

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO À ROBÓTICA INDUSTRIAL

Vitor Ferreira Romano e Max Suell Dutra

### 1.1 - INTRODUÇÃO

#### 1.1.1 - Breve Histórico sobre Robôs

Desde os primórdios de sua origem, o ser humano sempre se utilizou de ferramentas e utensílios que o auxiliaram na realização de diversas atividades cotidianas relacionadas às suas necessidades de sobrevivência.

Para a civilização ocidental o conceito de evolução humana está diretamente associado ao grau de desenvolvimento tecnológico adquirido ao longo do tempo, através do aperfeiçoamento destes objetos. Portanto, a motivação de se criar máquinas que possam substituir o homem na realização de tarefas, é uma característica da própria cultura ocidental. A primeira referência explícita a este conceito foi escrita por Aristóteles (séc. IV a.C.): “se os instrumentos pudessem realizar suas próprias tarefas, obedecendo ou antecipando o desejo de pessoas . . .”

Ao longo dos séculos, diversas invenções propiciaram a necessária bagagem tecnológica para a gradual substituição do homem pela máquina, porém, somente quando ocorre de forma sistemática a aplicação da ciência à indústria há uma concreta alteração do cenário, resultando na sociedade industrial. Já no fim do século XVI, Francis Bacon preconizava a idéia “. . . de que o saber devesse produzir seus frutos na prática, de que a ciência devesse ser aplicável à indústria, de que os homens tivessem o dever sagrado de se organizarem para melhorar e transformar as condições de vida” (DE MASI, 1999).

A partir da máquina a vapor desenvolvida por James Watt em 1769, houve um acentuado progresso em termos de *automação* de processos produtivos. A produção industrial em larga escala e os meios de transporte revolucionaram social e economicamente as relações humanas. Até meados do século XX, o processo de produção foi baseado no emprego de máquinas projetadas especificamente para a fabricação em série de produtos de uma mesma característica, visando uma elevada produtividade, volume e qualidade. Este modelo é denominado *automação rígida* e foi bastante difundido pelo empresário Henry Ford no início do século.

O avanço tecnológico das últimas décadas teve reflexo direto na organização das indústrias, as quais buscam minimizar seus custos industriais através da adoção de diversos modelos de produção. Neste contexto, destacam-se a *automação programável*, relativa à fabricação em série de pequenos e médios lotes de produtos, e a *automação flexível*, referida à fabricação de lotes variáveis de produtos diversos.

Os robôs industriais têm sido muito utilizados nos processos de automação programável e flexível, pois são essencialmente máquinas capazes de realizar os mais diversos movimentos programados, adaptando-se às necessidades operacionais de determinadas tarefas e empregando garras e/ou ferramentas oportunamente selecionadas.

O termo robô foi originalmente utilizado em 1921 pelo dramaturgo checo Karen Capek, na peça teatral "Os Robôs Universais de Russum (R.U.R.)" como referência a um *autômato* que acaba rebelando-se contra o ser humano. Robô deriva da palavra "robota" de origem eslava, que significa "trabalho forçado".

Na década de 40, o escritor Isaac Asimov tornou popular o conceito de robô como uma máquina de aparência humana não possuidora de sentimentos, onde seu comportamento seria definido a partir de programação feita por seres humanos, de forma a cumprir determinadas regras éticas de conduta. O termo *robótica* foi criado por Asimov para designar a ciência que se dedica ao estudo dos robôs e que se fundamenta pela observação de três leis básicas (SCHIAVICCO, SICILIANO, 1995):

- 1<sup>a</sup>. Um robô não pode fazer mal a um ser humano e nem consentir, permanecendo inoperante, que um ser humano se exponha a situação de perigo;
- 2<sup>a</sup>. Um robô deve obedecer sempre às ordens de seres humanos, exceto em circunstâncias em que estas ordens entrem em conflito com a 1<sup>a</sup> lei;
- 3<sup>a</sup>. Um robô deve proteger a sua própria existência, exceto em circunstâncias que entrem em conflito com a 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> leis.

A base tecnológica para os atuais robôs industriais foi desenvolvida a partir de pesquisas iniciadas logo após a Segunda Grande Guerra Mundial, quando foi construído um equipamento denominado **teleoperador "master-slave"** empregado em atividades de manipulação de materiais radioativos. O sistema era formado de um manipulador "master", movido diretamente por um operador humano responsável pelas seqüências de movimentos desejados, e um manipulador "slave" capaz de reproduzir os movimentos realizados remotamente pelo "master". Os vínculos entre os manipuladores "master" e "slave" eram realizados através de sistemas de transmissão mecânicos (FU et al., 1987).

A UNIMATION Inc. instalou o primeiro robô industrial, denominado UNIMATE, no chão-de-fábrica de uma empresa em 1961. O projeto deste robô resultou da combinação entre os mecanismos articulados e garras usados no teleoperador "master-slave" e a tecnologia de controle desenvolvida em máquinas operatrizes com comando numérico. Desde então, o constante desenvolvimento tecnológico nas áreas de mecânica, eletrônica digital, ciência da computação, materiais e logística da produção contribuiu para o aumento da confiabilidade nos componentes empregados em projetos de robôs e a redução dos custos para a sua implementação em atividades industriais.

O maciço investimento em robôs industriais no processo produtivo observado nas últimas décadas, deve-se principalmente às crescentes necessidades impostas pelo mercado de se obter sistemas de produção cada vez mais automatizados e dinâmicos. Devido às características de flexibilidade de programação e adaptação a sistemas integrados de manufatura, o robô industrial tornou-se um elemento importante neste contexto.

Um sistema de produção tem por objetivo agregar valor a produtos, ou seja, a partir de uma *entrada de materiais a serem processados*: matérias-primas, peças básicas ou conjuntos de peças (sub-grupos); o sistema de produção irá fazer algum *processo de transformação* sobre estes materiais, resultando em *produtos processados* com valor comercial mais elevado. Estes podem ser *produtos acabados* aptos a serem comercializados diretamente no mercado ou ainda *produtos intermediários* que serão utilizados posteriormente na construção de produtos acabados.

O uso de robôs industriais no chão-de-fábrica de uma empresa está diretamente associado aos objetivos da produção automatizada, a qual visa (BOUTEILLE et al., 1997):

- *Reduzir custos dos produtos fabricados*, através de: diminuição do número de pessoas envolvidas no produção, aumento da quantidade de produtos em um dado período

(produtividade), melhor utilização de matéria-prima (redução de perdas, otimização do aproveitamento), economia de energia e etc.;

- *Melhorar as condições de trabalho* do ser humano, por meio da eliminação de atividades perigosas ou insalubres de seu contato direto;
- *Melhorar a qualidade* do produto, através do controle mais racional dos parâmetros de produção;
- Realizar atividades impossíveis de serem controladas manualmente ou intelectualmente, como por exemplo, a montagem de peças em miniatura, a coordenação de movimentos complexos e atividades muito rápidas (deslocamento de materiais).

## 1.2 - ASPECTOS SOBRE SISTEMAS ROBÓTICOS

### 1.2.1 - Definição de Robô

Segundo a Robotic Industries Association (RIA), **robô industrial** é definido como um "manipulador multifuncional *reprogramável* projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais, através de diversos movimentos programados, para o desempenho de uma variedade de tarefas" (RIVIN, 1988).

Uma definição mais completa é apresentada pela norma ISO (International Organization for Standardization) 10218, como sendo: "uma máquina manipuladora com vários **graus de liberdade** controlada automaticamente, reprogramável, *multifuncional*, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial".

Um robô industrial é formado pela integração dos seguintes componentes (RIVIN, 1988, SEERING, SCHEINMAN, 1985, WARNECKE et al., 1985, SCIESZKO, 1988, BORODIN, 1988).

a) **manipulador mecânico**: refere-se principalmente ao aspecto mecânico e estrutural do robô. Consiste da combinação de elementos estruturais rígidos (corpos ou **elos**) conectados entre si através de articulações (**juntas**), sendo o primeiro corpo denominado *base* e o último *extremidade terminal*, onde será vinculado o componente **efetuador** (garra ou ferramenta).

- *elos*:

É inevitável que os elos rígidos apresentem algum grau de flexibilidade quando submetidos a esforços durante a realização de uma tarefa, sejam estes de natureza estática ou dinâmica. Portanto, nos robôs, a estrutura deve ser projetada para apresentar elevada rigidez aos esforços de flexão e torção. Os materiais mais empregados nas estruturas são alumínio e aço. Mais recentemente têm sido usados fibras de carbono e de vidro, materiais termoplásticos e plásticos reforçados.

- *junta*:

Em robótica geralmente utiliza-se dois tipos básicos de juntas para compor um par cinemático formado por dois elos adjacentes: junta de *rotação* ou junta *prismática* (translação). O uso destas juntas visa tornar mais simples o processo de montagem e/ou fabricação dos componentes mecânicos que compõe uma junta. Outra vantagem refere-se ao controle do movimento relativo entre os elos que depende de apenas uma variável de posição.

O número de graus de liberdade que um robô apresenta é o número de variáveis independentes de posição que precisam ser especificadas para se definir a localização de todas as partes do mecanismo, de forma inequívoca. O robô industrial é normalmente uma combinação de elos e juntas em forma de cadeia cinemática aberta. Portanto, o número de juntas equivale ao número de graus de liberdade.

- *sistema de transmissão*:

A movimentação de cada corpo ocorre devido a transmissão de potência mecânica (torque/força e velocidade angular/linear) originada de um atuador. Os sistemas de transmissão são componentes mecânicos cuja função é transmitir potência mecânica dos atuadores aos elos.

Dentre os componentes de transmissão mais usados tem-se engrenagens (dentes retos, helicoidais, cremalheira e pinhão, cônicas), fusos de esferas recirculantes, correias e polias dentadas, correntes, cabos, fitas de aço, engrenagens planetárias e engrenagens harmônicas.

A escolha destes componentes depende de parâmetros de projeto como a potência transmitida, os tipos de movimentos desejados e a localização do atuador em relação à junta controlada. As características mais importantes de desempenho operacional em sistemas de transmissão são a rigidez e a eficiência mecânica.

b) **atuadores:** São componentes que convertem energia elétrica, hidráulica ou pneumática, em potência mecânica. Através dos sistemas de transmissão a potência mecânica gerada pelos atuadores é enviada aos elos para que os mesmos se movimentem.

- *atuadores hidráulicos e pneumáticos:*

Os atuadores hidráulicos e pneumáticos podem ter a forma de cilindros lineares para gerar os movimentos lineares, ou motores para proporcionar deslocamentos angulares. Ambos são conectados a válvulas direcionais (pré-atuadores) que gerenciam a direção do deslocamento do fluido nos atuadores, a partir de sinais gerados de uma unidade de comando. O custo das válvulas direcionais de alto desempenho ainda permanece elevado.

Os atuadores hidráulicos permitem a implementação de controle contínuo e acurado de posicionamento e velocidade devido a incompressibilidade do fluido (óleo hidráulico), resultando numa elevada rigidez, porém isso pode tornar instável o controle de força. Outra característica é a elevada relação entre a potência mecânica transmitida pelo atuador e o seu peso, o que possibilita a construção de unidades compactas de alta potência. Uma bomba é utilizada para fornecer o óleo hidráulico para o atuador hidráulico através das válvulas direcionais.

Os atuadores pneumáticos são utilizados em robôs industriais que operam com movimentação de cargas entre posições bem definidas limitadas por batentes mecânicos, o que caracteriza o movimento ponto-a-ponto. A baixa rigidez destes atuadores devido à compressibilidade do fluido (ar comprimido), permite que sejam obtidas operações suaves, porém esta característica o torna pouco preciso quanto ao controle de posicionamento entre as posições limites. A natureza binária do movimento destes atuadores (posição estendida ou retraída) implica em um controle simples e de baixo custo. Utiliza-se um compressor para fornecer o ar comprimido ao atuador pneumático através das válvulas direcionais. Para um correto funcionamento dos atuadores, convém a instalação de unidades de preparação (filtro, dreno, regulador de pressão com manômetro e etc.) no circuito de ar comprimido antes da entrada deste nas válvulas direcionais.

- *atuadores eletromagnéticos:*

Os atuadores eletromagnéticos são os mais utilizados em robôs, principalmente atuadores do tipo motores de corrente contínua e de passo. Como vantagens pode-se citar a grande variedade de fabricantes disponíveis no mercado, o fato de os motores elétricos quando associados a sensores poderem ser empregados tanto para o controle de força quanto da posição do robô, e a facilidade de se programar seus movimentos, já que estes podem ser controlados por sinais elétricos, permitindo desta forma a utilização de controladores de movimento.

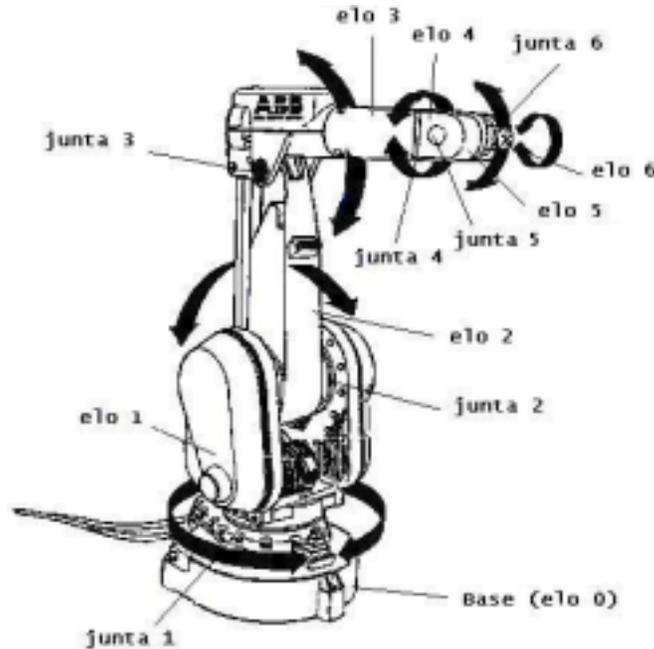
Os *motores tipo corrente contínua* (cc) são compactos e geralmente o valor de torque mantém-se numa faixa constante para grandes variações de velocidade, porém necessitam de sensores de posição angular (encoder) e de velocidade (tacômetro) para o controle de posicionamento em **malha fechada** (servocontrole). A máxima eficiência mecânica destes motores normalmente ocorre a velocidades elevadas, portanto é comum o uso de redutores de velocidade para se obter a redução de velocidade e conseqüentemente o aumento de torque necessários à transmissão de potência mecânica ao elemento movido. Atualmente os fabricantes de robôs utilizam os motores cc sem escovas ("brushless") devido à reduzida manutenção, decorrente da diminuição de desgastes e otimização da dissipação térmica entre o rotor e o estator.

Os *motores tipo passo* podem funcionar em *controle de malha aberta* em posição e velocidade e são facilmente interligados a unidades de comando de baixo custo, porém a curva de torque decresce com o aumento da velocidade e em baixas velocidades podem gerar vibrações mecânicas. São mais empregados na movimentação de garras.

Os *motores de corrente alternada*, os *motores lineares* e atuadores do tipo *solenóide* têm sido cada vez mais empregados em projetos de manipuladores mecânicos. Recentes pesquisas indicam que os *materiais com memória de forma* têm bom potencial para serem usados na construção de atuadores.

c) **sensores**: Fornecem parâmetros sobre o comportamento do manipulador, geralmente em termos de posição e velocidade dos elos em função do tempo, e do modo de interação entre o robô e o ambiente operativo (força, torque, sistema de visão) à unidade de controle. As juntas utilizadas para vincular os elos de um robô são normalmente acopladas a sensores.

d) **unidade de controle**: Responsável pelo gerenciamento e monitoração dos parâmetros operacionais requeridos para realizar as tarefas do robô. Os comandos de movimentação enviados aos atuadores são originados de controladores de movimento (computador industrial, CLP, placa controladora de passo) e baseados em informações obtidas através de sensores.



**Figura 1.1** - Robô industrial de seis graus de liberdade.

e) **unidade de potência:** É responsável pelo fornecimento de potência necessária à movimentação dos atuadores. A bomba hidráulica, o compressor e a fonte elétrica são as unidades de potência associadas aos atuadores hidráulico, pneumático e eletromagnético, respectivamente.

f) **efetuador:** É o elemento de ligação entre o robô e o meio que o cerca. Pode ser do tipo *garra* ou *ferramenta*. O principal escopo de uma garra é pegar um determinado objeto, transportá-lo a uma posição pré-estabelecida e após alcançar tal posição, soltá-lo. A ferramenta tem como função realizar uma ação ou trabalho sobre uma peça, sem necessariamente manipulá-la.

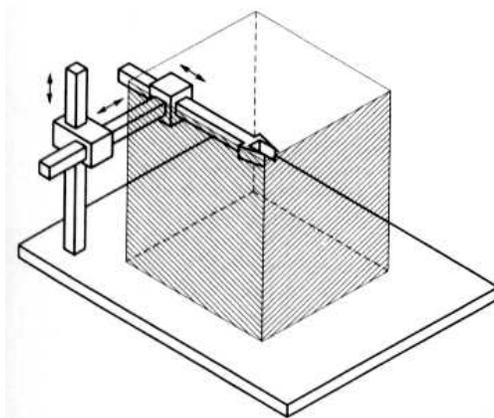
## 1.2.2 - Classificações de Robôs

### 1.2.2.1 - Quanto à Estrutura Mecânica

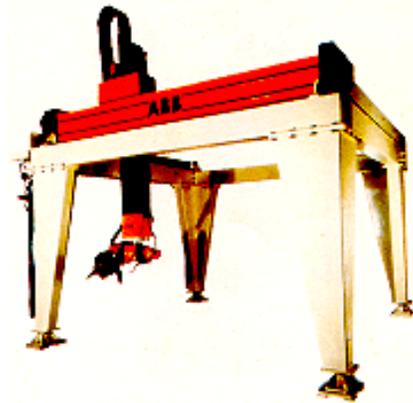
Diversas combinações de elementos (juntas e elos) podem ser realizadas para se obter uma configuração desejada. De acordo com a Federação Internacional de Robótica (*International Federation of Robotics - IFR*), as principais configurações básicas quanto à estrutura mecânica são as seguintes (IFR, 2000, SCHIAVICCO, SICILIANO, 1995):

a) *Robô de Coordenadas Cartesianas/Pórtico (cartesian/gantry robot):*

Este tipo de robô possui três juntas prismáticas (PPP), resultando num movimento composto de três translações, cujos eixos de movimento são coincidentes com um sistema de coordenadas de referência cartesiano. Uma variante deste robô é a configuração tipo *pórtico (gantry)*. O volume de trabalho gerado é retangular.



(a)

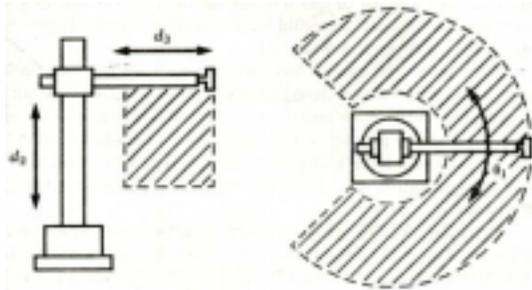


(b)

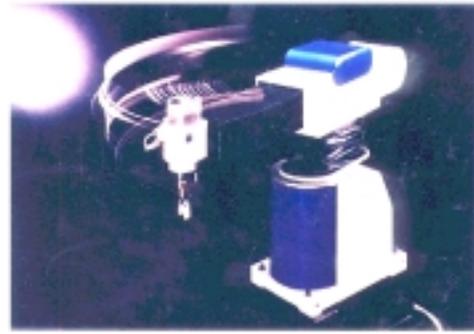
**Figura 1.2 - Robôs Cartesianos: (a) tipo convencional - volume de trabalho, (b) tipo pórtico.**

b) *Robô de Coordenadas Cilíndricas (cylindrical robot):*

Nesta configuração, os eixos de movimento podem ser descritos no sistema de coordenadas de referência cilíndrica. É formado por duas juntas prismáticas e uma de rotação (PPR), compondo movimentos de duas translações e uma rotação. Neste caso, o volume de trabalho gerado é cilíndrico.



(a)

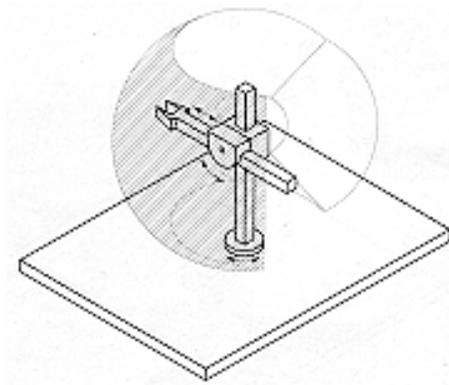


(b)

**Figura 1.3 - Robô de coordenadas Cilíndricas: (a) volume de trabalho, (b) robô.**

c) Robô de Coordenadas Esféricas (spherical robot):

Neste tipo de robô os eixos de movimento formam um sistema de coordenadas de referência polar, através de uma junta prismática e duas de rotação (PRR), compondo movimentos de uma translação e duas rotações. Para esta configuração, o volume de trabalho gerado é aproximadamente uma esfera.



(a)

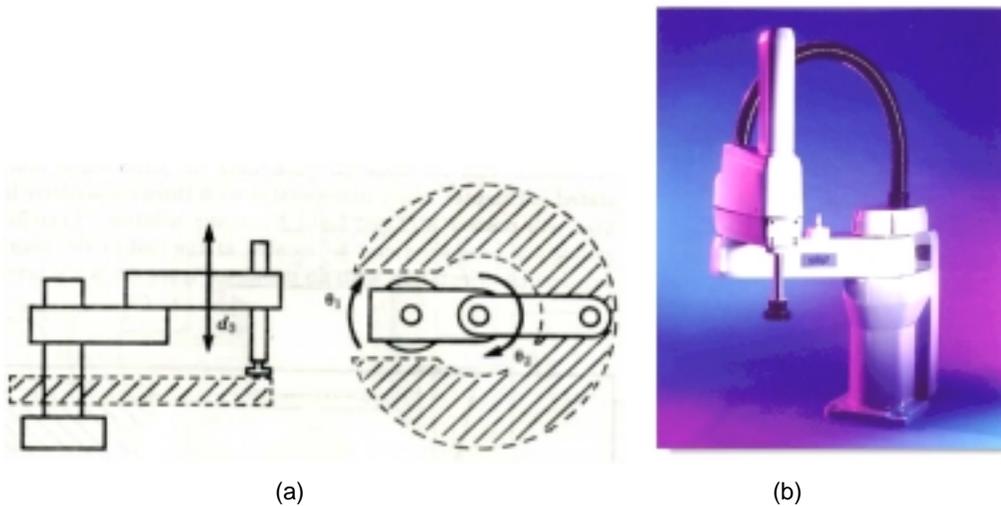


(b)

**Figura 1.4 - Robô de coordenadas Esféricas: (a) volume de trabalho, (b) robô.**

d) Robô SCARA:

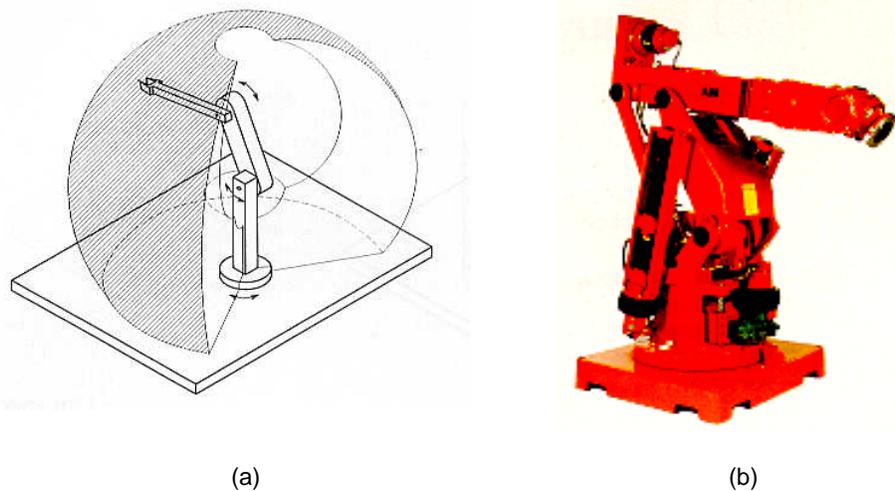
É um robô que apresenta duas juntas de rotação dispostas em paralelo para se ter movimento num plano e uma junta prismática perpendicular a este plano (PRR), apresentando portanto uma translação e duas rotações. O SCARA é muito empregado em tarefas de montagem de componentes de pequenas dimensões, como placas de circuitos eletrônicos. O volume de trabalho gerado por este tipo de robô é aproximadamente cilíndrico.



**Figura 1.5** - Robô tipo SCARA: (a) volume de trabalho, (b) robô.

e) Robô Articulado ou Antropomórfico (articulated robot):

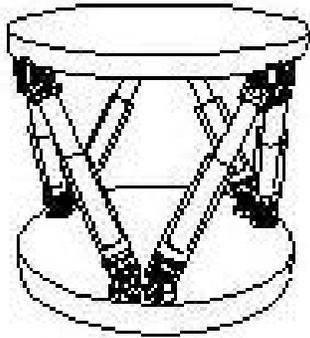
Nesta configuração, existem ao menos três juntas de rotação. O eixo de movimento da junta de rotação da base é ortogonal às outras duas juntas de rotação que são simétricas entre si. Este tipo de configuração é o que permite maior mobilidade a robôs. Seu volume de trabalho apresenta uma geometria mais complexa em relação as outras configurações.



**Figura 1.6** - Robô Articulado (cortesia ABB): (a) volume de trabalho, (b) robô.

f) Robô Paralelo (parallel robot):

Este robô apresenta configuração tipo plataforma e mecanismos em forma de cadeia cinemática fechada. O volume de trabalho resultante é aproximadamente semi-esférico.



(a)



(b)

**Figura 1.7 - Robô Paralelo (IFR, 2000): (a) esquema, (b) exemplo de robô.**

#### **1.2.2.2 - Quanto a geração tecnológica**

Outra classificação (RIVIN, 1988), (ROSEN, 1985), refere-se às gerações tecnológicas dos robôs industriais. A primeira geração é a dos robôs denominados de seqüência fixa, os quais uma vez programados podem repetir uma seqüência de operações e para realizar uma operação diferente devem ser reprogramados. O ambiente de interação do robô na fábrica deve estar completamente estruturado (parametrizado), pois as operações exigem o posicionamento preciso dos objetos a serem trabalhados. A maioria dos robôs industriais em uso pertence a esta geração.

Os robôs de segunda geração possuem recursos computacionais e sensores que permitem ao robô agir em um ambiente parcialmente estruturado, calculando em tempo real os parâmetros de controle para a realização dos movimentos. Algumas atividades como pegar uma peça que está deslocada de sua posição ideal e reconhecer uma peça a ser manipulada dentre um conjunto de peças variadas, são características desta geração.

A terceira geração de robôs apresenta inteligência suficiente para se conectar com outros robôs e máquinas, armazenar programas e se comunicar com outros sistemas computacionais. É capaz, por exemplo, de tomar decisões em operações de montagem, como montar uma adequada combinação de peças, rejeitar peças defeituosas e selecionar uma combinação correta de tolerâncias. O emprego deste tipo de robô em processos industriais ainda é incipiente.

#### **1.2.2.3 - Quanto à participação de operador humano**

O grau de envolvimento do operador humano no processo de controle de um sistema robótico é determinado pela complexidade que o meio de interação apresenta e pelos recursos disponíveis para o processamento dos dados necessários à execução das tarefas.

Em *ambientes estruturados*, onde os parâmetros necessários à operacionalidade do sistema podem ser identificados e quantificados, é possível estabelecer um sistema de controle capaz de gerenciar e monitorar as tarefas com a mínima participação de um operador. Neste caso classifica-se este sistema como robótico.

A maioria das atividades automatizadas relacionadas às indústrias, como soldagem por pontos ou contínua, fixação de circuitos integrados em placas, pintura de superfícies, movimentação de objetos e montagem de peças, operam em ambientes estruturados.

Já em *ambientes não estruturados*, devido à dificuldade de serem quantificados determinados parâmetros de processo ou ao elevado custo para obtê-los dentro de certas especificações, a utilização do poder decisório do operador no gerenciamento do sistema de controle torna-se fundamental para a realização das tarefas determinadas. Neste caso, o sistema é classificado como teleoperado.

Há diversas aplicações em ambientes não estruturados onde um computador pode processar parte das informações a serem enviadas do ambiente manipulado ao operador humano e vice-versa. Apesar de esta situação ter conceitualmente um operador humano no comando operacional, observa-se algum grau de autonomia do sistema.

Os sistemas baseados em *teleoperação* (ver capítulo 11) são normalmente utilizados em manipulações envolvendo atividades em ambientes não estruturados como mineração, recuperação de satélites, manipulação de materiais radioativos em usinas ou centros de pesquisas nucleares, e exploração de petróleo e gás em plataformas marítimas.

### 1.2.3 - Projeto de Robô

O projeto de um robô é necessariamente interdisciplinar e envolve a utilização de conhecimentos de várias áreas clássicas como:

- *Engenharia mecânica*: a qual fornece metodologias para o estudo de estruturas e mecanismos em situações estáticas e dinâmicas;
- *Engenharias elétrica e eletrônica*: fornecem técnicas para o projeto e integração de sensores, interfaces, atuadores e controladores;
- *Teoria de controle*: formula e avalia algoritmos ou critérios de inteligência artificial que realizam os movimentos desejados e controlam as interações entre robô e o ambiente; e
- *Ciência da computação*: propicia ferramentas para a programação de robôs, capacitando-os à realização das tarefas especificadas.

Neste tipo de projeto deve-se ainda considerar entre outros aspectos:

- dimensionamento de atuadores, mecanismos, circuitos eletrônicos (hardware), unidades de controle e potência;
- cálculos estruturais;
- fabricação e montagem de peças de precisão;
- seleção de materiais;
- planificação dos movimentos;
- simulação e modelagem;
- desenvolvimento de técnicas de programação para o sistema de controle, sistema operacional, diagnose de sistemas/componentes e comunicação ao operador; e
- testes de desempenho.

Os robôs são máquinas de programação flexível projetadas para operar em diversas situações, logo, as especificações de operação fornecidas pelo fabricante são de caráter geral e relacionam-se a: **volume de trabalho**, **capacidade de carga**, velocidade máxima, **precisão** e **repetibilidade**.

Com a implementação de um sistema robótico em uma fábrica, devem ainda ser analisados aspectos relacionados às áreas econômica e social, como: análise de custos e benefícios,

mudanças organizacionais na estrutura da empresa e investimentos diretos e indiretos na produção, redução do número de empregados e remanejamentos.

### **1.3 - EFETUADORES**

Os fabricantes de robôs especificam nos catálogos as informações relativas às características dimensionais e de desempenho dos robôs, como acurácia, repetibilidade, carga máxima de manipulação, número de graus de liberdade, volume de trabalho e etc. Estes dados fornecem ao usuário subsídios suficientes para que se tenha uma ordem de grandeza das condições operacionais de um determinado robô.

As informações indicadas nos catálogos relacionam-se essencialmente à extremidade terminal do manipulador mecânico, ou seja, ao último elo. Portanto, torna-se necessária a inclusão de um componente capaz de promover a interação entre a extremidade terminal do manipulador mecânico e o objeto a ser trabalhado. Este componente é o efetuador.

Os efetuadores podem ser divididos em dois grandes tipos: as *ferramentas especiais* e as *garras mecânicas*. As ferramentas têm como função realizar uma ação ou trabalho sobre uma peça, sendo relacionadas principalmente a operações de processamento e controle de qualidade.

Enquanto as ferramentas especiais realizam trabalho, durante a sua movimentação ou quando já posicionadas pelo manipulador, as garras mecânicas são associadas a preensão (agarramento) de objetos visando operações de movimentação ou manipulação. O principal escopo de uma garra é pegar um determinado objeto, transportá-lo a uma posição pré-estabelecida e após alcançar tal posição, soltá-lo (TANIE, 1985).

Os efetuadores usados em robótica são padronizados de tal forma a permitir uma vinculação fácil à extremidade terminal do robô industrial e geralmente podem ser controlados pela mesma unidade de controle do robô, através de interfaces apropriadas.

#### **1.3.1 - Ferramentas Especiais**

As ferramentas são geralmente rigidamente fixas às extremidades terminais dos robôs, não possuindo movimentação relativa a estes. A função primordial do robô nestes casos é posicionar e orientar a ferramenta em relação à peça que será trabalhada.

O uso de ferramentas está associado diretamente às tarefas a serem realizadas. Dentre as ferramentas mais tradicionais utilizadas em operações de processamento estão: o porta-eletrodo, a pistola de aspersão (para pó, jateamento de superfícies e etc.), a pistola de pintura, as tochas para soldagem TIG e MIG/MAG, o dispositivo para soldagem/corte à plasma, o conjunto de pinças para soldagem por pontos, o dispositivo para soldagem/corte à laser, o porta-esmeriladora, o maçarico para corte oxiacetilênico, a pistola para limpeza por jato d'água, a pistola para corte por jato d'água e etc.

#### **1.3.2 - Garras Mecânicas**

##### **1.3.2.1 - Analogias com a Mão Humana**

SALISBURY e CRAIG (1982) após pesquisarem cerca de seiscentas configurações diferentes de garras chegaram a conclusão que, em termos cinemáticos, uma garra na configuração de mão humana é a que possui maior versatilidade para realizar a manipulação de objetos dos mais variados tipos e inclusive formas irregulares, sendo capaz de exercer apenas a força estritamente necessária para que estes objetos sejam seguros com estabilidade e com segurança.

Para efeito de comparação, observa-se que uma garra com dois dedos pode manipular com sucesso aproximadamente 40% dos objetos das mais diferentes formas. Uma garra com três dedos poderia manipular 90% de todos os objetos, e uma na configuração com quatro dedos poderia manipular em torno de 99% destes objetos (MATSUOKA, 1995).

Embora uma garra com a configuração de mão humana possa apresentar elevada versatilidade em função de seus muitos graus de liberdade, sua utilização em robôs industriais não é conveniente devido a sua complexidade de construção e controle.

O número grande de juntas neste tipo de garra permite adaptá-la a muitas formas diferentes de objetos a serem manipulados, permitindo a preensão de um maior número de formas de objetos que as garras convencionais. Porém, a programação torna-se extremamente complexa. A manipulação eficiente de garras com múltiplos dedos, que cooperam entre si, requer um sistema de controle mais sofisticado contendo retroalimentação de sinais provenientes de sensores de tato (força, ótico, estensômetros e etc.) e planejamento de trajetórias.

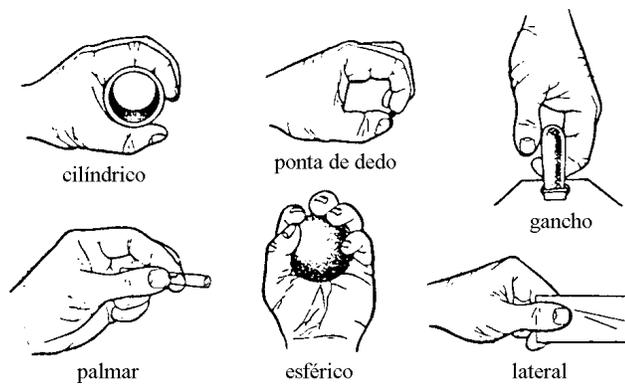
Quando se utiliza uma garra com apenas dois dedos (forquilha), a falta de versatilidade de manipulação ou destreza (*dexterity*) exige que o programador modele com grande precisão os objetos a serem seguros ou manipulados. Nos projetos deste tipo de garra, normalmente se considera que os modelos dos objetos que estão sendo manipulados estão disponíveis ou podem ser facilmente obtidos. Quando se deseja que o manipulador opere em ambientes desconhecidos de trabalho ou que ele manipule uma maior variedade de objetos com diferentes formas, esta modelagem é difícil de ser empregada. Já uma garra na configuração de mão humana com maior número de graus de liberdade (sistema redundante) pode-se adequar a incertezas do modelo simplesmente, por exemplo, pela retroalimentação dos sensores de tato. O maior desafio é manter a controlabilidade do sistema redundante devido aos vários graus de liberdade.

Basicamente existem dois modos estáveis de se promover a *preensão* de um objeto através de garras: a preensão com *precisão* e a preensão com *segurança* (TANIE, 1985). O modo com precisão é na maioria das vezes realizado utilizando-se principalmente as pontas dos dedos, como por exemplo no trabalho manual realizado por uma costureira através da agulha e fio. No modo com segurança existe o contato do objeto com os dedos e a palma da mão, como por exemplo um tenista segurando a sua raquete.

O estudo da mão humana sob o ponto de vista cinemático requer uma análise tanto do esqueleto quanto dos ligamentos. A mão pode ser considerada como um sistema formado por ossos (elos), ligamentos (juntas) e músculos (atuadores). Estes elementos formam os dedos e a palma e permitem a realização de movimento entre os elos. As juntas são tencionadas pelos ligamentos, tendões e músculos. O movimento nas junta é obtido pela força dos músculos e é restringido pelos músculos e articulações dos ossos.

A mão é formada por vinte e sete ossos, mais de vinte articulações e a sua ação envolve o uso de trinta e três músculos diferentes. Formada por cinco dedos, ela possui capacidade de executar inúmeros movimentos, que podem ser divididos em dois grupos fundamentais: movimentos *com preensão* e movimento *sem preensão*, nos quais o objeto é manipulado mediante impulsão ou levantamento.

Os tipos básicos de preensão de diferentes objetos podem ser vistos na figura 1.8. Desta figura pode-se notar as vantagens da utilização de uma mão com cinco dedos. Os tipos básicos de preensão são denominados: cilíndrico, ponta de dedo, gancho, palmar, esférico e lateral (ISO/DIS, 1998).

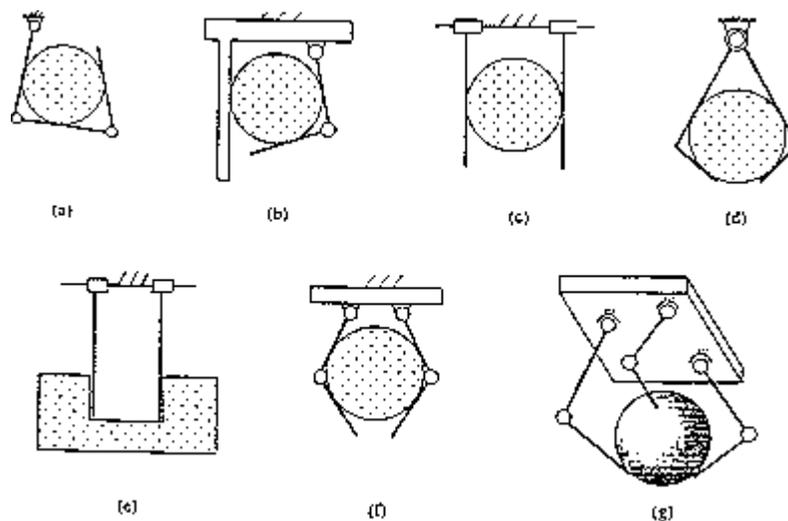


**Figura 1.8** – Seis tipos básicos de preensão de uma mão humana (TANIE, 1985).

### 1.3.2.2 - Formas de Preensão

Além da divisão por números de dedos, deve-se observar a forma de preensão. Nos desenhos esquemáticos da figura 1.9, pode-se notar as preensões internas e externas de diversas garras (ISO/DIS, 1998).

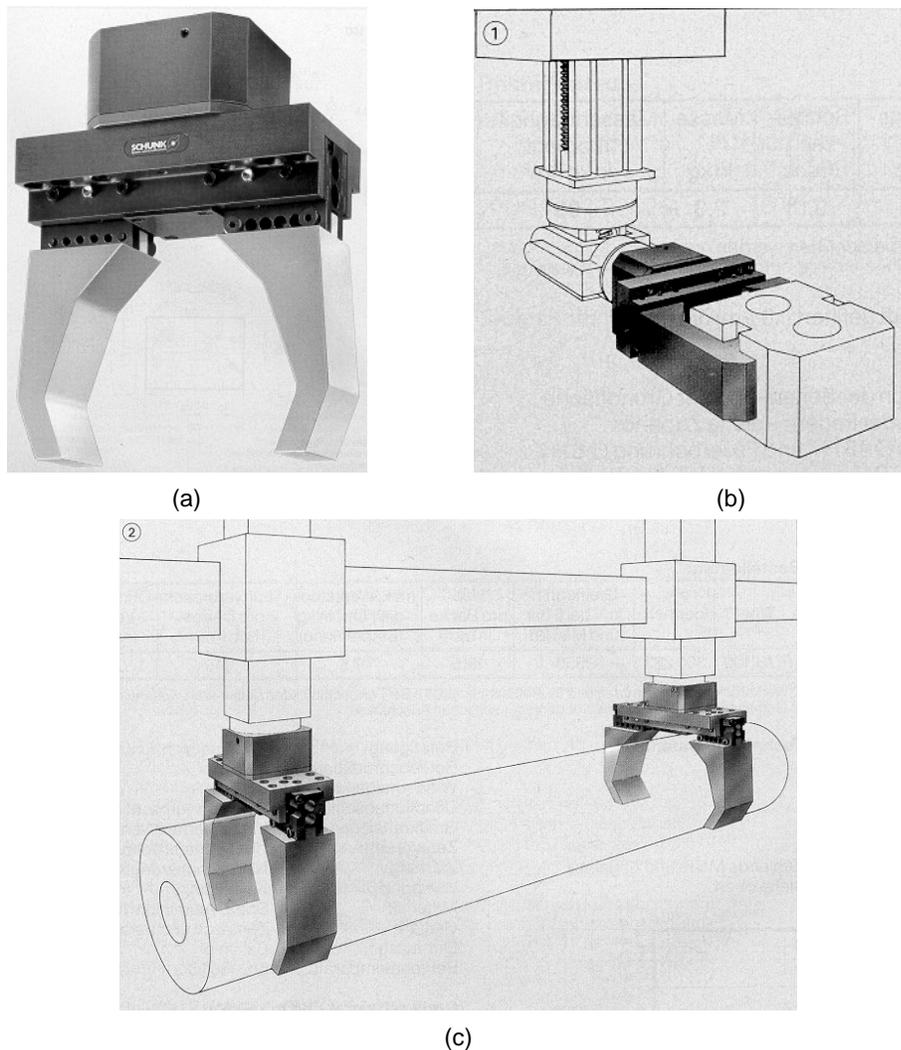
Além destes fatores, diversos outros devem ser considerados tanto para a especificação e seleção quanto para o projeto das garras mecânicas ou das ferramentas específicas. Dentre estes fatores podem ser citados: forma, peso, material e rigidez do objeto a ser manipulado, velocidade e aceleração do manipulador durante a realização da tarefa, estabilidade do agarramento, ambiente de trabalho, etc.



**Figura 1.9** – Preensões típicas de diversos tipos de garras (ISO/DIS 14539, 1998).

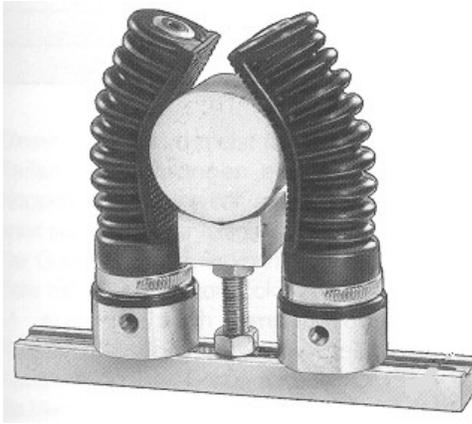
### 1.3.2.3 - Tipos de Garras Industriais

Enquanto nos centros de pesquisas de todo o mundo procura-se projetar garras mecânicas tão complexas como as dos seres humanos, nas indústrias as garras são, na sua grande maioria, compostas de apenas dois ou três dedos e uma junta de rotação em cada dedo. Entre as figuras 1.10 e 1.13 são apresentadas algumas garras utilizadas na indústria.



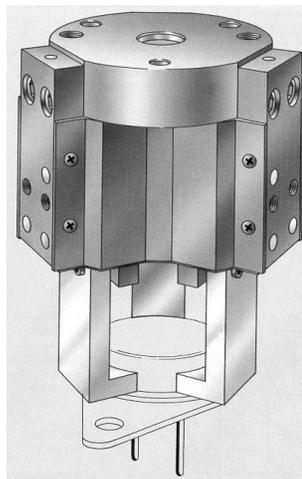
**Figura 1.10** – Garra com dois dedos intercambiáveis (cortesia Shunk GmbH.).

Em alguns casos deseja-se que a garra possua capacidade de exercer força e exibir uma destreza que só pode ser conseguida com dedos especiais. Na figura 1.11 pode-se observar um tipo de garra com esta característica, onde os dedos, quando sob pressão interna de algum fluido exerce a força diretamente sobre o objeto manipulado.



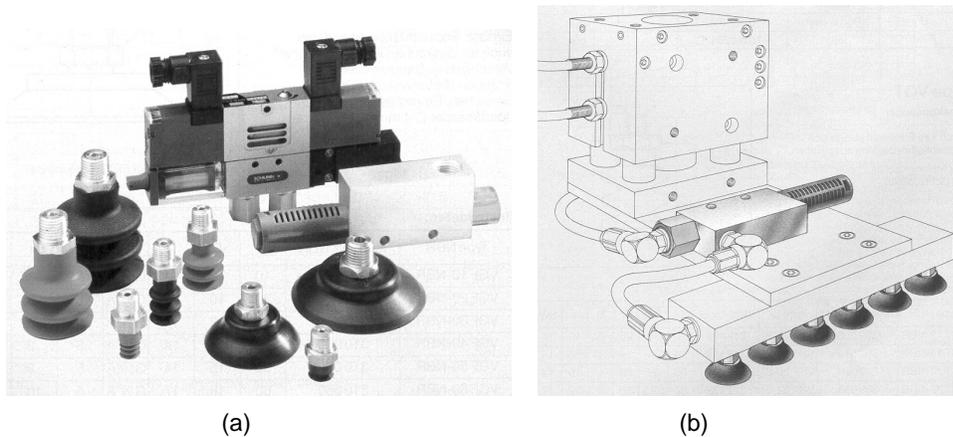
**Figura 1.11** – Garra com Dedos Flexíveis (Cortesia Sommer GmbH).

Mesmo com esta capacidade, existem objetos que para serem manipulados com segurança necessitam de garras com pelo menos três dedos. Um exemplo clássico deste tipo é o da preensão de esferas ou peças com superfície cilíndrica. Um exemplo deste tipo de garra pode ser visto na figura 1.12.



**Figura 1.12** – Garra Mecânica com três dedos (cortesia Shunk GmbH.).

Garras pneumáticas são muito empregadas para a movimentação de objetos com superfície plana e massa reduzida, como chapas metálicas, caixas e etc.



**Figura 1.13** - (a) Ventosas; (b) Garra pneumática (cortesia Shunk GmbH.).

### 1.3.3 - Especificação de uma Garra

Como os efetadores do tipo garra mecânica entrarão em contato direto com o objeto a ser manipulado, diversos fatores devem ser considerados no momento de sua especificação para o uso em robôs ou durante a fase de projeto de efetadores.

Segundo a norma ISO/DIS 14539 (1998), os principais itens são:

- Geometria dos dedos e da palma;
- Posicionamento dos dedos na palma;
- Forma dos dedos e seus movimentos durante o agarramento;
- Número e posicionamento dos atuadores;
- Número e posicionamento dos sensores;
- Mecanismos de transmissão da potência;
- Mecanismo de fixação efetador / manipulador;
- Tipo e força de agarramento;
- Tempo de operação (de agarramento, tempo do ciclo);
- Tipo de sistema de controle empregado (força e/ou posição);
- Número e material dos dedos;
- Número de graus de liberdade dos dedos;
- Geometria, peso, temperatura máxima e mínima, propriedades magnéticas e características da superfície do objeto a ser manipulado.

## 1.4 - APLICAÇÕES DE ROBÔS INDUSTRIAIS

### 1.4.1 - Generalidades

A própria definição de robô industrial como sendo um "manipulador multifuncional reprogramável projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais, através de diversos movimentos programados, para o desempenho de uma variedade de tarefas", já fornece uma idéia das variadas aplicações que podem ser realizadas com este equipamento.

Conforme mencionado anteriormente, as características operacionais de um robô industrial, dependem essencialmente de sua configuração, das indicações de desempenho indicadas nos catálogos dos fabricantes e das tarefas planejadas a serem realizadas.

Para cada tarefa, geralmente faz-se uso de diferentes efetadores, os quais são selecionados especificamente para promover a correta interação entre a extremidade terminal do manipulador mecânico e o objeto a ser trabalhado.

Os principais fabricantes de robôs industriais oferecem aos usuários diferentes configurações de manipuladores. Entretanto, alguns fabricantes se especializaram em produzir determinados tipos de robôs para aplicações específicas, obtendo desta forma melhores desempenhos operacionais.

Dentre as mais importantes empresas que fabricam robôs industriais encontram-se: ABB Robotics AB, Adept Technologies Inc., Brown & Shape, COMAU SPA, FANUC LTD, Kawasaki Robotics Inc., KUKA Roboter GmbH, Motoman Inc., Stäubli AG e Sony Co.

Uma das aplicações mais comuns de robôs industriais é a soldagem. Aproximadamente 25% dos robôs são empregados em diferentes aplicações de soldagem.

A montagem de componentes corresponde a cerca de 33% das aplicações de robôs (1997). Muitos destes são empregados pelas indústrias automobilísticas e de eletrônica.

Processos de empacotamento e paletização ainda permanecem com pequenos índices de aplicação com robôs, contribuindo com 2,8% do número total (1997). Esta área de aplicação deve crescer em função do aumento da capacidade de manipulação dos robôs.

A indústria alimentícia é uma área que deve contribuir consideravelmente no futuro com a aplicação de robôs industriais (IFR, 2000).

A maioria das atividades relacionadas a robôs industriais em processos de produção envolvem operações de *movimentação*, *processamento* e *controle de qualidade*. A seguir são apresentadas algumas destas atividades.

- *Movimentação:*
  - movimentação de peças entre posições definidas;
  - transporte de peças entre esteira transportadora e máquinas operatrizes;
  - carregamento e descarregamento de peças em máquinas operatrizes;
  - carregamento e descarregamento de peças em magazines;
  - paletização.
- *Processamento:*
  - soldagem por resistência elétrica (pontos) ou a arco (contínua);
  - fixação de circuitos integrados em placas;
  - pintura e envernizamento de superfícies;
  - montagem de peças;
  - acabamento superficial;
  - limpeza através de jato d'água e abrasivos;
  - corte através de processos por plasma, laser, oxi-corte ou jato d'água;
  - fixação de partes com parafusos, deposição de cola, rebites;
  - empacotamento.
- *Controle de qualidade:*
  - inspeção por visão;

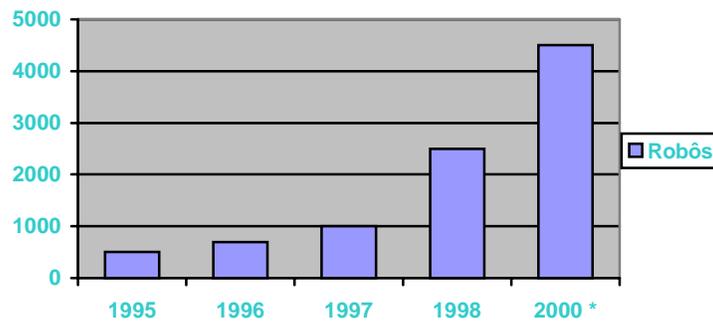
- verificação dimensional de peças através de sensores.

#### 1.4.2 - Aplicação de Robôs no Brasil

A população mundial instalada de robôs de seis eixos é estimada em 790.000 unidades (1999), sendo no Brasil em torno de 4500 unidades. Portanto, o Brasil contribui com aproximadamente 0,6% do número total de robôs industriais instalados no mundo.

As indústrias ligadas ao setor automobilístico, como montadoras e fornecedoras de auto-peças são as maiores usuárias de robôs industriais no país. Cerca de 900 unidades (20% do total) foram empregadas em pequenas e médias indústrias.

A figura 1.14 apresenta um gráfico do histórico da evolução do número de robôs industriais de seis eixos no Brasil. Observa-se que houve um acréscimo de 900% no número de robôs nos últimos cinco anos e a tendência é de crescimento (ROMANO, 2000).



**Figura 1.14** - Evolução histórica do número de robôs industriais de seis eixos no Brasil.

A empresa ABB Robotics AB é a líder no mercado brasileiro com 33% das vendas. Na tabela 1.1 pode-se observar a distribuição de robôs industriais de seis eixos por aplicação industrial desta empresa no mercado brasileiro.

**Tabela 1.1** - Distribuição percentual de robôs ABB no Brasil.

Aplicação Industrial	Percentual
Soldagem por pontos	33 %
Movimentação / paletização	25%
Soldagem por arco	18 %
Pintura	10 %
Outros (montagem, acabamento, corte por jato-d'água, oxi-corte)	14 %

Nas figuras a seguir são apresentados alguns exemplos de aplicação de robôs industriais no Brasil.



**Figura 1.15** - Pintura de carroceria de caminhão (cortesia Scania Latin America Ltda.).



**Figura 1.16** - Soldagem na fabricação de assentos (cortesia Marcopolo Ltda.).



**Figura 1.17** - Manutenção de turbinas de aeronaves (cortesia Viação Aérea São Paulo)

## 1.5 - REFERÊNCIAS

- BORODIN, N., *Machine Design*, 1 ed., MIR Publishers, Moscow, 1988.
- BOUTEILLE, D., BOUTEILLE, N., CHANTREUIL, S., et al., *Les Automatismes Programmables*, Cépaduès-éditions, 2 ed., Toulouse, 1997.
- CRAIG, J., *Introduction to Robotics: Mechanics & Control*, Addison-Wesley Publishing Co., 1 ed., Massachusetts, 1986.
- CUTKOSKY, M. R., "On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 5, n.3, pp. 269-279, 1989.
- DE MASI, D., *A Sociedade Pós-Industrial*, Editora SENAI, 2 ed., São Paulo, 1999.
- DUTRA, M. S., *Projeto, Construção, Modelagem Matemática e Testes Experimentais de uma Garra Mecânica com Quatro Dedos*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1990.
- FU, K.S., GONZALES, R.C., LEE, C.S.G., *Robotics - Control, Sensing, Vision and Intelligence*, McGraw-Hill Book Inc., International Edition, 1 ed., New York, 1987.
- GILBERTSON, R. G., *Muscle Wires - Project Book*, 3 ed., Mondotronics Inc., California, 1994.
- HIMENO, S., TSUMURA, H., "The locomotive and control mechanism of the human finger and its applications to robotics", In: *Proceedings of the '83 International Conference on Advanced Robotics*, pp. 261-269, 1983.
- IFR - International Federation of Robotics, <http://www.ifr.org>, 2000.
- ISO 10218 - *Manipulating Industrial Robots - Safety*, ISO Publications, France, 1992.
- ISO/DIS 14539 - *Manipulating Industrial Robots: Vocabulary of object handling with end effectors and of characteristics of grasp-type grippers*, ISO Publications, France, 1998.
- TANIE, K., "Design of Robot Hands". In: Nof, S. Y. (ed), *Handbook of Industrial Robotics*, 1 ed., chapter 8, New York, John Wiley & Sons, 1985.
- MATSUOKA, Y., *Embodiment and Manipulation Learning Process for a Humanoid Hand*, M.Sc. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1995.
- PHAN, D. T., HEGINBOTHAM, W. B., *Robot Grippers*, IFS (Publications) Ltd., EUA, 1986.
- RIVIN, E., *Mechanical Design of Robots*, 1 ed., McGraw-Hill Inc., New York, 1988.
- ROMANO, V.F., "Automação e Robótica", In: *Notas de Aula curso de graduação em Engenharia Mecânica EE-UFRJ*, Rio de Janeiro, 1994.
- ROMANO, V.F., "Brazilian Investments and Applications in Robotics". In: *Preprints of the Workshop on Integration In Manufacturing & Beyond - IIMB' 2000*, p.4, Bordeaux, France, Sept. 2000.
- ROSEN, C.A., "Robots and Machine Intelligence". In: Nof, S. Y. (ed), *Handbook of Industrial Robotics*, 1 ed., chapter 3, New York, John Wiley & Sons, 1985.
- SALISBURY, J. K.; CRAIG, J. J., "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issue", *International Journal of Robotics Research*, v.1, n. 1, pp.4-17, USA, 1982.
- SCHIAVICCO, L., SICILIANO, B., *Robotica Industriale - Modellistica e Controllo di Manipolatori*, 1 ed., McGraw-Hill Inc., Milano, 1995.
- SCIESZKO, J.L., "Projeto de Robôs", In: *Notas de aula curso de graduação em Engenharia Mecânica EE-UFRJ*, Rio de Janeiro, 1988.
- SEERING, W. P., SCHEINMAN, V., "Mechanical Design of an Industrial Robot". In: Nof, S. Y. (ed), *Handbook of Industrial Robotics*, 1 ed., chapter 4, New York, John Wiley & Sons, 1985.

WARNECKE, H. J., SCHRAFT, R. D., WANNER M. C., "Mechanical Design of Robot System". In: Nof, S. Y. (ed), *Handbook of Industrial Robotics*, 1 ed., chapter 5, New York, John Wiley & Sons, 1985.