisticação que se atingiu neste campo. A visão robótica, muito mais que um sistema de sensoriamento, é um elemento de inteligência de máquina, municiando os sistemas e controladores robóticos com informações para tomadas de decisão.

Aqui, analisaremos o processo de geração e reprodução de uma imagem, que é a base, juntamente com o processamento da mesma, para os sistemas de visão robótica.

## Sistema de visão

Podemos descrever, grosso modo, um sistema robótico através dos três componentes (Sensor, Processador e Atuador) mostrados abaixo:



O processador é a peça chave porque, executa os programas que determinam o controle dos atuadores do manipulador, condicionado a um sistema de sensorização.

Por exemplo, em uma fábrica de montagem o robô pode ser instruído para pegar uma peça em uma posição específica de um transportador, e montá-la em uma estrutura qualquer.

A seqüência de instruções iniciadas e interpretadas pelo processador pode requerer considerável complexidade do atuador (um braço mecânico com vários graus de liberdade) para executar estas instruções.

Nesse sistema em particular, pouco se exige da unidade de sensorização.

Em alguns sistemas, no entanto, a unidade sensorial pode ser a chave para a execução de uma operação.

Por exemplo, em um sistema de teste de qualidade, o sensor pode ser uma câmera de TV posicionada sobre uma esteira transportadora.

A tarefa desse sistema é uma inspeção visual de produtos manufaturados, em que se deve aceitar os produtos que estiverem dentro de um padrão e descartar os que (em termos visuais) parecem insatisfatórios.

Nesse caso, as unidades sensora e a processadora são de grande importância, enquanto, o atuador, pode ser relativamente simples.

Prover um robô com um sistema de visão preciso e útil é um dos maiores desafios que a engenharia, aplicada à robótica, vem encontrando.

Tal qual outras tecnologias aplicadas à robótica, a de sistemas de visão vem crescendo rapidamente desde a década de oitenta.

O processo de imagens em três dimensões (também chamado visão estéreo) ainda é um desafio que só recentemente vem sendo resolvido, ao passo que, em duas dimensões, vem se tornando muito comum em robôs industriais.

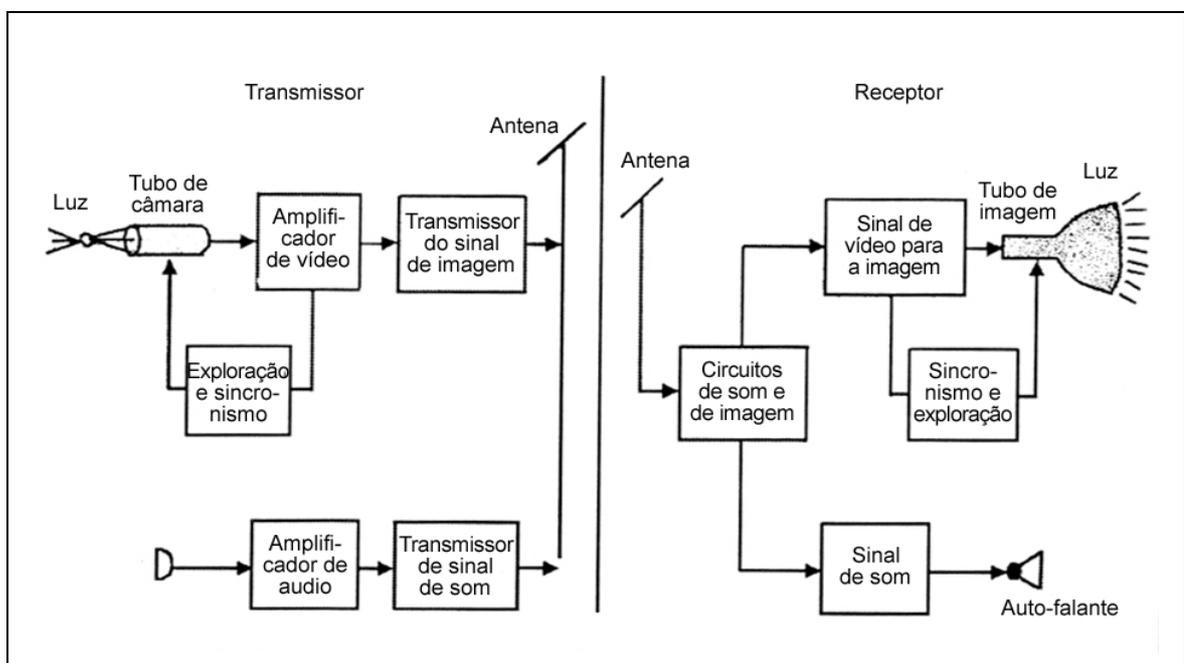
Antes de estudarmos os sistemas de visão aplicados à robótica, veremos primeiro, de maneira geral, o sistema de geração e reprodução de imagens, tal como acontecem em sistemas de televisão, que é a base dos sistemas de visão aplicados à robótica ou a sistemas automatizados de maneira geral.

## Sistema de televisão

Tele+visão = Ver à distância.

A imagem é gerada quando a informação visual de uma cena é convertida num sinal elétrico de vídeo que pode ser digitalizado, armazenado ou simplesmente transmitido para uma central ou para o(s) receptor(es).

A imagem é reproduzida quando, depois de recebida por um aparelho receptor, é reconstituída na tela fluorescente de um cinescópio ou num painel LCD



Televisão monocromática ou preto e branco (P&B) é a que gera e reproduz imagens em tons de preto, cinza e branco.

Televisão a cores ou RGB tem as partes principais da imagem reproduzidas em todas as suas cores naturais, com combinações de vermelho (red), verde (green) e azul (blue).

Aplicações: Radiofusão de TV, TV a cabo (CATV), circuito fechado de TV (CCTV), vídeo-fone, sistemas de visão artificial, etc.

Aqui abordaremos somente o sistema monocromático por ser o sistema mais difundido em visão robótica.

### A imagem da televisão

A TV é, basicamente, um sistema destinado a reproduzir uma imagem parada, tal qual uma fotografia.

Somente quando estas imagens são mostradas umas após as outras suficientemente rápido, é que se tem a impressão de movimento. O sistema é semelhante ao usado no cinema.

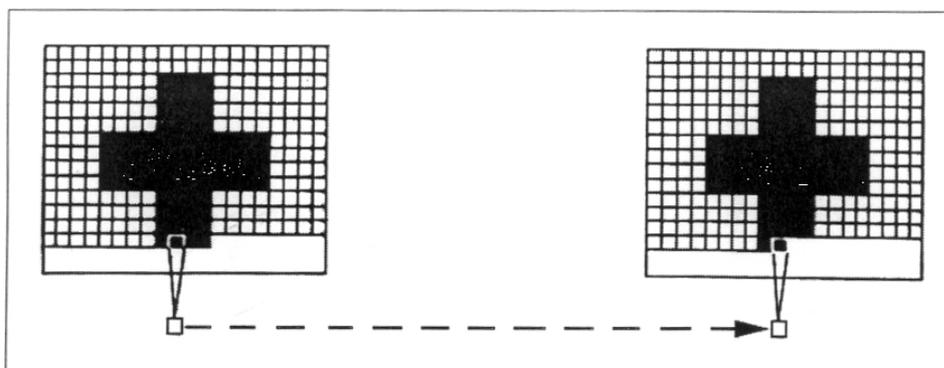
O mesmo princípio é também válido para os sistemas de visão robótica: imagens estáticas são produzidas, captadas, armazenadas, tratadas e analisadas para uma tomada de decisão sobre a continuidade da execução do programa.

### Elementos de imagem

Elementos de imagem = image element = picture element = pixel

Uma imagem parada nada mais é do que o arranjo de muitas pequenas áreas escuras e luminosas.

Cada pequena área de luz e sombra constitui um elemento de imagem ou detalhe de imagem.

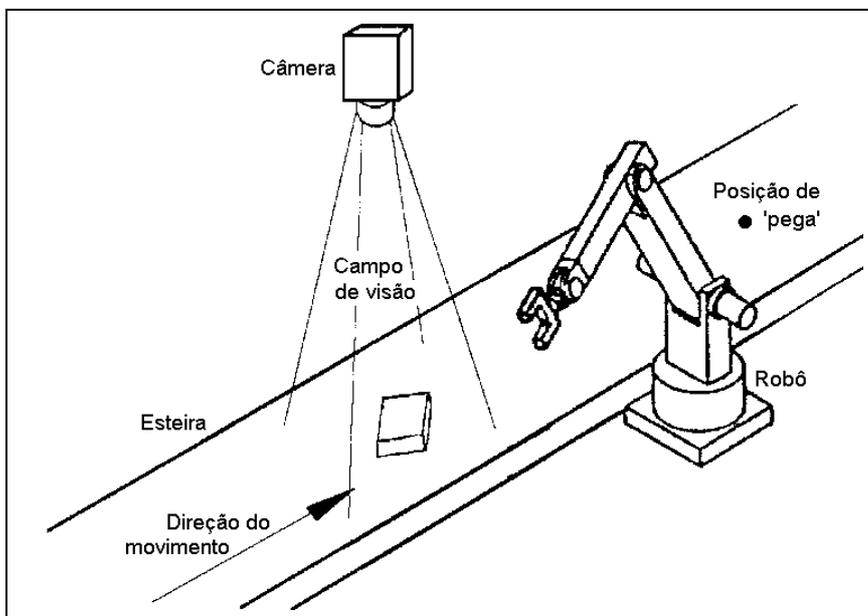


Se forem transmitidos e reproduzidos com o mesmo grau de luz e sombra conforme o original e na posição correta, a imagem será produzida.

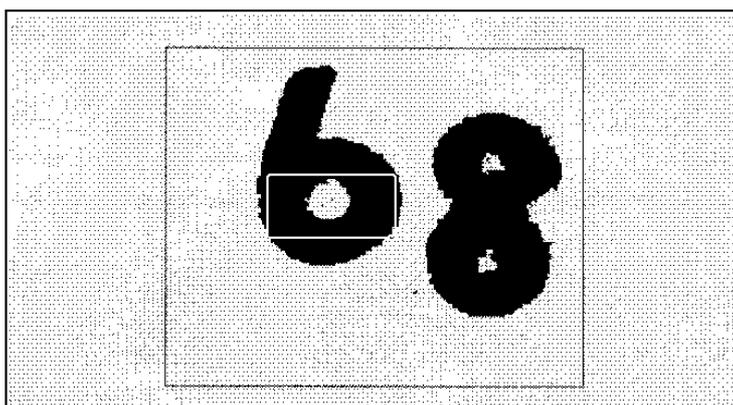
O mesmo se dá se estes elementos de imagem forem digitalizados para serem armazenados numa memória ou serem comparados com outras imagens para efeito de verificação de semelhanças ou diferenças.

## Visão robótica

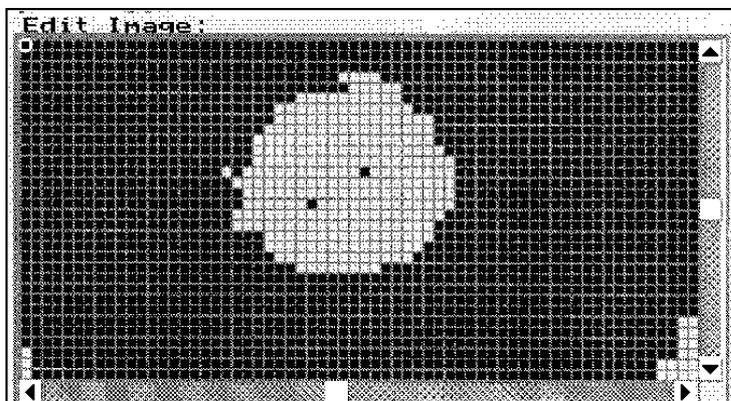
Num sistema de visão robótica, como o da figura abaixo, a câmera captura a imagem das peças transportadas pela esteira e com elas alimenta o sistema que passa a poder tomar decisões previamente programadas em função da imagem obtida.



Vejamos este exemplo em que uma peça gravada com a numeração **68** passa pelo sistema de visão:



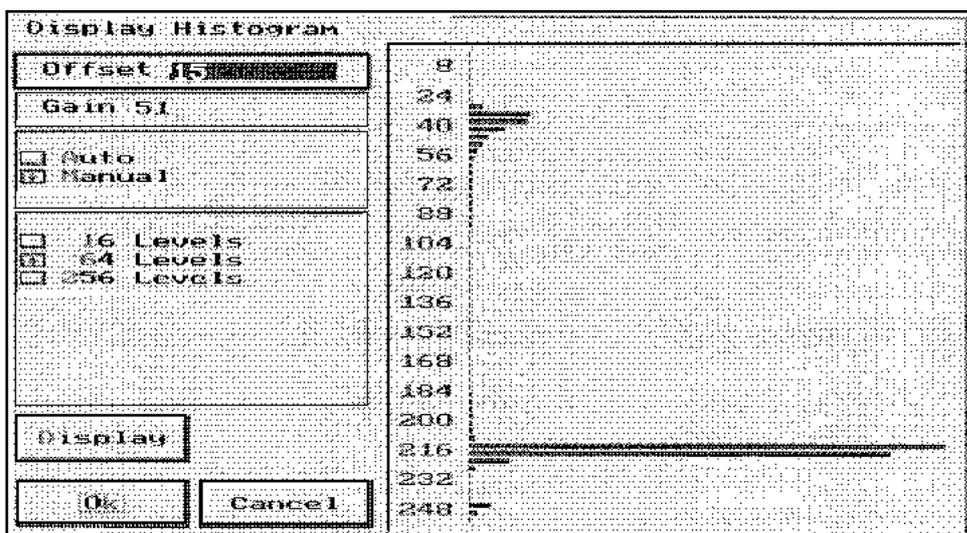
A imagem captada é inteiramente **digitalizada** e gera um mapa de pontos claros/escuros. A área selecionada na figura anterior gera o seguinte mapa de ponto escuros/claros mostrado pela figura a seguir:



Este *bitmap*, como é conhecido, é facilmente **binarizado**, associando bit 0 a um ponto escuro (preto) e um bit 1 a um ponto claro (branco) ou vice-versa. Esta associação pode ser salva como um arquivo gráfico e utilizado por um programa em comparação com outros *bitmaps*.

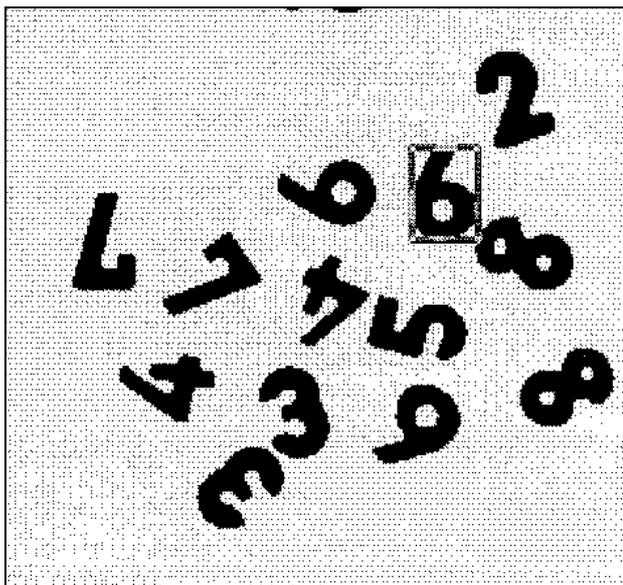
O processo de comparação com outros *bitmaps* pode incluir comparação com imagens padrões de formas predefinidas e que devem ser reconhecidas pelo sistema.

Essa comparação com padrões depende de uma análise, feita pelo software de controle do robô, que leva em consideração o padrão de distribuição de níveis de cinza na imagem digitalizada e binarizada.



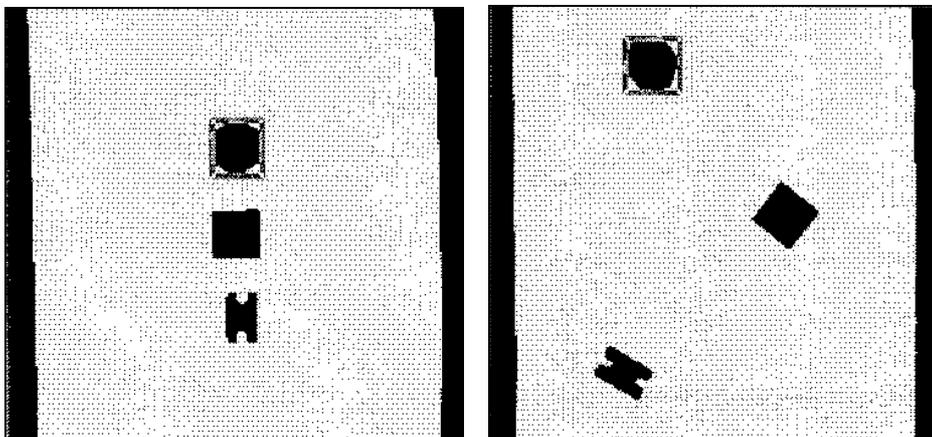
Imagens diferentes produzem diferentes padrões de distribuição. Seguindo o exemplo, este **histograma**, como é chamado, representa o caracter numérico **6**. O histograma é utilizado para identificação e comparações de formas, padrões e imagens.

Se, por exemplo, o sistema de visão capturasse uma imagem com as formas de vários caracteres numéricos em diferentes orientações, uma forma determinada (a do caracter **6**) poderia ser identificada.



Além de identificar essa forma, o sistema de visão também se presta a determinar a localização de um objeto com uma forma determinada, alimentando o sistema robótico com a posição/orientação do objeto a ser manipulado.

A próxima figura ilustra como uma peça circular pode ter sua posição identificada dentre outras peças e dentro do campo de visão do sistema de visão robótica.

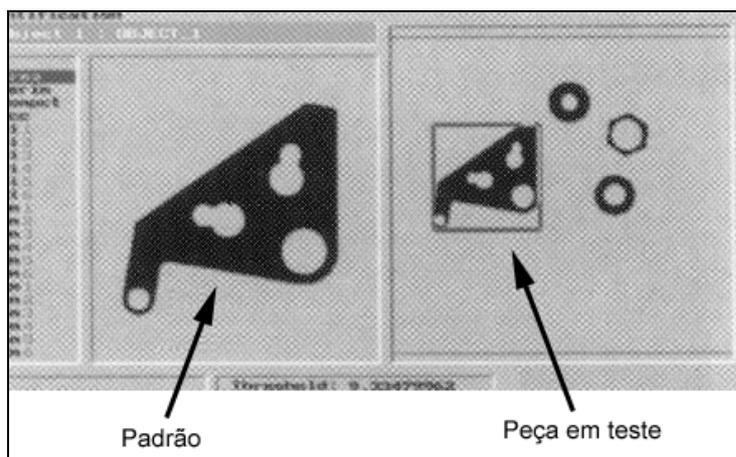


## Aplicações

Como vimos, a visão robótica tem duas grandes aplicações: Controle de qualidade e posicionamento do efetuador robótico.

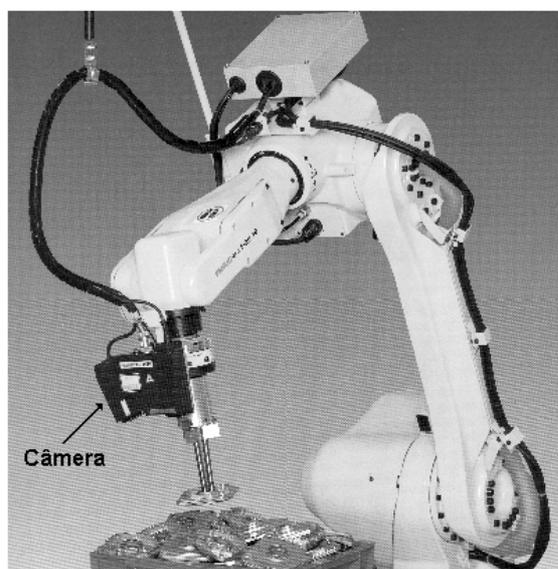
### Controle de qualidade

O sistema de visão robótica captura imagens de peças em processo, digitaliza e binariza estas imagens, e compara com arquivos *bitmap* de peças padrão para determinar sua conformidade ou não com o padrão.



### Posicionamento de efetuador

O sistema de visão robótica, se posicionado verticalmente, captura, digitaliza e binariza a imagem de uma peça, identificando sua posição no plano horizontal XY; se posicionado horizontalmente, identifica a posição de uma peça no plano vertical YZ; se o sistema de visão estiver acoplado ao punho do manipulador, identifica, não só a posição, mas também a orientação da peça.



As pesquisas mais recentes apontam para o desenvolvimento de sistemas de visão 'estéreo', ou seja, duas câmeras paralelas que capturam imagens do mesmo objeto. Esse sistema, que se assemelha ao sentido da visão humana, gera informação de distância do objeto cuja imagem é capturada.

Os *bitmaps* gerados serão iguais mas deslocados entre si. O passo do deslocamento define a distância do objeto: quanto maior a distância, menor o deslocamento entre as imagens.

## Câmeras

Apesar de existirem diferentes tipos de câmeras de TV, somente dois tipos são geralmente usados para visão de robô: as câmeras vidicon e câmeras com **sensores de estado sólido**. Atualmente, as câmeras de estado sólido têm sido as mais utilizadas.

A vidicon é um tubo com vácuo onde uma imagem é focada sobre uma placa-alvo ou placa de imagem fotocondutiva, permitindo que um feixe eletrônico explore a placa-alvo obtendo-se um sinal maior onde o brilho for mais intenso.

Geralmente são feitas 480 varreduras da área de imagem onde, primeiramente, são varridas as linhas ímpares e depois as linhas pares.

As desvantagens das vidicons são os desvios e as distorções geométricas e a persistência da imagem, o aquecimento e a vida curta.

As câmeras de estado sólido possuem um conjunto de elementos fotossensíveis igualmente espaçados. A luz que incide nesses elementos cria uma carga que será varrida, célula a célula, seqüencialmente.

O sinal de saída da câmera é uma seqüência dos níveis de tensão relativos à luz incidente em cada célula individualmente.

O conjunto de elementos é disponível em um nível de resolução que vai de 40 x 40 a 512 x 512 pixels ou mais. A saída pode ser entrelaçada para ser compatível com equipamentos de vídeo convencionais.

As câmeras de estado sólido tendem a ser simples, confiáveis e compactas. Elas operam a tensões compatíveis ao hardware da maioria dos computadores. Sua taxa de varredura é de 30 quadros por segundo, mas essa taxa pode mudar com o uso de um sinal de clock externo.

As câmeras de estado sólido, assim como as vidicons que usam silício como placa alvo, tem uma larga sensibilidade espectral que tem seu pico em torno de 80 nm, que é próximo da região de infravermelho.

Isso significa que o brilho de alguns objetos, que podem ser invisíveis ao olho humano, pode ser capturado. Isto não será problema se a iluminação vier de uma lâmpada fluorescente, mas a iluminação incandescente emite grande quantidade de radiação na região de infravermelho.

A relação de aspecto de pixel é independente da relação de aspecto de imagem e pode variar de câmera para câmera.

Há basicamente dois tipos de câmeras de estado sólido: As **CIDs** (Charge Injection Devices) e as **CCDs** (Charge-Coupled Devices).

Nas câmeras CID, cada localização de pixel contém dois capacitores **CMOS** (formados pela capacitância parasita encontrada nos Transistores de Efeito de Campo com porta isolada por óxido de semicondutor) adjacentes que podem ser acessados independentemente. Podem ser usados separados ou juntos para formar uma barreira de potencial onde as cargas fotogeradas serão armazenadas.

As câmeras CCD podem ser classificadas pela maneira como a intensidade de luz local é registrada. O 1º sistema usa fotodiodos como elemento sensor, ou seja, a fotocorrente é integrada e a carga resultante é armazenada por efeito capacitivo no diodo.

Registradores de deslocamento de carga acoplada são então usados para varrer o conjunto provendo a saída de vídeo. O segundo sistema usa CCD fotos sensíveis para captar a imagem, ou seja, registradores de deslocamento CCD são usados para escanear a imagem.

# Tipos de robôs

As diversas partes que compõem um manipulador industrial (robô) e que forma estudada até aqui - partes mecânicas, atuadores, sensores - podem ser montadas de diversas formas produzindo diferentes estruturas físicas de robôs.

Além de considerar o aspecto evolutivo, em que construções antiquadas têm seu desempenho superado por outras mais novas, as diferentes construções produzem diferentes tipos de robôs, cada um mais adaptado a um tipo específico de tarefa.

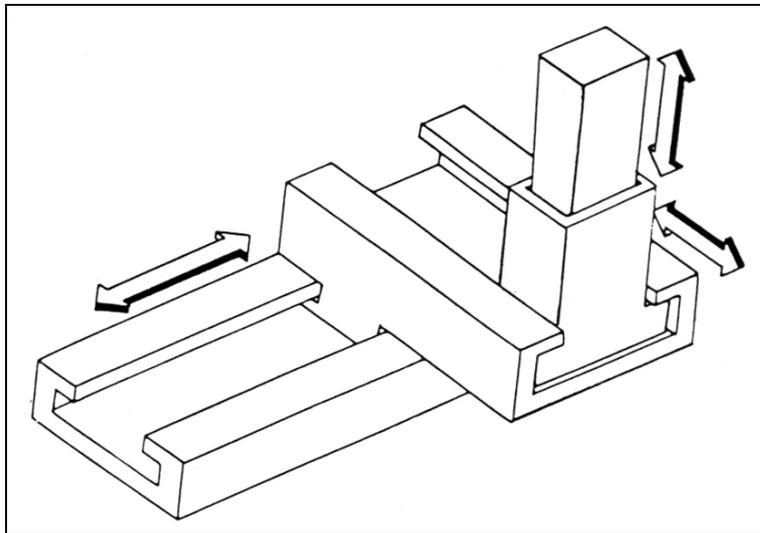
## **Robôs cartesianos**

O braço desses robôs possui três juntas prismáticas, que possibilitam a realização de movimentos lineares. Seu código é PPP.

Robôs cartesianos são caracterizados por:

- Pequena área de trabalho;
- Alto grau de rigidez mecânica;
- Grande precisão (posicionamento do atuador final);
- Carga inercial (momento) fixa, ao longo da área de trabalho;
- Controle de movimentos simples;

- Conveniência em tarefas que necessitam de grande precisão, sem uma grande necessidade de movimentos. Como exemplos temos a montagem de componentes em circuito impresso e a movimentação de peças em prateleiras (robô almoxarifado).



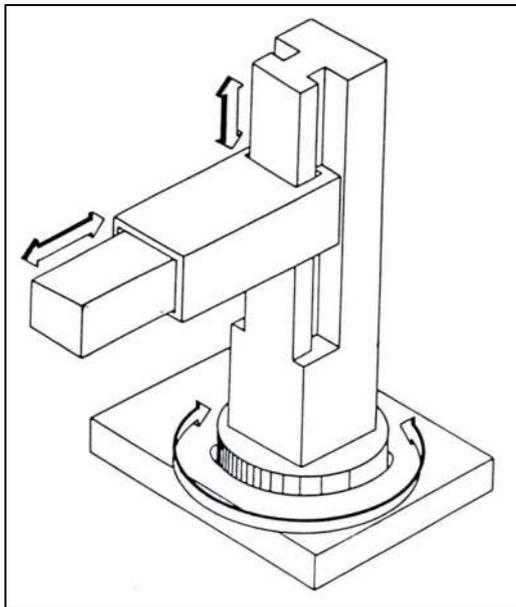
### **Robôs cilíndricos**

O braço desses robôs possui uma junta de revolução e duas juntas prismáticas. Seu código é RPP.

Robôs cilíndricos são caracterizados por possuírem uma área de trabalho maior do que robôs cartesianos, mas sua rigidez mecânica é ligeiramente menor. O controle é mais complexo devido à base (junta de revolução) e à variedade de momentos de inércia na área de trabalho.

São utilizados em atividades que necessitam de um deslocamento superior ao dos modelos cartesianos, mas não precise atingir pontos acima da altura do próprio robô.

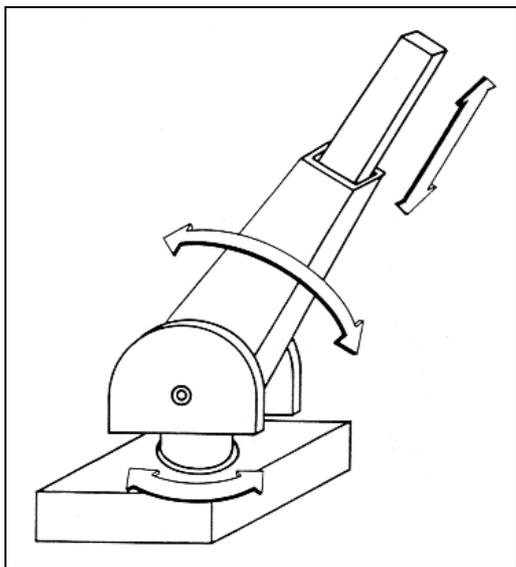
Uma das aplicações é o transporte de peças de um lado para outro (paletização), como por exemplo, ocorre com os robôs que alimentam prensas.



### Robôs esféricos

O braço desses robôs possui duas juntas de revolução e uma prismática. Seu código é RRP.

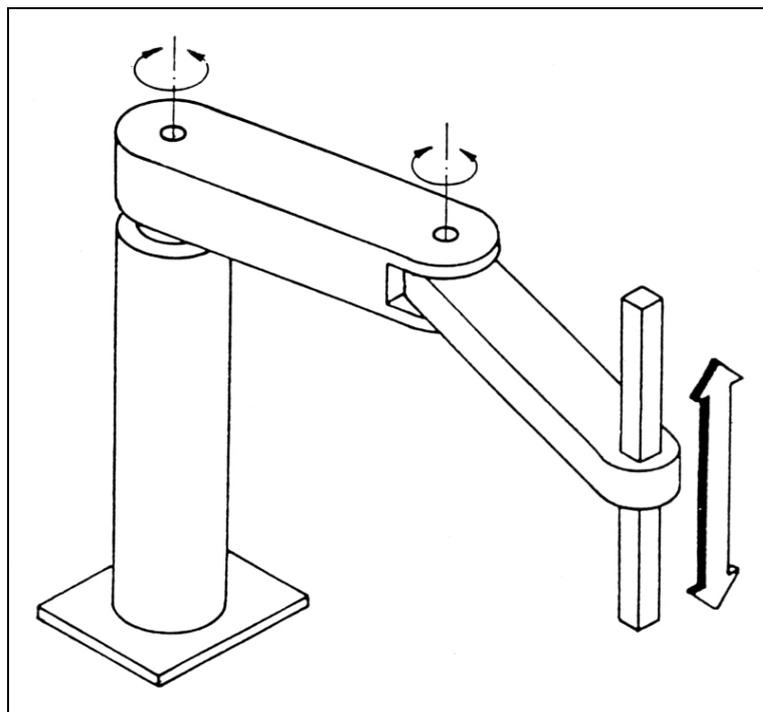
Robôs esféricos são caracterizados por possuírem uma ampla área de trabalho e um menor grau de rigidez mecânica. Seu controle é mais complexo devido ao movimento de rotação das duas primeiras juntas e a carga inercial (momento) altamente variável.



### Robôs articulados horizontais (SCARA\*)

O braço desses robôs possui duas juntas de revolução e uma prismática e realizam movimentos predominantemente horizontais. Seu código também é RRP.

A área de trabalho desses robôs é menor do que a de robôs esféricos e maior que cartesianos e cilíndricos. São apropriados para operações em linha de montagem, devido ao seu posicionamento horizontal e a possibilidade de atuação vertical linear do terceiro eixo.



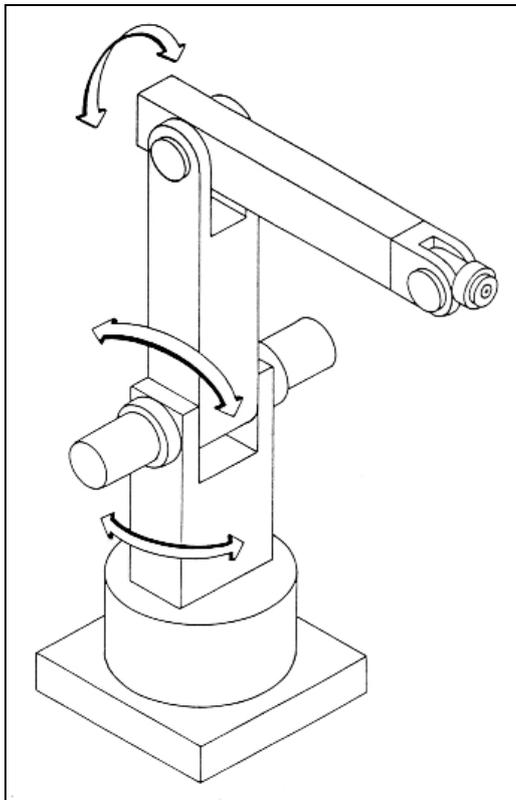
(\*)SCARA : *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (braço de robô de montagem com complância seletiva)

### Robôs articulados verticais

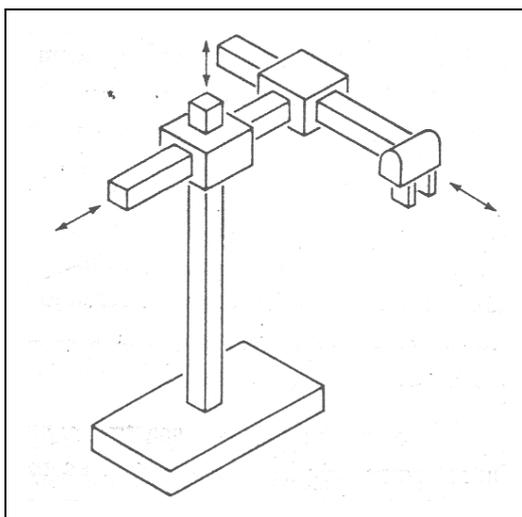
O braço desses robôs possui três juntas de revolução. É o tipo de braço robótico que mais se assemelha, em estrutura, ao braço humano, o qual também só possui juntas de revolução. Seu código é RRR.

Sua área de trabalho é ampla, porém sua rigidez mecânica é baixa. Grande precisão pode ser alcançada no posicionamento do atuador final (end effector).

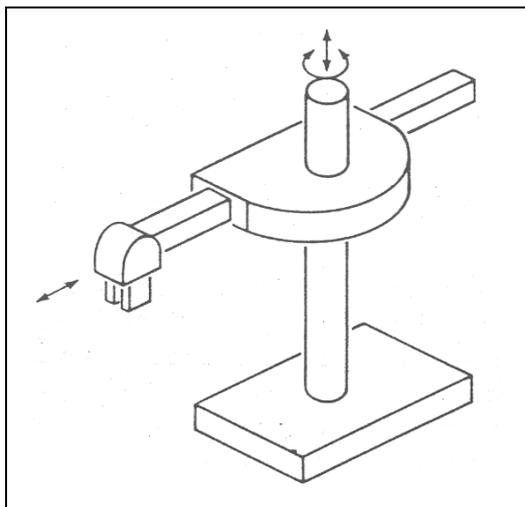
Seu controle é mais complexo devido ao movimento de rotação das três juntas e a carga inercial (momento) altamente variável.



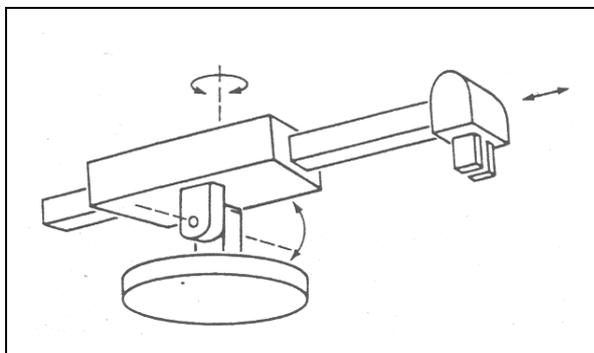
### Configurações e movimentos dos robôs industriais



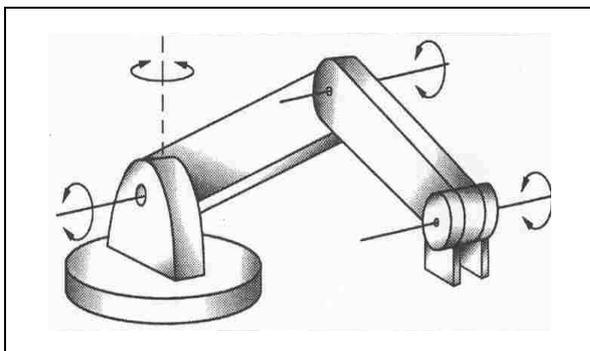
*Robô cartesiano (XYZ)*



*Robô cilíndrico*



*Robô esférico*

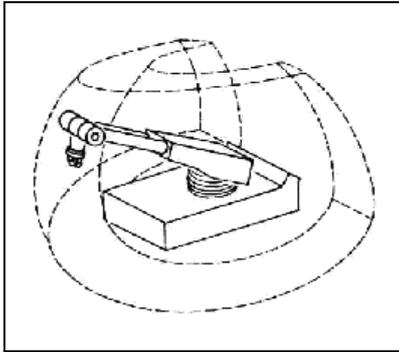


*Robô articulado (Articulado Vertical)*

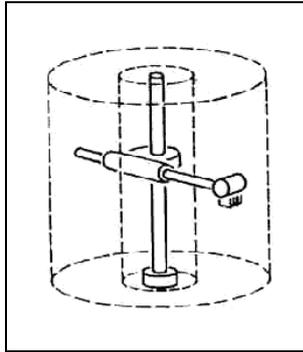
### **Volume de trabalho**

É o espaço dentro do qual o robô pode manipular a extremidade de seu punho (o efetuador). Em hipótese alguma poderá haver funcionários nesta região enquanto o robô estiver em funcionamento, evitando-se desta maneira acidentes. Alguns autores e fabricantes usam a expressão 'Envelope de Trabalho' para esta característica.

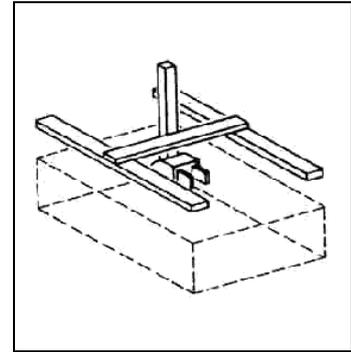
A figura a seguir apresenta alguns exemplos:



*Polar ou esférico*

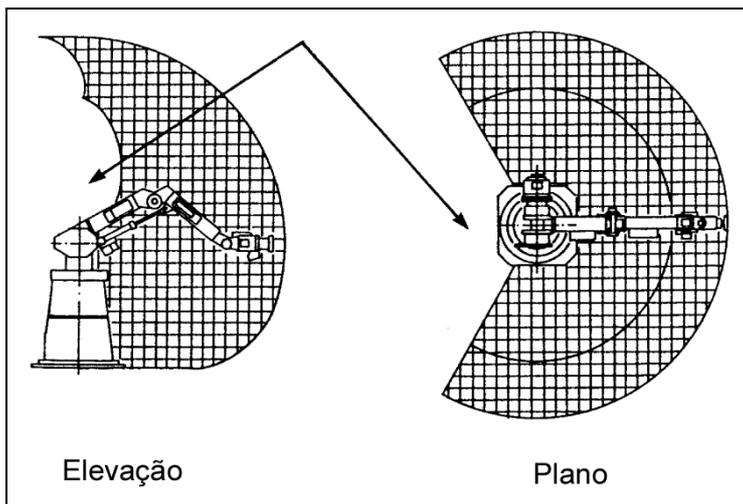


*Cilíndrico*



*Cartesiano*

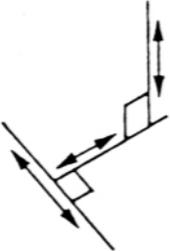
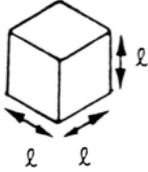
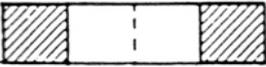
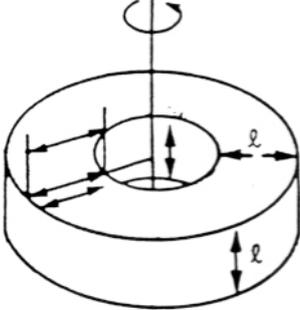
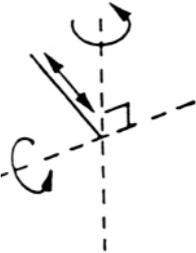
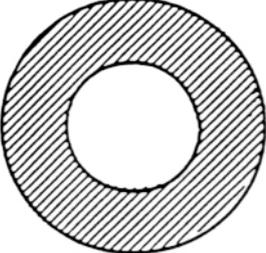
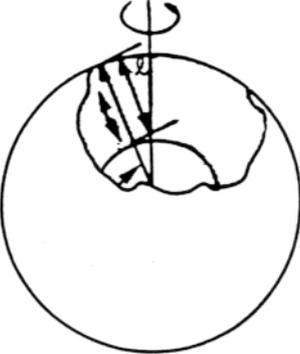
Os catálogos de fabricantes de robôs normalmente ilustram os volumes de trabalho por diagramas, tais como, os mostrados abaixo, que são as vistas laterais e superior da faixa de movimentos possíveis do robô.

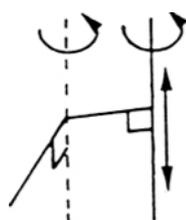


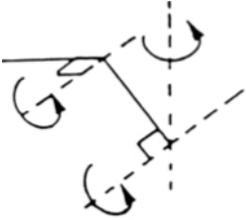
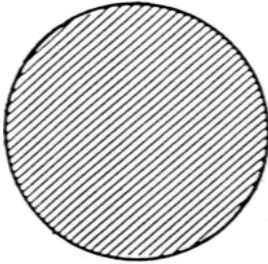
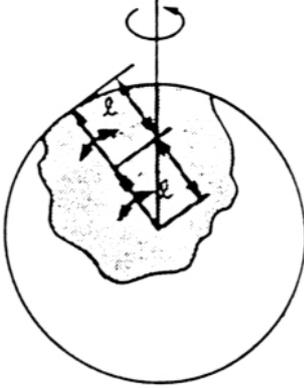
### **Volume (Envelope) de Trabalho Teórico de um Robô**

Nas figuras abaixo, podemos observar os volumes que podem ser alcançados pelos diferentes tipos de robôs abordados.

A coluna da esquerda esquematiza o movimento das três juntas mais próximas à base, a coluna central mostra a vista lateral e a coluna da direita esquematiza o volume de trabalho de cada tipo de robô.

Movimento de três juntas	Face de visão	Perfil
<b>Cartesiano</b>		
		
<b>Cilíndrico</b>		
		
<b>Esférico</b>		
		
<b>Articulação horizontal</b>		



Movimento de três juntas	Face de visão	Perfil
<b>Articulação vertical</b>		
		

**Considerações:**

- Todos os links possuindo o mesmo comprimento L;
- Volume do cubo =  $L^3$ ;
- Volume do cilindro  $\pi * L^3$ ;
- Volume da esfera  $\frac{4}{3} * \pi * L^3$ .

**Cálculos:**

- Volume cartesiano =  $L * L * L = L^3$
- Volume cilíndrico =  $L * [\pi * (2L)^2 - \pi * L^2] = 3 * \pi * L^3 = 9,423 * L^3$

volumes ocupados pelo próprio robô.

- Volume esférico =  $\frac{4}{3} * \pi * (2L)^3 - \frac{4}{3} * \pi * L^3 = \frac{28}{3} * \pi * L^3 = 29,32 * L^3$

- Volume articulado horizontal =  $L * [\pi * (2L)^2] = 4 * \pi * L^3 = 12,564 * L^3$

O robô ocupa espaço interno, porém pode alcançar o limite do eixo ou dos links.

- Volume articulado vertical =  $\frac{4}{3} * \pi * (2L)^3 = \frac{32}{3} * \pi * L^3 = 33,51 * L^3$

### **Resumindo**

Progressivamente os volumes alcançados pelos robôs são: cartesiano < cilíndrico < articulado horizontal < esférico < articulado vertical.

# Programação de robôs industriais

O robô industrial já foi definido nesse texto e por outros autores como uma máquina automática programável. Partindo desta definição inicial faz-se necessário conhecer os vários métodos usados para programar robôs.

Vários são os métodos existentes. Os fabricantes de robôs industriais disponibilizam os métodos mais adequados para as tarefas que um determinado modelo de robô pode realizar.

Os vários métodos podem ser classificados em duas categorias básicas: **programação por aprendizagem e linguagem textual.**

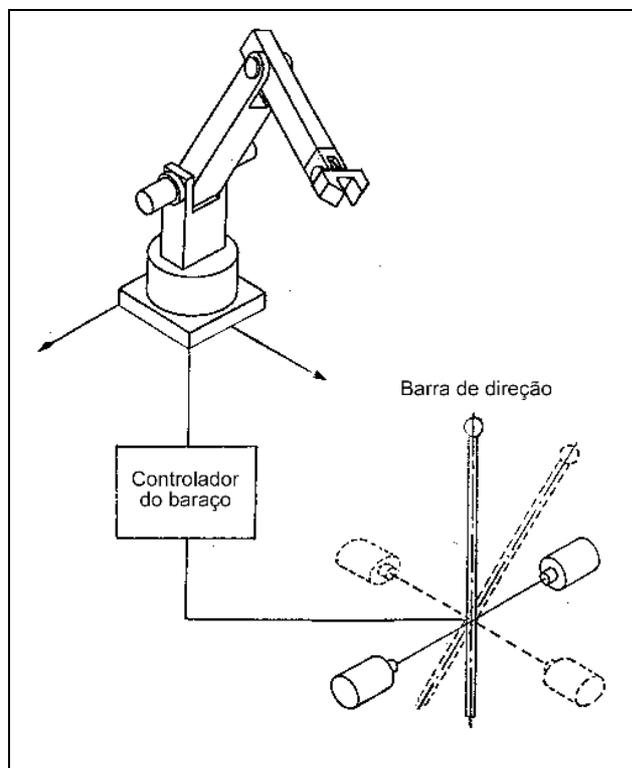
## Programação por aprendizagem

### Movimentação mecanizada

Este é um dos métodos mais comuns. Consiste de um ser humano fazendo com que o robô mova-se através do acionamento de botões ou chaves localizados num controle remoto (“teach pedant”) ou caixa de controle (“teaching box”) em uma certa ordem a fim de que o atuador seja posicionado no ponto desejado.



Ao atingir este ponto desejado, ele é gravado nesta posição através de um botão denominado de tecla de registro. Ex.: Tarefas de transferência, carga e descarga de peças em máquina, soldagem a ponto, etc.



Uma desvantagem apresentada nesse sistema de programação é que o operador precisa desviar a atenção dos movimentos do robô a fim de localizar e acionar a tecla adequada. Isso pode ser evitado com a utilização de um “joystick”, parecidos com os utilizados por pilotos de aviões ou “vídeo game”. As teclas de movimento são montadas no “joystick” de tal forma que se possa acionar uma ou mais teclas, promovendo a movimentação em várias direções sem que seja necessário ocorrer o desvio da atenção do operador.

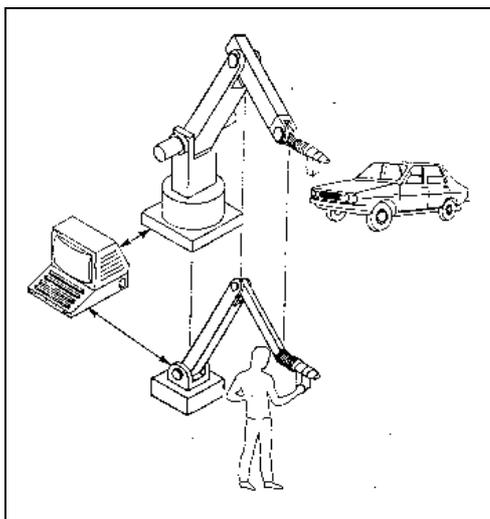
### **Movimentação manual**

Usado para programação de caminho contínuo, em que o ciclo de movimento envolve movimentos curvilíneos, suaves e complexos para o braço do Robô. Nesse método, o programador segura o braço do Robô (e o órgão terminal ou efetuator) e executa o movimento desejado. Esse método possui como limitação o fato de o operador ter de vencer o peso do robô e o atrito nas juntas e engrenagens, o que se torna inaplicável em robôs de grande e médio porte em que a precisão é requerida.

Um outro método envolve um robô chamado mestre, caracterizado por ser uma máquina leve que não inclui motores ou dispositivos de transferência de movimento e possui encoder em suas articulações. Ambos são controlados por um computador comum.

Sendo as estruturas geométricas dos robôs mestres e escravos idênticas, a trajetória realizada pelo robô mestre, será executada pelo robô escravo.

Ex.: Pintura automobilística com spray



### Linguagem textual

Empregam uma linguagem parecida com a língua inglesa para estabelecer a lógica e a seqüência do ciclo de trabalho. Um terminal de computador é usado para dar entrada nas instruções de programa ao controlador:

SPEED 35 IPS (Velocidade punho 35 "/s").

MOVE P1 (Move sua garra para o ponto P1)

CLOSE 40 mm (Fecha numa altura de 40mm)

WAIT 1 SEC (Aguardar 1 seg.)

DEPART 60 mm (A partir de P1 mover-se 60mm acima do ponto)

Um Robô industrial recebe uma classificação de acordo com a maneira como é programado:

**Robô sequencial:** aquele que executa movimentos seguindo uma seqüência pré-determinada.

- Seqüência fixa - não há 'programação'; os movimentos são definidos por sensores de limites que informam à lógica que um movimento chegou ao final e causa o início de outro movimento. Tem baixa versatilidade;
- Seqüência programável - os movimentos são definidos por um programa carregado na memória do controlador do robô. É extremamente versátil, pois em sua memória podem ser carregados diferentes programas.

**Robô 'play-back':** repete uma seqüência de movimentos definida de duas maneiras:

- Robô escravo - já citado como um robô miniatura (mestre) que é movido pelo operador/programador enquanto estes movimentos são gravados na memória do controlador. O robô escravo tem tamanho natural e repete os movimentos definidos no mestre miniatura;
- 'Lead-by-nose' - a expressão em inglês ilustra a maneira como se conduz o efetuador de um robô ao longo de um determinado percurso (guiado pelo nariz!). Sem um mestre em miniatura, os movimentos produzidos no robô industrial são gravados na memória do controlador para serem repetidos.

**Robô NC:** programação por comando numérico ('Numeric Command'), mas também empregada quando o robô é programado através de linguagem textual. É mais simples, do ponto de vista do operador/programador, mas o programa deve ser sempre bem testado com a situação real antes de ser utilizado já que não é elaborado in-loco.

**Robô inteligente:** última palavra em programação de robôs, pois todos os movimentos gravados na memória do controlador são realizados condicionalmente às condições de sensores de ambiente, tácteis, de temperatura, de proximidade, etc. Este tipo de robô é normalmente empregado quando é necessária interação com seres humanos.

# Segurança com robôs industriais

O robô industrial é uma máquina útil, que possui características bastante singulares comparado às máquinas convencionais, o que implica em aspectos importantes no tocante à segurança.

Quanto maior a potência do robô e a capacidade de operação dos robôs, maior serão os riscos de acidentes.

Po exemplo, qual a intensidade do choque que um operador sofre numa colisão com um manipulador? Em testes realizados com corpos de prova semelhantes aos usados na indústria automobilística, utilizando-se robô de grande porte com atuadores hidráulicos, detectou-se uma aceleração de choque de 200G. No caso de um robô de médio porte com atuadores elétricos, os valores atingidos permaneceram em torno de 90G. Se o ser humano for atingido por um objeto, uma parte móvel de uma máquina ou pelo efetuador de robô com aceleração de 100G, a colisão poderá ser fatal.

## **Tipos de acidentes**

São freqüentes os acidentes no uso de máquinas automáticas e de sistemas automáticos de produção industrial. Esses acidentes podem ser, de maneira geral, classificados conforme os exemplos a seguir:

1. O operador opera incorretamente a máquina;
2. Na ocorrência de um problema durante a operação da máquina automática, o operador tenta inadvertidamente fazer o reparo, introduzindo a mão ou entrando na área de risco, e colide com a parte móvel;

3. O operador, sem perceber que a máquina automática estava em operação, entra na linha de produção automática sem nenhuma proteção. É atingido por um movimento procedente de uma direção não perceptiva;
4. Durante uma parada momentânea da máquina automática (em espera), o operador detecta um problema e resolve repará-lo, achando que a máquina está desativada ou desligada; quando o movimento prossegue, o operador é atingido por uma parte móvel;
5. Por um defeito do equipamento controlador, a máquina automática sai repentinamente do estado de repouso e devido a um movimento descontrolado e na impossibilidade de ser parada, acaba ocasionando o acidente;
6. Devido a um defeito no dispositivo de segurança, a máquina automática não é paralisada e acaba ocasionando um acidente.

### Exemplo de acidente – 1

#### Manuseio incorreto

Uma pessoa que estava em treinamento, querendo aproveitar as 3 horas do intervalo de descanso para estudos práticos junto ao robô, penetra na área de ação do robô de solda.

Quando o operador responsável retorna ao local, aciona o botão de operação sem perceber a presença dessa pessoa na área de ação, prensando o treinando.



### Exemplo de acidente – 2

#### Aproximação sem interrupções do sistema

Um robô, para descarte de itens defeituosos, que correm em uma correia transportadora, deixa cair uma peça. Ao perceber isso, o operador tenta retirar a peça entrando na área de ação do robô sem antes paralisa-lo. O operador acaba prensado entre a correia transportadora e o manipulador.

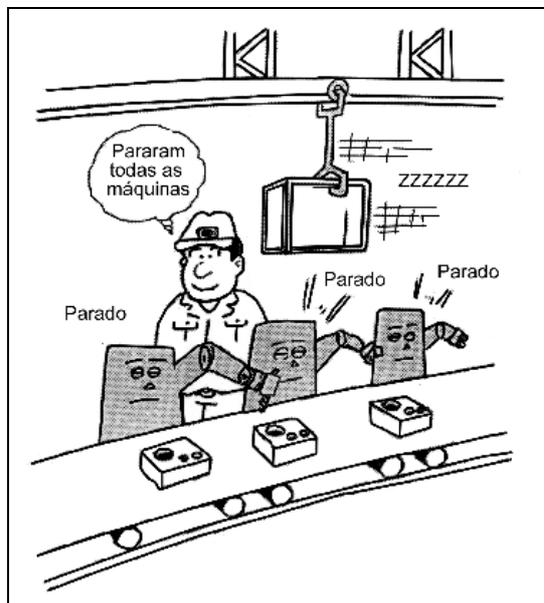


### Exemplo de acidente – 3

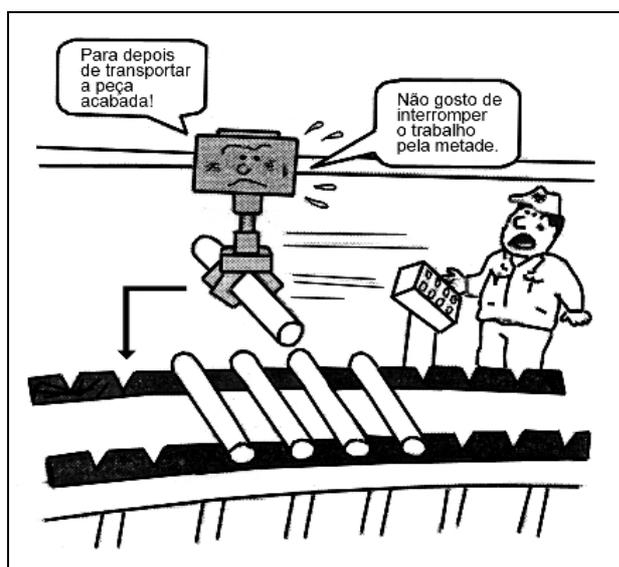
#### Paralisação incorreta da máquina

Para inspecionar o processo de MC (Machining Center, o Centro de Manufatura), o operador paralisa a linha automática de produção no modo bloqueio.

Depois de constatar que todas as máquinas no seu campo de visão estão paradas, o operador entra na área de produção quando é atingido por um robô de carregamento aéreo.



Há uma diferença importante entre a parada tipo bloqueio e a parada de emergência. A parada de emergência é comandada pelo operador e causa uma paralisação imediata de todo o processo. Por sua vez, o comando de parada tipo bloqueio executa a parada das máquinas envolvidas num tempo apropriado para cada uma delas. Por exemplo, um torno de controle numérico somente irá parar depois de concluir o processo de torneamento. Um robô transportador somente pára depois de colocar a peça acabada sobre a correia transportadora. Se o operador desconhece o comportamento da parada tipo bloqueio corre grandes riscos de sofrer acidentes.

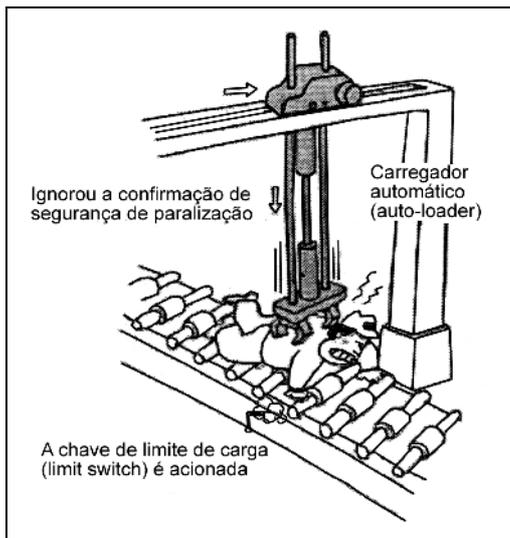


*Parada tipo bloqueio*

### Exemplo de acidente – 4

#### Desconhecimento da condição segura de paralisação

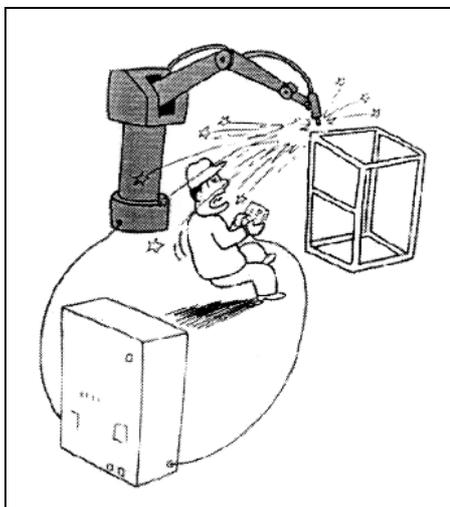
Devido a uma falha no processo, o operador percebe que todas as máquinas ficaram paralisadas e sobe na correia transportadora para remover a peça defeituosa com as duas mãos. Quando a peça é removida, a chave de limite de carga (limit switch) do robô acoplada à correia transportadora é acionada e o operador fica comprimido pelas costas entre o braço do robô e a correia transportadora.



### Exemplo de acidente – 5

#### Ruído externo acarreta movimento acidental do robô

Enquanto o operador executa um processo de instrução (programação) de um robô em baixa velocidade, utilizando um teaching box (painel de instrução), um ruído eletromagnético, gerado por faíscas de solda, interfere no controlador, o que faz o manipulador trabalhar em alta velocidade, provocando acidente.



## Exemplo de acidente – 6

### Defeito no dispositivo de segurança

Durante a limpeza diária, o operador abre a porta e entra na área cercada do robô que devido a uma falha na chave de segurança não é paralisado o que causa o acidente. Mesmo circundando a área de ação do robô com uma cerca de segurança, deve-se confirmar a paralisação do robô, antes da aproximação do operador. Para isso, geralmente se instala uma chave de segurança ligada a abertura da porta num modo interlock, de modo que o robô sempre seja paralisado assim que a porta for aberta. A implementação deve ser de tal modo que a paralisação do robô seja garantida mesmo em casos de falha na chave de segurança, assim como, no uso de fitas adesivas para desativação da chave.

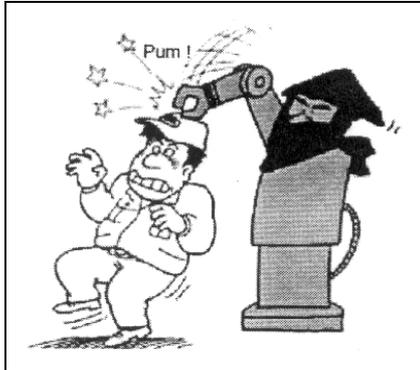


### Acidentes imprevistos

Na maioria das vezes pode-se constatar que um acidente é ocasionado pelo ataque imprevisto das partes móveis de um robô manipulador contra as vítimas. Para as máquinas automáticas em geral, os acidentes mais freqüentes são os causados por não se ter condições seguras de paralisação. É o caso do exemplo de acidente 6 em que o interruptor do sistema não paralisava todos os robôs industriais.

Os acidentes imprevistos com robôs industriais decorrem do seguinte fato:

“Durante a paralisação dos robôs industriais, operadores penetram na área de ação dos robôs e sofrem acidentes provocados pelo movimento do braço, ocasionados por alguma razão imprevista”.



Acidentes com robôs industriais devido a fatores imprevistos são os mais freqüentes

Ao classificar 300 exemplos de acidentes envolvendo robôs, constatou-se que, entre os acidentes imprevistos, 38,1% foram causados pelo homem e 61,9% pelos os robôs. Assim, apesar da automação e simplificação propiciadas pelos robôs, verificou-se a alta probabilidade de ocorrência de acidentes em que o operador não consegue evitar imprevistos.



O “National Bureau of Standards”, órgão nacional dos EUA responsável por normas, define 3 níveis de segurança em sistemas robóticos:

**Nível 1.** Detecção de penetração no perímetro de segurança;

**Nível 2.** Detecção de intruso dentro da célula de trabalho;

**Nível 3.** Detecção de intruso dentro do volume de trabalho do robô.

Os sistemas do primeiro nível são utilizados para acusar que o perímetro de segurança da célula de trabalho foi violado sem considerar a localização do indivíduo.

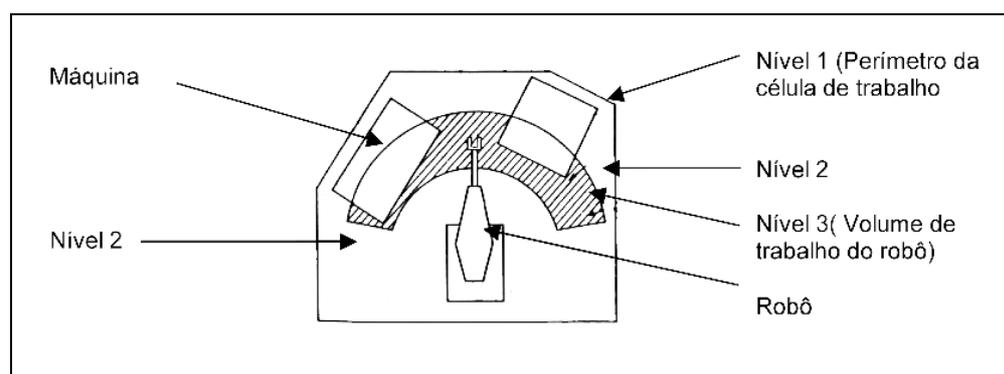
Os sistemas do segundo nível são projetados para detectar a presença de indivíduos entre a célula de trabalho e o limite do volume de trabalho do robô. A exata definição desta região dependerá do “layout” da célula e da estratégia utilizada para garantir a segurança do indivíduo.

Os sistemas do terceiro nível detectam a presença do indivíduo dentro do volume de trabalho do robô. Estes sistemas de sensores têm a finalidade de detectar a presença do trabalhador que possa estar muito próximo ao robô durante a sua operação (Ex. Os processos de programação do robô). Esse sistema do terceiro nível necessita ter a capacidade de detectar uma iminente colisão entre o robô e o trabalhador e executar uma estratégia para evitar a colisão.

Há dois modos comuns de implementar estes sistemas de segurança. Um é a utilização de sensores de pressão utilizados no piso e o outro é a utilização de sensores de presença fotoelétricos.

Sensores de pressão no piso, são utilizados para detectar a presença de indivíduos nos níveis 1 ou 2. Os sensores ópticos são mais apropriados para os sistemas de nível 1.

Para o nível 3, sensores de proximidade podem ser instalados no braço do robô. A figura abaixo ilustra estes três níveis de sensores.



Nível 1 – Perímetro de penetração.

Nível 2 – Detecção de intruso na célula de trabalho.

Nível 3 – Detecção de intruso dentro do volume de trabalho do robô.

# Manutenção

Robôs são sofisticados sistemas eletrônicos/mecânicos que possuem confiabilidade geralmente boa. Entretanto, por sua complexidade, essas máquinas ocasionalmente apresentam falhas, que implicam em um serviço de manutenção periódico. Os fatores necessários para a execução de um programa de manutenção eficiente são:

- Uma equipe altamente qualificada e treinada;
- Um programa apropriado de manutenção preventiva;
- Uma política racional de automatização dos equipamentos e dos processos.

Talvez o mais importante dos fatores em um programa de manutenção seja a existência de uma boa equipe de manutenção na companhia, treinada e qualificada especialmente em robótica.

A equipe de manutenção é responsável por dois tipos de manutenção: Preventiva e corretiva.

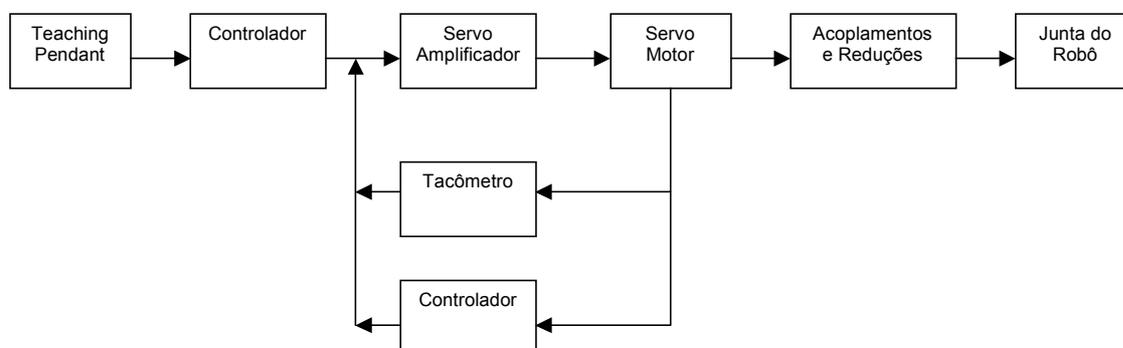
Para se detectar a causa de um defeito deve-se analisar o sistema pensando nos seus diversos blocos componentes. Normalmente, os fabricantes acrescentam aos manuais dos robôs um guia para a análise dos mais comuns e prováveis problemas (“troubleshooting”) que o sistema pode apresentar.

Mesmo assim, é importante estabelecer como estratégia para a descoberta de causas de um problema, a análise de cada bloco e da maneira como eles se relacionam entre si.

Normalmente, a pergunta que se faz é: “Há sinal de entrada?”. Sendo a resposta positiva, a próxima pergunta será: “Há sinal de saída?”.

## Troubleshooting

O quadro a seguir apresenta a noção de um “troubleshooting chart” bem simples, baseado em um diagrama de blocos de um robô.



Componentes do sistema	Defeito	Possíveis causas	Providências
Teaching Pendant	O robô não obedece aos comandos inseridos.	Ausência de comunicação entre o teaching pendant e o controlador;	Verificar as conexões entre as partes;
Controlador	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O robô não obedece aos comandos inseridos;</li> <li>- Tem sinal de entrada, mas não tem sinal de saída;</li> <li>- O robô não recebe as informações transmitidas pelo controlador;</li> <li>- Célula parada, nada funciona.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mainboard (placa mãe);</li> <li>- Placas de I/O (entrada/saída);</li> <li>- Conexões elétricas do CLP (fios) interrompidas ou inadequadas;</li> <li>- Bug de programação;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contatar fabricante;</li> <li>- Medir com ohmímetro e substituir os fios e corrigir conexões;</li> <li>- Alterar ou reinstalar o programa;</li> </ul>
Cartão de entrada	Não existe comunicação do CLP com os sensores e/ou controladores.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobretensão;</li> <li>- Fonte de alimentação defeituosa;</li> <li>- CPU com defeito;</li> <li>- Cartão de entrada queimado;</li> </ul>	Contatar fabricante.
Servo Amplificador e Servo Motor	Não há movimento no motor ou o movimento é deficiente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não há transmissão de sinais aos motores;</li> <li>- Defeito do motor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar se o motor está recebendo sinais;</li> <li>- Verificar se o motor aciona as juntas.</li> </ul>
Tacômetro	O robô não trabalha com a velocidade correta.	Ausência de realimentação ao servo amplificador.	Verificar o conjunto tacômetro/Servo Alimentador.

Encoder	O robô não se posiciona corretamente, perdendo precisão e acuidade.	Ausência de informação ao Servo Amplificador.	Verificar o conjunto Servo-Amplificador/Encoder
Acoplamentos e Reduções	Juntas travadas ou com folgas.	Desgaste da parte mecânica por falta de manutenção.	Realizar manutenção: troca e/ou lubrificação.
Sensores	O robô não detecta a presença de objetos ou não reconhece o limite do percurso.	Sensores desligados ou defeituosos.	Verificar sensores.
Computador pessoal conectado a rede	Não é possível acessar informações da rede industrial.	Conexão física de comunicação entre dispositivos.	Contatar manutenção de rede.



# Referências bibliográficas

BOLTON, W. **Engenharia de controle**. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1995.

CAPELLI, Alexandre. **Mecatrônica Industrial**. São Paulo: Editora Saber Ltda. 2002.

FESTO. **Automação Industrial I**. São Paulo: Festo Didatic. 1997.

FESTO. **Introdução à Robótica**. São Paulo: Festo Didatic. 1999.

FREITAS, Júlio Cesar de Almeida e SANTOS, Paulo Bueno. **Robótica**. São Paulo: SENAI-SP. 2000.

GROOVER, Mikell P.; WEISS, Mitchel; NAGEL, Roger N. e ODREY, Nicholas G.. **Industrial Robotics: Technology, Programming and Applications**. Singapore: McGraw Hill Book Company. 1986.

ISO 10218. **Manipulating industrial Robots - Safety**. Paris: ISO Publications. 1992.

JIS B 8433. **General code for safety of industrial robots**. Tóquio: Japanese Standards Association. 1993.

JIS B 8432. **Measuring Methods for characteristics and Functions of Industrial Robot**. Tóquio: Japanese Standards Association. 1993.

JIS B 8431. **Standard Form for Indicating Characteristics and Functions of Industrial Robot**. Tóquio: Japanese Standards Association. 1993.

JIS B 0138. **Symbols for Industrial Robots**. Tóquio: Japanese Standards Association. 1996.

KENJO, T. **Power Electronics for the Microprocessor Age**. Oxford, NY: University Press Inc. 1995.

KISSEL, Thomas E.. **Industrial Electronics**. New Jersey: Prentice Hall. 2000.

KOREN, Yoram. **Robotics for engineers**. New York: McGraw-Hill. 1985.

NOF, Shimon Y. **Handbook of industrial robotics**. New York: John Wiley. 1999.

PAZOS, Fernando. **Automação de Sistemas & Robótica**. Rio de Janeiro: Axcel Books. 2002.

POLONSKII, M. **Introdução à robótica e mecatrônica**. Caxias do Sul: Editora UCS. 1996.

ROMANO, Victor Ferreira. **Robótica Industrial: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 2002.

SALANT, Michael A. **Introdução à robótica**. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.

SENAI. **Elementos de Robótica**. São Paulo: Senai, 1998.

SHOHAM, Moshe. **Fundamentals of Robotics**. Tel Aviv: Eshed Robotec Ltd. 1982.

\_\_\_\_\_. **Robotics Structure**. Tel Aviv: Eshed Robotec Ltd. 1982.

SUGIMOTO, Noboru. **Como usar de maneira correta os robôs industriais**. Tradução de Kazuo Nishimoto. São Caetano do Sul: Escola SENAI "Armando de Arruda pereira". 2000.

