



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**

**ROBÓTICA NA CONSTRUÇÃO – UMA APLICAÇÃO  
PRÁTICA**

CRISTINA CALMEIRO DOS SANTOS

Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil  
Especialização em Ciências da Construção

Coimbra, Novembro de 2002



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**

# **ROBÓTICA NA CONSTRUÇÃO – UMA APLICAÇÃO PRÁTICA**

CRISTINA CALMEIRO DOS SANTOS

Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil  
Especialização em Ciências da Construção

Autor \_\_\_\_\_  
Assistente do 2º triénio Cristina Calmeiro dos Santos  
EST-IPCB

Orientador \_\_\_\_\_  
Professor Doutor Fernando José Telmo Dias Pereira  
DEC-FCTUC

Co-orientador \_\_\_\_\_  
Professor Doutor Joaquim Norberto Cardoso Pires da Silva  
DEM-FCTUC

Coimbra, Novembro de 2002

## **AGRADECIMENTOS**

Os meus primeiros agradecimentos vão para o Professor Doutor Telmo Pereira do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra que aceitou orientar esta dissertação de mestrado.

O trabalho com o Professor Doutor Telmo Pereira foi-me proporcionando a consciência da riqueza e potencialidades da Robótica Industrial aplicada à Indústria da Construção Civil.

Agradeço-lhe o apoio e a orientação que foi preciosa no esclarecimento de dúvidas, questões e partilha de opiniões. As discussões, as anotações críticas sempre estimulantes, as diversas e valiosas sugestões, o cuidado posto na revisão e o permanente incentivo contribuíram decisivamente para concretizar o plano de trabalho, dando corpo ao projecto inicial. Ao Professor Doutor Telmo Pereira que se demonstrou, em todos os momentos, disponível, atento e sempre pronto a orientar-me com a sua competência e simpatia o meu Bem-Haja.

Uma palavra de reconhecimento para o Professor Doutor Norberto Pires do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra que aceitou co-orientar este trabalho.

À sua competência científica, à sua orientação e ao seu apoio contínuos devo também a concretização desta dissertação.

O seu trabalho na área da Robótica proporcionou-me o contacto com um domínio novo e de grande valor científico e tecnológico, não só pela frequência da disciplina de Robótica Industrial (cuja abordagem teórica e prática permitiu adquirir e estruturar a informação neste domínio), mas também pela possibilidade de integrar um dos seus grupos de trabalho.

Agradeço igualmente a diversidade da informação e de bibliografia que me disponibilizou e que se revelaram de grande importância. Para o Professor Doutor Norberto Pires os meus agradecimentos.

Uma palavra de amizade e agradecimento aos colegas do grupo de trabalho do Laboratório de Robótica Industrial do DEM-FCTUC de quem recebi, sempre, apoio e inestimável incentivo.

À Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, agradeço as condições de trabalho de que tenho usufruído.

Para a minha família, nomeadamente os meus pais e a minha irmã, o meu especial reconhecimento pelo apoio e incentivo sempre demonstrado.

Finalmente, uma última palavra de reconhecimento para o meu marido, pela disponibilidade que procurou proporcionar-me e pelo apoio e ajuda que em todos os momentos me deu.

## **RESUMO E PALAVRAS CHAVE**

A robótica ao pretender substituir o homem pelas máquinas essencialmente em operações de trabalho manual intensivo e em tarefas com operações repetitivas, tem no sector da construção um vasto campo para o desenvolvimento de aplicações pois este sector caracteriza-se por ser um grande absorvedor de mão de obra. Os robôs, nomeadamente os manipuladores, possuem características e um grau de desenvolvimento técnico que se mostra suficiente para ir ao encontro das solicitações de várias tarefas da construção.

O aproveitamento das potencialidades e virtualidades dos progressos da robótica conduz a alterações no processo construtivo desde a fase de concepção e projecto até às tecnologias de execução nos estaleiros das obras. Assim, investiga-se, por um lado, a actuação dos robôs nos actuais locais de produção da indústria da construção (estaleiros) e, por outro lado, as potencialidades de aplicabilidade da robótica nas indústrias a montante com tarefas de fabrico executadas em ambiente controlado, sob a forma de processos construtivos passíveis de execução em meio fabril tradicional.

Neste trabalho desenvolve-se uma aplicação de robôs manipuladores na execução de soldadura de estruturas metálicas sustentando a ideia da possibilidade de incorporar nas obras, uma percentagem significativa de pré-fabricação, executada por robôs.

#### **PALAVRAS CHAVE**

Robótica, indústria da construção, estaleiros, pré-fabricação, soldadura robotizada.

**ABSTRACT E KEYWORDS**

The robotics aims to replace men with machines essentially in intensive manual labour and in repetitive tasks, has in the construction sector a vast field for the development of its applications because these activities are characterized for a big employment. Robot manipulators in particular have features and a level of technical development that are quite capable of meeting the demands of the tasks of construction.

The potentialities and virtualities benefits in the advances robotics it would be a changes in the construction process from the conception and project phases to the execution of technologies in the building site. The robotics research study for one side, the robots performance in the production site of the construction industry (building site), and in the other hand, the potentialities of robotics application in upstream industry with execute tasks in a control environment, using constructive processes for we execute them in traditional way.

In this case, we develop a manipulator robots application for execute a metal structures welding target be possible implement this in construction, area pre-fabrication by do for robots.

#### **KEYWORDS**

Robotics, construction industry, building sites, pre-fabrication, welding robotics.

## **ÍNDICE GERAL**

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT E KEYWORDS</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE GERAL</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS</b>	<b>XIV</b>
<b>CAPÍTULO 1. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUÇÃO	2
1.2. IDENTIFICAÇÃO E PERTINÊNCIA DO TEMA	3
1.3. OBJECTIVOS GERAIS	3
1.4. DOMÍNIOS PRIVILEGIADOS DE INVESTIGAÇÃO	4
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	5
<b>CAPÍTULO 2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>7</b>
2.1. INTRODUÇÃO	8
2.2. HISTÓRIA – ORIGEM DOS ROBÔS	8
2.3. ROBÓTICA	11
2.4. ROBÔ – DEFINIÇÃO	15
2.5. POTENCIALIDADES DA UTILIZAÇÃO DE ROBÔS	19
2.6. ROBÔS MANIPULADORES INDUSTRIAIS	21
2.6.1. Manipulador	23
2.6.2. Actuadores	27
2.6.3. Sensores	31
2.6.4. Sistema de Controlo	32
<b>CAPÍTULO 3. CONTROLO DE ROBÔS</b>	<b>33</b>
3.1. INTRODUÇÃO	34
3.2. CONCEPÇÃO E PROJECTO DE UM ROBÔ	34
3.3. CONFIGURAÇÃO FÍSICA DE UM ROBÔ	36
3.3.1. Robô Cartesiano	40
3.3.2. Robô Cilíndrico	41
3.3.3. Robô Polar	42
3.3.4. Robô de Revolução	43
3.4. POSIÇÃO E ORIENTAÇÃO DE UM CORPO RÍGIDO	46
3.4.1. Matriz de Rotação	47
3.4.2. Matrizes de Transformação	51
3.4.3. Representações Mínimas de Orientação	54
3.4.4. Quatérnios	59

3.5. CINEMÁTICA DE UM ROBÔ MANIPULADOR	62
3.5.1. <i>Cinemática Directa</i>	64
3.5.2. <i>Espaço da Junta e Espaço Operacional</i>	70
3.5.3. <i>Espaço de Trabalho</i>	71
3.5.4. <i>Cinemática Inversa</i>	72
3.5.5. <i>Cinemática Diferencial</i>	73
3.5.6. <i>Forças Estáticas</i>	81
3.6. DINÂMICA DE UM ROBÔ MANIPULADOR	84
3.6.1. <i>Formulação de Newton-Euler</i>	85
3.6.2. <i>Formulação Dinâmica Iterativa de Newton-Euler</i>	86
3.6.3. <i>Equação Dinâmica da Estrutura do Manipulador</i>	90
3.6.4. <i>Formulação de Lagrange na Dinâmica de um Manipulador</i>	91
3.7. GERAÇÃO DE UMA TRAJECTÓRIA	94
<b>CAPÍTULO 4. UTILIZAÇÃO DE ROBÔS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO</b>	<b>99</b>
4.1. INTRODUÇÃO	100
4.2. POSSIBILIDADES DA UTILIZAÇÃO DE ROBÔS	101
4.3. ROBÔS NA CONSTRUÇÃO/ ROBÔS EM OBRA	108
4.4. ROBÓTICA NA PRÉ-FABRICAÇÃO	113
4.5. UMA APLICAÇÃO PRÁTICA	115
4.5.1. <i>Processo de Soldadura</i>	117
4.5.2. <i>Sistema de Implementação – Hardware e Software</i>	119
4.5.3. <i>Resultados Práticos</i>	137
4.6. CONCLUSÃO	138
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>	<b>140</b>
5.1. INTRODUÇÃO	141
5.2. CONCLUSÕES	141
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	145
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>146</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 2.1. A “Zona da Robótica”.	13
Figura 2.2. Alguns robôs industriais disponíveis.	22
Figura 2.3. Os movimentos do punho do robô ( <i>Pitch, Yaw e Roll</i> ).	24
Figura 2.4. Tipos de articulações.	25
Figura 3.1. Processo de desenvolvimento de um robô.	36
Figura 3.2. Robô manipulador.	37
Figura 3.3a. Punho esférico ou <i>Roll-Pitch-Roll (ZYZ)</i> .	38
Figura 3.3b. <i>Pitch-Yaw-Roll (YXZ)</i> .	38
Figura 3.4. Articulação ou Junta de Revolução.	38
Figura 3.5. Articulação ou Junta Prismática.	39
Figura 3.6a. Robô cartesiano.	40
Figura 3.6b. Espaço de trabalho do robô cartesiano.	40
Figura 3.7a. Robô cilíndrico.	41
Figura 3.7b. Espaço de trabalho do robô cilíndrico.	41
Figura 3.8a. Robô polar.	43
Figura 3.8b. Espaço de trabalho do robô polar.	43
Figura 3.9a. Robô de revolução.	44
Figura 3.9b. Espaço de trabalho do robô de revolução.	44
Figura 3.10a. Manipulador SCARA.	45
Figura 3.10b. Espaço de trabalho do SCARA.	45
Figura 3.11. Posição e orientação de um corpo rígido.	46
Figura 3.12. Rotação do sistema O-xyz de um ângulo $\alpha$ em torno de z.	549
Figura 3.13. Representação do ponto P num sistema de duas coordenadas diferentes.	50
Figura 3.14. Representação de um ponto P em diferentes sistemas de coordenadas.	52
Figura 3.15. Representação dos ângulos de Euler ZYZ.	55
Figura 3.16. Representação dos ângulos RPY.	57
Figura 3.17. Sistemas de referência.	62
Figura 3.18. Descrição da posição e orientação do eixo da ponta do robô.	65
Figura 3.19. Parâmetros cinemáticos de Denavit-Hartenberg.	67
Figura 3.20. Caracterização de um elo i genérico de um manipulador.	77
Figura 3.21. Braço com dois elos representados no plano.	80
Figura 3.22. Equilíbrio de força/momento estático num elo simples.	82
Figura 3.23. Força F aplicada no centro de massas do corpo com a aceleração do corpo $\dot{U}_C$ provocada pela respectiva força F.	85
Figura 3.24. Momento N actuando num corpo sendo que o corpo roda com velocidade $\omega$ e aceleração $\dot{\omega}$ .	86
Figura 3.25. A força de equilíbrio, incluindo forças de inércia, para um elo simples de um manipulador.	88

Figura 3.26. Na execução de uma trajectória um manipulador deve deslocar-se da sua posição inicial para a posição desejada de um modo suave.	94
Figura 3.27. Trajectórias possíveis para uma junta simples.	96
Figura 4.1. Estaleiros e respectivas obras. É óbvia a impossibilidade de actuação de robôs.	105
Figura 4.2. Soldadura Robotizada.	116
Figura 4.3. Processo de soldadura MIG/MAG.	118
Figura 4.4. Estrutura do sistema a implementar.	119
Figura 4.5. Tocha de soldadura.	120
Figura 4.6. O software do controlador do robô a funcionar como servidor.	128
Figura 4.7. Módulo de programação que permite ao robô executar a tarefa de soldadura (robô a funcionar como servidor).	128
Figura 4.8. Painel de controlo do robô.	129
Figura 4.9. Código da função Motor ON.	130
Figura 4.10. Código da função Motor OFF.	130
Figura 4.11. Explorador de ficheiros do robô.	131
Figura 4.12. Painel de definição de soldadura.	133
Figura 4.13. Painel de ajuste da soldadura.	134
Figura 4.14. Código da função de movimentação do robô (rotina em RAPID a correr no controlador do robô).	135
Figura 4.15. Rotinas em C++ as quais permitem escrever o valor actual das juntas do robô.	136
Figura 4.16. Código da função que permite controlar o arame na tocha.	137
Figura 4.17. Mesa de trabalho e robô em posição para executar uma soldadura.	137
Figura 4.18. Execução de soldadura robotizada.	138

## **ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 2.1. Comparação entre os diferentes tipos de actuadores.	31
Quadro 3.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas cartesianos.	41
Quadro 3.2. Vantagens e desvantagens dos sistemas cilíndricos.	42
Quadro 3.3. Vantagens e desvantagens dos sistemas esféricos ou polares.	43
Quadro 3.4. Vantagens e desvantagens dos sistemas de revolução.	44

# **Capítulo 1**

## **APRESENTAÇÃO DO TRABALHO**

## 1.1. INTRODUÇÃO

Assistiu-se nos últimos anos a um grande desenvolvimento tecnológico no domínio dos autómatos (robôs) programáveis e à sua utilização em várias indústrias, com claras vantagens em relação a processos de produção manual.

De facto, vivemos num mercado global e muito competitivo, em que se exigem produtos muito diversos, muitas vezes definidos pelo próprio cliente, com tempos de vida curtos<sup>1</sup>, a baixo preço e com maior qualidade. A indústria está assim submetida a uma pressão contínua no sentido de aumentar a produtividade e realizar o produto final com qualidade uniforme.

Essa pressão do mercado leva a que a indústria tenha que apostar cada vez mais em Sistemas Flexíveis de Produção (SFP) susceptíveis de uma fácil adaptação às alterações e até mesmo à introdução de novos produtos, com qualidade elevada e constante, em pequena/média escala e permitindo ao próprio cliente a definição do produto que pretende. Estes SFP são preferencialmente sistemas computadorizados onde a instalação de robôs manipuladores é fundamental devido à sua flexibilidade (pois são sistemas reprogramáveis), sendo adaptáveis a várias funções em que a sua grande precisão e repetibilidade não são afectadas<sup>2</sup>. Por outro lado, a transição de processos totalmente manuais para processos autómatos ou semi autómatos permite aumentar a produtividade, sendo igualmente esta capacidade a chave do sucesso dos sistemas robotizados.

Assim, o robô industrial converteu-se em muitos casos na solução ideal para a automatização de sistemas de produção, permitindo sistemas muito flexíveis e a introdução de frequentes modificações nos produtos, tudo isto com um custo mínimo.

---

<sup>1</sup> A indústria vê-se obrigada a colocar de parte os Sistemas de Produção Rígidos, virados para a produção em massa e prevendo uma etapa intermédia de armazenamento.

<sup>2</sup> Dependendo, bem entendido, do seu *software* e da adequação da ferramenta à função a desempenhar.

Existem vários sectores industriais que já apostaram em tornar as suas linhas de produção automatizadas e robotizadas, sendo a indústria automóvel um dos exemplos pioneiros em Portugal.

## **1.2. IDENTIFICAÇÃO E PERTINÊNCIA DO TEMA**

O tema desta Tese é a aplicação da Robótica à indústria da Construção.

Esta indústria tem, tal como as outras, a necessidade de aumentar a produtividade e a qualidade do produto final a um baixo custo, de modo a assegurar a competitividade face aos concorrentes.

É nosso parecer que nesse processo pode beneficiar com a aplicação da tecnologia proveniente do desenvolvimento da robótica noutras áreas.

A investigação e desenvolvimento neste domínio podem levar à criação de máquinas capazes de realizar com vantagens algumas das muitas tarefas, da construção, até aqui realizadas exclusivamente pelo homem.

## **1.3. OBJECTIVOS GERAIS**

Para a realização deste trabalho traçaram-se os seguintes objectivos gerais:

- Organizar a informação existente sobre robôs;
- Analisar protótipos e sistemas robóticos em funcionamento;
- Identificar virtualidades e capacidades dos actuais robôs;
- Estudar a Cinemática e a Dinâmica dessas máquinas;
- Explorar a possibilidade de aplicação da robótica na indústria da construção;
- Perspectivar necessidades de investigação tecnológica para aplicação no domínio da construção civil;
- Participar no desenvolvimento de um protótipo para a indústria.

## 1.4. DOMÍNIOS PRIVILEGIADOS DE INVESTIGAÇÃO

Do tema desta Tese e dos objectivos gerais a atingir resultam duas grandes linhas de investigação.

Por um lado há a considerar a Robótica Industrial, claramente fora das preocupações correntes e conhecimento dos técnicos (em regra engenheiros civis) da indústria da construção, mesmo daqueles que estão mais ligados à produção. Outra linha de investigação será a da integração dessas técnicas na indústria da construção e o desenvolvimento ou alterações tecnológicas que esta terá de sofrer para que tal seja possível.

Na primeira linha de investigação estão domínios como os sensores e actuadores industriais, a cinemática e a dinâmica de robôs, o *software* de monitorização, controlo e operação dos robôs, etc.

Para a consecução dos objectivos de estudo e estruturação deste conhecimento, a candidata frequentou a disciplina de Robótica Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (DEM-UC).

Na segunda linha de investigação iremos encontrar uma indústria (da construção) onde não existe um conhecimento detalhado do ambiente de trabalho, onde é quase sempre inexistente a estruturação das tarefas a realizar, as quais decorrem geralmente em meio e condições adversas. Na prática, a efectiva realização destas tarefas em larga escala por robôs, implicaria equipá-los com meios de locomoção, sensores e *software* que lhes conferissem possibilidades evoluídas como o reconhecimento do ambiente de trabalho e a superação de obstáculos inerentes às actividades a executar. Outra hipótese, que será analisada no corpo da Tese, será a da evolução da indústria da construção no sentido da pré-fabricação.

## 1.5. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Dividiu-se o trabalho em cinco capítulos.

No segundo, apresenta-se uma análise da bibliografia existente apontando alguns momentos históricos mais significativos relativamente ao surgimento, desenvolvimento e utilização dos robôs. Aborda-se a robótica como uma tecnologia interdisciplinar, uma vez que recorre a conhecimentos provenientes de várias áreas científicas. Inclui-se um conjunto de definições e classificações com particular referência aos elementos que fazem parte da constituição dos robôs industriais: manipulador ou estrutura mecânica, actuadores, sensores e sistema de controlo.

O terceiro capítulo dedica-se ao estudo do controlo de autómatos, analisando-se a interacção entre o robô manipulador e o seu meio envolvente.

Para que um robô se mova e manipule objectos é necessário definir a posição e orientação do respectivo objecto e em particular o extremo do robô. Neste capítulo apresentam-se diferentes ferramentas matemáticas para este fim.

Por outro lado, para o controlo de robôs é fundamental o estudo dos seus modelos cinemático e dinâmico. A cinemática permite relacionar a posição e a orientação do elemento terminal do robô com os valores das suas coordenadas articulares. O modelo dinâmico tem por objectivo conhecer a relação entre o movimento do robô e as forças que o originam. Estes modelos são também objecto de estudo neste terceiro capítulo.

No quarto capítulo analisa-se a viabilidade de utilização de sistemas robóticos na indústria da construção, considerando-se que um dos campos privilegiados é a pré-fabricação pois desenvolve-se em ambientes conhecidos e controlados (ambiente fabril) e os robôs disponíveis no mercado respondem em regra às necessidades requeridas.

Seguidamente descreve-se um modelo de robotização desenvolvido por um grupo de investigação do Laboratório de Robótica Industrial do DEM-UC, no qual a

candidata se integrou e no seio do qual se procedeu ao desenvolvimento de um protótipo de soldadura robotizada para utilização numa das maiores empresas nacionais de construções metálicas.

Para o quinto capítulo reservaram-se as conclusões desta tese.

Nele salientamos os pontos principais no sector da construção onde será pertinente apostar na robotização. Apesar dos obstáculos com que nos deparamos na consecução desse objectivo há não só formas de os superar como argumentos válidos a seu favor. Estes representam certamente um desafio quer à robótica industrial quer à indústria da construção.

A fechar o capítulo e esta Tese apresentam-se linhas de investigação e de desenvolvimento tecnológico neste domínio.

## **Capítulo 2**

### **PESQUISA BIBLIOGRÁFICA**

## **2.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo efectua-se uma análise bibliográfica no domínio da robótica visando o esclarecimento das suas potencialidades e desenvolvimentos em curso. A abordagem histórica que seguimos mostra a robótica como uma tecnologia interdisciplinar englobando várias áreas do saber.

Ao analisar os sistemas existentes mais recentes desenvolvem-se aspectos relacionados com aqueles cuja aplicação na indústria da construção se afigura como mais viável.

## **2.2. HISTÓRIA – ORIGEM DOS ROBÔS**

Ao longo da história o homem sempre se sentiu atraído pelo mundo das máquinas, no sentido de encontrar substitutos que imitassem as funções, o comportamento e os movimentos dos seres humanos. Estamos a referir-nos aos robôs – máquinas que podem substituir o ser humano na execução de várias tarefas e, conseqüentemente, destinados a melhorar a produção e a qualidade de vida [Barrientos et al., 1997].

Assim, quando falamos de robôs não falamos de máquinas recentes, pois desde os primeiros tempos que o homem se sente fascinado por máquinas capazes de desempenhar, executar e imitar tarefas realizadas pelo homem. Senão vejamos:

- Os antigos Egípcios adicionaram braços mecânicos às estátuas dos seus Deuses. Estes braços eram operados por Sacerdotes, os quais clamavam para agirem sob inspiração dos Deuses.
- Os Gregos construíram estátuas movidas hidraulicamente, ilustrando assim a hidráulica como ciência.
- No século XVII foi construído em Espanha o Tocador de Viola (desenhado por Leonardo da Vinci).
- No século XVIII Jacquet-Droz construiu vários objectos mecânicos.

- Na China, entre os séculos XVIII e XIX, construíram-se bonecas que transportavam o chá.
- Durante o século XVIII, complexos bonecos mecânicos autómatos foram construídos na Europa. Estes representavam imitações das acções humanas e animais e foram um sucesso junto do público [McKerrow, 1991].

Ao longo da história<sup>1</sup> podemos referir nomes como Ctesibius (270 a.c.) que projectou os relógios de água com figuras móveis. Pensa-se que estes tenham sido os primeiros trabalhos sobre robôs.

Por sua vez Leonardo Da Vinci (1452-1519) desenhou e projectou mecanismos de transmissão de movimentos e alguns investigadores pressupõem que tenha projectado os estudos para um robô de aspecto humano – um cavaleiro andante com uma armadura Germano – capaz de mover a cabeça e braços, levantar-se e sentar-se, abrir e fechar o maxilar da armadura, emitir sons, etc.

Mais recentemente Nicola Tesla (1845-1943) construiu um modelo de um barco tele-comandado através de impulsos hertzianos codificados.

Inicialmente os autómatos, projectados pelos Gregos, tinham fins lúdicos, estéticos e contemplativos faltando-lhes a noção de aplicabilidade prática, contributo este dado pelos Árabes cujas criações demonstravam, a par das preocupações estéticas e de entretenimento, preocupações de utilidade – a título exemplificativo veja-se o Lavatório de Mãos [Hayes, 1983].

Robô é uma palavra eslava que deriva de “robota”, significando “trabalho” [Sciavico e Siciliano, 1996]. Foi divulgada em 1921 pelo checoslovaco Karel

---

<sup>1</sup> Apresentam-se aqui alguns exemplos de cientistas que projectaram e construíram máquinas capazes de executar algumas tarefas humanas de forma incansável e obediente, o leitor interessado numa descrição histórica mais detalhada poderá consultar [Pedretti, 1981], [Tesla, 1983] e [Rosheim, 1994].

Capek<sup>2</sup>, no seu romance *Rossum's Universal Robots*. Capek descreveu os robôs como máquinas com braços trabalhando duas vezes mais que os humanos, de forma incansável, eficiente e obediente.

Distintamente de Capek, que considerou que os robôs se tornariam malévolos e dominariam o mundo, Asimov defendeu que a construção de robôs seguiria uma linha positiva e benéfica [Nof, 1999], concebendo-os como autômatos de aparência humana mas desprovidos de sentimentos [Sciavico e Siciliano, 1996]. A Asimov e à sua obra literária atribui-se a criação e divulgação do termo “Robotics” (Robótica).

Em 1950 Asimov publicou o seu livro *I Robot*, o qual gira em torno da inteligência humana dos robôs de acordo com as seguintes Leis da Robótica (que pela primeira vez enunciou na revista *Galaxy Science Fiction* e que publicou em 1945):

1ª Lei: Um robô não pode prejudicar um ser humano, ou quando inactivo, deixar um ser humano exposto ao perigo.

2ª Lei: Um robô deve obedecer às ordens dadas pelo ser humano, excepto se tais ordens estiverem em contradição com a 1ª Lei.

3ª Lei: Um robô deve proteger a sua própria existência desde que essa protecção não entre em conflito com a 1ª e a 2ª Lei [McKerrow, 1991] [Sciavico e Siciliano, 1996][Barrientos et al., 1997].

Em 1985, Asimov<sup>3</sup> acrescenta uma 4ª Lei que diz que “um robô não pode causar mal à humanidade ou por falta de acção permitir que a humanidade sofra perigos”. Esta lei, de maior prioridade que a primeira (a qual deve ser mudada nesse

---

<sup>2</sup> Veja-se [Capek, 1935] e [Capek, 1966].

<sup>3</sup> Veja-se [Asimov e Frenkel, 1985].

sentido), dá o primado ao bem comunitário sobre o bem individual [Barrientos et al., 1997].

Para concluir esta perspectiva histórica assinala-se que a robótica esteve na sua génese associada à ficção científica pois as palavras robô e robótica foram criadas por escritores desta área tendo sobretudo por base o ponto de vista de Asimov [Nof, 1999]. O desenvolvimento dos sistemas robóticos seguiu inicialmente uma linha com objectivos não produtivos (de distração e entretenimento) no entanto o acumular de experiências, conhecimentos e técnicas conduziu à construção e perfeição da maquinaria existente e conseqüentemente à produção inovadora de autómatos já com fins claramente produtivos.

### **2.3. ROBÓTICA**

A robótica é uma disciplina que envolve conhecimentos de várias áreas do saber com o objectivo de desenvolver e integrar técnicas e algoritmos para a criação, controlo e programação de robôs, com vista à sua aplicabilidade na indústria [McKerrow, 1986]. Neste sentido, preocupa-se com o desenho, construção e aplicação de máquinas multifuncionais e reprogramáveis – os robôs – capazes de não só executar tarefas humanas, mas também solucionar problemas, uma vez que têm a capacidade de identificar alterações colocadas quer pela própria tarefa, quer pelo meio envolvente, e também decidir as acções a desenvolver e executá-las.

Cada vez mais nos deparamos com a necessidade de realizar tarefas com grande eficiência e precisão em que, por um lado, a presença humana se torna difícil e arriscada e, por outro lado, até impossível. Ora, é cada vez mais necessário, viável e útil a presença de robôs para as realizar sem correr risco de vida. Efectivamente sendo o robô industrial uma máquina flexível por excelência, programável, reconfigurável e adaptável, pode executar tarefas próximas das humanas. Daí que actualmente se assista a uma necessidade crescente de se instalarem robôs “operários” nas fábricas, os quais vieram revolucionar a produção em série.

Assim, os robôs industriais são componentes essenciais para a realização de sistemas de manufatura autômatos, porque reduzem o custo de manufatura, aumentam a produtividade, melhoram a qualidade do produto e possibilitam a eliminação de tarefas prejudiciais para os operadores humanos (veja-se também [Sciavicco e Siciliano, 1996]).

Para algumas indústrias a evolução da área da robótica continua a ser um factor de fulcral importância nomeadamente o aumento da mobilidade dos robôs, a destreza e a autonomia das suas acções. É cada vez mais fundamental introduzir uma maior flexibilidade nos ambientes de produção (ou seja, flexibilidade de utilização em diferentes tarefas) através de mudanças de ferramenta e reprogramação.

Daqui resulta o conceito de automatização flexível, ou seja, o desenvolvimento de Sistemas Flexíveis de Produção (SFP) – por oposição à automatização rígida<sup>4</sup>. Note-se que actualmente, as empresas produzem em pequena/média escala (sistemas de produção flexíveis) em que a definição do produto é feita muitas vezes pelo cliente. Tal é incompatível com sistemas de produção rígidos vocacionados para a produção em massa.

A automação flexível, ou o desenvolvimento de sistemas flexíveis de produção, baseiam-se em sistemas integrados e computadorizados constituídos por vários equipamentos interligados através de uma Rede Local Industrial (RLI), e organizados segundo uma rede hierárquica do tipo CIM – *Computer Integrated Manufacturing*. Nessa rede os equipamentos de produção estão organizados em

---

<sup>4</sup> A automatização rígida constituída por máquinas dedicadas de elevada capacidade de produção está orientada para a produção em massa. A necessidade de manufatura de grandes quantidades de produto com alta produtividade e qualidade requerem o uso de sequências de operações físicas para serem executadas por máquinas especiais. Utilizam-se assim máquinas, ditas “dedicadas” só para uma determinada produção. Esta forma de automatização não se adapta aos nossos dias porque a enorme diversidade de produtos, o desaparecimento de fronteiras comerciais aliado à exigência de maior qualidade a mais baixo preço, torna o ciclo de vida dos produtos muito curto [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Células Flexíveis de Produção (CFP) existindo mecanismos de transporte entre as várias CFP [Kusiak, 1986][Waldner, 1992].

A principal vantagem dos SFP é a flexibilidade resultante da sua constituição: equipamentos programáveis e facilmente reconfiguráveis, o que lhes permite adaptar-se às novas exigências de produção (introduzir alterações num produto existente até à obtenção de um novo produto). Neste sentido, as exigências do mercado actual (produções em baixa/pequena escala) favorecem a utilização de robôs na indústria porque se adaptam com facilidade a diferentes tarefas, a situações que requerem elevada flexibilidade, repetibilidade e precisão. Assim, as áreas de adequação da robótica (a designada “Zona da Robótica” na Figura 2.1 nas palavras de [Myhr, 1999] e [Pires et al., 2001]) correspondem a produções industriais de pequena ou média dimensão (não se produz para *stocks*) e produtos que mudam rapidamente (tempos de vida curtos).

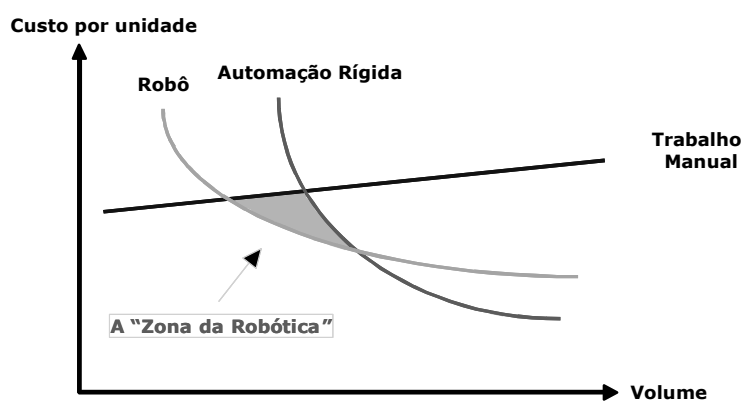


Figura 2.1. A “Zona da Robótica”.

É a robótica que sustenta as grandes modificações que se têm verificado no processo produtivo de manufactura: mudanças tecnológicas, globalização de mercados, competitividade, responsabilidades ambientais, aumento das expectativas do cliente, etc. [Nof, 1999]. No entanto, a robótica não vem substituir o homem, mas apoiá-lo para um desempenho mais eficiente do seu trabalho [Nof, 1999]. A par disto a robótica tem que ser considerada uma tecnologia em evolução caminhando no sentido da construção de sistemas inteligentes capazes

de realizar tarefas que, por enquanto, só o homem é capaz de executar. É pois nesse sentido que se dará a evolução tecnológica no cerne dos objectos da produção industrial (maior quantidade a mais baixo preço).

As necessidades a curto e médio prazo (em termos tecnológicos) apontam para máquinas com elevado desempenho, equipadas com sensores de controlo mais sofisticados, ferramentas programadas *off-line*, baixo consumo de energia, facilidade de utilização, a baixo preço. Assim, as novas exigências da robótica manifestam-se a nível da capacidade, da utilização e da conectividade dos robôs. Em termos da capacidade aponta-se para uma melhoria de performance, estruturas mais leves, maiores acelerações e velocidades e também controlo posicional mais preciso e versátil. Quanto à utilização, são necessários ambientes de programação mais poderosos e mais fáceis de usar (*software* de orientação do objecto e programação). Finalmente, em termos de conectividade, exige-se meios de acesso estandardizados com protocolos igualmente estandardizados para integração do processo produtivo.

Deste modo, com a contínua pressão para aumentar a produtividade de um produto final ao qual se exige uma qualidade uniforme, a indústria deverá cada vez mais basear-se em sistemas de automação. No entanto, para uma maior e mais rentável aplicabilidade dos robôs nas diversas áreas produtivas e tipos de indústria é fundamental conhecer os seus requisitos específicos, incluindo as necessidades funcionais e de manufactura, ter presente a componente mecânica do *design* dos sistemas robóticos, conhecer os interesses económicos e ter em conta considerações de ordem estética e ambiental [Sandler, 1999].

## 2.4. ROBÔ – DEFINIÇÃO

Um robô é uma máquina que pode ser programada para executar uma variedade de tarefas, do mesmo modo que um computador é um circuito eléctrico que pode ser programável para executar uma variedade de tarefas [McKerrow, 1986]. O termo robô também é usado para manipuladores que têm um sistema de controlo e são capazes de executar operações de uma forma autónoma.

Os progenitores mais directos dos robôs foram os telemanipuladores que precisam de ser comandados continuamente por um operador [Barrientos et al., 1997]. Não são considerados robôs porque o homem é o elemento que controla a execução da operação. Eles são providos de capacidades que potenciam a actividade humanas mas não substituem os seres humanos [McKerrow, 1991].

O dicionário *Webster's* define robô como um mecanismo automático que desempenha funções idênticas às desenvolvidas pelos seres humanos [Fu et al., 1987].

Também no livro *Robotics for Engineers*<sup>5</sup> encontram-se algumas definições do conceito robô. Por exemplo: um robô industrial é um manipulador mecânico programável capaz de se deslocar ao longo de diversas direcções, e tem na extremidade uma ferramenta (*end-effector*) que lhe permite realizar o trabalho executado pelos seres humanos na indústria. Para além disso é essencial incluir na definição de robô, palavras como “deslocamentos através de direcções restritas”, “ferramenta” e “trabalho em fábrica”.

A Divisão Internacional de Robótica da Sociedade de Engenharia de Manufatura define um robô como sendo um manipulador multifunções, reprogramável, utilizado para deslocar materiais ou outros objectos específicos através da programação de movimentos.

---

<sup>5</sup> Veja-se [Koren, 1985].

Na Enciclopédia Britânica, a palavra robô significa um mecanismo instrumental usado na ciência ou na indústria para substituir o lugar do ser humano.

No livro *A Glossary of Terms for Robotics*, “robô é um engenho mecânico que pode ser programado para desempenhar tarefas de manipulação ou locomoção sob um controle automático” [Sandler, 1999].

Os Japoneses definem um robô como um mecanismo que substitui o trabalho humano [Soska, 1985]. A Associação de Robôs Industriais Japoneses (JIRA)<sup>6</sup> classifica os robôs em seis categorias, desde os manipuladores manuais até robôs inteligentes [Schlssel, 1985].

Classificação JIRA:

- Classe 1: Manipulador – dispositivo com vários graus de liberdade actuado por um operador.
- Classe 2: Robô de sequência fixa – manipulador que realiza as sucessivas etapas de uma tarefa de acordo com um método pré-determinado e invariável, difícil de modificar.
- Classe 3: Robô de sequência variável – do mesmo tipo do da classe 2 mas as etapas podem ser modificadas facilmente.
- Classe 4: Playback robô – o operador humano realiza a tarefa manualmente, guiando ou controlando o robô que memoriza a trajetória. O robô pode então realizar esta tarefa de modo automático, recorrendo à informação anteriormente armazenada.
- Classe 5: Robô de controle numérico – o operador humano introduz um programa no robô em vez de o ensinar manualmente.
- Classe 6: Robô inteligente – robô com meios para compreender o seu ambiente e habilidade para completar com sucesso uma tarefa, mesmo que haja variações nas condições que o rodeiam e nas quais a tarefa tem de ser realizada (ambiente de trabalho).

---

<sup>6</sup> JIRA (*Japanese Industrial Robô Association*).

O Instituto do Robô Americano (RIA)<sup>7</sup>, apresenta uma definição mais restrita de robô: é um manipulador multifunções programável desenhado para movimentar material, peças ou mecanismos especializados através de vários movimentos programáveis para o desempenho de diversas tarefas [Schlussel, 1985][Barrientos et al., 1997]. Na classificação RIA somente as máquinas das classes 3, 4, 5 e 6 da classificação JIRA são consideradas robôs.

A Associação Francesa de Robótica Industrial (AFRI)<sup>8</sup> estabelece a seguinte classificação [Barrientos et al., 1997]:

Classificação AFRI:

Tipo A: Classe 1 da classificação JIRA.

Tipo B: Classes 2 e 3 da classificação JIRA.

Tipo C: Classes 4 e 5 da classificação JIRA (robô programável, conhecido como robô da primeira geração).

Tipo D: Classe 6 da classificação JIRA (robô que faz aquisição de certos dados do meio ambiente, conhecido como robô da segunda geração).

Mais simples e específica é a classificação de robôs por geração os quais são progressivamente mais inteligentes [Barrientos et al., 1997][Nof, 1999]. Nela são diferenciados os sistemas de robôs da primeira, segunda e terceira geração.

Nos sistemas da primeira geração os robôs têm como única função inteligente a aprendizagem de uma sequência de ações de manipulação coordenadas por um operador humano usando uma unidade de comando. Por isso repetem a tarefa programada sequencialmente, não tendo em conta possíveis alterações do meio envolvente.

---

<sup>7</sup> RIA (*Robotics Institute of América*).

<sup>8</sup> AFRI (*Association Française de Robôtique Industrielle*).

As restrições ao uso destes robôs incluem o posicionamento no espaço, o relacionamento específico com outras máquinas e a segurança para equipamento e pessoas que se encontrem próximos deste tipo de robôs. Neste sentido, Nof<sup>9</sup> considera que estes robôs são surdos, mudos e cegos.

Como o manuseamento de materiais, controlo de qualidade e montagem requerem graus sucessivos de comportamento inteligente (aspectos importantes nos capítulos do custo e desempenho industrial), estes robôs da 1ª geração cedo se apresentam insuficientes.

Os sistemas de robôs da segunda geração consistem na adição de um processador (computador) a um controlador (robô), tornando possível responder, em tempo real, ao controlo de movimentos de cada grau de liberdade e assim efectuar movimentos coordenados da ferramenta ao longo de trajectórias pré-determinadas. Sensores simples de força, rotação e proximidade podem ser integrados nestes sistemas robóticos, provendo-os de alguns graus de adaptabilidade ao ambiente, ou seja, podem localizar, classificar (visão), detectar esforços e adaptar os seus movimentos a essa informação. Assim, os robôs da 2ª geração possuem melhores e maiores capacidades sobretudo pela aquisição de informação (embora limitada) do seu meio envolvente e actuação consoante essa informação.

A maioria das aplicações de robôs da 2ª geração faz parte de uma manufactura automática.

Os sistemas de robôs da terceira geração têm sido introduzidos ao longo dos últimos anos. Caracterizam-se pela incorporação de processadores múltiplos em que, cada operação em sincronia desempenha funções específicas. Possui capacidade para planificação automática de tarefas.

Um sistema típico de robôs da 3ª geração inclui um processador de baixo nível para cada grau de liberdade, um supervisor (computador *master*), um coordenador destes processadores e funções de elevado nível. Cada processador de baixo nível

---

<sup>9</sup> Veja-se [Nof, 1999].

recebe sinais sensoriais internos, relativamente a dados de posição e velocidade. O computador *master* coordena as acções de cada grau de liberdade e pode desempenhar a coordenação de transformações de cálculo nos diferentes eixos de referência. Faz interfaces com sensores externos, com outros robôs e máquinas, programas de gestão de *stocks* e comunicação com outros sistemas de computadores.

## **2.5. POTENCIALIDADES DA UTILIZAÇÃO DE ROBÔS**

decorre do ponto anterior que, hoje em dia, grande potencial de um robô é a utilização de um sistema computacional de controlo (*hardware* e *software*) que, aliado à informação sensorial, lhe criará a flexibilidade e a controlabilidade necessárias ao desempenho de tarefas [Salant, 1990]. Assim, das várias vantagens de utilização dos robôs destacam-se a redução do custo de produção e aumento da produtividade, a melhoria da qualidade do processo, a possibilidade de trabalhar em ambientes nocivos ou de realizar tarefas de risco.

Quanto à primeira, redução do custo de produção e aumento da produtividade, podemos dizer que o custo da utilização dos robôs é significativamente inferior ao custo do trabalho equivalente executado pelo homem, uma vez que os robôs podem trabalhar em sobrecarga durante 95% do tempo, não necessitando de intervalos para café ou refeição nem para dormir. Não sofrem de fadiga, raramente “adoecem” e produzem um trabalho sempre igual<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Se os robôs trabalharem 22 horas por dia durante 7 dias por semana verifica-se que os robôs trabalham cerca de 48 mil horas num período de 6 anos – duração média de um robô; enquanto que um operário ao trabalhar 40 horas por semana, somará as 48 mil horas apenas no final de 30 anos. Neste sentido, os robôs podem ocupar o lugar dos homens, substituindo dezenas ou até centenas de homens numa linha de produção [Salant, 1990].

Também as possibilidades de evolução futura apontam para a queda nos custos efectivos dos robôs, tornando-os acessíveis para muitos sectores da indústria. Esta tendência para produzir cada vez mais baratos e mais potentes sistemas faz com que os robôs possam competir com a mão-de-obra barata (como a existente nos países do terceiro mundo).

Quanto à melhoria da qualidade do processo temos que a capacidade de precisão e repetibilidade da maioria dos robôs é muito superior à do ser humano. Aprendida uma tarefa, o robô pode repeti-la indefinidamente sem se cansar e com alto grau de precisão, ao passo que a precisão humana tende a diminuir com o tempo. Num determinado número de situações os robôs podem substituir os seres humanos, com um grau de desempenho e qualidade bastante superior, principalmente no caso de trabalhos desenvolvidos em ambientes hostis ou quando se trata de tarefas repetitivas em que se requer simultaneamente rapidez e precisão.

Para o funcionamento em ambientes nocivos, ou para a realização de tarefas de risco, os trabalhos que envolvem produtos tóxicos podem ser executados com segurança por um braço de robô. Os robôs são imunes ao meio, podendo trabalhar em ambientes muito quentes ou muito frios, com gases tóxicos, em ambientes radioactivos, ruidosos, etc.

Perspectivando a evolução futura, se inicialmente o robô foi visto como um sistema mecânico comandado electronicamente, caracterizando-se por uma grande capacidade de manipulação e de flexibilidade no desempenho de tarefas repetitivas, sem capacidade para reconhecer e detectar mudanças no meio envolvente, hoje, ao nível da concepção de máquinas assiste-se ao desenvolvimento de uma classe de robôs que podem apreender e reagir a mudanças no meio ambiente – são designados por robôs interactivos. O desenvolvimento destes robôs interactivos baseia-se na introdução de sensores e outros dispositivos que lhe permitem detectar mudanças no ambiente de trabalho e adaptar-se às novas condições como um operador humano. Os robôs contudo não

podem, por si só, resolver todos os problemas e por isso devem ser associados a outras técnicas, como a Inteligência Artificial.

Neste sentido, pensa-se que num futuro próximo se assistirá à introdução de novos sensores que permitirão formas de controlo mais sofisticadas e uma melhor integração do robô no sistema produtivo. Num futuro mais distante, aliada a esta capacidade sensorial, aparecerão controladores cada vez mais autômatos e inteligentes que aumentarão ainda mais a flexibilidade dos actuais robôs.

## **2.6. ROBÔS MANIPULADORES INDUSTRIAIS**

Neste ponto pretendemos analisar as tecnologias existentes no domínio dos robôs manipuladores industriais, os que actualmente são mais utilizados na indústria.

O *Robot Institute of America*<sup>11</sup> considera que um robô industrial é uma máquina multifuncional reprogramável, projectada para movimentar materiais, componentes, ferramentas ou dispositivos a partir de um conjunto de trajectórias programáveis com o objectivo de executar um conjunto pré-determinado de tarefas.

Assim, um robô industrial é uma máquina versátil e flexível (de geometria variável), programável, reconfigurável, com facilidade de ligação e auto-adaptabilidade ao meio ambiente (Figura 2.2).

---

<sup>11</sup> Veja-se [Sciavicco e Siciliano, 1996].



Figura 2.2. Alguns robôs industriais disponíveis.

Os robôs manipuladores industriais são elementos típicos de sistemas flexíveis de produção (SFP). Neste sentido, no âmbito da automatização industrial<sup>12</sup> utilizamos uma automatização flexível (que é numa evolução da automatização programável<sup>13</sup>). A automatização flexível tem como objectivo a manufactura de lotes variáveis de diferentes produtos minimizando o tempo perdido na reprogramação da sequência de operações e máquinas quando se muda de lote.

---

<sup>12</sup> A automatização industrial é a tecnologia destinada a substituir os seres humanos por máquinas num determinado processo de produção, com o objectivo de desempenhar operações físicas e processamento rápido e inteligente da informação [Sciavicco e Siciliano, 1996].

<sup>13</sup> A automatização programável consiste na utilização de sistemas programáveis, orientados para a produção em pequena/média escala e média produtividade. Um sistema de automatização programada permite a mudança das sequências de operação para executar as tarefas variando a gama de produtos. Assim, as máquinas utilizadas são mais versáteis e são capazes de produzir diferentes objectos do mesmo grupo tecnológico [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Requer um sistema fortemente integrado da tecnologia computacional com a tecnologia industrial.

Um robô industrial é composto por uma estrutura mecânica ou manipulador, por actuadores, sensores e por um sistema de controlo [Barrientos et al., 1997]. Para uma melhor compreensão da constituição de um robô, passa-se a descrever cada um dos seus elementos.

### **2.6.1. MANIPULADOR**

O manipulador (estrutura mecânica) é composto por uma sequência de corpos rígidos (elos) unidos por meio de articulações (juntas) e por um elemento terminal (a “mão” do robô). Assim, do manipulador fazem parte os segmentos ou elos que são as partes rígidas do braço de um robô e asseguram o posicionamento e mobilidade. As articulações ou juntas são as partes do braço do robô que permitem uma ligação móvel entre dois segmentos: o punho que lhe confere a orientação; o elemento terminal (mão do braço do robô) que permite a execução de uma tarefa específica. Em termos mecânicos, um robô é composto por um braço e um punho onde está colocada uma ferramenta. A ferramenta serve para agarrar uma peça do trabalho em curso ou executar tarefas no seu “volume de trabalho”. O volume de trabalho é o espaço dentro do qual o braço do robô pode manipular o punho.

O punho tem, em geral, três movimentos de rotação. A combinação destes movimentos orienta a ferramenta de acordo com a configuração do objecto. Estes três movimentos são muitas vezes chamados de “Pitch”, de “Yaw” e de “Roll” (Figura 2.3) [Salant, 1990].

- *Pitch* é uma rotação em torno de um eixo horizontal que vai da esquerda para a direita através do punho;
- *Yaw* é uma rotação em torno de um eixo vertical que vai da parte superior à parte inferior através do punho;
- *Roll* é uma rotação em torno de um eixo horizontal que vai de trás para a frente através do punho.

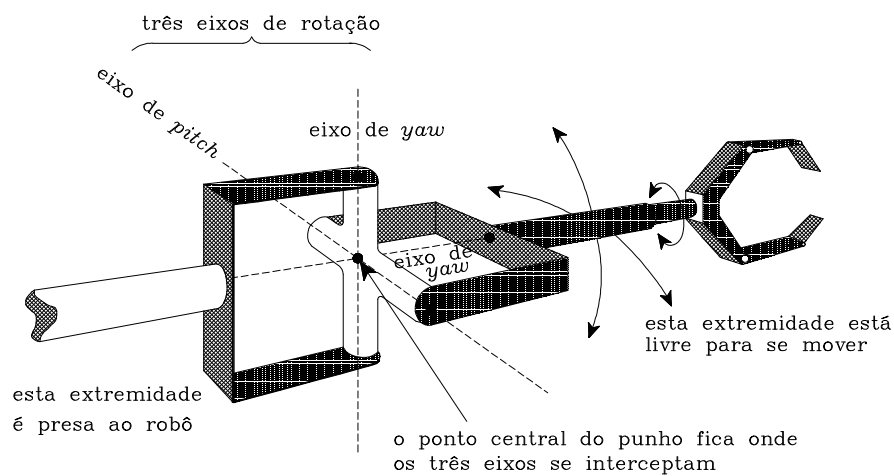


Figura 2.3. Os movimentos do punho do robô (*Pitch*, *Yaw* e *Roll*).

Assim, para um robô de seis juntas, o braço é um mecanismo de posição enquanto que o pulso é o mecanismo de orientação. O movimento de cada articulação pode ser de deslizamento, rotação ou uma combinação de ambos. O movimento deslizante (também designado linear) permite movimentos em linha recta, sem rotação. O movimento rotacional é o movimento que gira em torno de uma linha chamada eixo de rotação.

A Figura 2.4 mostra seis tipos de articulações.

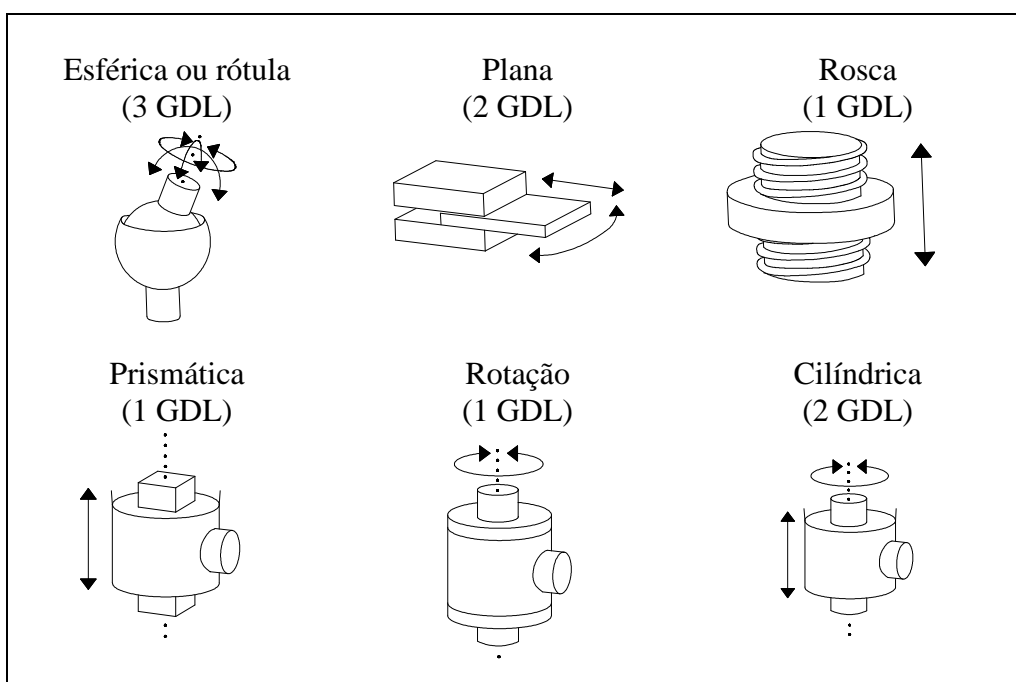


Figura 2.4. Tipos de articulações.

O braço do robô é frequentemente descrito pelo número de graus de liberdade (GDL)<sup>14</sup>. Em robótica, o número de graus de liberdade é o número de movimentos distintos que o braço pode realizar, ou seja, cada um dos movimentos independentes que cada articulação pode realizar relativamente à anterior. O número de graus de liberdade do robô é dado pela soma dos graus de liberdade das articulações que o compõem.

Os robôs só utilizam as articulações de rotação e as prismáticas com um grau de liberdade cada uma, em que o número de graus de liberdade do robô coincide com o número de articulações que o compõem. O emprego de diferentes combinações de articulações num robô dá lugar a diferentes configurações e características que têm de se ter em conta tanto no desenho e construção do robô como na sua aplicação.

<sup>14</sup> Consultar [Barrientos et al., 1997].

Embora um robô necessite apenas de dois ou três graus de liberdade para ser útil, por vezes são necessários mais de seis graus de liberdade para ser possível realizar tarefas mais complexas. Por exemplo, para posicionar e orientar um corpo no espaço são necessários seis parâmetros, três para definir a posição e três para a orientação. Portanto, se se pretende que um robô posicione e oriente o seu extremo no espaço (e com ele a peça ou ferramenta manipulada) são necessários pelo menos seis graus de liberdade.

Existem também casos em que é preciso mais de seis graus de liberdade para que o robô possa ter acesso a todos os pontos à sua volta. Quando trabalha num meio com obstáculos é necessário dotar o robô com graus de liberdade adicionais que lhe permitirão aceder a posições e orientações às quais, devido aos obstáculos, não consegue aceder com apenas seis graus de liberdade.

Do manipulador fazem ainda parte os elementos terminais também chamados de *end-effector* (ferramenta), utilizados para interagir directamente com o ambiente envolvente do robô. Os elementos terminais suportam melhor que o ser humano cargas pesadas e quentes faltando-lhes no entanto a sensibilidade da mão humana. Neste domínio tem sido feita bastante investigação com o objectivo de desenvolver elementos terminais capazes de segurar objectos delicados e irregulares.

Os elementos terminais são classificados em dois grupos: garras ou ferramentas especializadas.

As garras utilizam-se para agarrar e mover os objectos. As garras podem ser de vários tipos: pinças mecânicas para agarrar objectos rígidos<sup>15</sup>; grampos

---

<sup>15</sup> Para desenhar uma pinça tem que se ter em conta diversos factores, entre eles os que dizem respeito ao tipo de objecto - o peso, a forma, o tamanho do objecto, e os que se referem à manipulação a realizar - a força que é necessário exercer e manter para o suportar. Entre os parâmetros da pinça destaca-se o seu peso (que afecta as inércias do robô), o equipamento de accionamento e a capacidade de controlo.

electromagnéticos para agarrar objectos de ferro; ventosas de sucção a vácuo para agarrar objectos delicados com superfícies lisas; tornos ou grampos mecânicos; ganchos; mãos de três ou mais dedos; cabeça de soldadura; cabeça para pintura por pulverização; rectificadores; etc.

Quando o robô tem que realizar tarefas que não consistem em manipular objectos, tem que se recorrer ao uso de ferramentas especializadas<sup>16</sup>, especificamente desenhadas para cada tipo de trabalho. O tipo de ferramenta com que se pode dotar um robô é muito diversificado. Normalmente a ferramenta está fixada rigidamente no extremo do robô o qual está por vezes equipado com um dispositivo de alteração automático que lhe permite usar diferentes ferramentas durante a realização da tarefa [Barrientos et al., 1997].

### **2.6.2. ACTUADORES**

Os actuadores actuam nas articulações (juntas) para as mover, podendo ser rotacionais ou lineares, consoante produzem respectivamente um movimento giratório ou em linha recta. Os actuadores geram o movimento dos elementos do robô segundo as ordens dadas pela unidade de controlo. Podem ser eléctricos (accionados por motores eléctricos), hidráulicos (accionados por líquido comprimido) ou pneumáticos (accionados por gases comprimidos). Para seleccionar o actuador mais conveniente e apropriado, deve-se ter em conta as suas características específicas.

---

Na pinça devem-se situar sensores para detectar o estado da mesma (aberto ou fechado). Pode-se incorporar na pinça outro tipo de sensores para controlar o estado da peça, sistemas de visão que proporcionam dados geométricos dos objectos, detectores de proximidade, sensores de esforços, etc. [Barrientos et al., 1997].

<sup>16</sup> [Ferraté, 1986] e [Groover, 1989] apresentam um estudo detalhado das diferentes ferramentas e pinças para robôs.

## *Características dos actuadores*

### *Actuadores pneumáticos*

Os actuadores pneumáticos têm como fonte de energia o ar, com pressões entre 5 e 10 bar<sup>17</sup>. Deve-se ter em conta que o emprego de um robô com accionamento pneumático deverá dispor de uma instalação de ar comprimido, incluindo compressor, sistema de distribuição, filtros, secadores, etc. Geralmente, devido à compressibilidade do ar, os actuadores pneumáticos não conseguem uma boa precisão de posicionamento, e as cargas máximas suportadas (forças e momentos de torção) são menores relativamente aos sistemas hidráulicos.

No entanto, estas instalações pneumáticas são frequentes e existem em muitas fábricas onde há um certo grau de automatização.

A vantagem deste tipo de sistemas reside principalmente no seu baixo custo, segurança e facilidade de operação. De salientar que a maioria dos locais industriais já tem uma instalação de ar comprimido que pode ser utilizada. A sua principal utilização é em robôs de precisão.

### *Actuadores hidráulicos*

Os actuadores hidráulicos funcionam de um modo idêntico aos pneumáticos, mas em vez de ar utilizam-se fluidos a uma pressão compreendida entre os 50 e 100 bar<sup>18</sup> produzindo esforços de torção. As características do fluido utilizado pelos actuadores hidráulicos estabelecem diferenças entre estes e os actuadores pneumáticos.

---

<sup>17</sup> Veja-se [Deppert, 1994] e [Barrientos et al., 1997].

<sup>18</sup> Veja-se [Vockroth, 1994].

Como o grau de compressibilidade dos fluidos usados é inferior ao do ar, a precisão obtida neste caso é maior. Por motivos similares, é mais fácil nestes realizar um controlo contínuo, podendo posicionar o seu eixo em vários valores com notável precisão. As elevadas pressões de trabalho, dez vezes superiores à dos actuadores pneumáticos, permitem desenvolver esforços elevados.

Por outro lado, este tipo de actuadores apresenta estabilidade perante cargas estáticas ou seja, o actuador é capaz de suportar cargas, como o peso ou uma pressão exercida sobre uma superfície, sem gasto de energia. De sublinhar também a sua elevada capacidade de carga e relação potência-peso, assim como as suas características de autolubrificação e robustez. Deste modo, o limite do esforço de torção (ou força) é determinado pela pressão de segurança do sistema e o limite da velocidade de operação é determinado pelo calor interno do fluido. Como consequência destes limites, um sistema hidráulico é capaz de suportar cargas estáticas e cargas dinâmicas elevadas.

Apesar destas vantagens existem também certos inconvenientes: as elevadas pressões a que se trabalha podem levar à existência de fugas de fluido ao longo da instalação. Estes sistemas hidráulicos são mais complicados que os dos actuadores pneumáticos e ainda mais que os dos eléctricos, necessitando de filtros de partículas, purgadores de ar, sistemas de refrigeração e unidades de controlo de distribuição. Outras desvantagens destes actuadores são o modo de operação não linear e o seu elevado custo.

Os actuadores hidráulicos usam-se com frequência nos robôs que têm que mover grandes cargas e em situações onde a segurança não permita a existência de faíscas.

### *Actuadores eléctricos*

As características de controlo, sensibilidade e precisão dos accionamentos eléctricos levam a que sejam os mais usados nos robôs industriais actuais.

Dentro dos actuadores eléctricos podemos distinguir três tipos diferentes: servo-motores de corrente contínua (DC), motores de corrente alterna (AC) e motores passo a passo [Cortés, 1989].

Os servo-motores de corrente contínua são motores de pequena dimensão, de baixa inércia e que podem produzir elevadas acelerações e desacelerações. Ao contrário do motor passo a passo, são de operação contínua, isto é, não se movem segundo passos discretos. São controlados mediante referências de velocidade e são os mais utilizados actualmente devido ao seu fácil controlo.

Os motores passo a passo são motores muito leves, fiáveis e fáceis de controlar. Empregam-se para o posicionamento de eixos que não precisam de grandes potências (rotação de pinças) ou para robôs pequenos (educacionais); também são muito utilizados em dispositivos periféricos do robô, como mesas de coordenadas. A sua principal vantagem em relação aos tradicionais servo-motores é a capacidade para assegurar um posicionamento simples e exacto, podendo rodar de forma contínua e com velocidade variada.

Entre os inconvenientes podemos destacar os seguintes: o seu funcionamento a baixas velocidades não é estável; tende a sobreaquecer quando trabalha a velocidades elevadas e a sua potência nominal e a sua precisão (ângulo mínimo de rotação) são baixas.

Os motores de corrente alterna não têm tido aplicação no campo da robótica devido à dificuldade do seu controlo.

Apresenta-se seguidamente um quadro comparativo (Quadro 2.1) que permite uma leitura simples das vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de actuadores usados na robótica [Barrientos et al., 1997].

	Pneumáticos	Hidráulicos	Eléctricos
Energia	- ar comprimido (5 –10 bar)	- fluído (50-100 bar)	- corrente eléctrica
Vantagens	- baratos - rápidos - robustos	- rápidos - alta relação potência-peso - auto-lubrificantes - alta capacidade de carga - estabilidade frente a cargas estáticas	- precisos - fiáveis - fácil controlo - silenciosos
Desvantagens	- dificuldade de controlo contínuo - instalação especial (compressor, filtros) - ruidosos	- difícil manutenção - instalação especial (filtros, eliminação ar) - fugas frequentes - caros	- potência limitada

Quadro 2.1. Comparação entre os diferentes tipos de actuadores.

### 2.6.3. SENSORES

Os sensores (tacto, visão, pressão, proximidade, etc.) dão informação de estado do manipulador (sensores internos) e do ambiente exterior (sensores externos). Os sinais de entrada dos sensores do robô incluem dados de posição das articulações, da posição da garra (se está aberta ou fechada), do sensor de visão (se o robô tiver visão) e dados do sensor de tacto da ferramenta (se o robô tiver sensores de tacto ou força). São frequentemente codificadores rotacionais ou lineares, porque codificam informação sobre as posições das articulações, de forma a serem facilmente enviadas como sinais ao controlador do robô [Barrientos et al., 1997].

Para que um robô realize tarefas com adequada precisão, velocidade e inteligência é preciso que tenha conhecimento tanto do seu próprio estado como do estado do seu meio envolvente. A informação relacionada com o seu estado, fundamentalmente a posição das suas articulações, é conseguida através dos sensores internos; a informação do estado do seu meio envolvente adquire-se com sensores externos<sup>19</sup>.

A informação que a unidade de controlo do robô pode adquirir sobre o estado da sua estrutura mecânica (obtida através dos sensores internos) é relativa à sua posição e velocidade. Em robôs industriais os sensores internos mais utilizados são os que obtêm informação de posição, velocidade e de presença [Pallás, 1989][Nachtigal, 1990]. Assim, os sensores de posição empregam-se para o controlo de posição angular. Os sensores de velocidade permitem a captação da velocidade necessária para melhorar o comportamento dinâmico dos actuadores do robô. Os sensores de presença são os que possibilitam detectar a presença de um objecto dentro de um raio de acção determinado, ou seja, são auxiliares dos detectores de posição, para indicar os limites de movimento das articulações e permitir localizar a posição de referência. Esta detecção pode fazer-se com ou sem contacto com o objecto.

#### **2.6.4. SISTEMA DE CONTROLO**

O sistema de controlo é um sistema computacional que permite o controlo, a supervisão da estrutura (manipulador), para além de fornecer o ambiente de programação. A unidade de controlo representa o “cérebro” do robô. Não é mais do que um computador que recebe sinais de entrada dos sensores do robô e transmite sinais de saída para os actuadores.

---

<sup>19</sup> A informação sobre sensores externos pode ser pesquisada em textos e bibliografia especializada. Para sensores de força veja-se [Creus, 1979], para os de tacto veja-se [Russel, 1990], para a visão artificial veja-se [Gonzalez e Woods, 1992].

## **Capítulo 3**

### **CONTROLO DE ROBÔS**

### **3.1. INTRODUÇÃO**

A movimentação dos robôs e a manipulação de objectos implicam o conhecimento da sua posição e orientação, especialmente da extremidade do robô. Aspecto particularmente importante é o estudo do controlo do robô e a análise da interacção entre ele próprio e o meio envolvente. Neste capítulo apresentam-se diferentes ferramentas matemáticas com esse objectivo.

Para o controlo de robôs é necessário um modelo cinemático e dinâmico. A cinemática permite relacionar a posição e a orientação do elemento terminal do robô com os valores das suas coordenadas articulares. A dinâmica permite conhecer a relação entre o movimento do robô e as forças que o originam. Este capítulo faz referência aos conceitos fundamentais da cinemática e dinâmica de robôs manipuladores industriais.

### **3.2. CONCEPÇÃO E PROJECTO DE UM ROBÔ**

O processo de concepção e projecto de um robô passa por três fases fundamentais: análise da tarefa, análise da estrutura do robô e análise funcional do robô. A cada uma destas fases corresponde um trabalho específico.

A análise da tarefa e do respectivo processo produtivo consiste na determinação de tarefas mais específicas, métodos e ferramentas a utilizar em cada uma das fases da sua realização. Após esta primeira fase passa-se à análise da estrutura do robô que inclui as suas especificações funcionais, o *design* de concepção e o detalhe do *software* e *hardware*. Desta fase resultará documentação com toda a informação relevante para a manufactura, montagem, operação e manutenção do robô. A fase de concepção e projecto termina com a análise funcional do robô permitindo identificar as funções e níveis de desempenho que podem ser automatizados, especificando o meio envolvente em que a tarefa vai ser executada, ou seja, a verificação experimental do protótipo do robô.

No entanto, se forem detectadas deficiências em termos de qualidade, desempenho e potenciais custos deve-se passar a uma fase de melhoria de performances do robô, requerendo a modificação e variação das tarefas planeadas com o intuito de rentabilizar o desempenho [Nof, 1999].

A análise do esquema da Figura 3.1 (adaptada de [Nof, 1999]) e retratando o processo de desenvolvimento de um robô permite-nos tirar as seguintes conclusões:

- Há uma estreita relação entre a concepção e projecto de um robô e as exigências específicas da tarefa a realizar;
- A análise da tarefa a realizar pelo robô permite-nos definir alguns parâmetros (não estandardizados) fundamentais para o aumento da sua funcionalidade. Para tal devemos ter em conta as características dos objectos que se pretende manusear, transportar ou trabalhar, etc.;
- A concepção e projecto do robô tem que ser desenvolvida com base nas especificações funcionais, processo que é essencialmente intuitivo e deve ser sistemático;
- Os requisitos da configuração cinemática do robô são determinados pela complexidade da tarefa a executar;
- Para a determinação do desempenho geométrico, cinemático e mecânico na concepção e projecto de um robô, os sistemas de trabalho devem ser automatizados, seleccionados, observados e descritos.

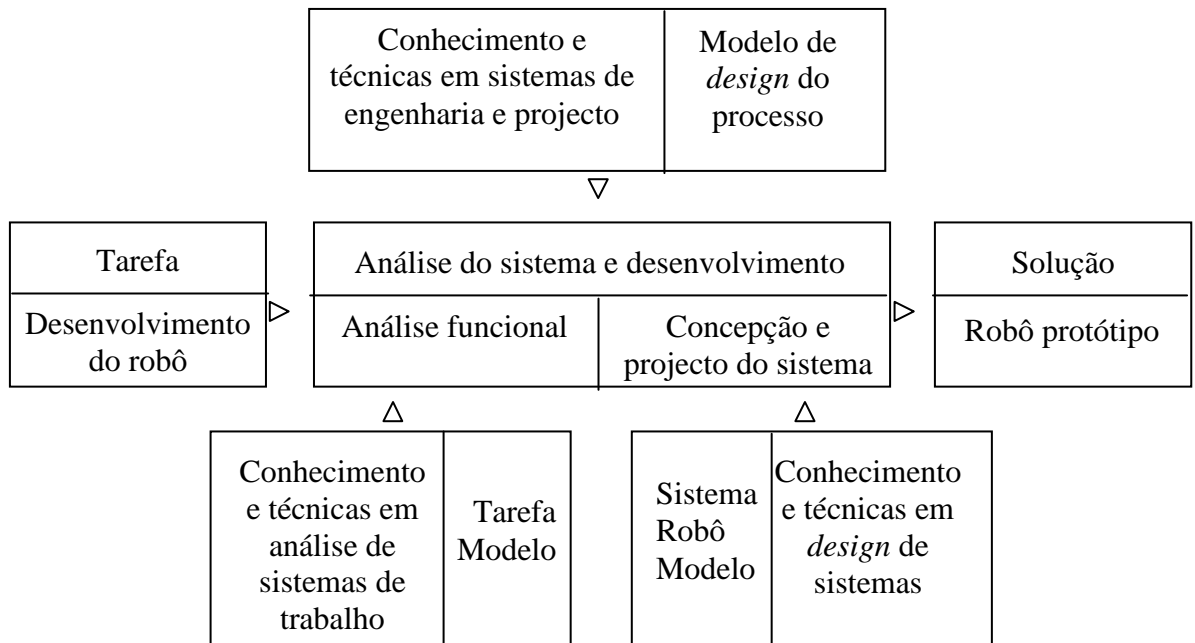


Figura 3.1. Processo de desenvolvimento de um robô.

### 3.3. CONFIGURAÇÃO FÍSICA DE UM ROBÔ

Actualmente os robôs manipuladores industriais são máquinas muito avançadas de grande precisão e repetibilidade. Do ponto de vista mecânico são estruturas constituídas por uma cadeia cinemática de corpos rígidos – elos (*links*) – interligados por juntas de revolução ou prismáticas as quais constituem os graus de mobilidade de uma estrutura (normalmente seis), tendo uma extremidade fixa (base do robô) e outra livre para se mover (elemento terminal) – ferramenta (*end-effector*) (Figura 3.2) [Sciavicco e Siciliano, 1996].

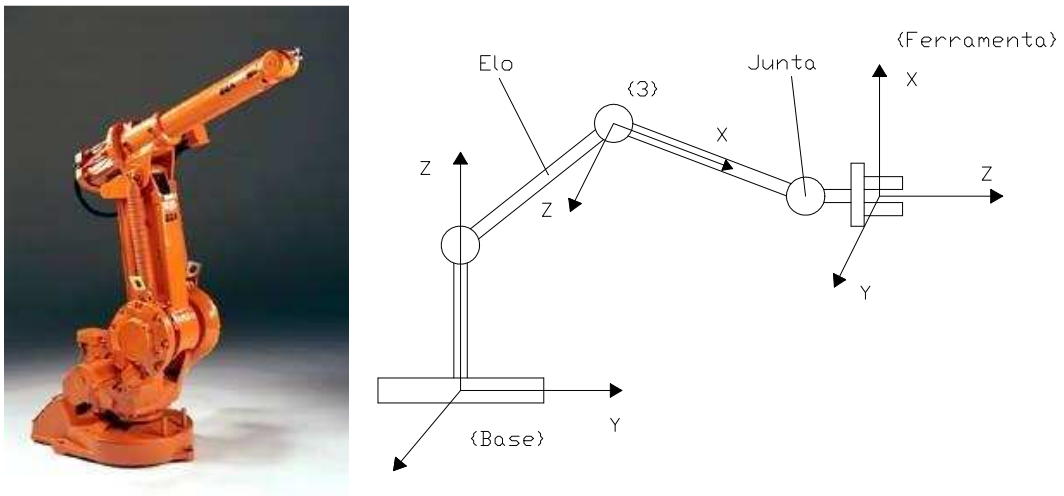


Figura 3.2. Robô manipulador.

O movimento resultante da estrutura é obtido pela composição dos movimentos elementares de cada elo em relação ao elo anterior. Como num braço humano, os robôs manipuladores industriais usam geralmente as primeiras juntas para posicionar a estrutura formada pelas restantes, as quais são usadas para orientar o elemento terminal. As juntas utilizadas para posicionamento formam a estrutura denominada braço. As juntas seguintes formam o punho, por analogia com o braço humano [Nof, 1999].

O punho tem geralmente duas configurações: *pitch-yaw-roll* (YXZ) como o punho humano, ou *roll-pitch-roll* (ZYZ) também denominado punho esférico (Figura 3.3a e 3.3b) [Pires, 2002]. Este último é o mais usado em robótica de manipulação, por ser o mais simples embora a sua estrutura apresente configurações singulares. Consideram-se aqui robôs com braço de revolução de estrutura antropomórfica e pulso esférico (Figura 3.4) [Sciavicco e Siciliano, 1996].

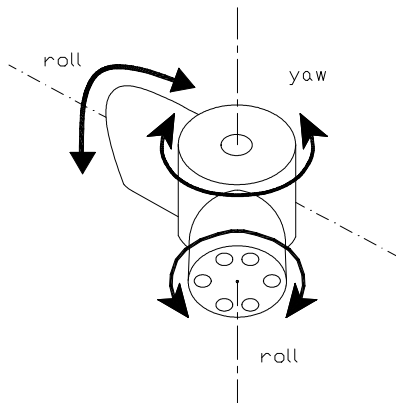


Figura 3.3a. Punho esférico ou *Roll-Pitch-Roll (ZYZ)*.

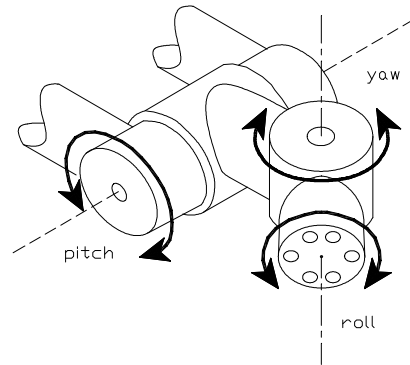


Figura 3.3b. *Pitch-Yaw-Roll (YXZ)*.

A mobilidade de um robô manipulador é assegurada pela presença das articulações. A articulação entre dois elos consecutivos pode ser prismática ou de revolução. Uma articulação prismática realiza um movimento relativo translacional entre dois elos, enquanto que uma articulação de revolução realiza um movimento relativo rotacional entre dois elos ( Figura 3.4 e 3.5) [Sciavicco e Siciliano, 1996].

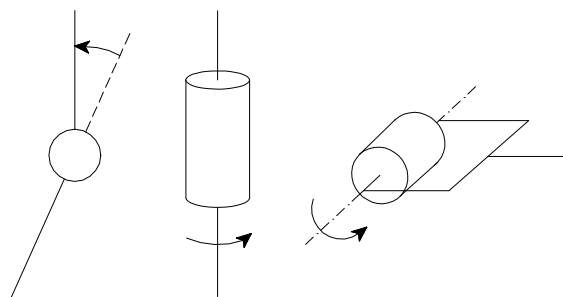


Figura 3.4. Articulação ou Junta de Revolução.

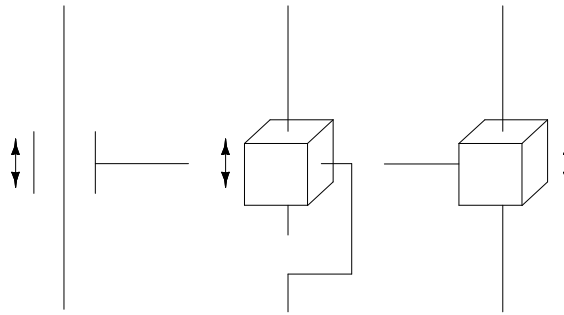


Figura 3.5. Articulação ou Junta Prismática.

Os robôs manipuladores industriais usados nas diversas tarefas de manufatura e montagem, utilizam uma das quatro categorias básicas da definição de movimento<sup>1</sup> [Fu et al., 1987][Sciavicco e Siciliano, 1996]:

- Coordenadas cartesianas ou retangulares (3 eixos lineares) – robô cartesiano;
- Coordenadas cilíndricas (2 eixos lineares e 1 de rotação) – robô cilíndrico;
- Coordenadas esféricas ou polares (1 eixo linear e 2 eixos de rotação) – robô polar;
- Coordenadas articuladas ou de revolução (3 eixos de rotação) – robô de revolução.

Um robô manipulador usa as juntas do braço para a função de posicionamento e as juntas do punho para a função de orientação. Existem assim cinco tipos principais de braços em robótica de manipulação: cartesiano, cilíndrico, polar, revolução e SCARA.

---

<sup>1</sup> Para um estudo mais detalhado sobre esta temática pode-se consultar [Fu et al., 1987], [McKerrow, 1991], [Sciavicco e Siciliano, 1996], [Nof, 1999] e [Sandler, 1999].

### 3.3.1. ROBÔ CARTESIANO

A coordenada do centro da ferramenta é especificada em função de 3 eixos de translação:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  como se vê na Figura 3.6a. A Figura 3.6b mostra a zona de trabalho de um robô de coordenadas cartesianas.

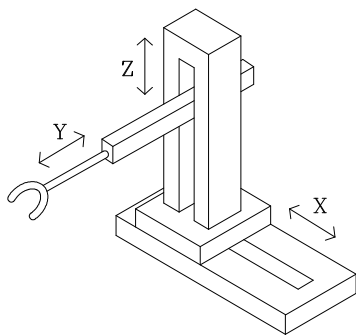


Figura 3.6a. Robô cartesiano.

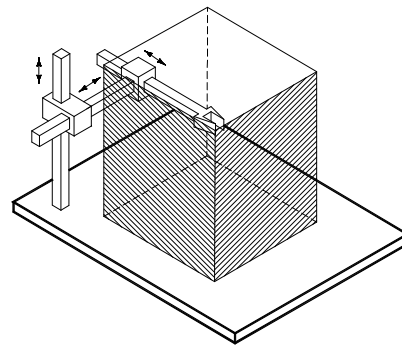


Figura 3.6b. Espaço de trabalho do robô cartesiano.

Os robôs cartesianos utilizam 3 juntas prismáticas em que os eixos são ortogonais. São muito usados para tarefas de manuseamento como paletização, armazenagem e tarefas de maquinação tais como jacto de água e corte por laser em que os movimentos do robô abrangem grandes superfícies. Por outro lado, os seus eixos principais podem ser organizados e dimensionados de acordo com as tarefas a realizar [Nof, 1999].

As vantagens e desvantagens dos sistemas cartesianos estão sintetizadas no Quadro 3.1.

Robô	Juntas	Coordenadas
Cartesiano	Prismáticas x Prismáticas y Prismáticas z	<p>Vantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- movimento linear segundo 3 direcções fácil de visualizar;</li> <li>- modelo cinemático simples;</li> <li>- estrutura rígida;</li> <li>- uso de equipamento pneumático de baixo custo para operações de <i>pick and place</i>.</li> </ul> <p>Desvantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- requer um grande volume de operações;</li> <li>- área de trabalho menor que o volume do robô;</li> <li>- de todos os sistemas de coordenadas é o que requer maior superfície;</li> <li>- as superfícies de movimento expostas necessitam ser cobertas ou revestidas contra atmosferas corrosivas.</li> </ul>

Quadro 3.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas cartesianos.

### 3.3.2. ROBÔ CILÍNDRICO

As coordenadas deste sistema são  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  tal como se mostra na Figura 3.7a. A zona de trabalho está representada na Figura 3.7b. O robô cilíndrico difere do cartesiano porque uma das articulações prismáticas é substituída por uma articulação de revolução [Sciavicco e Siciliano, 1996].

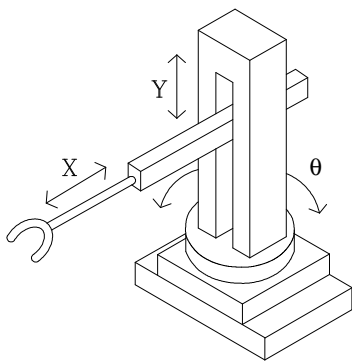


Figura 3.7a. Robô cilíndrico.

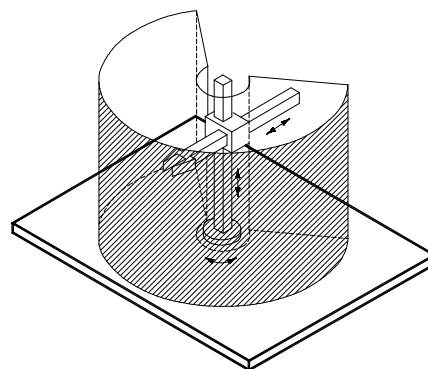


Figura 3.7b. Espaço de trabalho do robô cilíndrico.

As vantagens e desvantagens dos sistemas cilíndricos estão patentes no quadro seguinte.

<b>Robô</b>	<b>Juntas</b>	<b>Coordenadas</b>
Cilíndrico	Revolução $\theta$ Prismáticas x Prismáticas y	<p>Vantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sistema de coordenadas fácil de visualizar e calcular;</li> <li>- modelo cinemático simples;</li> <li>- movimentos lineares onde se podem utilizar sistemas hidráulicos, os quais podem fornecer potências elevadas;</li> <li>- bom acesso a cavidades e aberturas.</li> </ul> <p>Desvantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- área de trabalho restrita;</li> <li>- não pode atingir o volume cilíndrico perto do suporte vertical ou da base;</li> <li>- as juntas prismáticas dificultam a vedação ao pó e líquidos;</li> <li>- possibilidade de interferências na área de trabalho.</li> </ul>

Quadro 3.2. Vantagens e desvantagens dos sistemas cilíndricos.

### 3.3.3. ROBÔ POLAR

As coordenadas deste tipo de robô são  $z$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  tal como se mostra na Figura 3.8a. O manipulador polar difere do cilíndrico porque uma das duas juntas prismáticas é substituída por uma junta de revolução [Sciavicco e Siciliano, 1996]. A zona de trabalho pode-se visualizar na Figura 3.8b.

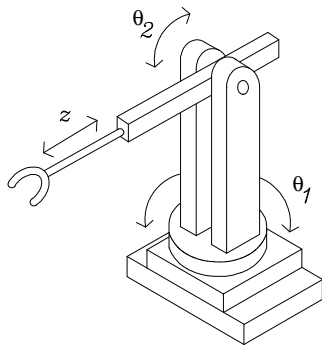


Figura 3.8a. Robô polar.

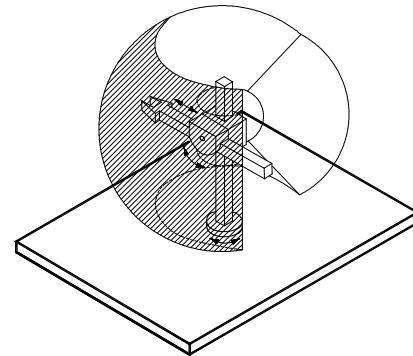


Figura 3.8b. Espaço de trabalho do robô polar.

As vantagens e desvantagens dos sistemas esféricos ou polares estão sintetizadas no Quadro 3.3.

Robô	Juntas	Coordenadas
Polar	Revolução $\theta_1$ Revolução $\theta_2$ Prismáticas z	<p>Vantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- cobre um volume grande a partir de um dado ponto central;</li> <li>- os dois movimentos de rotação podem ser facilmente isolados;</li> <li>- podem inclinar-se no sentido descendente para apanhar objectos.</li> </ul> <p>Desvantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- modelo cinemático complexo;</li> <li>- coordenadas complexas difíceis de visualizar e controlar;</li> <li>- movimento linear.</li> <li>- volume coberto limitado.</li> </ul>

Quadro 3.3. Vantagens e desvantagens dos sistemas esféricos ou polares.

### 3.3.4. ROBÔ DE REVOLUÇÃO

As coordenadas são 3 ângulos de rotação:  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  (Figura 3.9a). O robô de revolução é constituído por 3 articulações de revolução cujos eixos da primeira

articulação são ortogonais e os eixos das outras duas articulações são paralelos. A zona de trabalho mostra-se na Figura 3.9b [Nof, 1999].

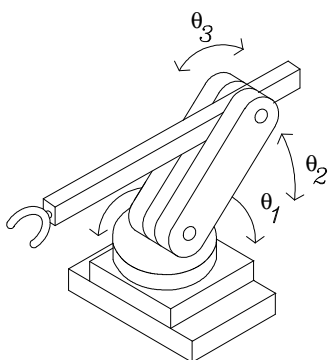


Figura 3.9a. Robô de revolução.

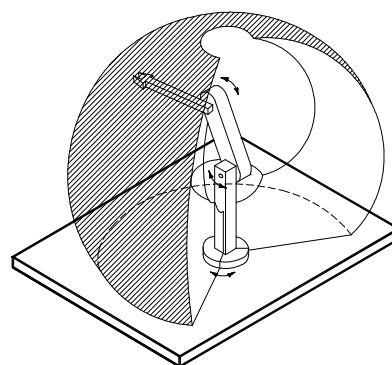


Figura 3.9b. Espaço de trabalho do robô de revolução.

As vantagens e desvantagens dos sistemas de revolução estão sintetizadas na Quadro 3.4.

Robô	Juntas	Coordenadas
Revolução	Revolução $\theta_1$ Revolução $\theta_2$ Revolução $\theta_3$	<p>Vantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- todas as ligações são rotativas;</li> <li>- máxima flexibilidade já que qualquer local pode ser atingido;</li> <li>- as ligações podem ser completamente estanques (juntas de revolução fáceis de vedar);</li> <li>- útil em ambientes sujos ou corrosivos, ou mesmo debaixo de água;</li> <li>- pode estender-se por cima e por baixo dos objectos.</li> </ul> <p>Desvantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- modelo cinemático complexo;</li> <li>- difícil para visualizar;</li> <li>- o controlo do movimento linear é difícil;</li> <li>- estrutura não rígida;</li> <li>- volume total coberto limitado.</li> </ul>

Quadro 3.4. Vantagens e desvantagens dos sistemas de revolução.

Deste modo, o tipo de sequência dos graus de liberdade começa nas articulações permitindo classificar os manipuladores em<sup>2</sup>:

- Cartesianos;
- Cilíndricos;
- Polares;
- Revolução;
- SCARA<sup>3</sup>.

É oportuno referir que o robô SCARA – uma subclasse dos robôs cilíndricos - (Figura 3.10a e 3.10b) tem 3 juntas de revolução e 1 junta prismática. Duas das juntas de revolução posicionam-se no plano horizontal permitindo a extensão do braço do robô a qualquer ponto do plano horizontal. No fim da extremidade do braço do robô existe um elo vertical o qual se pode deslocar segundo uma junta prismática. A ferramenta colocada no fim da ligação vertical pode rodar em torno do eixo vertical desta ligação (junta de revolução), facilitando o controlo e orientação da respectiva ferramenta no plano horizontal [Sciavico e Siciliano, 1996][Nof, 1999].

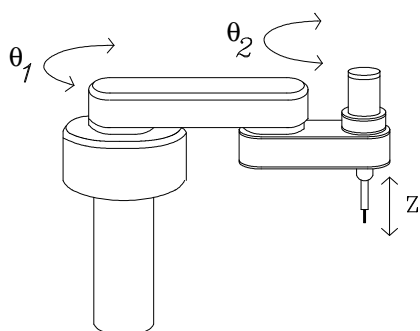


Figura 3.10a. Manipulador SCARA.

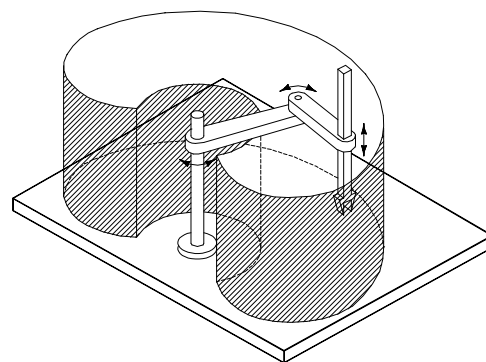


Figura 3.10b. Espaço de trabalho do SCARA.

<sup>2</sup> Veja-se [Fu et al., 1987], [McKerrow, 1991], [Sciavico e Siciliano, 1996], [Nof, 1999] e [Sandler, 1999].

<sup>3</sup> SCARA: *Selective Compliance Assembly Robot Arm* [Pires, 2002].

### 3.4. POSIÇÃO E ORIENTAÇÃO DE UM CORPO RÍGIDO

Para localizar um corpo rígido no espaço<sup>4</sup> é necessário representar a sua posição e orientação em relação a um eixo de referência, como se pode ver na Figura 3.11.

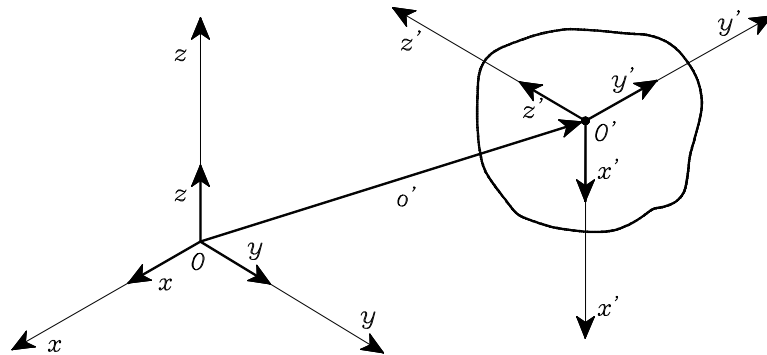


Figura 3.11. Posição e orientação de um corpo rígido.

Quando se trabalha no espaço (com 3 dimensões) um vector é definido em relação a um sistema ortogonal de referência O-xyz em que x, y, z são as componentes vectoriais em relação aos eixos de referência. A posição do ponto O' no corpo rígido em relação ao sistema ortogonal de referência O-xyz é dada pela seguinte expressão [Sciavicco e Siciliano, 1996]:

$$o' = o'_x + o'_y + o'_z$$

em que  $o'_x$ ,  $o'_y$ ,  $o'_z$  são componentes do vector  $o'$  ao longo do eixo de referência. A posição O' pode ainda ser representada por uma matriz vectorial:

---

<sup>4</sup> Para um estudo mais aprofundado da localização de um corpo rígido no espaço consultar [Groover et al., 1986], [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [McKerrow, 1991], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997].

$$o' = \begin{bmatrix} o'_x \\ o'_y \\ o'_z \end{bmatrix}$$

Na representação da orientação de um corpo rígido devemos ainda considerar um eixo ortogonal ( $O'-x'y'z'$ ) com origem no corpo rígido (cujas orientações se pretende definir), expresso pelos seus vectores unitários ( $x', y', z'$ ) em relação ao eixo de referência fixo ( $O-xyz$ ).

Estes vectores são expressos pelas seguintes relações, considerando como eixo de referência  $O-xyz$  [Sciavicco e Siciliano, 1996]:

$$x' = x'_x x + x'_y y + x'_z z$$

$$y' = y'_x x + y'_y y + y'_z z$$

$$z' = z'_x x + z'_y y + z'_z z$$

### 3.4.1. MATRIZ DE ROTAÇÃO

Seguindo a representação matricial, os três vectores unitários  $x', y', z'$  descrevem a orientação do corpo rígido em relação ao eixo de referência ( $O-xyz$ ) e podem ser combinados na seguinte forma matricial [Sciavicco e Siciliano, 1996]:

$$R = \begin{bmatrix} x' & y' & z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_x & y'_x & z'_x \\ x'_y & y'_y & z'_y \\ x'_z & y'_z & z'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'^T x & y'^T x & z'^T x \\ x'^T y & y'^T y & z'^T y \\ x'^T z & y'^T z & z'^T z \end{bmatrix}$$

a qual se designa por matriz de rotação<sup>5</sup> e que define a orientação do sistema do

---

<sup>5</sup> Matriz de rotação é uma forma de escrever os vectores unitários do sistema de referência associado ao objecto relativamente ao sistema de referência utilizado para comparação [Groover,

corpo rígido ( $O'-x'y'z'$ ) em relação ao sistema fixo de referência ( $O-xyz$ ). A matriz de rotação descreve ( $O'-x'y'z'$ ) relativamente a ( $O-xyz$ ). Esta matriz é obtida projectando os vectores unitários de ( $O'-x'y'z'$ ) sobre os eixos de ( $O-xyz$ ). Portanto os vectores coluna da matriz  $R$  são mutuamente ortogonais se representarem vectores unitários de um eixo de referência, isto é:

$$\begin{array}{lll} x'^T y' = 0 & y'^T z' = 0 & z'^T x' = 0 \\ x'^T x' = 1 & y'^T y' = 1 & z'^T z' = 1 \end{array}$$

Consequentemente  $R$  é uma matriz ortogonal:  $R^T R = I$ , em que  $I$  é a matriz identidade. Multiplicando ambos os lados da igualdade anterior pela matriz inversa  $R^{-1}$ , o resultado obtido é  $R^{-1} R^T R = I R^{-1} \Leftrightarrow R^T = R^{-1}$ . Assim a matriz transposta da matriz de rotação é igual à sua inversa [Sciavicco e Siciliano, 1996].

A matriz de rotação corresponde à representação da orientação de sistemas que rodam unicamente sobre um dos eixos principais do sistema de referência. Se  $O-xyz$  for um sistema de referência e o sistema do corpo rígido  $O-x'y'z'$  rodar em torno do eixo  $z$  de um ângulo  $\alpha$  (Figura 3.12) então, os vectores unitários no novo eixo podem ser descritos do seguinte modo [Barrientos et al., 1997]:

$$x' = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad y' = \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad z' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

em que a matriz de rotação do sistema  $O-x'y'z'$  em relação a  $O-xyz$  é

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

---

1986], [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [McKerrow, 1991], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997] apresentam um estudo detalhado sobre esta temática.

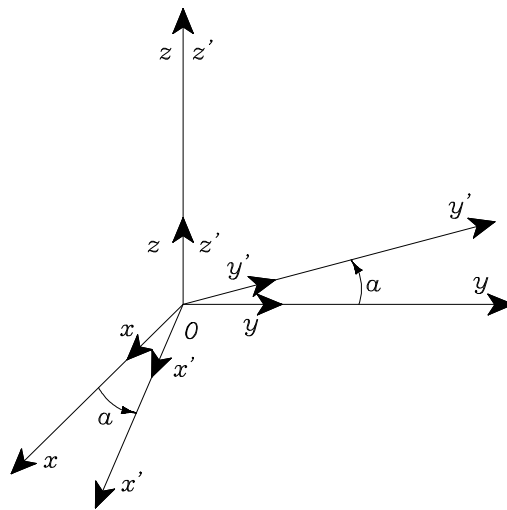


Figura 3.12. Rotação do sistema O-xyz de um ângulo  $\alpha$  em torno do eixo z.

Do mesmo modo conseguem-se obter as matrizes de rotação se o sistema rodar em torno de y com um ângulo  $\beta$  e em torno de x com um ângulo  $\gamma$ :

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$$

Estas matrizes são úteis para descrever as rotações em relação a um sistema arbitrário no espaço.

Do mesmo modo as matrizes de rotação elementares possuem a seguinte propriedade:  $R_k(-\vartheta) = R_k^T(\vartheta)$ ,  $k=x,y,z$ . Esta expressão permite atribuir um significado geométrico à matriz de rotação – a matriz R descreve a rotação, em torno de um sistema no espaço, necessária para alinhar os seus eixos de referência com os eixos de referência do corpo rígido [Sciavicco e Siciliano, 1996].

### *Representação de um Vector*

Para melhor se compreender o significado geométrico da matriz de rotação, considere-se o caso em que o sistema de referência do corpo coincide com o sistema de referência do espaço:  $o'=O$ , o que leva a que  $O$  seja um vector nulo ( $3 \times 1$ ).

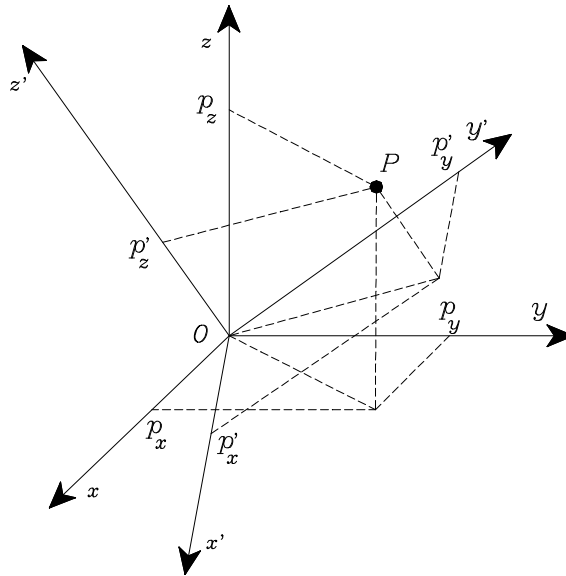


Figura 3.13. Representação do ponto  $P$  num sistema de duas coordenadas diferentes.

Nesse caso um ponto  $P$  no espaço (Figura 3.13) é representado<sup>6</sup> por

$$p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \text{ em relação ao sistema } O\text{-}xyz.$$

---

<sup>6</sup> Para saber mais sobre esta temática consultar [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [McKerrow, 1991], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997].

Em relação ao sistema O-x'y'z', temos  $p' = \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{bmatrix}$

p e p' são representações do mesmo ponto P, isto é

$$p = p'_x x' + p'_y y' + p'_z z' = [x' \ y' \ z'] p'$$

vindo

$$p = R p'.$$

A matriz de rotação R representa a matriz de transformação do vector de coordenadas O-x'y'z' em coordenadas do vector O-xyz.

Do ponto de vista das propriedades ortogonais, a transformação inversa é dada por  $p' = R^T p$  [Sciavicco e Siciliano, 1996].

### **3.4.2. MATRIZES DE TRANSFORMAÇÃO**

Como já foi referenciado, a posição de um corpo rígido no espaço é expressa em termos da posição de um ponto no corpo em relação ao eixo de referência (translação), enquanto a sua orientação é expressa em termos das componentes do vector unitário do eixo junto ao corpo (rotação). A figura que se segue considera um ponto P arbitrário no espaço.

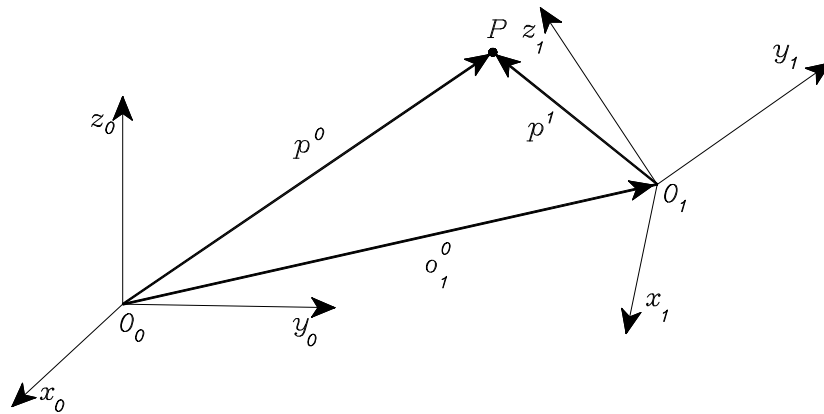


Figura 3.14. Representação de um ponto P em diferentes sistemas de coordenadas.

Considerando  $p^0$  o vector de coordenadas P em relação ao eixo de referência  $O_0-x_0y_0z_0$  e um outro eixo de referência no espaço  $O_1-x_1y_1z_1$  pode definir-se o vector  $o_1^0$  (descrevendo a origem do eixo 1 em relação ao eixo 0) e a matriz  $R_1^0$  (de rotação do eixo 1 em relação a 0). Assim, o vector  $p^1$  é um vector de coordenadas P em relação ao eixo 1.

$$p^0 = o_1^0 + R_1^0 p^1$$

Esta equação representa a transformação de coordenadas (translação acrescida de rotação) do vector soma entre os dois eixos [Sciavicco e Siciliano, 1996].

A transformação inversa pode ser obtida multiplicando ambos os lados por  $R_1^{0T}$ :

$$R_1^{0T} p^0 = (o_1^0 + R_1^0 p^1) R_1^{0T}$$

$$p^1 = -R_1^{0T} o_1^0 + R_1^{0T} p^0$$

$$p^1 = -R_0^1 o_1^0 + R_0^1 p^0$$

Utilizando a forma matricial de modo a representar a relação entre coordenadas do mesmo ponto em dois eixos de referência diferentes, obtém-se o vector  $p$  representado por  $\tilde{p}$  :

$$\tilde{p} = \begin{bmatrix} p \\ 1 \end{bmatrix}$$

Adoptando a representação dos vectores  $p^0$  e  $p^1$ , a transformação de coordenadas pode ser escrita em termos de uma matriz designada por matriz de transformação<sup>7</sup> [Sciavicco e Siciliano, 1996].

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} R_1^0 & o_1^0 \\ O^T & 1 \end{bmatrix}$$

Deste modo, verificamos que a transformação do vector do eixo 1 para o eixo 0 é expressa por uma matriz simples, que contém a matriz de rotação do eixo 1 em relação ao eixo 0 e o vector translação a partir da origem do eixo 0 até à origem do eixo 1. Note-se que à matriz de transformação não se aplica a propriedade da ortogonalidade:  $A^{-1} \neq A^T$  [Bottema e Roth, 1979].

Podemos então reescrever a transformação de coordenadas:

$$\tilde{p}^0 = A_1^0 \tilde{p}^1$$

$$\tilde{p}^1 = A_1^0 \tilde{p}^0 = (A_1^0)^{-1} \tilde{p}^0$$

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} R_1^{0T} & -R_1^{0T} o_1^0 \\ O^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0^1 & -R_0^1 o_1^0 \\ O^T & 1 \end{bmatrix}$$

---

<sup>7</sup> Para um estudo mais aprofundado ver [Groover et al., 1986], [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [McKerrow, 1991], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997].

Assim, a matriz de transformação apresenta a mudança de coordenadas entre dois eixos de uma forma compacta. Se os eixos têm a mesma origem, a matriz de rotação é reduzida. Se existirem mais do que dois sistemas de referência, também se definem matrizes de transformação compostas (obtidas por um processo idêntico ao anterior). Por exemplo, considerem-se três sistemas de referência  $O_0$ ,  $O_1$ ,  $O_2$  arbitrariamente transladados e orientados relativamente uns aos outros e defina-se um ponto  $P$  em  $O_2$ . Assim pode-se escrever [Sciavicco e Siciliano, 1996]

$$p^1 = A_2^1 p^2$$

$$p^0 = A_1^0 p^1 = A_1^0 A_2^1 p^2 = A_2^0 p^2$$

$$A_2^0 = \begin{bmatrix} R_1^0 R_2^1 & R_1^0 o_2^1 o_1^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3.4.3. REPRESENTAÇÕES MÍNIMAS DE ORIENTAÇÃO

De um modo geral, as matrizes de rotação dão-nos uma descrição redundante da orientação dos eixos. Elas são caracterizadas por nove elementos, os quais se relacionam por seis limitações devido às condições da ortogonalidade. No caso da descrição da orientação a partir da rotação em torno de um eixo arbitrário, a representação é obtida por quatro parâmetros: o ângulo e as três componentes do vector unitário. Isto implica que a orientação seja descrita por três parâmetros independentes que constituem uma representação mínima. Nas matrizes de rotação estas representações mínimas são obtidas pelos ângulos de Euler e ângulos fixos RPY (de *Roll/Pitch/Yaw*) [Sciavicco e Siciliano, 1996].

## Ângulos de Euler

Os ângulos de Euler<sup>8</sup> constituem uma representação mínima da orientação expressa em relação a um eixo e obtêm-se pela composição de rotações elementares. Todo o sistema  $O-x'y'z'$  pertencente ao corpo rígido (cuja orientação se quer descrever) pode definir-se em relação ao sistema  $O-xyz$  com o recurso a três ângulos  $\varphi$ ,  $\vartheta$ ,  $\psi$ , denominados ângulos de Euler. Rodando sucessivamente o sistema  $O-xyz$  sobre determinados eixos de um triedro ortogonal dos valores de  $\varphi$ ,  $\vartheta$ ,  $\psi$ , obtêm-se o sistema  $O-x'y'z'$ . Torna-se então necessário conhecer os valores dos ângulos e os eixos sobre os quais se realizam as rotações [Barrientos et al., 1997].

Ainda que existam diversas possibilidades de conjugação de ângulos de Euler, as mais usadas são a representação dos ângulos ZYZ e ângulos ZYX. A rotação descrita pela representação ZYZ (Figura 3.15) é a representação mais usual entre as que realizam as rotações sobre eixos previamente rodados.

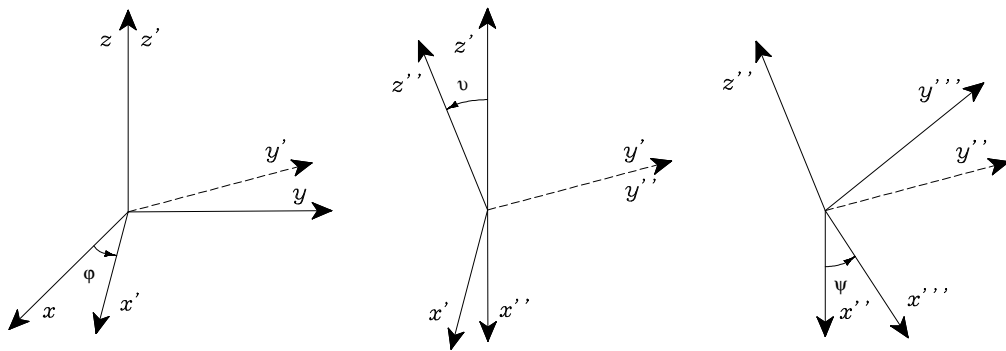


Figura 3.15. Representação dos ângulos de Euler ZYZ.

<sup>8</sup> [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [McKerrow, 1991], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997] apresentam um estudo detalhado sobre esta temática.

O'-x'y'z' obtém-se a partir de O-xyz fazendo as rotações marcadas na figura anterior, na ordem ZYZ rodando o sistema de referência original (O-xyz) até obter (O'-x'y'z').

Partindo dos sistemas O-xyz e O'-x'y'z', inicialmente coincidentes, pode-se colocar o sistema O'-x'y'z' em qualquer orientação tendo em conta as seguintes rotações elementares [Sciavicco e Siciliano, 1996]:

- Rotação do eixo de referência pelo ângulo  $\varphi$  em torno de z - matriz de rotação  $R_z(\varphi)$ .
- Rotação do eixo de referência pelo ângulo  $\vartheta$  em torno de y' - matriz de rotação  $R_{y'}(\vartheta)$ .
- Rotação do eixo de referência pelo ângulo  $\psi$  em torno de z'' - matriz de rotação  $R_{z''}(\psi)$ .

O resultado é

$$R_{EUL} = R_z(\varphi)R_{y'}(\vartheta)R_{z''}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\vartheta & 0 & \sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Psi & -\sin\Psi & 0 \\ \sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_\varphi c_\vartheta c_\psi - s_\varphi s_\psi & -c_\varphi c_\vartheta c_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\vartheta \\ s_\varphi c_\vartheta c_\psi + c_\varphi s_\psi & -s_\varphi c_\vartheta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\vartheta \\ -s_\vartheta c_\psi & s_\vartheta s_\psi & c_\vartheta \end{bmatrix}$$

Em que

$$\begin{aligned} c_\varphi &= \cos\varphi & s_\varphi &= \sin\varphi \\ c_\vartheta &= \cos\vartheta & s_\vartheta &= \sin\vartheta \\ c_\psi &= \cos\Psi & s_\psi &= \sin\Psi \end{aligned}$$

A rotação descrita pela representação ZYX é igual à rotação dos Ângulos RPY (ângulos fixos X-Y-Z) (Figura 3.16), pois, de uma forma geral, três rotações em torno de eixos fixos origina a mesma orientação dos eixos do sistema de referência em movimento.

### **Ângulos Fixos RPY (Roll, Pitch, Yaw)**

A representação da orientação em termos de ângulos RPY<sup>9</sup> (ângulos fixos em torno de X-Y-Z) (Figura 3.16) constitui uma representação obtida pela composição de rotações elementares em relação a um sistema de referência fixo. Neste caso o conjunto de ângulos ( $\varphi$ ,  $\vartheta$ ,  $\psi$ ) representam as rotações definidas em relação a um sistema de eixos fixo. O novo sistema de referência obtém-se a partir do sistema de referência fixo fazendo as rotações marcadas na figura seguinte e na ordem X-Y-Z [Sciavicco e Siciliano, 1996].

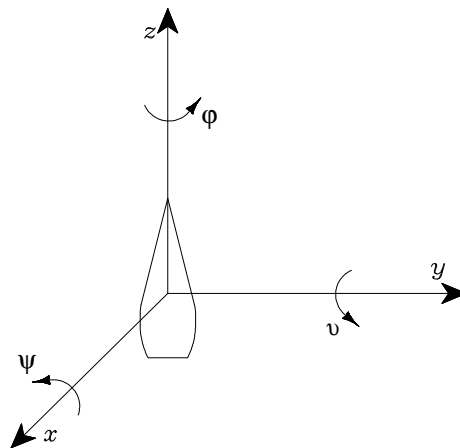


Figura 3.16. Representação dos ângulos RPY.

---

<sup>9</sup> [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [McKerrow, 1991], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997] apresentam um estudo detalhado sobre esta temática.

A rotação resultante a partir dos ângulos  $(\varphi, \vartheta, \psi)$  obtém-se pelas seguintes rotações elementares:

- Rotação do eixo de referência de um ângulo  $\psi$  em torno de x (*yaw*) - matriz de rotação  $R_x(\psi)$ .
- Rotação do eixo de referência de um ângulo  $\vartheta$  em torno de y (*pitch*) - matriz de rotação  $R_y(\vartheta)$ .
- Rotação do eixo de referência de um ângulo  $\varphi$  em torno de z (*roll*) - matriz de rotação  $R_z(\varphi)$ .

O resultado da orientação é obtido pela composição de rotações em relação ao eixo fixo [Sciavicco e Siciliano, 1996], dado por:

$$R_{RPY} = R_z(\varphi)R_y(\vartheta)R_x(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\vartheta & 0 & \sin\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\vartheta & 0 & \cos\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Psi & -\sin\Psi \\ 0 & \sin\Psi & \cos\Psi \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_\varphi c_\vartheta & c_\varphi s_\vartheta s_\psi - s_\varphi c_\psi & c_\varphi s_\vartheta c_\psi + s_\varphi s_\psi \\ s_\varphi c_\vartheta & s_\varphi s_\vartheta s_\psi + c_\varphi c_\psi & s_\varphi s_\vartheta c_\psi - c_\varphi s_\psi \\ -s_\vartheta & c_\vartheta s_\psi & c_\vartheta c_\psi \end{bmatrix}$$

Em que

$$\begin{aligned} c_\varphi &= \cos \varphi & s_\varphi &= \sin \varphi \\ c_\vartheta &= \cos \vartheta & s_\vartheta &= \sin \vartheta \\ c_\psi &= \cos \Psi & s_\psi &= \sin \Psi \end{aligned}$$

### 3.4.4. QUATÉRNIOS

Quatérnios<sup>10</sup> são formas de representar a orientação que podem ser utilizados como ferramenta matemática de grande versatilidade computacional para trabalhar com rotações e orientações. Um Quatérnio  $Q$  é constituído por quatro componentes  $(q_0, q_1, q_2, q_3)$  - conjunto de quatro números reais - que representam as coordenadas de um Quatérnio numa base  $\{e, i, j, k\}$ . É frequente designar a parte escalar do Quatérnio referente à componente em  $\underline{e}$  de  $q_0$ , e a parte vectorial às restantes componentes. Deste modo um Quatérnio pode-se representar como [Barrientos et al., 1997]:

$$Q = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3] = [S, V]$$

$$\vec{V} = q_1 \hat{i} + q_2 \hat{j} + q_3 \hat{k}$$

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$$

onde  $S$  representa a parte escalar e  $V$  representa a parte vectorial.

Para se utilizar os Quatérnios como metodologia de representação de orientações associa-se uma rotação de um ângulo  $\theta$  sobre um vector  $k$ , sendo o Quatérnio definido por:

$$Q = \text{Rot}(k, \theta) = \left( \cos \frac{\theta}{2}, k \sin \frac{\theta}{2} \right).$$

---

<sup>10</sup> [Hamilton, 1969], [Fu et al., 1987] e [Barrientos et al., 1997] apresentam um estudo detalhado sobre esta temática.

Assim, os Quatérnios definem uma rotação  $\theta$  em torno de um vector equivalente  $k$  definidos da seguinte forma [Fu et al., 1987]:

$$\hat{k} = k_x \hat{i} + k_y \hat{j} + k_z \hat{z}$$

$$q_0 = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right); q_1 = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) k_x; q_2 = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) k_y; q_3 = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) k_z$$

$$\text{Rot}(k, \theta) = \left( \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \hat{k} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)$$

verificando as seguintes propriedades:

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$$

$$Q_1 Q_2 = (S_1 S_2, S_1 \vec{V}_1 + S_2 \vec{V}_2 + \vec{V}_1 \vec{V}_2)$$

$$Q_1 \pm Q_2 = (S_1 \pm S_2, \vec{V}_1 \pm \vec{V}_2)$$

A matriz de rotação  $R$  equivalente a um determinado Quatérnio  $Q$  de componentes  $(q_0, q_1, q_2, q_3) = (S, \vec{V})$  é definida por:

$$R = \begin{bmatrix} 1 - 2(q_2)^2 - 2(q_3)^2 & 2(q_1 q_2 - q_3 q_0) & 2(q_1 q_3 + q_2 q_0) \\ 2(q_1 q_2 + q_3 q_0) & 1 - 2(q_1)^2 - 2(q_3)^2 & 2(q_2 q_3 - q_1 q_0) \\ 2(q_1 q_3 - q_2 q_0) & 2(q_2 q_3 + q_1 q_0) & 1 - 2(q_1)^2 - 2(q_2)^2 \end{bmatrix}$$

Inversamente, dada uma matriz de rotação  $R$ , o Quatérnio  $Q$  equivalente é obtido a partir de:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$q_0 = \frac{\sqrt{1 + r_{11} + r_{22} + r_{33}}}{2}; q_1 = \frac{\sqrt{1 + r_{11} - r_{22} - r_{33}}}{2}$$

$$q_2 = \frac{\sqrt{1 + r_{22} - r_{11} - r_{33}}}{2}; q_3 = \frac{\sqrt{1 + r_{33} - r_{11} - r_{22}}}{2}$$

em que o sinal dos elementos é definido por:

$q_0 > 0 \rightarrow -180^\circ < \theta < 180^\circ$  (este é normalmente o caso dos robôs manipuladores comerciais).

$$\text{sinal}(q_1) = \text{sinal}(q_1 q_0) = \text{sinal}(r_{32} - r_{23})$$

$$\text{sinal}(q_2) = \text{sinal}(q_2 q_0) = \text{sinal}(r_{13} - r_{31})$$

$$\text{sinal}(q_3) = \text{sinal}(q_3 q_0) = \text{sinal}(r_{21} - r_{12})$$

Usar Quatérnios, apesar de menos intuitivo, é mais eficiente do ponto de vista computacional, pois tanto em termos de multiplicação como de rotação em torno de um vector genérico, com os Quatérnios necessitamos de menos operações matemáticas para chegare ao resultado (comparativamente com as matrizes de rotação) [Fu et al., 1987].

### 3.5. CINEMÁTICA DE UM ROBÔ MANIPULADOR

A Cinemática é a parte da Física que procura descrever e caracterizar o movimento, usando descrições geométricas, variáveis de posição e as respectivas derivadas, isto é, velocidade, aceleração e todas as outras derivadas de ordem superior. A relação entre esse movimento e as forças e momentos que o originam é o objectivo da Dinâmica [Craig, 1989].

Tendo em conta a variedade e complexidade das estruturas que compõem os robôs manipuladores, a Cinemática descreve o movimento relativo dos vários sistemas de referência à medida que a estrutura se movimenta (associando sistemas de referência às várias partes da estrutura) (Figura 3.17 adaptada de [Pires, 2002]).

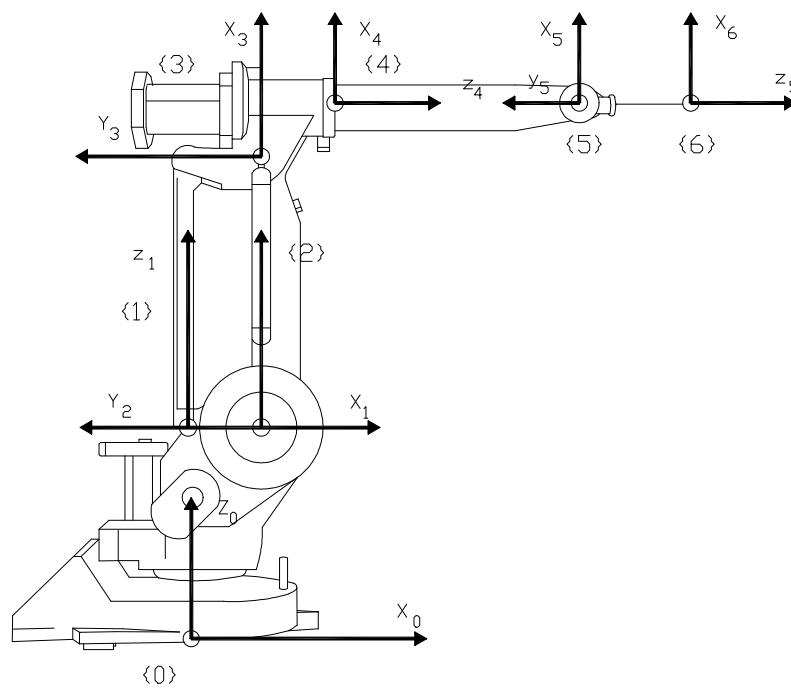


Figura 3.17. Sistemas de referência.

A Cinemática de um robô<sup>11</sup> estuda o movimento deste em relação a um sistema de coordenadas que se toma como referência. Nela são importantes dados como a posição, a velocidade, a aceleração e outras variáveis de posição em relação ao tempo (ou seja, a descrição analítica do movimento espacial do robô como uma função do tempo).

A Cinemática dos manipuladores permite então o estudo e definição de todas as propriedades geométricas e tempo baseadas no movimento tendo como objectivo fundamental a conjugação da relação entre a posição e orientação do elemento terminal do manipulador com os valores que tomam as suas articulações [Craig, 1989].

Um primeiro problema a resolver visa determinar qual a posição/orientação do elemento terminal do robô em relação a um sistema de coordenadas que se toma como referência conhecidos os valores das articulações (posições angulares de cada junta) e os parâmetros geométricos dos elementos do robô. Este é designado por Problema Cinemático Directo.

Um outro problema consiste em saber qual a configuração que um robô deve apresentar para uma posição, orientação e velocidade do elemento terminal do robô conhecidas. Este é considerado o Problema Cinemático Inverso [Fu et al., 1987][Barrientos et al., 1997]. Estas transformações envolvem três espaços de representação diferentes: espaço dos actuadores (motores), espaço das juntas e espaço cartesiano.

---

<sup>11</sup> Veja-se [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [McKerrow, 1991], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Nof, 1999].

### 3.5.1. CINEMÁTICA DIRECTA

A resolução do Problema Cinemático Directo<sup>12</sup> consiste em encontrar as relações que permitem conhecer a localização espacial do extremo do robô a partir dos valores das coordenadas das suas articulações. De um modo geral, o Problema Cinemático Directo reduz-se a encontrar uma matriz de transformação T que relaciona a posição e orientação do extremo do robô em relação ao sistema de referência fixo situado na base do mesmo [Barrientos et al., 1997].

Para a resolução do respectivo problema directo, podemos utilizar as matrizes de transformação, o algoritmo de Denavit-Hartenberg ou os Quatérnios.

Consideremos um manipulador constituído por n+1 elos ligados por n juntas. A cinemática directa determina a posição e a orientação da ponta do robô, como uma função de juntas variáveis. Como já foi referido, a posição e orientação de um corpo em relação a um eixo de referência é descrita pela posição do vector de origem e vectores unitários ligados ao respectivo corpo [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Em relação ao sistema de referência  $O_0-x_0y_0z_0$ , a função cinemática directa é expressa pela matriz de transformação:

$$T^0(q) = \begin{bmatrix} n^0(q) & s^0(q) & a^0(q) & p^0(q) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

em que q é (n×1) vectores de juntas variáveis; n, s, a são vectores unitários do eixo de referência da ponta do robô, e p é o vector posição da origem do sistema de referência em relação à origem do sistema de referência  $O_0-x_0y_0z_0$  (Figura 3.18).

---

<sup>12</sup> [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997] apresentam um estudo detalhado sobre este tema.

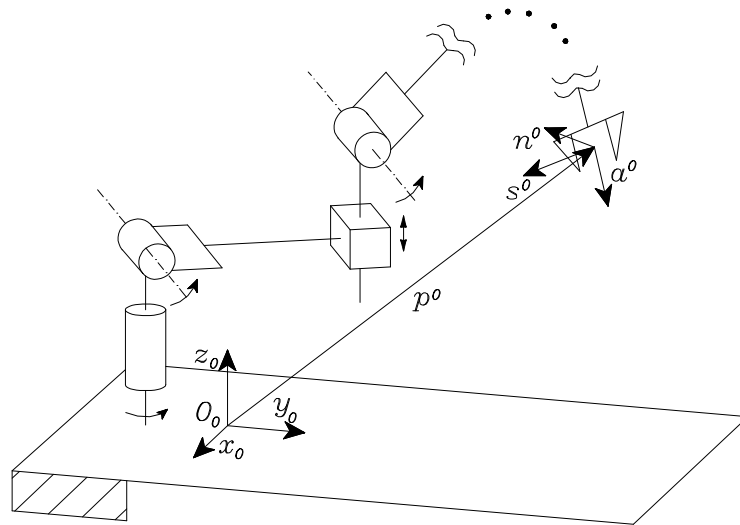


Figura 3.18. Descrição da posição e orientação do eixo da ponta do robô.

Assim  $n$ ,  $s$ ,  $\underline{a}$  e  $p$  são funções do vector  $q$  de várias juntas. O sistema  $O_0-x_0y_0z_0$  termina na base. O sistema de eixos colocado no fim do braço termina na ponta do robô e a sua escolha deve ter em conta a geometria particular da tarefa a realizar. Se a ponta do robô for uma garra, a origem do eixo de referência a colocar na ponta do robô deve ser localizada no centro da garra, o vector unitário  $\underline{a}$  é escolhido para a direcção de aproximação ao objecto, o vector unitário  $s$  é a normal a  $\underline{a}$  no plano de deslocação e o vector unitário  $n$  é a normal aos dois vectores anteriores [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Para manter a descrição da Cinemática, independente dos sistemas de referência bem como do tipo de estrutura, utiliza-se um conjunto de parâmetros que descrevem a estrutura usada. Esse conjunto de parâmetros e o conjunto de regras de definição constituem uma notação. A notação que utilizaremos será a notação de Denavit-Hartenberg.

### *Notação de Denavit-Hartenberg*

Desde que cada junta ligue dois ou mais elos consecutivos, podemos considerar primeiro uma descrição da relação cinemática entre elos consecutivos e posteriormente obter uma descrição geral da cinemática de um manipulador. Sendo assim a representação da posição e orientação de um corpo rígido é útil na obtenção de uma composição de coordenadas de transformação entre dois tramos consecutivos. Em geral os tramos podem ser escolhidos arbitrariamente. Para a definição dos elos é importante considerar as seguintes regras [Fu et al., 1987] [Sciavicco e Siciliano, 1996]:

1. Identificar, para cada junta, o eixo de rotação. As juntas devem ser numeradas consecutivamente de 1 a N.
2. Identificar a perpendicular comum entre cada dois eixos consecutivos ou o ponto de intersecção. A origem do sistema de referência  $\{i\}$  deve ser colocado no ponto de intersecção ou no ponto em que a perpendicular comum intersecta o eixo de rotação da junta  $\{i\}$ .
3. Colocar  $Z_i$  ao longo do eixo de rotação da junta  $\{i\}$ .
4. Colocar  $X_i$  a seguir a perpendicular comum, ou no caso dos eixos de rotação se intersectarem fazer  $X_i$  perpendicular ao plano contendo os dois eixos de rotação.
5. Colocar o sistema de referência  $\{0\}$  associado à base do robô e  $Z_0$  ao longo do eixo de rotação  $\{1\}$ . O sistema de referência  $\{N\}$  deve ser escolhido de forma a anular o maior número de parâmetros.

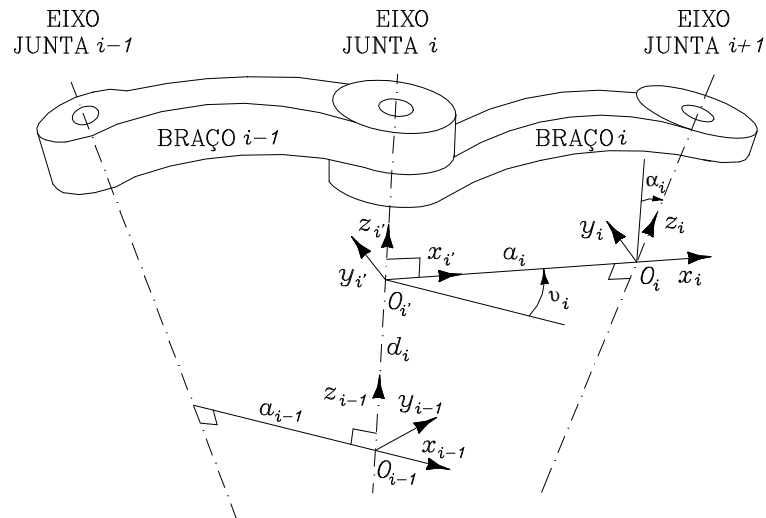


Figura 3.19. Parâmetros cinemáticos de Denavit-Hartenberg.

Considerando a Figura 3.19 [Sciavicco e Siciliano, 1996], o eixo  $i$  é o eixo da junta que liga o elo  $i-1$  ao elo  $i$ . A chamada notação de Denavit-Hartenberg<sup>13</sup> é adoptada para definir o eixo  $i$  do elo:

- Selecção do eixo  $z_i$  ao longo do eixo da junta  $i+1$ .
- Localizar a origem  $O_i$  na intersecção do eixo  $z_i$  com a normal (linha que contém a mínima distância entre duas linhas) ao eixo  $z_{i-1}$  e  $z_i$ .
- Selecção do eixo  $x_i$  ao longo da normal com o eixo  $z_{i-1}$  e  $z_i$  com a direcção da junta  $i$  até à junta  $i+1$ .
- Selecção do eixo  $y_i$ .

A notação de Denavit-Hartenberg dá-nos uma definição do eixo do elo, nos seguintes casos:

<sup>13</sup> Para mais conhecimentos sobre esta temática consultar [Denavit e Hartenberg, 1955], [Paul, 1981], [Fu et al., 1987], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997].

- Para o eixo 0, só a direcção do eixo  $z_0$  é especificada; então a escolha de  $O_0$  e  $x_0$  pode ser arbitrária.
- Para o eixo  $n$ , só a escolha do eixo  $x_n$  é limitada (normal ao eixo  $z_{n-1}$ ).
- Quando os dois eixos consecutivos são paralelos, a normal entre eles não está definida.
- Quando dois eixos consecutivos se intersectam, a direcção  $x_i$  é arbitrária.
- Quando uma junta  $i$  é prismática, só a direcção do eixo  $z_{i-1}$  é determinada.

Uma vez os elos estabilizados, a posição e orientação do eixo  $i$  em relação a  $i-1$  são obtidas pelos seguintes parâmetros:

- $a_i$  Distância entre  $O_i$  e  $O_{i-1}$ ;
- $d_i$  Coordenada de  $O_i$  ao longo de  $z_{i-1}$ ;
- $\alpha_i$  Ângulo entre os eixos  $z_{i-1}$  e  $z_i$  em relação a  $x_i$ ;
- $\vartheta_i$  Ângulo entre os eixos  $x_{i-1}$  e  $x_i$  em relação a  $z_{i-1}$ .

Os parâmetros de Denavit-Hartenberg são um conjunto de quatro parâmetros por elo/junta: dois descrevem o elo e os outros dois descrevem a ligação a um elo adjacente. Assim, um robô manipulador de seis graus de liberdade precisa de vinte e quatro parâmetros para definir completamente a sua estrutura [Fu et al., 1987].

Os parâmetros  $a_i$  e  $\alpha_i$  são sempre constantes e dependem da geometria da ligação entre juntas consecutivas estabelecidas pelo elo  $i$ . Dos dois parâmetros comuns, só um é variável dependendo do tipo de junta que liga o elo  $i-1$  ao elo  $i$ . Em particular:

- Se a junta  $i$  é de revolução a variável é  $\vartheta_i$ ,
- Se a junta  $i$  é prismática a variável é  $d_i$ .

Utilizando a notação de Denavit-Hartenberg e as regras de definição de sistemas de referência anteriormente apresentadas, é fácil concluir que a matriz de transformação que descreve a transformação de coordenadas entre o eixo  $i$  e o eixo  $i-1$  se obtém tendo em conta os seguintes passos [Fu et al., 1987][Sciavicco e Siciliano, 1996]:

1. Seleção do eixo alinhado com  $i-1$ .
2. Seleção da coordenada  $d_i$  ao longo do eixo  $z_{i-1}$  e rotação  $\vartheta_i$  em torno do eixo  $z_{i-1}$ ; a sequência alinha o eixo de referência com o eixo  $i'$  e é descrita pela matriz de transformação dada por:

$$A_{i'}^{i-1} = \begin{bmatrix} c_{\vartheta_i} & -s_{\vartheta_i} & 0 & 0 \\ s_{\vartheta_i} & c_{\vartheta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Alinhamento com o eixo  $i'$  através de  $a_i$  ao longo do eixo  $x_{i'}$  e rotação  $\alpha_i$  em torno do eixo  $x_{i'}$ ; a sequência alinha o eixo de referência com o eixo  $i$  e é descrita pela matriz de transformação

$$A_i^{i'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. A resultante da transformação de coordenadas é obtida por

$$A_i^{i-1}(q_i) = A_{i'}^{i-1} A_i^{i'} = \begin{bmatrix} c_{\vartheta_i} & -s_{\vartheta_i} c_{\alpha_i} & s_{\vartheta_i} s_{\alpha_i} & a_i c_{\vartheta_i} \\ s_{\vartheta_i} & c_{\vartheta_i} c_{\alpha_i} & -c_{\vartheta_i} s_{\alpha_i} & a_i s_{\vartheta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Nota:  $c_{\vartheta_i} = \cos(\vartheta_i)$ ;  $s_{\vartheta_i} = \sin(\vartheta_i)$

$c_{\alpha_i} = \cos(\alpha_i)$ ;  $s_{\alpha_i} = \sin(\alpha_i)$

De referir que a matriz de transformação do eixo  $i$  para  $i-1$  é apenas função das juntas variáveis  $i$ , isto é,  $\vartheta_i$  para juntas de revolução ou  $d_i$  para juntas prismáticas.

### 3.5.2. ESPAÇO DA JUNTA E ESPAÇO OPERACIONAL

Como foi descrito, a equação da cinemática directa do manipulador permite representar a posição e a orientação do eixo da ponta do robô como uma função da variável da junta em relação ao eixo da base. Se a tarefa for específica da ponta do robô é necessário assinalar a posição e a orientação do elemento terminal do robô como uma função do tempo (trajectória). A posição pode ser descrita por um número mínimo de coordenadas com vista à geometria da estrutura. A orientação pode ser especificada em termos de uma representação mínima descrevendo a rotação do eixo da ponta do robô em relação ao eixo da base, isto é, ângulos de Euler ou ângulos RPY. Deste modo é possível descrever a posição e a orientação do manipulador através de um vector ( $m \times 1$ ) com  $m \leq n$ ,

$$x = \begin{bmatrix} p \\ \phi \end{bmatrix}$$

onde  $p$  descreve a posição da ponta do robô e  $\phi$  a orientação.

Esta representação da posição e orientação permite a descrição das tarefas da ponta do robô em relação ao número inerente de parâmetros independentes. O vector  $x$  é definido no espaço em que a tarefa do manipulador é especificada – espaço este normalmente chamado de espaço operacional [Craig, 1989][Sciavicco e Siciliano, 1996].

Por outro lado, o espaço da junta (configuração no espaço) decompõe o espaço num vector ( $n \times 1$ ) de variáveis de junta

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix},$$

em que  $q_i = \vartheta_i$  se a junta é de revolução e  $q_i = d_i$  se a junta for prismática.

Tendo em conta que a posição e orientação dependem das juntas variáveis, a equação da cinemática directa pode ser escrita da seguinte forma:  $x = k(q)$  [Sciavicco e Siciliano, 1996].

### **3.5.3. ESPAÇO DE TRABALHO**

O campo operacional onde o robô executa o seu desempenho é designado por espaço de trabalho. Este é a região descrita pela origem do eixo da ponta do robô quando todas as juntas do manipulador executam todos os movimentos possíveis. O espaço de trabalho depende da geometria do manipulador e dos limites mecânicos das juntas. Por vezes estabelece-se a distinção entre espaço de trabalho de alcance e espaço de trabalho com destreza. Espaço de trabalho com destreza é a região em que a origem do eixo da ponta do robô pode ser descrita enquanto se obtém diferentes orientações. O espaço de trabalho de alcance é aquele em que a origem do eixo da ponta do robô pode ser obtida com pelo menos uma orientação. [Craig, 1989][Sciavicco e Siciliano, 1996].

### 3.5.4. CINEMÁTICA INVERSA

A equação da cinemática directa na forma  $x = k(q)$  estabelece uma relação funcional entre as várias juntas e a posição/orientação da ponta do robô. O Problema da Cinemática Inversa<sup>14</sup> consiste na determinação das várias juntas correspondentes a uma dada posição/orientação da ponta do robô. Isto é, pretende-se encontrar os valores que devem tomar as coordenadas articuladas do robô ( $q$ ) para que o seu extremo se posicione e oriente segundo uma determinada localização espacial.

O processo de obtenção das equações, no problema cinemático inverso, depende da configuração do robô. A solução do problema transforma as especificações do movimento (designadas pela ponta do robô no espaço operacional) de acordo com o movimento espacial das juntas correspondentes e que permitem a execução do movimento pretendido.

Como se pode verificar pela equação da cinemática directa, a posição da ponta do robô e a matriz de rotação podem ser conjugadas de uma única maneira uma vez que as juntas variáveis são conhecidas. No entanto, o Problema da Cinemática Inversa é muito mais complexo pelas seguintes razões [Sciavicco e Siciliano, 1996]:

- A solução da equação em geral não é linear e nem sempre é possível encontrar uma solução final;
- Podem existir soluções múltiplas;
- Podem existir soluções infinitas;
- Pode não existir uma solução admissível do ponto de vista da estrutura cinemática de um manipulador.

---

<sup>14</sup> Para um estudo mais pormenorizado sobre esta temática consultar [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997].

A existência de soluções está garantida se a posição e orientação da ponta do robô (manipulador) pertencer ao seu espaço de trabalho com destreza. Por outro lado, a existência de soluções múltiplas depende do número de graus de mobilidade e dos parâmetros de Denavit-Hartenberg que admitem um grande número de soluções [Sciavicco e Siciliano, 1996].

### 3.5.5. CINEMÁTICA DIFERENCIAL

A Cinemática Diferencial estabelece a relação entre a velocidade das juntas e a velocidade angular e linear da ponta do robô. Esta relação é designada na forma matricial como Jacobiano geométrico o qual depende da configuração do manipulador. Por outro lado, se a localização da ponta do robô é expressa em referência a uma representação mínima no espaço, é possível conjugar a matriz Jacobiana por diferenciação da função cinemática directa em relação às juntas variáveis. A resultante Jacobiana designa-se por Jacobiano analítico. O Jacobiano constitui uma das mais importantes ferramentas que caracterizam um manipulador [Craig, 1989][Sciavicco e Siciliano, 1996].

#### *Jacobiano Geométrico*

Considerando  $n$  graus de liberdade de um manipulador, a equação da cinemática pode ser escrita na forma:

$$T(q) = \begin{bmatrix} R(q) & p(q) \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$$

onde  $q = [q_1 \ \dots \ q_n]^T$  é o vector das juntas variáveis. A posição e orientação da ponta do robô variam quando  $q$  varia [Barrientos et al., 1997].

O objectivo da cinemática diferencial é encontrar uma relação entre a velocidade da junta e as velocidades linear e angular da ponta do robô. Ou seja, expressar a velocidade linear da ponta do robô por  $\dot{p}$  e a velocidade angular por  $\omega$ , como função da velocidade da junta  $\dot{q}$ , significa que:

$$\dot{p} = J_p(q)\dot{q} \quad \text{velocidade linear}$$

$$\omega = J_o(q)\dot{q} \quad \text{velocidade angular}$$

onde  $J_p$  é uma matriz ( $3 \times n$ ) relativa à contribuição da junta de velocidade  $\dot{q}$  para a velocidade linear da ponta do robô  $\dot{p}$ , enquanto que  $J_o$  é uma matriz ( $3 \times n$ ) relativa à contribuição da velocidade da junta  $\dot{q}$  para a velocidade angular  $\omega$  da ponta do robô.

Então temos:

$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \omega \end{bmatrix} = J(q)\dot{q}$$

a qual representa a Equação Cinemática Diferencial de um manipulador.

O Jacobiano geométrico de um manipulador é uma matriz ( $6 \times n$ ):

$$J = \begin{bmatrix} J_p \\ J_o \end{bmatrix}$$

a qual é função das várias juntas [Sciavicco e Siciliano, 1996].

### *Derivada da Matriz de Rotação*

A equação da cinemática directa descreve a posição e orientação da ponta do robô em função das várias juntas, em termos do vector posição e da matriz de rotação. Se o objectivo é determinar a velocidade linear e angular, é conveniente considerar a derivada da matriz de rotação em relação ao tempo [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Considerando a matriz de rotação em função do tempo:  $R = R(t)$  e aplicando a propriedade ortogonal, temos:

$$R(t)R^T(t) = I$$
$$\dot{R}(t)R^T(t) + R(t)\dot{R}^T(t) = 0$$

considerando

$$S(t) = \dot{R}(t)R^T(t)$$

a matriz  $S$  ( $3 \times 3$ ) é simétrica desde que

$$S(t) + S^T(t) = 0$$

se multiplicarmos ambos os lados da expressão (a) por  $R(t)$  obtemos

$$\dot{R}(t) = S(t)R(t)$$

esta expressão permite concluir que a derivada de  $R(t)$  em relação ao tempo é função de  $R(t)$  (de ela própria) [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Considerando um vector  $p'$  constante e o vector  $p(t) = R(t)p'$ , a derivada em relação ao tempo de  $p(t)$  é

$$\dot{p}(t) = \dot{R}(t)p'$$

$$\dot{p}(t) = S(t)R(t)p'$$

Se o vector  $\omega(t)$  designar a velocidade angular do eixo  $R(t)$  em relação ao eixo de referência tempo  $t$ , então

$$\dot{p}(t) = \omega(t)R(t)p'$$

A matriz  $S(t)$  descreve um vector produto entre o vector  $\omega$  e o vector  $R(t)p'$ . A matriz  $S(t)$  é simétrica representando na diagonal principal as componentes do vector  $\omega(t) = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$  na forma

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

a qual justifica a expressão  $S(t) = S(\omega(t))$ . Por outro lado, se  $R$  é a matriz de rotação, o vector pode ser representado na seguinte relação:

$$R S(\omega) R^T = S(R \omega).$$

### ***Velocidade do Elo***

Considerando um elo genérico  $i$  de um manipulador numa cadeia cinemática aberta e de acordo com a notação de Denavit-Hartenberg, o elo  $i$  está ligado à junta  $i$  e  $i+1$ . O eixo  $i$  está ligado ao elo  $i$  e tem origem ao longo da junta  $i+1$ ,

enquanto o eixo  $i-1$  tem origem ao longo do eixo da junta  $i$  (Figura 3.20) [Sciavicco e Siciliano, 1996].

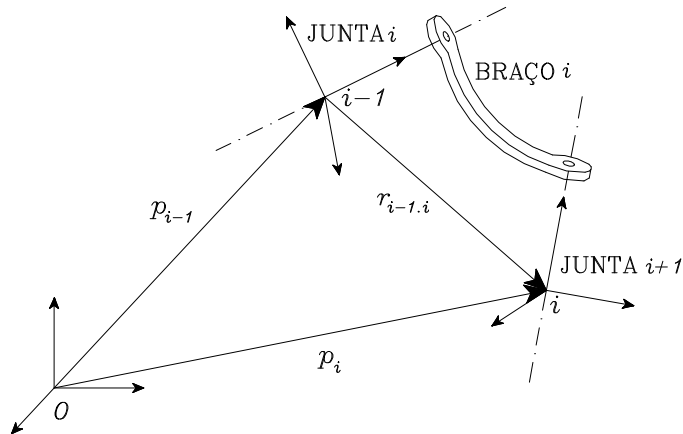


Figura 3.20. Caracterização de um elo  $i$  genérico de um manipulador.

Os vectores posição  $p_{i-1}$  e  $p_i$  têm origem no eixo  $i-1$  e  $i$  respectivamente. O vector  $r_{i-1,i}^{i-1}$  representa a posição da origem do eixo  $i$  em relação a  $i-1$  expressa no eixo  $i-1$ .

1. Então podemos escrever

$$p_i = p_{i-1} + R_{i-1} r_{i-1,i}^{i-1}$$

$$\dot{p}_i = \dot{p}_{i-1} + R_{i-1} \dot{r}_{i-1,i}^{i-1} + \omega_{i-1} R_{i-1} r_{i-1,i}^{i-1} = \dot{p}_{i-1} + v_{i-1,i} + \omega_{i-1} r_{i-1,i}$$

a qual representa a velocidade linear do elo  $i$  em função da velocidade de translação e rotação do elo  $i-1$ . De salientar que  $v_{i-1,i}$  é a velocidade na origem do eixo  $i$  em relação à origem do eixo  $i-1$  expresso no eixo da base [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Em relação à velocidade angular temos

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{i-1} \mathbf{R}_i^{i-1}$$

aplicando a expressão  $\dot{\mathbf{R}}(t) = \mathbf{S}(t)\mathbf{R}(t)$  obtemos

$$\mathbf{S}(\omega_i)\mathbf{R}_i = \mathbf{S}(\omega_{i-1})\mathbf{R}_i + \mathbf{R}_{i-1} \mathbf{S}(\omega_{i-1,i}^{i-1})\mathbf{R}_i^{i-1}$$

onde  $\omega_{i-1,i}^{i-1}$  é a velocidade angular do eixo  $i$  em relação ao eixo  $i-1$ . Assim

$$\mathbf{S}(\omega_i)\mathbf{R}_i = \mathbf{S}(\omega_{i-1})\mathbf{R}_i + \mathbf{S}(\mathbf{R}_{i-1} \omega_{i-1,i}^{i-1})\mathbf{R}_i$$

o que conduz a

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \mathbf{R}_{i-1} \omega_{i-1,i}^{i-1} = \omega_{i-1} + \omega_{i-1,i}$$

e representa a velocidade angular do elo  $i$  em função da velocidade angular do elo  $i-1$ , e o elo  $i$  em relação ao elo  $i-1$  [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Dependendo do tipo de junta, as equações da velocidade linear do elo  $i$  e velocidade angular do mesmo elo adquirem diferentes expressões. Ou seja,

1. Junta prismática: a orientação do eixo  $i$  em relação a  $i-1$  não varia com o movimento da junta, isto é

$$\omega_{i-1,i} = 0$$

em que a velocidade linear é

$$v_{i-1,i} = \dot{d}_i z_{i-1}$$

onde  $z_{i-1}$  é o vector unitário da junta  $i$ . Assim a velocidade linear e a velocidade angular são

$$\omega_i = \omega_{i-1}$$

$$\dot{p}_i = \dot{p}_{i-1} + \dot{d}_i z_{i-1} + \omega_i r_{i-1,i}$$

2. Junta de revolução: para a velocidade angular temos

$$\omega_{i-1,i} = \dot{\theta}_i z_{i-1}$$

enquanto que para a velocidade linear temos

$$v_{i-1,i} = \omega_{i-1,i} r_{i-1,i}$$

devido à rotação do eixo  $i$  em relação a  $i-1$  introduzida pelo movimento da junta  $i$ . Deste modo as expressões da velocidade angular e linear são respectivamente

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \dot{\theta}_i z_{i-1}$$

$$\dot{p}_i = \dot{p}_{i-1} + \omega_i r_{i-1,i}$$

### ***Pontos Singulares***

O Jacobiano na equação da cinemática diferencial de um manipulador define uma trajectória linear

$$v = J(q)\dot{q}$$

entre o vector  $\dot{q}$  de velocidade da junta e o vector  $v = [\dot{p}^T \quad \omega^T]^T$  representando a velocidade da ponta do robô. O Jacobiano em geral é função da configuração  $q$ .

Estas configurações nas quais  $J$  é dependente chamam-se singularidades cinemáticas. As singularidades representam configurações nas quais a mobilidade da estrutura é reduzida, isto é, não é possível impor um movimento arbitrário à ponta do robô. Quando a estrutura é singular, podem existir várias soluções para o problema da cinemática inversa. Devido às singularidades reduzem-se as velocidades no espaço operacional, o que pode causar elevadas velocidades no espaço da junta [Sciavicco e Siciliano, 1996].

As singularidades podem ser classificadas em:

- Singularidades de fronteira que ocorrem quando o manipulador está retraído;
- Singularidades internas que ocorrem dentro do espaço de alcance e são causadas pelo alinhamento de dois ou mais eixos de movimento.

Se considerarmos um manipulador com um braço de dois elos no plano (Figura 3.21).

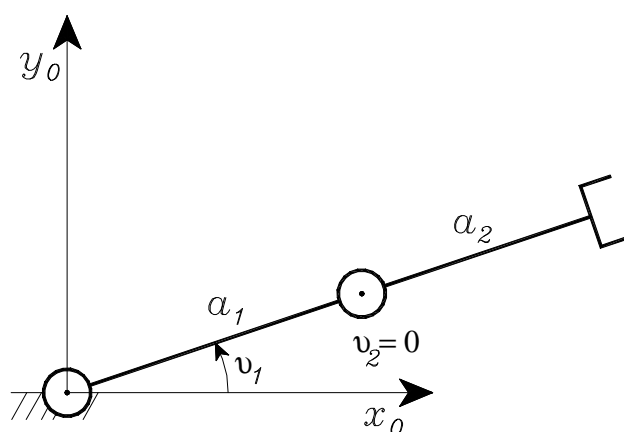


Figura 3.21. Braço com dois elos representados no plano.

A matriz Jacobiana é dada por:

$$J = \begin{bmatrix} -a_1 s_1 - a_2 s_{12} & -a_2 s_{12} \\ a_1 c_1 + a_2 c_{12} & a_2 c_{12} \end{bmatrix}$$

o determinante de J é dado por

$$\det(J) = a_1 a_2 s_2$$

Para  $a_1, a_2 \neq 0$  é fácil verificar que o  $\det(J)$  desaparece quando

$$\vartheta_2 = 0 \text{ ou } \vartheta_2 = \pi$$

$\vartheta_1$  é irrelevante para a determinação de configurações singulares [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Por análise do movimento diferencial da estrutura nesta configuração podemos ver dois vectores coluna Jacobiano

$$[-(a_1 + a_2)s_1 \quad (a_1 + a_2)c_1]^T \text{ e } [-a_2 s_1 \quad a_2 c_1]^T$$

### 3.5.6. FORÇAS ESTÁTICAS

O objectivo da estática é determinar a relação entre as forças aplicadas à ponta do robô e as forças aplicadas às juntas – forças para juntas prismáticas, momentos para juntas de revolução – com o manipulador numa posição de equilíbrio.

Para a determinação das forças estáticas aplicadas a um manipulador, deve-se imobilizar todas as juntas de modo a que o manipulador se torne numa estrutura.



somando os momentos com origem no eixo  $i$

$${}^i n_i - {}^i n_{i+1} - {}^i P_{i+1} \quad {}^i f_{i+1} = 0$$

obtemos

$${}^i f_i = {}^i f_{i+1}$$

$${}^i n_i = {}^i n_{i+1} + {}^i P_{i+1} \quad {}^i f_{i+1}$$

Para obtermos estas equações, em função de uma só força e momento definidos no fim dos eixos dos próprios elos, usamos a matriz de rotação descrita pelo eixo  $i+1$  relativo a  $i$  para a sua transformação [Craig, 1989][Sciavicco e Siciliano, 1996]. Obtemos então a propagação da força estática de elo a elo

$${}^i f_i = {}^i R^{i+1} \quad {}^i f_{i+1}$$

$${}^i n_i = {}^i R^{i+1} \quad {}^i n_{i+1} + {}^i P_{i+1} \quad {}^i f_i$$

Os momentos necessários a aplicar nas juntas para obter o equilíbrio das forças de reacção e momentos aplicados nos elos são determinados do seguinte modo.

Uma vez que a estrutura resiste a um dado vector força e momento (com excepção do momento aplicado à volta do eixo da junta) temos que encontrar o momento a aplicar na junta de modo a manter o equilíbrio estático no ponto essencial do eixo da junta com o vector momento aplicado no elo, o qual é calculado pela expressão [Craig, 1989]:

$$\tau_i = {}^i n_i^T \quad {}^i \hat{Z}_i$$

No caso da junta  $i$  ser uma junta prismática, calculamos a força actuante na junta do seguinte modo:

$$\tau_i = {}^i f_i^T \hat{Z}_i$$

### 3.6. DINÂMICA DE UM ROBÔ MANIPULADOR

O estudo dos manipuladores não se baseia só em considerações cinemáticas, forças/posições estáticas e velocidades, além destes é necessário considerar as forças necessárias à impulsão do movimento. Na Dinâmica de manipuladores<sup>15</sup> temos de considerar as equações de movimento para um manipulador em que o movimento surge pela acção do movimento aplicado pelos actuadores, ou a partir de forças externas aplicadas ao manipulador.

Deste modo, deve-se ter sempre presentes dois tipos de problemas: o primeiro refere-se a um dado ponto da trajectória ( $\theta$ ,  $\dot{\theta}$  e  $\ddot{\theta}$ ) sendo necessário encontrar o vector dos momentos  $\tau$  aplicados à junta; o segundo tipo de problema consiste em calcular como o mecanismo se move sob a aplicação de um conjunto de momentos nas juntas, isto é, um dado momento  $\tau$ , e calcular a resultante do movimento do manipulador ( $\theta$ ,  $\dot{\theta}$  e  $\ddot{\theta}$ ) [Craig, 1989].

Normalmente apresentam-se dois métodos para a derivação das equações de momento de uma junta de um manipulador no espaço. O primeiro método baseia-se na formulação de Newton-Euler que permite obter uma solução do tipo recursivo, o segundo método baseia-se na formulação de Lagrange que permite obter uma solução simples e sistemática.

---

<sup>15</sup> Veja-se [Groover et al., 1986], [fu et al., 1987], [Craig, 1989], [McKerrow, 1991], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997].

### 3.6.1. FORMULAÇÃO DE NEWTON-EULER

Considerando cada elo do manipulador como um corpo rígido e sabendo a localização do centro de massas e a inércia do elo, passamos a ter caracterizada a distribuição de massas do elo. Para movimentar os elos temos que acelerar ou desacelerar. As forças necessárias para este movimento são função da aceleração e da distribuição de massas do elo. A formulação Newton-Euler descreve o tipo de forças, inércia e acelerações registadas [Craig, 1989].

#### *Equação de Newton*

De acordo com a Figura 3.23, temos um corpo rígido que tem o centro de massas em aceleração  $\dot{v}_c$ . A força  $F$  aplicada no centro de massas gera uma aceleração  $\dot{v}_c$  dada pela equação de Newton<sup>16</sup>:

$$F = m\dot{v}_c$$

em que  $m$  é a massa total do corpo.

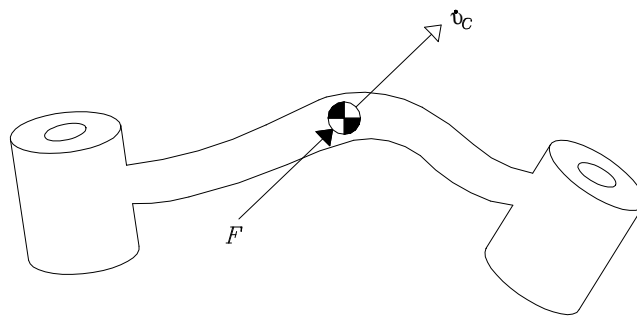


Figura 3.23. Força  $F$  aplicada no centro de massas do corpo com a aceleração do corpo  $\dot{v}_c$  provocada pela respectiva força  $F$ .

<sup>16</sup> Veja-se [Fu et al., 1987], [Craig, 1989] e [Sciavicco e Siciliano, 1996].

### *Equação de Euler*

Na Figura 3.24 (adaptada de [Craig, 1989]) está representado um corpo rígido rodando com uma velocidade angular  $\omega$  e uma aceleração angular  $\dot{\omega}$ , em que o momento  $N$ , que causa o movimento do corpo, é definido pela equação de Euler<sup>17</sup>:

$$N = {}^C I \dot{\omega} + \omega {}^C I \omega$$

em que  ${}^C I$  é o tensor de inércia escrito em  $\{C\}$  associado ao centro de massas.

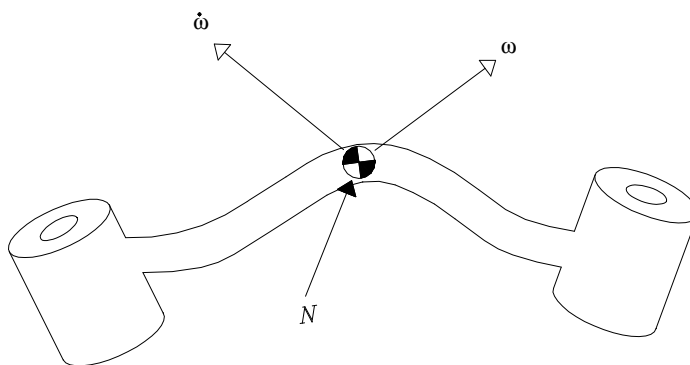


Figura 3.24. Momento  $N$  actuando num corpo sendo que o corpo roda com velocidade  $\omega$  e aceleração  $\dot{\omega}$ .

### **3.6.2. FORMULAÇÃO DINÂMICA ITERATIVA DE NEWTON-EULER**

O problema que se coloca é determinar os momentos nas juntas que causam o movimento pretendido, partindo do conhecimento da posição, velocidade e aceleração das juntas ( $\theta$ ,  $\dot{\theta}$  e  $\ddot{\theta}$ ). Com a ajuda suporte da cinemática e da distribuição de massas de um robô podemos calcular os momentos pretendidos e por meio de iterações podemos calcular a velocidade e a aceleração.

<sup>17</sup> Veja-se [Fu et al., 1987], [Craig, 1989] e [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Este cálculo inicia-se pelo elo 1 passando elo a elo sucessivamente até ao elo n. Para termos conhecimento das forças de inércia no elo é necessário calcular a velocidade rotacional e linear, bem como a aceleração rotacional do centro de massas de cada elo do manipulador num determinado instante [Craig, 1989].

A velocidade rotacional de elo para elo é dada pela expressão:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}_i R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$$

Para obtermos a aceleração angular:

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}_i R^i \dot{\omega}_i + {}^{i+1}_i R^i \omega_i \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$$

No caso da junta i+1 ser prismática, temos:

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}_i R^i \dot{\omega}_i$$

O cálculo da aceleração angular é definido por

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}_i R \left[ {}^i\dot{\omega}_i {}^i P_{i+1} + {}^i\omega_i \left( {}^i\omega_i {}^i P_{i+1} \right) + {}^i\dot{\omega}_i \right]$$

no caso da junta i+1 ser uma junta prismática, temos

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}_i R \left[ {}^i\dot{\omega}_i {}^i P_{i+1} + {}^i\omega_i \left( {}^i\omega_i {}^i P_{i+1} \right) + {}^i\dot{\omega}_i \right] + 2{}^{i+1}\omega_{i+1} \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$$

Na obtenção da aceleração linear do centro de massas de cada elo usamos:

$${}^i\dot{v}_{C_i} = {}^i\dot{\omega}_i {}^i P_{C_i} + {}^i\omega_i \left( {}^i\omega_i {}^i P_{C_i} \right) + {}^i\dot{v}_i$$

Para o caso particular do elo  $i$  temos  ${}^0\omega_0 = {}^0\dot{\omega}_0 = 0$ .

Após termos calculado a aceleração angular do centro de massas de cada elo e aplicando a equação de Newton-Euler, podemos calcular a força de inércia e o momento que actua no centro de massas de cada elo [Craig, 1989].

$$F_i = m\dot{v}_{C_i}$$

$$N_i = {}^{C_i}I\dot{\omega}_i + \omega_i {}^{C_i}I\omega_i$$

onde  $\{C_i\}$  tem origem no centro de massas de cada elo e a mesma orientação do eixo  $i$  do elo.

Cada elo tem forças e momentos aplicados pelos seus elos vizinhos (Figura 3.25).

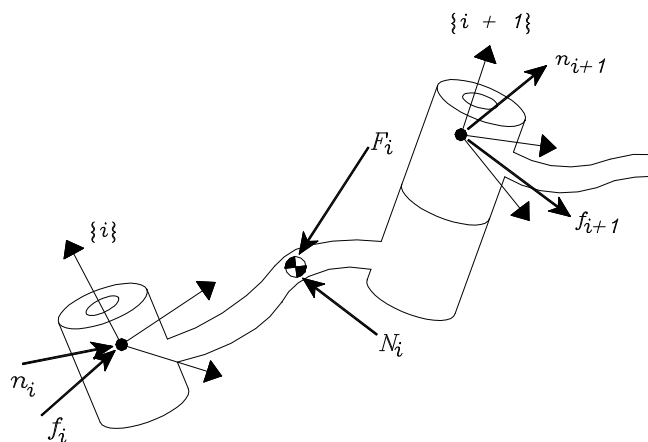


Figura 3.25. A força de equilíbrio, incluindo forças de inércia, para um elo simples de um manipulador.

Se  $f_i$  = força exercida no elo  $i$  pelo elo  $i-1$

$N_i$  = momento exercido no elo  $i$  pelo elo  $i-1$

efectuando o somatório das forças aplicadas no elo  $i$ , temos

$${}^i F_i = {}^i f_i - {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1}$$

e efectuando o somatório dos momentos, obtemos

$${}^i N_i = {}^i n_i - {}^i n_{i+1} + (-{}^i P_{C_i}) {}^i f_i - ({}^i P_{i+1} - {}^i P_{C_i}) {}^i f_{i+1}$$

reorganizando as equações de força e momento, obtemos:

$${}^i f_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i$$

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}_{i+1}^i R^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_{C_i} {}^i F_i + {}^i P_{i+1} {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1}$$

Estas equações permitem avaliar elo a elo, até ao elo  $n$ , trabalhando em comum até à base do robô. Assim, o momento aplicado na junta é obtido pela componente  $\hat{Z}$  do momento aplicado pelo elo no seu elo vizinho:

$$\tau_i = {}^i n_i^T {}^i \hat{Z}_i$$

Para uma junta prismática  $i+1$  temos:

$$\tau_i = {}^i f_i^T {}^i \hat{Z}_i$$

onde  $\tau$  é a força actuante linear.

### 3.6.3. EQUAÇÃO DINÂMICA DA ESTRUTURA DO MANIPULADOR

As equações Newton-Euler são analisadas simbolicamente para qualquer manipulador e podem ser expressas na forma:

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$$

em que  $M(\theta)$  é a matriz massa ( $n \times n$ ) do manipulador,  $V(\theta, \dot{\theta})$  é o vector ( $n \times 1$ ) dos termos centrífugo e coriolis e  $G(\theta)$  é o vector ( $n \times 1$ ) dos termos da gravidade;

ou

$$\tau = \tau_m + \tau_v + \tau_f + \tau_g + \tau_\alpha + \tau_e$$

onde

$\tau_m$  – forças devido à inércia;

$\tau_v$  – forças centrífugas e coriolis;

$\tau_f$  – forças de atrito;

$\tau_g$  – forças de gravidade;

$\tau_\alpha$  - forças não modelizadas;

$\tau_e$  – forças externas [Craig, 1989].

De uma forma genérica:

$$\tau_m = \tau_{mm} + \tau_{mR}$$

onde

$\tau_m$  – momento que o actuador aplica na junta;

$\tau_{mm}$  – inércia do motor ( $\tau_{mm} = I_m \ddot{\theta}$ );

$\tau_{mR}$  – inércia do robô (estrutura).

### 3.6.4. FORMULAÇÃO DE LAGRANGE NA DINÂMICA DE UM MANIPULADOR

A aproximação Newton-Euler é baseada numa formulação dinâmica elementar a par com a análise de forças e momentos agindo entre os elos. Como alternativa à formulação ou método de Newton-Euler temos a formulação dinâmica de Lagrange. Enquanto que a formulação Newton-Euler faz um equilíbrio de forças, Lagrange faz uma formulação baseada na energia. O modelo dinâmico de um manipulador descreve a relação entre o momento aplicado na junta e o movimento da estrutura. Com a formulação de Lagrange as equações de movimento podem ser determinadas independentemente do sistema de coordenadas de referência.

Iniciando com a expressão da energia cinética de um manipulador temos:

$$k_i = \frac{1}{2} m_i v_{c_i}^T v_{c_i} + \frac{1}{2} {}^i \omega_i^T {}^{c_i} I_i {}^i \omega_i$$

em que o primeiro termo é a energia cinética devido à velocidade linear do elo (centro de massa) e o segundo termo é a energia cinética devido à velocidade angular do elo [Craig, 1989]. A energia cinética do manipulador é a soma da energia cinética de cada elo individual:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i$$

A expressão da energia cinética<sup>18</sup> pode ser apresentada de uma forma escalar desde que  $v_{c_i}$  e  ${}^i \omega_i$  sejam funções de  $\theta$  e  $\dot{\theta}$ , assim

$$k(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta}$$

em que  $M(\theta)$  – matriz de massa ( $n \times n$ ).

---

<sup>18</sup> Veja-se [Fu et al., 1987], [Craig, 1989] e [Sciavicco e Siciliano, 1996].

A formulação dinâmica Lagrangeana é o meio de derivação da equação do movimento a partir de uma função escalar chamada Lagrangeano, a qual é definida pela diferença entre a energia cinética e a energia potencial. Deste modo, o Lagrangeano do manipulador é definido por:

$$L(\theta, \dot{\theta}) = k(\theta, \dot{\theta}) - u(\theta)$$

A equação do movimento do manipulador é dada por:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau$$

onde  $\tau$  é o vector de momentos aplicados à junta. No caso do manipulador, a equação é dada por:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial k}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial k}{\partial \theta} + \frac{\partial u}{\partial \theta} = \tau$$

### 3.6.5. FORMULAÇÃO DA DINÂMICA DE UM MANIPULADOR EM ESPAÇO CARTESIANO

A equação da dinâmica tem sido desenvolvida em relação à derivada da posição e tempo dos ângulos das juntas de um manipulador na forma:

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\theta, \dot{\theta}) + \sum \alpha$$

Esta equação permite determinar a aceleração da ponta do robô no espaço cartesiano para forças e momentos cartesianos aplicados à ponta do robô. O vector

momento  $\tau$  é a soma de todas as forças aplicadas na junta e  $M(\theta)$  – matriz de massa/inércia;  $V(\theta, \dot{\theta})$  - forças centrífugas e coriolis;  $G(\theta)$  – forças gravíticas;  $F(\theta, \dot{\theta})$  - forças de atrito e  $\sum \alpha$  – forças não modelizadas (ex. perturbações) [Craig, 1989].

No modelo dinâmico que reflecte a realidade física do equipamento são importantes as forças de fricção. Um dos modelos para as forças de fricção é a fricção viscosa na qual o momento devido à fricção é proporcional à velocidade do movimento da junta:

$$\tau_{\text{fricção}} = \nu \dot{\theta}$$

onde  $\nu$  é a constante de fricção de viscosidade. O outro tipo de força importante para um modelo simples por fricção é o caso da fricção Coulomb. A fricção Coulomb é constante excepto para um sinal dependente da velocidade da junta:

$$\tau_{\text{fricção}} = C \operatorname{sgn}(\dot{\theta})$$

onde  $C$  é a constante de fricção Coulomb. Quando a junta de um manipulador exhibe fricção viscosa e/ou fricção Coulomb geram-se vários problemas entre eles o problema da lubrificação.

Assim, o modelo deve incluir os dois tipos de forças

$$\tau_{\text{fricção}} = C \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + \nu \dot{\theta}$$

Um outro modelo de fricção complexa deve ser expresso por:

$$\tau_{\text{fricção}} = f(\theta, \dot{\theta}).$$

### 3.7. GERAÇÃO DE UMA TRAJECTÓRIA

O movimento de um robô manipulador deve ser descrito como uma sequência de pontos no espaço, cada um com uma determinada posição e orientação, através dos quais o manipulador deve descrever uma curva. Esta curva no espaço que o manipulador descreve desde uma localização inicial (posição e orientação) até à localização final é chamada trajectória<sup>19</sup>. Assim, para realizar uma tarefa o robô deve-se mover desde um ponto inicial até um ponto final. Este movimento pode-se realizar segundo infinitas trajectórias espaciais.

Neste caso abordam-se métodos de cálculo de uma trajectória multidimensional no espaço a qual descreve o movimento desejável do manipulador. Aqui a trajectória refere o período de tempo da posição, velocidade e aceleração de cada grau de liberdade. De uma maneira geral considera-se o movimento de um manipulador como sendo o movimento da ferramenta {T} relativo ao eixo de referência {S} como se pode ver na figura que se segue [Craig, 1989].

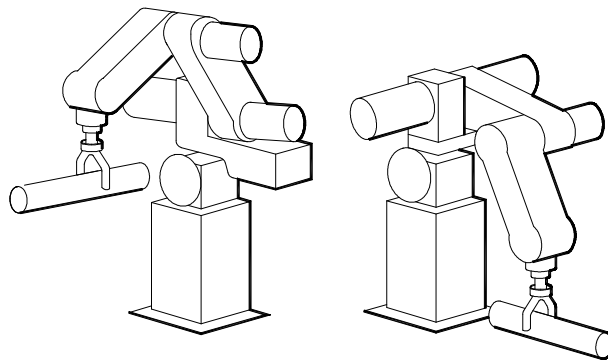


Figura 3.26. Na execução de uma trajectória um manipulador deve deslocar-se da sua posição inicial para a posição desejada de um modo suave.

<sup>19</sup> Veja-se [Fu et al., 1987], [Craig, 1989], [Sciavicco e Siciliano, 1996] e [Barrientos et al., 1997].

O problema base é movimentar o manipulador da posição inicial para uma posição final desejada, isto é, pretende-se movimentar a ferramenta do seu valor corrente  $\{T_{\text{inicial}}\}$  para o desejável valor final  $\{T_{\text{final}}\}$ . Este movimento envolve uma mudança de orientação e de posição da ferramenta relativa ao eixo de referência. Um dos caminhos para descrever uma trajetória é indicar uma sequência desejável de pontos entre a posição inicial e a posição final. Os pontos da trajetória incluem todos os pontos intermédios inclusive o inicial e o final.

Um método para a determinação de uma trajetória considera que a forma dessa trajetória (no espaço e no tempo) é descrita em função de ângulos das juntas. Cada ponto da trajetória é especificado em termos de posição e orientação desejável do eixo da ferramenta  $\{T\}$  relativamente ao eixo de referência  $\{S\}$ . Assim, todos os pontos são convertidos num conjunto de ângulos de junta por aplicação da cinemática inversa. É então determinada uma função plana para cada  $n$  juntas, a qual passa através destes pontos até ao ponto que se pretende.

Apresenta-se de seguida o problema do movimento de uma ferramenta a partir da posição inicial para uma posição desejada num determinado período de tempo.

Usando a cinemática inversa o conjunto de ângulos da junta corresponde à posição desejada e a orientação pode então ser calculada. É necessário uma função para cada junta, cujo valor para a posição inicial é  $t_0$ , e para a posição desejável da junta (posição final) que é  $t_f$ . De acordo com a Figura 3.27 [Craig, 1989] existem muitas funções planas,  $\theta(t)$ , que podem ser usadas para interpolação do valor da junta [Fu et al., 1987] [Sciavicco e Siciliano, 1996]:

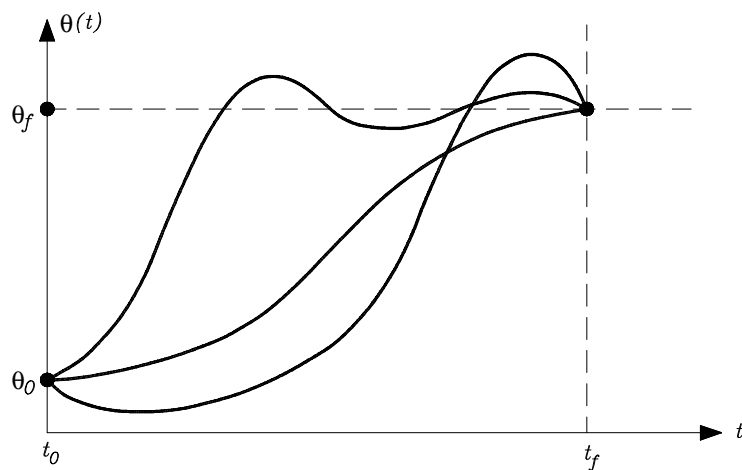


Figura 3.27. Trajetórias possíveis para uma junta simples.

Fazendo um movimento plano simples, são evidentes pelo menos quatro condições  $\theta(t)$ . Duas delas são valores que provêm da obtenção de valores iniciais e finais, ou seja:

$$\theta(0) = \theta_0$$

$$\theta(t_f) = \theta_f$$

Estas duas condições conduzem a uma velocidade inicial e final igual a zero, pois são funções contínuas em termos de velocidade, logo:

$$\dot{\theta}(0) = 0$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0$$

De acordo com o referido anteriormente, na descrição de uma trajectória plana temos quatro condições  $\theta(t)$ . Estas quatro condições levam a que a expressão  $\theta(t)$  seja um polinómio<sup>20</sup> do 3º grau:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

Assim, a velocidade e a aceleração da junta ao longo da trajectória são:

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3 t$$

Combinando as equações anteriores, obtemos:

$$\theta_0 = a_0,$$

$$\theta_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3,$$

$$0 = a_1,$$

$$0 = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2.$$

Por resolução em ordem a  $a_i$  obtemos os pontos da trajectória:

$$a_0 = \theta_0,$$

$$a_1 = 0,$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0),$$

$$a_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0).$$

---

<sup>20</sup> Veja-se [Fu et al., 1987], [Craig, 1989] e [Sciavicco e Siciliano, 1996].

Usando os coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  obtidos anteriormente, pode-se calcular o polinómio de grau três que liga qualquer posição inicial com qualquer posição final desejável. A solução que foi obtida para velocidades, inicial e final, iguais a zero [Craig, 1989].

## **Capítulo 4**

### **UTILIZAÇÃO DE ROBÔS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO**

## 4.1. INTRODUÇÃO

O sector da construção é na maioria dos países industrializados, um dos que mobiliza um maior número de recursos económicos<sup>1</sup> e humanos. Constitui em Portugal um sector de grande projecção económica, quer ao nível do número de empresas envolvidas e facturação produzida, quer a nível de quantidade e diversidade da mão-de-obra empregada.

Uma das características principais desta indústria é o grande peso do custo da mão-de-obra, uma vez que na execução dos empreendimentos esse custo é de cerca de 50%<sup>2</sup> do custo total. Daí ser frequente a sua identificação como o motor da economia nacional.

Neste capítulo veremos em primeiro lugar que a robótica, ao pretender substituir o homem pelas máquinas nomeadamente em operações de trabalho manual intensivo e repetitivo exigindo precisão e rapidez, tem no sector da construção um vasto campo para o desenvolvimento de aplicações. Veremos no entanto que esse objectivo tem implicações muito vastas ao longo de todo o processo de construção (concepção, projecto, planeamento, execução).

Tal não obsta ao desenvolvimento de sistemas robotizados que visam automatizar algumas das muitas tarefas que fazem parte dos processos construtivos. É o que faremos ao longo da segunda parte deste capítulo com a apresentação de uma aplicação concreta.

---

<sup>1</sup> Em Portugal, por exemplo, se analisarmos as inter-relações sectoriais através de uma matriz de Leontieff, facilmente chegamos à conclusão que actualmente movimenta cerca de 40% da nossa economia.

<sup>2</sup> Dependendo, no entanto, do tipo de obra e do tipo de trabalhos envolvidos.

## **4.2. POSSIBILIDADES DA UTILIZAÇÃO DE ROBÔS**

Para melhorar os actuais processos de construção é vantajoso aplicar a tecnologia robótica pois os robôs são de uma precisão elevada e poderosa para a execução de diferentes tipos de tarefas. Há no entanto que os integrar e adaptar ao ambiente da construção civil.

Assim, para a utilização de robôs na construção importa desde já caracterizar o ambiente de trabalho e o tipo de tarefas desenvolvidas, bem como os estaleiros de obras – local de trabalho por excelência.

### **4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DAS TAREFAS**

Uma análise atenta das tarefas específicas da indústria da construção permite apontar algumas possibilidades da utilização de robôs neste sector.

É fácil verificar que várias actividades da construção envolvem operações repetitivas – aplicação de tijolos, reboco, pintura, etc. – pelo que a máquina substitui com precisão, qualidade e rapidez o homem nestas tarefas. Por outro lado, ao mesmo tempo que substitui os trabalhadores em operações de trabalho manual intensivo, em muitas circunstâncias está também a substituí-lo nas tarefas efectuadas em ambientes de risco.

O sector da construção é particularmente perigoso e continua a ser o que envolve maior número de acidentes de trabalho, muitos deles mortais. Além disso, a frequência e a gravidade dos acidentes está a aumentar. Se tal facto, por um lado, se deve à falta de segurança, a défices de formação, a prazos de execução apertados com desrespeito pelas normas de protecção exigidas, por outro lado, deve-se ao elevado grau de risco inerente às tarefas de construção.

Assistimos a um desrespeito pelas normas básicas de segurança pessoal por parte dos trabalhadores. Relutância no uso do capacete, botas apropriadas às tarefas em questão, luvas, óculos de protecção, máscaras respiratórias, protecções contra o ruído. Os trabalhadores continuam a não cumprir as normas de segurança colectivas de modo a tornar o ambiente de obra menos perigoso, nomeadamente na aplicação de guarda-corpos nas plataformas e andaimes, aberturas protegidas, locais de trabalho e os acessos correctamente iluminados e com protecções, escavações entivadas e contornadas com rodapés, pavimentos de trabalho com as beiras que dão para o vazio protegidas com guarda-corpos.

Também o elevado grau de risco inerente a algumas tarefas realizadas em obra é uma oportunidade para recorrer à utilização de robôs. Veja-se realização de trabalho em alturas elevadas expondo os trabalhadores a quedas de altura, as quedas de objectos, soterramentos, afundamentos e riscos associados ao contacto e utilização de produtos químicos (tóxicos) ou radiações (exposição a elevadas temperaturas).

#### **4.2.2. POSSIBILIDADES DOS ROBÔS**

A implementação de um robô industrial no processo de construção exige um estudo prévio e detalhado do custo (desde a sua aquisição até à sua efectiva amortização), ponderando as vantagens e inconvenientes da sua introdução. Se é um facto que a justificação económica para o emprego de robôs determina a sua viabilidade e rentabilidade, também é um facto que paralelamente ao custo com a aquisição, ferramentas e equipamentos e instalação do robô em fábrica, temos que ponderar os benefícios que a utilização do robô, ou a automatização em termos gerais, comporta:

- Aumento da qualidade. O robô realiza a tarefa de maneira uniforme e consistente;
- Aumento da produtividade. O aumento da produtividade é uma consequência de realização de trabalho de forma mais rápida, com menos interrupções e durante vários turnos sem problemas acrescidos;
- Adequado para processos de fabricação com ciclos de vida curtos. Não podemos esquecer que um dos factores que definem um robô industrial é o ser uma ferramenta programável e flexível e, portanto, susceptível de ser utilizada em diversas aplicações e em processos de fabricação com ciclos de vida curtos<sup>3</sup>.

Deste modo, em defesa da aplicabilidade de robôs no sector da construção está o seu contributo para o aumento da produtividade e qualidade da construção pois os robôs são máquinas incansáveis<sup>4</sup>, trabalhando continuamente, mantendo a precisão da execução das tarefas, bem como a produtividade e a qualidade do trabalho final. Tal facto não se verifica no trabalho realizado manualmente porque, contrariamente ao robô, o homem tem necessidade de fazer pausas e o seu grau de fadiga vai aumentando ao longo do dia de trabalho o que se reflecte na precisão, produtividade e muitas vezes na qualidade da tarefa realizada.

---

<sup>3</sup> Normalmente a vida dos equipamentos de fabricação coincide com a do produto que se está a fabricar, ou seja, quando muda o produto, quer por questões de mercado quer por necessidades técnicas, as máquinas usadas tornam-se obsoletas ou a sua adaptação ao novo processo e produto torna-se muito dispendioso, pelo que o rendimento posterior ao ciclo de vida do produto é praticamente nulo. Contrariamente, o robô, dadas as suas características, é uma ferramenta susceptível de adaptar-se a novas e diversas aplicações e processos de fabricação, com baixos custos [Barrientos et al, 1997].

<sup>4</sup> Os robôs são fortes, capazes de manusear grandes pesos e aplicar grandes forças. Podem trabalhar sete dias por semana e vinte e quatro horas por dia, não necessitando de intervalos para café ou refeição nem para dormir. Também não sofrem de fadiga, raramente adoecem e produzem um trabalho sempre igual [Salant, 1990].

### 4.2.3. PROBLEMAS DE INSTALAÇÃO DE ROBÔS NOS ESTALEIROS

Os estaleiros<sup>5</sup> são elementos de suporte imprescindíveis à realização dos empreendimentos. Efectivamente qualquer construção inicia-se pela implantação do estaleiro de obra. Deste fazem parte quer materiais quer equipamentos indispensáveis à execução das diferentes tarefas que compõem uma obra. Neste sentido, os estaleiros são locais bastante dinâmicos devido às alterações sistemáticas dos postos de trabalho e do ambiente que os envolve.

Os locais de trabalho são adversos uma vez que neles existem superfícies irregulares, escadas, vãos sobre o vazio, vãos de entrada apertados, valetas, rampas e uma grande diversidade de materiais colocados em sítios incertos e sem alocação definida. Neste sentido, os locais de trabalho caracterizam-se pela não estruturação decorrente do dinamismo inerente ao próprio estaleiro e da falta de planeamento das actividades (Figura 4.1). Esta desestruturação dos estaleiros cria obstáculos na definição de pontos e referências a dar ao robô para a sua movimentação e execução de tarefas.

Os locais de trabalho (obras e respectivos estaleiros) apresentam-se com grande dispersão geográfica principalmente as das grandes empresas, pois tanto podem estar a construir no norte como no sul do país, o que implica o transporte de materiais e equipamentos a grandes distâncias, tornando-se por vezes inviável. Simultaneamente há tarefas a serem executadas entrecruzando-se em termos de recursos a elas afectos – tal facto exige dos robôs a partilha de recursos sem interferir no espaço de trabalho que cada tarefa a ser executada requer.

---

<sup>5</sup> Entende-se por estaleiro o local de trabalho onde se efectuam trabalhos de construção de edifícios e de Engenharia Civil (pontes, estradas, túneis, etc.), bem como os locais onde se desenvolvem actividades de apoio directo àqueles trabalhos.



Figura 4.1. Estaleiros e respectivas obras. É óbvia a impossibilidade de actuação de robôs.

#### 4.2.4. SITUAÇÃO ACTUAL

Se compararmos outros sectores industriais com a construção verificamos que nesta tem sido difícil implementar robôs. As causas estão, como vimos, na natureza da produção nos locais de construção, nas condições de trabalho peculiares, variando constantemente de empreendimento para empreendimento e no grande número de locais de trabalho necessários.

Cada construção constitui um trabalho realizado com base num projecto elaborado e utilizado, na generalidade dos casos, uma única vez, ou seja, tem um carácter único e equivale a um protótipo na acepção industrial<sup>6</sup>. Sendo cada obra única, consequentemente os produtos finais não são repetitivos o que faz com que os intervenientes no processo – dono de obra, o projectista, o empreiteiro e os subempreiteiros – considerem cada obra como um caso isolado existindo diferenças fundamentais relativamente às várias construções (com excepção de algumas construções com projecto-tipo: escolas, hospitais, centros de saúde, etc.).

Este facto implica capacitar os robôs de maior grau de versatilidade, adaptabilidade e autonomia – que se traduz no emprego, por exemplo, de sensores e de *software* adequado para lhes dar possibilidade de tomada de decisões de acordo com as tarefas a realizar em cada obra.

Para assistirmos à consolidação da automação na construção é necessário proceder a alterações principalmente ao nível da integração, ao nível da pré-fabricação.

Ao nível da integração devemos ter em conta a percepção do projecto de construção, a diversidade dos projectos com os mesmos *standards*, estandardização de *software*; ao nível da pré-fabricação apostando na produção em fábrica, estandardização de componentes e novos materiais pré-fabricados.

---

<sup>6</sup> [Ueno, 1994] e [Warszawski e Navon, 1996] consideram que na indústria da construção não se produz em massa, esta é uma indústria monoproduto, com menos tarefas repetitivas que o trabalho fabril.

A par destes problemas inerentes à construção, deparamo-nos com outras barreiras à automatização da indústria da construção. Por um lado, de natureza económica - o elevado custo de um sistema robótico - e, por outro lado, de natureza técnica - a elevada sofisticação de um sistema de controlo do robô, em especial o procedimento de programação. Então deve-se actuar no sentido de baixar o preço, tornar mais fácil o seu uso e aumentar o nível de automatização.

De referir também que a estrutura da indústria da construção é relativamente complexa. Sob a alçada de um empreiteiro geral temos os subempreiteiros e outros prestadores de serviços, muitos deles constituindo pequenas empresas sem capacidade económica e produtiva para fazer progressos tecnológicos.

Estes são, sem dúvida, dois grandes desafios: espírito de abertura a novas concepções, métodos, processos e tecnologias por parte do pessoal afecto ao sector e espírito de cooperação entre os vários intervenientes, fomentando uma atitude de sincronia entre os construtores e os fabricantes de maquinaria robótica - a colaboração visa o desenvolvimento da tecnologia robótica capaz de ser aplicada na construção (portanto, possibilitando a construção robotizada).

com a aplicação de sistemas automatizados, será necessário, não só uma nova concepção da fábrica e da organização do trabalho, mas também modificar a mentalidade dos principais intervenientes no processo construtivo no sentido de os predispor para aceitar a introdução de mudanças no desenvolvimento do próprio processo construtivo que facilitem e tornem viável a introdução de robôs, nomeadamente a integração dos trabalhadores nos objectivos globais de produção, à participação na própria implementação das inovações técnicas e organizacionais da empresa e à formação permanente dos trabalhadores devido à sistemática introdução de inovações tecnológicas.

### **4.3. ROBÔS NA CONSTRUÇÃO/ ROBÔS EM OBRA**

Na indústria de robôs existe uma grande variedade de máquinas sofisticadas que trabalham com controladores de posição e movimento e que são detentoras de equipamento de manufatura flexível, capazes de realizar com grande perfeição diversas tarefas humanas. Muitas das máquinas utilizadas actualmente na construção usam mecanismos idênticos aos mecanismos usados na robótica.

O desenvolvimento da tecnologia robótica que se verificou nos últimos anos dotou os robôs de características fundamentais que permitem considerar útil a sua aplicabilidade na área da construção civil. No entanto, as potencialidades e virtualidades dos progressos recentes da robótica mostram-se ainda insuficientes para responder às actuais exigências das tarefas da construção.

Para o êxito da aplicabilidade dos robôs nos actuais estaleiros é necessário que outros desenvolvimentos se verifiquem na área da robótica, nomeadamente nos seguintes âmbitos: locomoção, visão, preparação face a ambientes adversos, manuseamento de cargas pesadas ou de grande dimensão e manipulação de materiais frágeis.

Assim, esses robôs deveriam ter capacidade de locomoção e um certo grau de “inteligência”, o que implica dotá-los de capacidades para subir escadas, passar através de vãos, evitar obstáculos; ou seja, os meios de locomoção implicam a existência de caminhos viáveis – situação bem diferente da realidade dos estaleiros os quais não apresentam superfícies lisas e estão pejados de detritos, materiais a aplicar, obstáculos, etc. Deste modo, a não existência de caminhos viáveis nos estaleiros implicaria dotar os robôs de meios de orientação, ou por intermédio de caminhos pré-definidos (eventualmente repetitivos), ou meios estruturados com referências identificáveis pelos robôs.

A questão da locomoção está também ligada à questão da realização de tarefas, repetitivas ou não, em local fixo. Na verdade, alguns dos trabalhos desenvolvidos em obra envolvem operações repetitivas, na acepção de que requerem a repetição de ciclos de movimento. No entanto, a localização do trabalho está constantemente a mudar o que implica a sistemática mudança da posição do robô, em regra através de uma translação após a qual se iniciaria um novo ciclo [Groover et al., 1986]. Por outro lado, nos estaleiros e respectivas obras associadas coexistem um grande número de diferentes actividades, com inúmeras especificidades e com pequeno grau de repetitividade o que para além da questão da sua mobilidade exige ao robô ter capacidade de se adaptar com facilidade às diferentes ferramentas: pincéis, martelos, berbequins, etc.

Não menos importante será prover os robôs de capacidades para o reconhecimento dos ambientes diversificados em que operam (estaleiros), ou seja, a maioria das capacidades requeridas implicaria o recurso à visão artificial, permitindo superar obstáculos, percorrer trajectórias pré-definidas, identificar pontos de referência, etc. Por outro lado, sabemos que muitas das tarefas de construção são executadas no exterior, em sítios difíceis, imprevisos e não protegidos. Neste sentido, os robôs deveriam estar também preparados e equipados para trabalhar face a ambientes adversos, nomeadamente quedas em altura, queda de materiais, impactos, agentes atmosféricos.

Grande parte das tarefas executadas em obra requer o manuseamento de materiais com características distintas: manuseamento de cargas pesadas ou de grande dimensão, manipulação de materiais frágeis e ferramentas variadas. Na prática, significaria que os robôs teriam que estar equipados para a execução de tarefas que implicam a movimentação de elementos como vigas e painéis pré-fabricados (podendo pesar algumas toneladas) ou manusear materiais com uma certa fragilidade (produtos cerâmicos tais como ladrilhos, loiças sanitárias ou vidros).

Deste modo, do ponto de vista das actuais necessidades da construção a indústria de robôs deverá desenvolver-se no sentido de melhorar o seu desempenho nos seguintes pontos:

- O robô deve ser uma máquina altamente flexível e provida de um controlo rigoroso e com funções de reconhecimento do meio de trabalho;
- O robô deve transmitir segurança e ser fácil de operar pelos trabalhadores (aos quais é necessário dar formação);
- Os materiais utilizados na construção são de grandes dimensões e de elevado peso pelo que requer equipamento do robô capaz de suportar esses pesos;
- O robô tem de estar equipado para trabalhar no exterior e em condições adversas;
- O robô deve ser fácil de mover porque está constantemente a ser transferido para secções de trabalho diferentes ou de local de construção para local de construção;
- O robô deve ser robusto para aguentar a sujidade e choques a que está sujeito no ambiente da construção;
- O robô deve ser suficientemente leve de modo a não afectar as estruturas onde se move;
- O robô deve necessitar de manutenção menos especializada do ponto de vista dos sistemas mecânicos e electrónicos que conjuga.

De tudo isto se infere que o uso dos robôs nos actuais estaleiros de obras dependerá da sua portabilidade, da capacidade de se deslocarem, de “sentir” o ambiente, de processar os dados e informação recebidos e, com base em toda a informação disponível, executar uma tarefa. As obras, como locais não estruturados, constituem sobretudo um grande desafio à sua mobilidade e reconhecimento do ambiente de trabalho.

Em estaleiro, as condições de trabalho adversas, a complexidade, diversidade e pouca repetitividade das operações a realizar, não tornam impossível a utilização de robôs. De facto a tecnologia existente consegue ultrapassar os problemas referidos. Tal não é no entanto economicamente viável mesmo com alterações significativas nos estaleiros (estruturação do ambiente, modos/vias de circulação, armazenamento, etc.).

Face às características dos actuais estaleiros, obras e tarefas a desenvolver e face ao encarecimento dos robôs devido à sofisticação exigida, a hipótese que parece apresentar grandes potencialidades e a que mais benefícios retira dos actuais robôs consiste na realização de tarefas repetitivas e com posto de trabalho fixo, em ambiente fabril. Neste sentido, a área da pré-fabricação parece ser a mais viável uma vez que não nos deparamos com os problemas inerentes aos ambientes de estaleiro. Nela os robôs realizam tarefas em ambientes fabris a montante das obras, onde não se colocam problemas de locomoção e de identificação dos locais de trabalho.

No entanto, para uma efectiva aplicação dos sistemas robóticos na construção, dever-se-ia actuar nos seguintes âmbitos [Ueno, 1994][Hasegawa, 1996]:

- Fazer um levantamento da concepção, dos elementos e dos materiais necessários para o recurso à standardização (não disponível presentemente);
- Elaborar projectos de construção e métodos orientados para a automatização e robotização na construção;
- Incrementar o mercado da construção permitiria suportar os custos para manter o sistema de automação e, conjuntamente com o elevado desempenho do robô, obter vantagens em termos de investimento comparativamente ao trabalho manual;
- Reestruturar a indústria da construção (assente numa estrutura multilateral de empreiteiros, subempreiteiros e outros, construção de maquinaria, técnicas de engenharia, etc.) de modo a poder articular-se com a organização da automação e robótica na produção.

Será então necessário modificar, em primeiro lugar, o entendimento conceptual da indústria da construção, mais especificamente do próprio processo de construção em que o planeamento, a racionalização, a normalização e a programação das actividades devidamente integradas permitiriam enveredar pela automatização da construção.

A introdução de novos materiais e de novas tecnologias, nomeadamente a pré-fabricação, implica a alteração das relações entre os donos de obra, os projectistas e os construtores. Os intervenientes no processo da construção devem estar motivados e disponíveis para a aplicação das metodologias e técnicas que permitem transformar a indústria da construção numa indústria de “manufatura moderna” e que já permitiram a outras indústrias atingir elevados níveis de produtividade.

Um dos exemplos paradigmáticos da adopção deste conceito de “manufatura moderna” (CIM<sup>7</sup>) é o da indústria automóvel. Este conceito consiste na organização e no controlo de todo o processo produtivo de um modo hierárquico, por níveis, explorando a flexibilidade do sistema produtivo e respondendo rapidamente a alterações dos produtos ou à introdução de novos produtos constituindo Sistemas Flexíveis de Produção (SFP). A flexibilidade resulta do facto de estes sistemas serem constituídos por equipamentos programáveis e facilmente reconfiguráveis como, por exemplo, robôs manipuladores que conseguem executar uma grande diversidade de tarefas muitas delas de uma forma quase humana [Pires, 2000]. Tais sistemas permitem aumentar a produção e a qualidade baixando o preço<sup>8</sup>.

---

<sup>7</sup> CIM – *Computer Integrates Manufacturig* [Kusiak, 1986], [Waldner, 1992], [Rembold et al., 1993], [Rehg, 1994] e [Balaguer, 2000].

<sup>8</sup> O que não é novidade uma vez que intervir na concepção, na organização e nos métodos de trabalho e de produção, tendo em conta o estado de evolução da técnica, permite otimizar o emprego dos recursos disponíveis: equipamentos e instalações fabris.

Nos últimos tempos, em especial no Japão, assiste-se à tentativa de adaptação do conceito CIM à indústria da construção no sentido da utilização crescente de componentes, apostando claramente numa tecnologia de pré-fabricação. O CIM deu lugar ao CIC - *Computer Integral Construction* - cujo sucesso se tem manifestado apenas no planeamento e na relação com os fornecedores e não no próprio processo de produção, em grande parte porque a indústria da construção é (também no Japão) muito conservadora, não respondendo afirmativamente à inovação tecnológica [Miyatake e Kangari, 1993] in [Balaguer, 2000].

#### **4.4. ROBÓTICA NA PRÉ-FABRICAÇÃO**

Vimos, no ponto anterior que a possibilidade de incorporar uma percentagem significativa de pré-fabricação obrigaria à existência, a montante da construção, de uma indústria com tarefas de fabrico executadas em ambientes controlados e não nos actuais estaleiros de obras.

Ao colocar os robôs a realizar tarefas em ambientes fabris, onde sobretudo não se colocam grandes problemas de locomoção e de identificação dos locais de trabalho, deparamo-nos com implicações – tecnológicas e económicas – e problemas que correspondem sobretudo aos da pré-fabricação.

Em termos de implicações tecnológicas, os projectistas teriam que adaptar os seus projectos aos componentes disponibilizados pela pré-fabricação, diminuindo o mais possível a quantidade de elementos executados em obra. A preparação de obra assumiria então uma importância crescente. Na execução, com o fabrico prévio de componentes a incorporar nas obras, a construção seria cada vez mais uma indústria de montagem.

Em termos de implicações económicas, com o fabrico de componentes a incorporar nas obras, a construção ficaria cada vez mais dependente da indústria a montante. Essas empresas teriam a sua viabilidade dependente do volume de

encomendas. Este por sua vez dependeria criticamente da divulgação dos produtos e da capacidade da empresa em os produzir a um custo que justificasse a alteração tecnológica. Há, no entanto, que referir que em muitos países as obras são sobretudo realizadas por mão-de-obra de baixo custo recorrendo-se muitas vezes à imigração. Em Portugal, por exemplo, depois de décadas de mão-de-obra de origem africana, verifica-se o afluxo de emigrantes de Leste. Operários Ucrânianos, Moldavos ou Romenos são agora numerosos nas nossas obras.

Todavia, a queda nos custos efectivos dos robôs, tornando-os acessíveis para muitos sectores da indústria, faz com que os robôs possam competir com a mão-de-obra barata. A mão-de-obra instável e com um nível baixo de qualificação e de formação, o recurso ao trabalho temporário e o grande nível de emprego da população estrangeira ou marginal faz baixar a qualidade da execução das várias tarefas associadas ao sector da construção. Torna-se por isso vantajosa a utilização de robôs os quais produzem um trabalho sempre uniforme e consistente (sem o aparecimento de momentos de maior ou menor produtividade próprios do estado de espírito do operário) e, portanto, com qualidade.

Embora a utilização das novas tecnologias no processo produtivo substitua os trabalhadores, tal não pode ser visto numa perspectiva negativa porque as tarefas repetitivas ou perigosas para os seres humanos passam a ser realizadas por máquinas e, conseqüentemente, com melhorias do bem estar dos trabalhadores. Por outro lado, em virtude da competitividade a que está sujeita a indústria torna-se cada vez mais difícil mantê-la à custa de mão-de-obra barata e não qualificada pelo que a automatização da indústria é simultaneamente um critério de sobrevivência do sector industrial e uma forma de manter postos de trabalho.

Independentemente destas implicações importa salientar que alguns sistemas robóticos – nomeadamente os robôs manipuladores – mostram potencialidades de aplicação imediata neste tipo de ambientes da pré-fabricação para a indústria da construção. Os robôs manipuladores possuem características e um grau de desenvolvimento técnico que se mostram suficientes para ir ao encontro das

solicitações das tarefas em causa. Neste domínio, o avanço da tecnologia robótica pode aplicar-se a bastantes processos de construção.

Os robôs industriais manipuladores são essencialmente máquinas com controlo de posição e movimento às quais se podem adaptar ferramentas de trabalho. Para além disso têm uma precisão elevada, grande velocidade de execução, admitem vários interfaces de comunicação, diversas possibilidades de *input/output*, controlo de força, visão [Pires, 2000]. É, no entanto, necessário proceder à sua integração e adaptação a necessidades de fabrico específicas, quer em termos das suas ferramentas de trabalho quer em termos de programação.

#### **4.5. UMA APLICAÇÃO PRÁTICA**

Uma das áreas industriais em que a viabilidade do emprego de robôs é menos problemática é a soldadura<sup>9</sup>. Tal decorre essencialmente das seguintes razões:

- Um grande número e variedade de produtos no processo de construção requerem operações de soldadura (estruturas metálicas, por exemplo);
- A soldadura é considerada uma operação de risco para o homem devido ao seu contacto com temperaturas elevadas, exposição a radiações do arco eléctrico (infravermelhos e ultravioletas), inalação de fumos ricos em óxidos, poeiras, gases, etc.;
- Repetitividade e grande precisão exigida na realização da tarefa que faz dela uma actividade cansativa, levando a produtividade do operador a decrescer ao longo do dia;
- Exigência de grande qualificação dos operadores, o que acarreta a dificuldade de obter mão-de-obra especializada e capaz de responder à exigência de produção em vários turnos.

---

<sup>9</sup> A indústria do sector automóvel foi a grande impulsionadora da robótica industrial e mais especificamente da soldadura robotizada. O processo de soldadura de carroçarias consiste na união de duas peças metálicas num ponto, por fusão conjunta de ambas as partes.

Estas razões justificam o facto da soldadura robotizada (Figura 4.2) apresentar um crescimento exponencial a nível mundial.

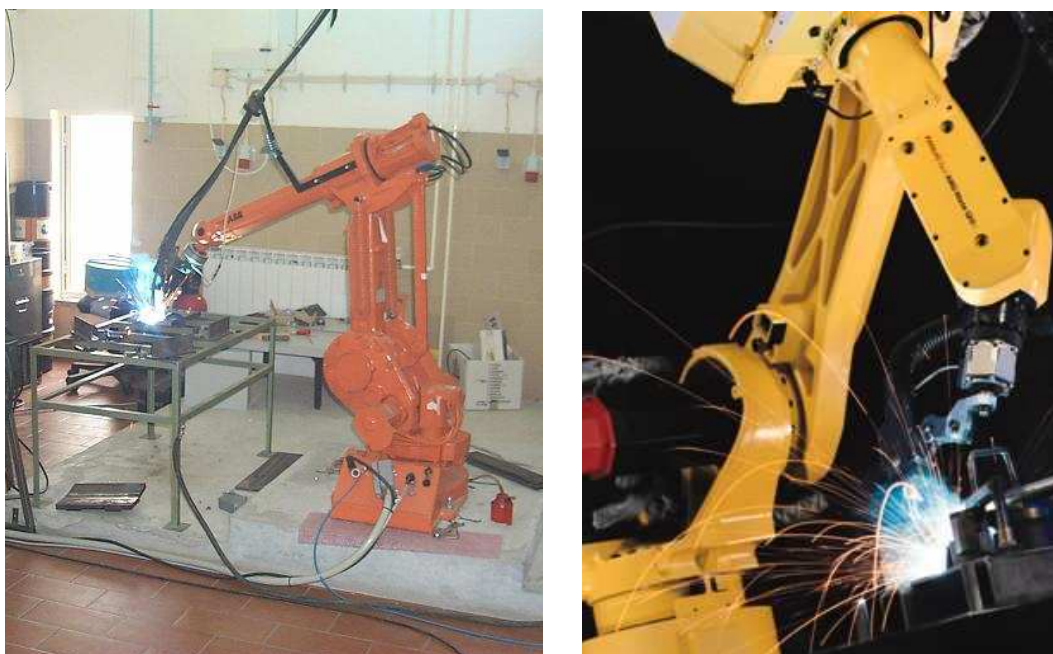


Figura 4.2. Soldadura Robotizada.

É neste sentido que Santos e Quintino<sup>10</sup> defendem que a opção pela automatização (nomeadamente a automatização na soldadura) tem particular sucesso quando se orienta por três objectivos fundamentais: reduzir os custos de produção mediante o aumento da produtividade, aumentar a qualidade do produto e aumentar a sua fiabilidade mediante a redução ou eliminação de possíveis erros humanos.

No entanto, para usufruir da aplicação de soldadura robotizada é necessário transformar os robôs em máquinas cada vez mais fáceis de usar, programar, controlar e integrar com outros equipamentos, pois eles vão ser usados como uma ferramenta em tarefas complexas dentro de ambientes flexíveis. Portanto, os robôs terão que ser capazes de receber solicitações complexas por parte dos utilizadores de computadores, executá-las e fornecer os resultados. De salientar que a interface

---

<sup>10</sup> [Santos e Quintino, 1992].

homem-máquina beneficia da conectividade do robô com computadores, pois facilita a transparência no diálogo.

O caso prático que aqui analisaremos tem como objectivo o desenvolvimento de uma aplicação<sup>11</sup> capaz de simplificar e tornar acessível a programação de um robô dedicado a operações de soldadura industrial. Esta aplicação visa a instalação de robôs manipuladores numa das maiores empresas nacionais de construção metálica e destina-se a dar resposta a solicitações por parte das empresas de construção civil. Na operação de soldadura industrial, o trabalho dos robôs vai consistir na soldadura de estruturas metálicas (peças com diferentes dimensões).

A aplicação e os exemplos analisados nos pontos seguintes fazem parte de uma aplicação na área da soldadura industrial levada a efeito no Laboratório de Robótica Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (DEM-UC). Pretende-se explorar a capacidade de interface via computador com o operador e o *software* poderoso e de fácil utilização para programação, base de dados, etc.

#### **4.5.1. PROCESSO DE SOLDADURA**

Uma operação de soldadura tem como objectivo assegurar a união das peças a ligar, de modo a obter quer a continuidade metálica quer a continuidade mecânica. Neste processo utiliza-se sempre uma fonte de energia para realizar a ligação provocando a fusão do metal de adição, o metal de base ou de ambos [Santos e Quintino, 1992]. Dos vários processos de soldadura que podem ser robotizados, o mais utilizado é o processo de soldadura designado MIG/MAG.

---

<sup>11</sup> Foi solicitado ao Laboratório de Robótica Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, por parte de um parceiro industrial (Empresa Nacional de Construção Metálica), o desenvolvimento de uma aplicação com vista a robotizar as suas linhas de produção fabril.

O processo MIG/MAG<sup>12</sup> - *Metal Inert Gas/Metal Active Gás* - é o que se pretende usar no processo de soldadura robotizado a desenvolver porque apresenta uma boa capacidade de ajuste, é fácil de automatizar e com elevado grau de adaptabilidade a soldaduras de diversos metais ferrosos e não ferrosos.

Segundo Kalpakjian<sup>13</sup>, o processo MIG/MAG é um processo térmico que utiliza uma fonte exterior de gás que serve de protecção ao banho de fusão. O material de adição é depositado através de um arco eléctrico estabelecido entre a peça a soldar e um eléctrodo sólido contínuo (arame) o qual é alimentado pela tocha (ferramenta de soldadura). Dos parâmetros principais de soldadura – a corrente, a tensão, a velocidade de soldadura, o avanço do fio (arame), o gás de protecção e o comprimento do arco – resulta a estabilidade e a qualidade das soldaduras [Choi et al., 1998] [Jones et al., 1998].

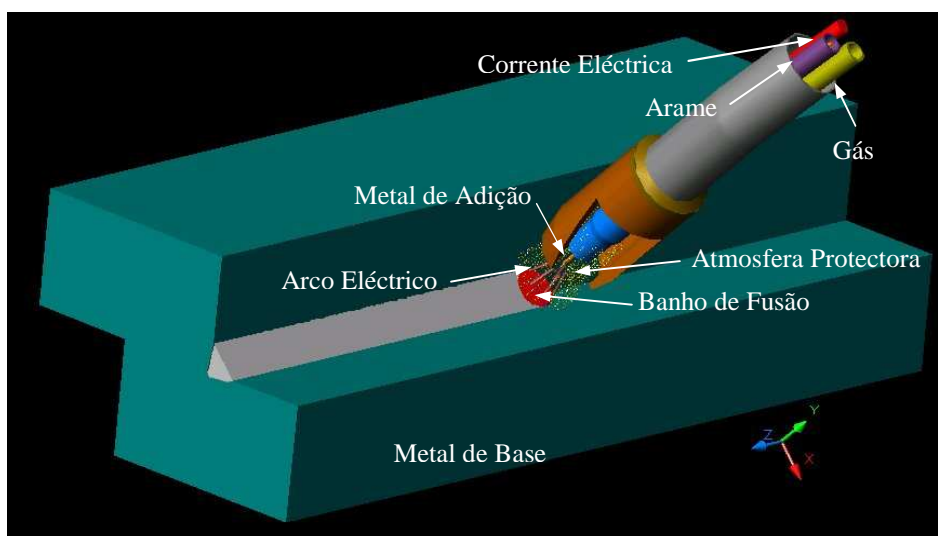


Figura 4.3. Processo de soldadura MIG/MAG [Pires et al., 2001].

<sup>12</sup> O processo MIG é um processo de soldadura no qual a atmosfera protectora é constituída por gases ou mistura de gases inertes como o árgon e o hélio; o processo MAG é igualmente um processo de soldadura mas a atmosfera protectora é constituída por misturas activas como dióxido de carbono ou outras. Todavia designa-se normalmente por processo MIG/MAG devido à dificuldade de distinguir um e outro processo nomeadamente quando se utilizam misturas complexas [Santos e Quintino, 1992].

<sup>13</sup> Veja-se [Kalpakjian, s.d.].

Do processo de soldadura MIG/MAG (Figura 4.3) fazem parte o gerador de corrente, a fonte de gás, o alimentador e a tocha de soldadura. O gerador de corrente é uma máquina de soldadura de corrente contínua. A fonte de gás assegura o fornecimento do gás de protecção do banho de fusão. O alimentador assegura a alimentação do fio fusível até à junta a soldar. A tocha de soldadura assegura o guiamento da extremidade do fio, onde se estabelece o arco eléctrico, bem como a protecção gasosa do fio e do banho de fusão [Santos e Quintino, 1992].

Para se obter um processo suficientemente flexível, robusto e atraente para aplicação no ambiente industrial, o processo de soldadura robotizado deve ser capaz de reconhecer o tipo de junta, o desvio à trajectória pré-estabelecida, a alteração automática dos parâmetros da soldadura.

#### 4.5.2. SISTEMA DE IMPLEMENTAÇÃO – *HARDWARE E SOFTWARE*

A estrutura geral do sistema em implementação envolve o sistema de soldadura, um computador (PC), o controlador do robô e o robô (Figura 4.4) [Pires e Sá da Costa, 2000].

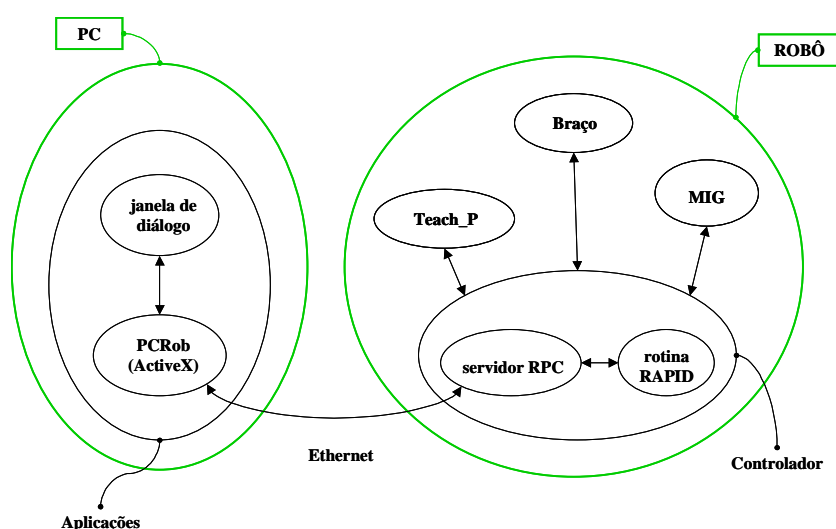


Figura 4.4. Estrutura do sistema a implementar.

- O sistema de soldadura é constituído pela máquina de soldadura (tocha de soldadura) (Figura 4.5);
- Um computador (PC) que permite o controlo geral do sistema. É o PC que contém os algoritmos de processamento de imagem que permite obter as características das peças a soldar bem como a trajectória a seguir. Os algoritmos de controlo estão igualmente implementados no PC e são eles que permitem gerar os dados quer para a trajectória da tocha da soldadura quer para os parâmetros de soldadura. Ao PC cabe também a comunicação com o controlador do robô. Deste modo, o PC gere a aquisição de dados, controla a posição do robô e selecciona os parâmetros de soldadura usados no processo em conformidade com uma base de dados;
- O controlador do robô recebe do PC os dados de posição e orientação da tocha e os dados dos parâmetros de soldadura, ficando responsável pelo movimento da tocha e pela ligação ao controlador dos parâmetros de soldadura;
- O robô é o elemento onde está instalada a tocha, sendo responsável pelo seu posicionamento sobre as peças a soldar.



Figura 4.5. Tocha de soldadura.

Neste sentido, o robô industrial é controlado pelo sistema electrónico computadorizado (controlador), responsável pela tarefa de controlar a estrutura mecânica, coordenando a acção dos motores das juntas do robô de acordo com a informação sensorial de posição e velocidade (e por vezes de aceleração), e do movimento a executar previamente programado. Assim, o robô tem capacidade de programação local, armazenamento de informação, algoritmos de controlo e planeamento de trajectórias que implicam a existência de modelos cinemáticos e dinâmicos para descrever a estrutura do robô e o respectivo movimento.

A arquitectura do *software* é uma arquitectura genérica baseada em objectos que utiliza as capacidades do sistema de controlo original do robô num ambiente distribuído Cliente/Servidor, recorrendo aos modelos de programação que se discriminam [Pires e Sá da Costa, 2000]:

- Cliente/Servidor – é necessário ter um código do servidor a correr em cada equipamento que recebe chamadas de computadores remotos (clientes), executando-as e devolvendo os resultados;
- Chamadas remotas (RPC – *Remote Procedure Calls*) – permite implementar comunicações entre um cliente e o servidor de aplicações distribuídas. O cliente faz o que parece ser um procedimento de chamada local embora a fonte não seja local. O mecanismo de RPC que está a ser usado traduz essa chamada numa comunicação via rede (*network*). O servidor recebe o pedido, executa-o de acordo com a parametrização fornecida e devolve os resultados;
- Partilha de dados (*Data Sharing*) – há funções que partilham entre o cliente e o servidor ficheiros, programas, base de dados, etc. Os serviços que utilizam partilha de dados serão construídos sobre RPC, o qual fornece os meios para a transferência de dados.

Tendo os equipamentos actuais uma livreria de funções que lhes permite desenvolver operações complexas (determinando a sua funcionalidade) e alguma capacidade local de processamento (um microprocessador, capacidades de armazenamento de informação e de comunicação em rede) torna-se possível disponibilizar as referidas operações complexas via rede local num ambiente distribuído do tipo Cliente/Servidor.

Esta estrutura permite, através do computador, gerir uma célula de produção mediante um programa de gestão, controlo e coordenação das operações a executar pela referida célula. Para o efeito, o *software* utilizado para realizar aplicações distribuídas de monitorização e controlo usa uma linguagem estandardizada – o *Microsoft Visual Basic* e o *Microsoft Visual C++* – baseada em plataformas PC a correr sistemas operativos *Win32*, nomeadamente *Windows NT/2000*. A referida estrutura permite ainda gerir a aquisição de dados, controlar e corrigir a posição do robô, conjuntamente com a selecção dos parâmetros da soldadura (de acordo com uma base de dados) usados para descrever o processo de soldadura.

Assim, a utilização de redes industriais, interligando os controladores dos robôs e outros equipamentos devidamente segmentados em células funcionais e linhas de produção, permite a construção de aplicações distribuídas baseadas em computadores pessoais, aliando à sua capacidade de processamento e de programação as funcionalidades dos controladores dos robôs. Deste modo, é possível a gestão e monitorização de células de trabalho, das linhas de produção e de todo o processo produtivo.

O processo de soldadura desenvolvido será integrado em sistemas de produção organizados segundo uma estrutura hierárquica do tipo CIM. Esta estrutura permite o desenvolvimento de interfaces com o utilizador disponibilizando informação *on-line* sobre um robô/controlador específico, ou conjunto de robôs controladores de uma determinada célula ou linha funcional de produção. Vai funcionar em plataformas estandardizadas (já utilizadas em ambiente industrial)

permitindo a integração de novas funcionalidades através de ambientes de programação largamente divulgados.

Para que o utilizador não visualize os pormenores de comunicação em rede, acesso a *hardware*, etc., utilizam-se objectos os quais podem ser construídos com o recurso a várias tecnologias disponíveis. Para este trabalho usaram-se objectos construídos com a tecnologia “Controlos ActiveX”<sup>14</sup> já anteriormente desenvolvidos pelo coordenador do grupo de trabalho Professor Doutor J. Norberto Pires. A tecnologia COM/OLE/ActiveX<sup>15</sup> foi desenvolvida pela *DEC/Microsoft* e é suportada por plataformas *Win32*, para as quais existem boas ferramentas de desenvolvimento, integradas em pacotes como o *Microsoft Visual C++*, com disponibilidade de documentação detalhada e de acesso fácil mesmo através da *Internet*.

Para que o robô receba instruções a partir do PC é necessário a sua programação e um *software* de controlo. Para o *software* de controlo utilizou-se a tecnologia ActiveX; para a programação, cada fabricante de robôs utiliza uma linguagem específica, por exemplo os robôs da ABB são programados com uma linguagem RAPID enquanto os robôs da FANUC utilizam uma linguagem KAREL.

Sublinhe-se que todo o *software* a utilizar, embora específico para um robô manipulador ABB IRB1400 e respectivo controlador ABB S4/M95 (que existe no Laboratório de Robótica Industrial DEM-UC), será adaptado para poder ser usado nos robôs FANUC, mais concretamente no FANUC M16 100i com o controlador RJ3 (robôs existentes no parceiro industrial interessado na presente aplicação).

---

<sup>14</sup> Das várias tecnologias existentes para a construção de objectos, optou-se pela “Controlos ActiveX” porque o grupo de trabalho do Laboratório de Robótica Industrial do DEM-UC já tem alguma experiência nesta tecnologia.

<sup>15</sup> [Box, 1998] e [Rogerson, 1997].

## *Programação do Robô*

A programação de um robô consiste em indicar a sequência de acções (por exemplo, mover-se entre pontos pré definidos ou manipular objectos em seu redor) que o robô deve realizar durante a execução da tarefa. O método de programação permite indicar a tarefa ao robô mediante o uso de uma linguagem de programação específica.

No decurso do programa interacciona-se com a memória do sistema, com o controlo cinemático e dinâmico do robô e com as entradas/saídas do sistema. Através da interacção com a memória do sistema é possível ler e actualizar o conteúdo das variáveis utilizadas no programa; com o sistema de controlo cinemático e dinâmico do robô dá-se o sinal para accionar o robô a partir das especificações do movimento que se lhes proporciona; e, finalmente, com as entradas/saídas do sistema obtém-se a sincronização do robô com as máquinas e elementos que compõem o seu ambiente.

O sistema de programação é então a ferramenta com a qual o utilizador acede às diversas prestações do robô, existindo uma relação directa entre as características e possibilidades do sistema de programação e as características do robô. A flexibilidade em aplicar o robô depende em grande medida das características do seu sistema de programação.

Na base da aplicação em desenvolvimento esteve envolvido um robô da ABB, que na sua programação utiliza uma linguagem RAPID. No entanto, por imposição da tecnologia disponível na empresa à qual se destina a aplicação, substituiu-se os robôs da ABB por robôs FANUC os quais utilizam uma linguagem KAREL.

De referir que todas as linguagens de programação de robôs<sup>16</sup> envolvem o ambiente da programação, o modelo do ambiente, tipo de dados, entradas/saídas

---

<sup>16</sup> Veja-se [Lozano, 1982], [Blume e Jakob, 1986] e [Craig, 1989].

(digitais e analógicas), controlo do movimento e controlo do fluxo de execução do programa.

Um ambiente de programação adequado permite aumentar a produtividade da própria programação. O sistema de programação de robôs deve ter uma boa capacidade de execução passo a passo, tendo em conta a interacção em tempo real que existe entre os diferentes equipamentos com o controlador do robô.

O modelo do ambiente é a representação que o robô tem dos objectos com os quais interactua, nomeadamente as características geométricas (posição e orientação dos objectos), a forma, as dimensões, o peso, etc. Para definir a posição e orientação de cada objecto associa-se-lhe um sistema de referência de modo que a posição e orientação deste sistema de referência esteja referenciado a um sistema base. No presente caso, o sistema de referência está localizado na tocha de soldadura (objecto) referenciado a um sistema base situado na mesa de trabalho.

Os dados utilizados no sistema de programação de robôs são do tipo convencional (inteiros, reais, booleanos, etc.) e outros específicos que definem as operações de interacção com o seu meio, como por exemplo os dados que especificam a posição e orientação dos pontos e objectos a que deve aceder o robô. A posição e orientação espacial de um objecto podem ser especificadas (como se demonstrou no capítulo 3 deste trabalho) utilizando as coordenadas articulares ou as coordenadas cartesianas do robô. As coordenadas articulares do robô ( $q_1, q_2, \dots, q_n$  em que  $n$  é o número de graus de liberdade do robô) indicam os valores articulares que deve tomar o robô para posicionar e orientar o seu extremo; as coordenadas cartesianas em que se associa um sistema de referência de coordenadas  $\{S_1\}$  ao objecto, a posição é descrita pelas coordenadas cartesianas da origem de  $\{S_1\}$  ( $p_x, p_y, p_z$ ) e a orientação por diferentes tipos de representação: Ângulos de Euler ( $\varphi, \vartheta, \psi$ ), Quatérnios ( $\cos\left(\frac{\theta}{2}\right); \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)k_x; \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)k_y; \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)k_z$ ).

Para conseguir a integração e sincronização dos robôs nos processos de fabricação é fundamental a comunicação do robô com outras máquinas ou processos que interactivam com ele. Esta comunicação obtém-se mediante sinais binários de entrada/saída que possibilitam ao robô começar determinada tarefa ou ordenar a um dispositivo externo que inicie a sua tarefa.

Outro modo de estabelecer a comunicação do robô com o seu ambiente de trabalho consiste na comunicação através de rede local. Esta comunicação permite integrar o robô num sistema informático geral em que o seu funcionamento é controlado mediante um computador externo. Os sistemas RAPID de ABB e o KAREL da FANUC são exemplos de sistemas com esta capacidade.

Na programação do robô deve-se especificar o seu movimento: ponto de destino, tipo de trajectória a realizar, a velocidade média e a precisão com que deve chegar ao ponto de destino. Neste sentido, muitos sistemas de programação definem pontos (posição e orientação) especificando a precisão com que o robô deve alcançar determinado ponto.

Assim, o controlo (cinemático e dinâmico) do robô, recebe as referências de posição e orientação provenientes do programa, não admitindo uma nova referência se o extremo do robô ainda não alcançou a referência em vigor com a precisão indicada. Por exemplo, a aplicação de *software* KAREL que integra os robôs FANUC utiliza os comandos *move to*, *move near*, *move away*, *move about*, *move relative*, *move axis* para movimentar o robô ponto a ponto; para um movimento em trajectória contínua recorre ao comando *move along*. Permite também programar a sua aceleração ou desaceleração, precisão, etc. É ainda possível através da linguagem KAREL aceder a ficheiros de base de dados utilizando rotinas quer de procedimentos quer de funções, permitindo ao utilizador o controlo por teclas de algumas operações do robô.

### ***Controlador do Robô***

O sistema de controlo é um sistema computacional que permite o controlo e a supervisão da estrutura, fornecendo o ambiente de programação. Assim, com o *software* de controlo (que usa um objecto disponível ActiveX), é possível implementar métodos e estruturas que usando funções de uma maneira fácil, permitem ao utilizador partir delas para obter resultados. Este *software* de controlo usa rotinas RPC (*Remote Procedure Calls*) que permitem o controlo do robô através do PC por parte dos utilizadores.

O *software* de comunicação com o robô baseia-se na utilização de serviços remotos disponibilizados pelo controlador do robô (por exemplo sistema S4 da ABB ou RJ3 da FANUC). Os serviços que são necessários para realizar a arquitectura de *software* proposta, são os serviços de acesso a variáveis definidas na memória do controlador do robô. Para além desses serviços estão disponíveis serviços de gestão de ficheiros e de programas. Funções para utilização desses serviços elementares e outros mais complexos foram construídas em C++ e agrupadas numa livraria e num objecto COM/OLE/ActiveX denominado PCROB<sup>17</sup>.

Estando o robô ligado ao computador (PC) através de uma porta tipo *Ethernet*, o *software* de controlo faz a comunicação entre o robô e o PC, funcionando como um servidor que disponibiliza ao cliente uma série de serviços que constituem a sua função primária (Figura 4.6 e 4.7). Se o robô responder a comandos remotos enviados pelo PC pode iniciar ou encerrar um procedimento de soldadura, ser comandado para seguir trajectórias, simular o processo na sua totalidade ou passo a passo.

---

<sup>17</sup> Uma lista completa das funções implementadas no objecto PCROB é apresentada em <http://robotics.dem.uc.pt/norberto/pcrob>.

```

while never_end;
    switch decision
        case 1: call routine_1; break;
        case 2: call routine_2; break;
        case 3: call routine_3; break;
        ...
        case n: call routine_n; break;
    end_switch;
end_while;

```

Figura 4.6. O software do controlador do robô a funcionar como servidor.

Apresenta-se de seguida a programação da rotina “routine\_1” considerada uma função que permite ao robô executar o processo de soldadura.

```

PROC weld()
    weldon:=0; i:=1;
    WHILE ((decision1=9401) AND (i<=numberpoints) AND (i>=1)) DO weldpoint:=i;
        wd_iref:=trj_voltage{i}; feed_iref:=trj_current{i};
        wd_href:=trj_voltage{i}; feed_href:=trj_current{i};
        wd_ref:=trj_voltage{i}; feed_ref:=trj_current{i};
        IF (trj_type{i}=0) THEN
            weld_on;
            weldon:=1;
        ENDIF
        ppos:=trj{i}; pvel:=trj_vel{i};
        pzone:=trj_prec{i}; ptype:=trj_mode{i};
        move_gen;
        IF (Weldon=1) AND ((i+1>numberpoints) OR (trj_type{i+1}=1)) THEN
            weld_off;
            weldon:=0;
        ENDIF
        i:=i+1;
    ENDWHILE
    IF (Weldon=1) THEN
        weld_off;
        weldon:=0;
    ENDIF
ENDPROC

```

Figura 4.7. Módulo de programação que permite ao robô executar a tarefa de soldadura (robô a funcionar como servidor).

O *software* do controlador de robôs apresenta-se estruturado em módulos, cabendo a cada um o desempenho de determinadas tarefas. O controlador do robô ABB dispõe, por exemplo, do módulo **PROC WELD()**, cujo o código de programação se apresentou (Figura 4.7), composto pelo programa de soldadura que é executado quando se pretende soldar peças; do módulo **PROC MOVE\_GEN()** que se destina à execução do tipo de movimento pretendido.

#### *Painel de Controlo do Robô*

O painel de controlo do robô (Figura 4.8) foi desenvolvido para mostrar algumas das funções do painel de controlo de um manipulador industrial de modo a permitir ao utilizador ligar/desligar o motor (**Motor ON**, **Motor OFF**), iniciar/parar programas (**Prepare Program**, **Run Program**, **Halt Program**), carregar ou apagar módulos de programas do controlador do robô (**Delete Prog**, **Load Prog**). Através do servidor RPC é possível receber mensagens/eventos, ou seja, chamadas RPC feitas pelo controlador do robô quando ocorrem acontecimentos.

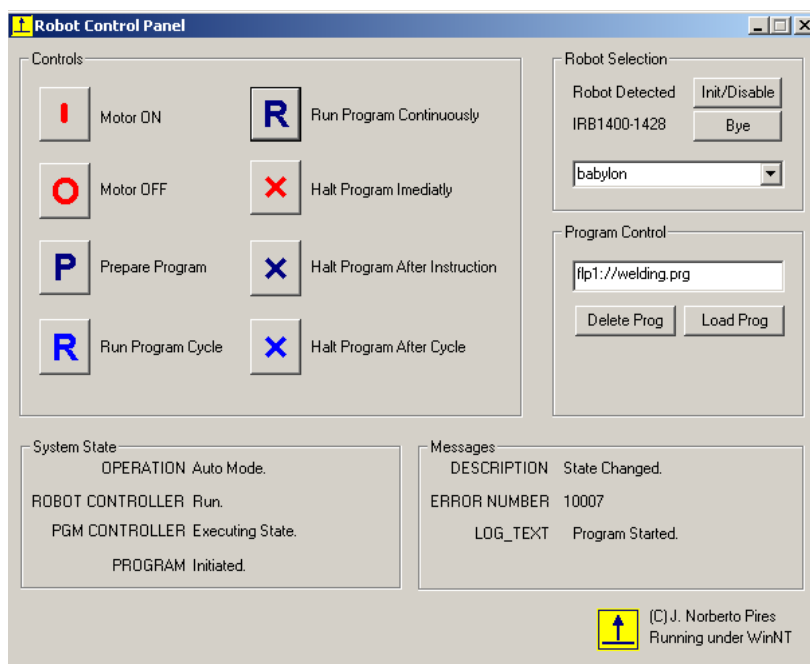


Figura 4.8. Painel de controlo do robô.

O código do painel de controlo foi desenvolvido tendo por base todos os robôs ABB equipados com controlador da família S4.

Para exemplificar algumas das funções do painel de controlo do robô apresenta-se seguidamente o código para as funções **Motor ON** (Figura 4.9) e **Motor OFF** (Figura 4.10). Com o botão **Motor ON** o robô está apto para se movimentar e executar uma tarefa.

```
void CCtrpanelDlg::Onmotoron()
{
    nresult=m_pon.MotorON();
    if (nresult<0) msg.SetWindowText("Motor On falhou.");
}
```

Figura 4.9. Código da função Motor ON.

O botão **Motor OFF** permite imobilizar imediatamente o robô assim como terminar qualquer tarefa que esteja a executar.

```
void CCtrpanelDlg::Onmotoron()
{
    nresult=m_pon.MotorOFF();
    if (nresult<0) msg.SetWindowText("Motor Off falhou.");
}
```

Figura 4.10. Código da função Motor OFF.

### *Explorador de Ficheiros*

Para que o robô execute a tarefa pretendida, para além das aplicações Cliente/Servidor, é necessário proceder à troca de ficheiros entre o PC e o controlador do robô; assim como transferir programas, módulos de *software*, base de dados, etc. entre o controlador do robô e o PC. Deste modo é necessário uma

aplicação (Figura 4.11) que funcione de modo idêntico ao explorador de ficheiros do *Windows*, em que os robôs aparecem como discos extra, permitindo ao utilizador aceder ao disco interno ou à disquete do controlador do robô de uma maneira simples.

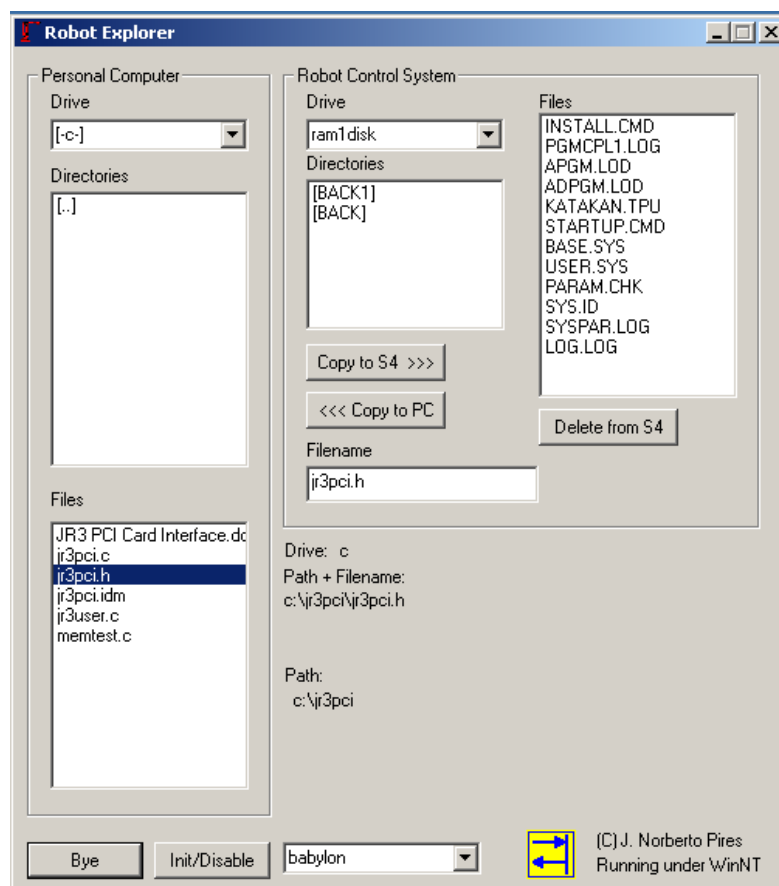


Figura 4.11. Explorador de ficheiros do robô.

Note-se que esta aplicação (tal como o painel de controlo do robô) foi desenvolvida para os robôs ABB equipados com controlador da família S4. Se usarmos um robô da FANUC M16 100i com um controlador RJ3, está disponibilizado um *kit* de desenvolvimento de aplicações para PC constituído por um objecto ActiveX<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> Para esta temática consultar FANUC Robotics, PC Developers Kit, <http://www.fanucrobotics.com>.

### ***Implementação da Soldadura Robotizada***

Para que os robôs efectuem a operação de soldadura terão que “aprender” uma trajectória e repeti-la. A trajectória será definida por um ponto (posição e orientação) de início (posição actual do robô) e um ponto de fim (ponto para o qual o robô se irá movimentar), contendo ou não pontos intermédios. As trajectórias podem-se obter através de um modelo CAD<sup>19</sup> da peça a soldar, podendo proceder-se a ajustes no decurso do processo de soldadura.

Para o controlo e monitorização do processo de soldadura robotizado temos que definir as trajectórias e respectivos parâmetros, fazer os ajustes *on-line* da posição do robô e dos parâmetros da soldadura (sempre que necessário) e proceder a uma análise do cordão de soldadura efectuado de modo a obter soldaduras com qualidade uniforme.

Neste sentido, as aplicações a desenvolver devem permitir, por um lado, criar e manipular ficheiros de soldadura e, por outro lado, ajustar o robô aos pontos que definem a trajectória da soldadura a efectuar. Para o efeito, e tendo presente as diferentes ferramentas visuais que se podem usar, seleccionou-se o *Microsoft Visual C++* e o *Visual Basic*, porque são fáceis de utilizar e detentores de grandes potencialidades, tais como: a possibilidade de programar por objectos utilizando ferramentas visuais, utilização de objectos desenvolvidos com componentes ActiveX para robôs, e o ambiente de programação é familiar uma vez que possibilita a utilização de computadores pessoais.

---

<sup>19</sup> A utilização de sistemas CAD (Projecto Assistido por Computador) permite aos programadores de robôs (destinados a operações de soldadura) reduzir os custos de preparação do processo produtivo. Embora CAD permita obter os dados de uma peça, mas esses dados não correspondem à sua geometria real, devido às tolerâncias e à preparação insuficiente da peça. No entanto, os dados CAD podem ser usados como uma primeira informação porque quando decorre a operação de soldadura, se os sensores detectarem possíveis desvios, pode procede-se então às respectivas correcções [Santos e Quintino, 1992].

### Painel de Definição de Soldadura

Para criar e manipular ficheiros de soldadura (pontos de definição da trajectória de soldadura a efectuar) tem que se desenvolver uma aplicação que contenha a definição completa da soldadura que se pretende realizar (Figura 4.12). Deste modo, estão desenvolvidos meios para criar e editar ficheiros de soldadura e, se necessário, alterar ou ajustar os pontos de uma trajectória (movimentando o robô para a posição desejada através do PC ou através de uma consola portátil do robô). Os pontos são definidos num sistema de referência situado na ponta da tocha de soldadura referenciado a um sistema base situado na mesa de trabalho.

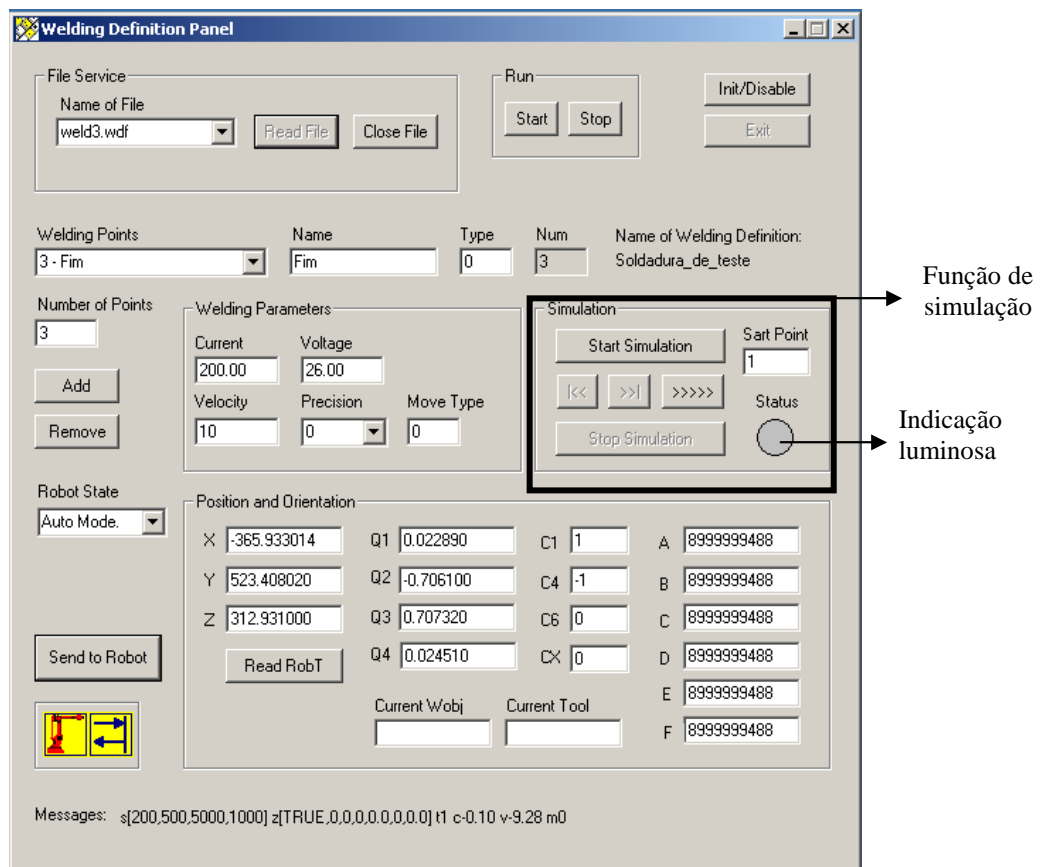


Figura 4.12. Painel de definição de soldadura.

Com esta ferramenta é possível editar os pontos da trajectória e respectivos parâmetros de soldadura (corrente, tensão, velocidade, etc.), e ainda fazer uma

simulação de execução de uma operação de soldadura com a tocha desligada dando a impressão de que o robô está a efectuar a operação de soldadura quando a indicação **Status** passar para vermelho. O objectivo desta simulação é possibilitar a observação de todo o programa de soldadura.

O robô envia eventos que ao serem visualizados neste painel permitem, quando necessário, aceder a funções com a finalidade de bloquear o equipamento de modo a evitar acidentes pessoais ou danificar o próprio equipamento.

### *Painel de Ajuste da Soldadura*

Com a criação do painel de ajuste da soldadura (Figura 4.13) estão criadas as condições para se colocar o robô na posição desejada, pois permite fazer ajustes de pontos em tempo real e até mesmo adquirir novos pontos. Usando comandos de movimento cartesianos X, Y, Z ou de juntas, é possível movimentar o robô a partir do PC.

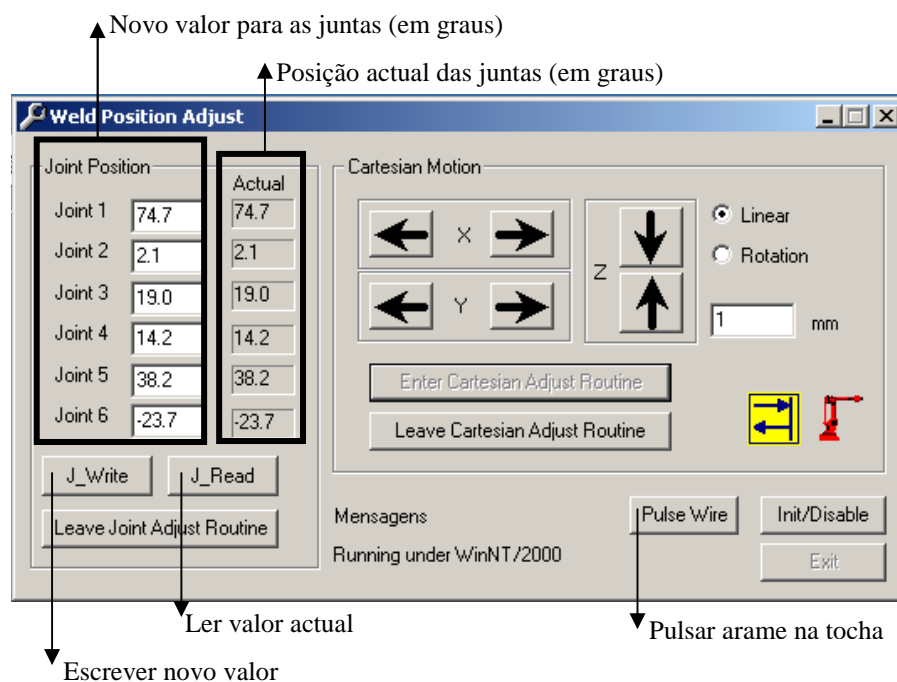


Figura 4.13. Painel de ajuste da soldadura.

Assim, por exemplo, o botão **J\_Read** permite ao utilizador obter a posição real do robô (ler o valor actual), e move-lo através do PC, utilizando o movimento cartesiano ou o movimento de juntas; o botão **J\_Write** permite escrever o novo valor da posição do robô (Figura 4.13).

Para clarificar a criação do painel de ajuste da soldadura, apresenta-se como exemplo, o código da função de movimentação do robô (Figura 4.14). A movimentação do robô especificando os ângulos das juntas é conseguida com a caixa **Joint Position**.

```
IF decision1=9101 THEN
    WHILE decision1>0 DO
        MoveAbsJ joints_now, velc, zone, toolt;
    ENDWHILE
    decision1:=123;
ENDIF
```

Figura 4.14. Código da função de movimentação do robô (rotina em RAPID a correr no controlador do robô).

A seguir apresentam-se rotinas (C++) com o código da função “**Joint Position actual**” (Figura 4.15) as quais permitem o acesso à rotina de serviço “decision1” pertencente ao código da função da movimentação do robô anteriormente apresentado.

```

Void CWeldadjustDlg::Onjwrite()
{
VARIANT var; BOOL all_done;
float warn[12]; float value=9101;
long i; CString msg;
SAFEARRAY FAR *psa; SAFEARRAYBOUND rgsabound[1];
if (!on_cycle)
{
nResult=m_pon.WriteNum(LPCTSTR("decision1"),&value);
if (nResult<0) m_msg.SetWindowText("Failed to enter routine.");
on_cycle=TRUE;
m_leavej.EnableWindow(TRUE);
CWeldadjustDlg::Onjread();
return;
}
m_j1.GetWindowText(msg); if (msg.GetLength()) warn[0]=(float) atof(msg);
m_j2.GetWindowText(msg); if (msg.GetLength()) warn[1]=(float) atof(msg);
m_j3.GetWindowText(msg); if (msg.GetLength()) warn[2]=(float) atof(msg);
m_j4.GetWindowText(msg); if (msg.GetLength()) warn[3]=(float) atof(msg);
m_j5.GetWindowText(msg); if (msg.GetLength()) warn[4]=(float) atof(msg);
m_j6.GetWindowText(msg); if (msg.GetLength()) warn[5]=(float) atof(msg);
warn[6]=(float)9e9; warn[7]=(float)9e9;
warn[8]=(float)9e9; warn[9]=(float)9e9;
warn[10]=(float)9e9; warn[11]=(float)9e9;
all_done=FALSE; VariantInit(&var);
rgsabound[0].lLbound=0; rgsabound[0].cElements=12;
var.vt=VT_ERROR; psa=SafeArrayCreate(VT_R4, 1, rgsabound);
for (i=0; i<=11; i++)
{
var.parray=psa;
if (!all_done) { var.vt= VT_ARRAY | VT_R4; SafeArrayLock(psa);
m_pon.WriteJointTarget("joints_now",&var);}
else AfxMessageBox("Oops!");
VariantClear(&var);
}
}

```

Figura 4.15. Rotinas em C++ as quais permitem escrever o valor actual das juntas do robô.

Enquanto para movimentar o robô se utiliza a caixa **Joint Position**, para pulsar o arame na tocha de soldadura utiliza-se o botão **Pulse Wire** que permite controlar a velocidade de avanço de arame (mediante uma saída analógica aoFEED\_REF). O accionamento do motor que controla o arame da tocha é feito por uma saída digital (doFEED) (Figura 4.16).

```

void CWeldajustDlg::Onpulse()
{
    float value=0.25;
    long valuer;
    nResult=m_pon.WriteAnalog(LPCTSTR("aoFEED_REF",&value);
    if (nResult<0) m_msg.SetWindowText("Failed to update anlog reference.");
    valuer=1;
    nResult=m_pon.WriteDigital(LPCTSTR("doFEED",&valuer);
    if (nResult<0) m_msg.SetWindowText("Failed to write digital output.");
    Sleep(500);
    valuer=0;
    nResult=m_pon.WriteDigital(LPCTSTR("doFEED",&valuer);
    if (nResult<0) m_msg.SetWindowText("Failed to write digital output.");
}

```

Figura 4.16. Código da função que permite controlar o arame na tocha.

### 4.5.3. RESULTADOS PRÁTICOS

Com a aplicação de robôs em operações de soldadura pretendia-se realizar soldaduras de um modo eficiente, económico e com elevada precisão – objectivos norteadores deste trabalho. Após a criação de todas as ferramentas requeridas, o robô está apto a integrar um posto de trabalho na indústria (Figura 4.17) e a executar operações de soldadura (Figura 4.18) com a qualidade e precisão requeridas.



Figura 4.17. Mesa de trabalho e robô em posição para executar uma soldadura.

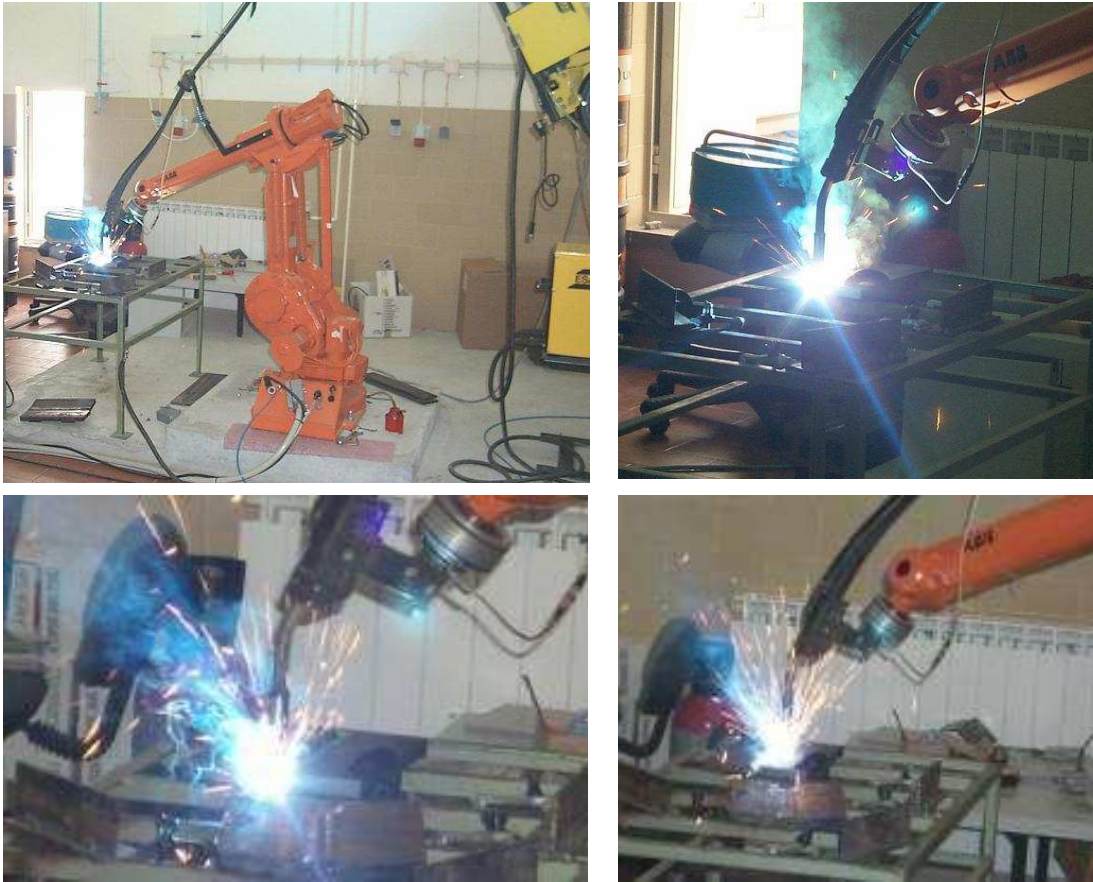


Figura 4.18. Execução de soldadura robotizada.

#### 4.6. CONCLUSÃO

Dadas as peculiares características do ambiente da construção (falta de estruturação e organização dos estaleiros; complexidade, diversidade e coexistência de tarefas, entre outras) a utilização de robôs na construção deverá fazer-se essencialmente sem os problemas inerentes aos ambientes de estaleiro e a montante da sua aplicação em obra.

A pré-fabricação é a área de aplicação óptima dos actuais robôs manipuladores industriais no sector da construção. Para o efeito é necessário uma modificação do entendimento conceptual da indústria da construção mais especificamente do próprio processo de construção.

Com o caso prático desenvolvido pretendia-se demonstrar que o uso de robôs no processo de soldadura industrial permite aumentar a produtividade e qualidade das soldaduras, libertando o homem dos riscos inerentes a esta actividade. Por outro lado, a optimização do interface com o utilizador faz com que o recurso a mão-de-obra especializada seja cada vez mais diminuta.

## **Capítulo 5**

### **CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

## **5.1. INTRODUÇÃO**

Neste Capítulo apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e as linhas de investigação que consideramos de interesse para desenvolvimentos futuros.

## **5.2. CONCLUSÕES**

Ainda que o sector da construção se apresente com características próprias e específicas que, de um modo geral, representam condicionalismos à aplicação de robôs considera-se que o processo de automatização no âmbito da construção civil é possível e necessário.

As iniciativas que estão a surgir e que visam a industrialização da construção são ainda, no entanto, reduzidas. A utilização das metodologias e técnicas que já permitiram a outras indústrias atingir elevados níveis de produtividade, objectivo último de todo e qualquer sector industrial, constituem um desafio a vencer. As dificuldades são inúmeras e enormes.

Sabemos que o sector da construção civil e obras públicas tem grande projecção económica, nomeadamente ao nível da quantidade e de diversidade de mão-de-obra empregada.

A grande necessidade de mão-de-obra e a escassez de trabalhadores qualificados origina o recurso a mão-de-obra sem formação profissional (ainda que de baixo custo). No entanto, a actividade da construção insere-se num mercado que tem a particularidade de se definir por uma forte competitividade, característica esta que se expressa numa construção com baixo preço<sup>1</sup> mas com qualidade – difícil de conseguir quando se recorre a mão-de-obra não especializada. Este sector apresenta ainda uma reconhecida penosidade inerente às várias actividades que o compõem e que se traduzem em expor os trabalhadores a vários riscos

---

<sup>1</sup> Quando não sujeita à especulação imobiliária...

profissionais – condições climatéricas adversas, ambientes nocivos (ruídos, poeiras), movimentação manual de cargas pesadas, manuseamento de produtos tóxicos, quedas de altura e outras.

Estes apresentam-se desde já como argumentos válidos a favor da industrialização da construção: alguns dos sistemas robotizados disponíveis no mercado, com vários níveis de sofisticação, permitem responder às exigências atrás formuladas tornando possível automatizar algumas das múltiplas tarefas que constituem o processo construtivo. Sendo a actual indústria de robôs constituída por máquinas versáteis com poderosos ambientes de programação e enorme flexibilidade de utilização, podem com grande perfeição e precisão substituir o homem na realização de diversas tarefas próprias do sector da construção - incluindo as tarefas de risco e em ambientes nocivos.

Uma leitura mesmo superficial deste facto traz impactos sociais claros: a robótica conduz ao temor pelo desemprego dos trabalhadores. No entanto, convém sublinhar que não se trata propriamente da redução da mão-de-obra empregada no sector, mas sobretudo de conseguir, com a mesma mão-de-obra, produzir cada vez mais em menor tempo (contribuir para a redução sensível dos tempos de construção e, conseqüentemente, redução dos custos de produção), contribuir para a defesa da qualidade, e por outro lado, diminuir o risco inerente às várias tarefas.

Da análise do meio existente para a robotização na construção chega-se à conclusão que as condições de trabalho são complexas e variadas.

De facto, a actividade da construção tem a particularidade de se definir pela desorganização e uma certa improvisação, falta muitas vezes o planeamento, a racionalização, a normalização e a programação das actividades.

A estrutura produtiva da indústria da construção é também muito complexa e geralmente, sob a alçada de um empreiteiro geral, temos uma grande quantidade e diversidade de subempreiteiros e outros prestadores de serviços. Muitos deles constituem pequenas empresas sem capacidade económica e produtiva para fazer progressos tecnológicos.

Por outro lado, as obras e respectivos estaleiros ao caracterizarem-se por locais não estruturados, representam um exemplo e um desafio à mobilidade e reconhecimento do ambiente de trabalho por parte dos robôs.

Superar essas dificuldades implicaria que os robôs tivessem capacidades de locomoção, um certo grau de “inteligência”, visão, que estivessem preparados para trabalhar no exterior, movendo-se em locais difíceis e não protegidos, capazes de manusear peças pesadas e de grandes dimensões, bem como materiais frágeis e, dada a grande dispersão geográfica das obras, devem ser fáceis de transportar.

Com a tecnologia existente no domínio da robótica é possível superar cada uma destas dificuldades. A viabilidade económica de cada uma teria no entanto de ser oferecida a um custo justificado pelo aumento da produtividade.

Como esta é uma área de investigação e desenvolvimento constante (e na qual se esperam avanços significativos nos próximos tempos) a tendência será produzir sistemas cada vez mais baratos e mais potentes. O desenvolvimento da robótica direcciona-se no sentido de aumentar a mobilidade dos robôs, a sua destreza e autonomia de acção, o que colocará a automação ao alcance das pequenas e médias empresas pois serão cada vez mais numerosas as implementações em campos em que ganhos de produtividade compensam os custos do equipamento e da implementação.

No domínio da introdução da robótica na indústria da construção, há também que se apostar na reorganização dos estaleiros, na alteração dos processos tecnológicos e na definição das tarefas a desenvolver de modo a permitir a implementação de novos métodos de execução.

Face às dificuldades inerentes à estruturação dos actuais estaleiros e face aos custos que as empresas têm que suportar com a contratação e deslocação dos trabalhadores para os locais de trabalho (muitas vezes distantes), justifica-se apostar em novos métodos de trabalho transferindo para instalações fixas o máximo de operações possíveis, aproveitando os avanços da tecnologia robótica,

integrando e adaptando os robôs industriais disponíveis quer em termos das suas ferramentas de trabalho quer em termos de programação (apostar em sistemas genéricos programáveis, facilmente adaptáveis de modo a torná-los cada vez mais flexíveis e com custo de implementação cada vez mais acessível) às necessidades de fabrico específicas existentes na pré fabricação, o que obriga à existência, a montante da construção, de uma indústria em que as tarefas são executadas em ambientes fabris controlados e não nos actuais estaleiros de obra.

Deste modo, a possibilidade de incorporar uma percentagem significativa de pré-fabricação no sector da construção constitui, simultaneamente, o campo privilegiado e o mais viável de aplicação da robótica nesta indústria.

Ao longo deste trabalho sublinhou-se que, por definição, o robô industrial é multifuncional – característica que permite a sua aplicação a um número, quase ilimitado, de funções.

Os desenvolvimentos práticos efectuados durante a elaboração deste trabalho mostram que a robotização é óptima em determinados processos como a paletização e a soldadura, o que vem confirmar trabalhos anteriores<sup>2</sup>.

A utilização de robôs no processo de soldadura constitui mesmo a aplicação mais difundida e uma solução rentável. Cremos que se justifica a sua aplicação pelas condições intrínsecas do trabalho em causa:

- Ambiente de risco: temperaturas elevadas, exposição a radiações, inalação de fumos, poeiras, gases, etc.;
- Grau de repetibilidade elevado tornando-a cansativa com a consequente perda de produtividade do operário;
- Elevada exigência quanto à qualidade dos resultados, exigindo trabalhadores qualificados;
- Um grande número de produtos requer operações de soldadura durante o processo de construção.

---

<sup>2</sup> [Engelberger, 1980], [Appleton e Williams, 1987] e [Groover, 1989].

Para já, a realização deste e doutros tipos de integração, sobretudo a montante da indústria da construção, constituem a chave da aplicação óptima dos recentes progressos da indústria robótica.

## **5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Requere-se investigação continuada no desenvolvimento de aplicações no âmbito da indústria robótica.

A preocupação com a programação é de longe a mais evidente. Efectivamente, as melhorias na programação justificam-se por ser este um factor que contribuirá para melhorar significativamente os actuais robôs. Estes devem ser mais fáceis de usar e programar de modo a facilmente serem utilizados por trabalhadores sem formação especializada.

Tal permitirá eliminar o recurso exclusivo a mão-de-obra qualificada, muitas vezes inexistente ou muito cara.

A par do facto dos actuais robôs serem difíceis de usar e programar, o trabalhador industrial depara-se com outra dificuldade – tem de operar com diferentes equipamentos cada um com um ambiente de programação, constituindo uma linguagem específica. Esta deve ser uma outra dificuldade a superar a curto prazo e um trabalho futuro deve ser direccionado no sentido de ultrapassar esta dificuldade.

Um outro campo de investigação visará a obtenção de melhorias na estrutura mecânica dos robôs, a qual deve ser cada vez mais leve e flexível.

Será igualmente necessária investigação para desenvolver robôs especializados, com capacidade para trabalhar no exterior e em meios não estruturados e perigosos permitindo assim, ainda que a longo prazo e no desempenho de tarefas limitadas, a introdução de robôs em estaleiro.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [Appleton e Williams, 1987] Appleton, E.; Williams, D. J., *Industrial Robot Applications*, Halsted Press, John Wiley and Sons y Open University Press, 1987.
- [Asimov e Frenkel, 1985] Asimov, I.; Frenkel, K. A., *Robots. Máquinas a imagen y semejanza del hombre*, Plaza y Janés, 1985.
- [Balaguer, 2000] Balaguer, C., *Open Issues and Future Possibilities in the eu Construction Automation*, 17th IAARC, Taipei, Taiwan, 2000.
- [Barrientos et al., 1997] Barrientos, A.; Peñín, L. F.; Balaguer, C.; Aracil, R., *Fundamentos de Robótica*, Universidad Politécnica de Madrid, McGraw-Hill, España, 1997.
- [Blume e Jakob, 1986] Blume, C.; Jakob, W., *Programming Languages for Industrial Robots*, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [Bottema e Roth, 1979] Bottema, O.; Roth, B., *Theoretical Kinematics*, North Holland, Amsterdam, 1979.
- [Box, 1998] Box, D., *Essential COM*, Addison-Wesley, 1998.
- [Capek, 1935] Capek, K., *R.U.R. Rossum's Universal Robots*, F. R. Borový, Praga, 1935.
- [Capek, 1966] Capek, K., *R.U.R. Robots Universales Rossum*, Alianza Editorial, Libro de bolsillo, Madrid, 1966.
- [Choi et al., 1998] Choi, S. K.; Yoo, C. D.; Kim, Y.S., *Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW. Part1: Globular and Spray Transfer Mode Welding*, pp. 38-44, *Part2: Short Circuit Transfer Mode*, pp. 45-51, *Welding Journal*, 77(1), 1998.
- [Cortés, 1989] Cortés Cherta, M., *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas*, Cuatro tomos, Editores Técnicos Asociados, Barcelona, 1989.

- [Craig, 1989] Craig, John J., *Introduction to robotics: mechanics and control*, 2<sup>nd</sup> edition, Addison-Wesley Publishing Company, United States of America, 1989.
- [Creus, 1979] Creus, A., *Instrumentación industrial*, Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 1979.
- [Denavit e Hartenberg, 1955] Denavit, J.; Hartenberg, R. S., *A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices*, Journal of Applied Mechanics, June 1955.
- [Deppert, 1994] Deppert, W., *Dispositivos neumáticos*, Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 1994.
- [Engelberger, 1980] Engelberger, J. F., *Robotics in Practice*, Kogan Page, Londres, 1980.
- [Ferraté, 1986] Ferraté, G., *Robótica industrial*, Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 1986.
- [Fu et al., 1987] Fu, K. S.; Gonzalez, R. C.; Lee, C. S. G., *Robotics: control, sensing, vision and intelligence*, McGraw-Hill, Singapore, 1987.
- [Gonzalez e Woods, 1992] Gonzalez, R. C.; Woods, R. E., *Digital Image Processing*, Addison Wesley, 1992.
- [Groover et al., 1986] Groover, M. P.; Weiss, M.; Nagel, R. N.; Odrey, N. G., *Industrial Robotics Technology, programming and applications*, McGraw-Hill, Singapore, 1986.
- [Groover, 1989] Groover, M. P., *Robot y efectores finales en: Robótica Industrial. Tecnología, Programación y Aplicaciones*, McGraw-Hill, Madrid, 1989.
- [Hamilton, 1969] Hamilton, W. R., *Elements of Quaternions*, Chelsea Publishing Co, New York, 1969.

- [Hasegawa, 1996] Hasegawa, Y., *Current Status Key Issues for Construction Automation and Robotics in Japan*, Paper presented at 13<sup>th</sup> ISARC, June, 1996.
- [Hayes, 1983] Hayes, J., *The Genius of Arab Civilization*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1983.
- [Jones et al., 1998] Jones, L. A.; Edgar, T. W.; Lang, J. H., *Images of Steel Electrode in Ar-20% Shielding During Constant Current Gas Metal Arc Welding*, *Welding Journal*, 77(1), pp. 135-141, 1998.
- [Lozano, 1982] Lozano-Pérez, T., *Robot Programming*, Memo AIM-698, Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [Kalpakjian, s.d.] Kalpakjian, S., *Manufacturing Engineering and Technology*, 3<sup>rd</sup> ed. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co.
- [Koren, 1985] Koren, Y., *Robotics for Engineers*, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [Kusiak, 1986] Kusiak, A., *Modelling and Design of Flexible Manufacturing Systems*, Elsevier Science Publishers, 1986.
- [McKerrow, 1986] McKerrow, Phillip John, *Robotics, an Academic Discipline?*, *Robotics*, 2, 3, pp. 267-274.
- [McKerrow, 1991] McKerrow, Phillip John, *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley Publishing Company, Singapore, 1991.
- [Miyatake e Kangari, 1993] Miyatake, Y.; Kangari, R., *Experiencing Computer Integrated Construction*, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 119, n°2, 1993.
- [Myhr, 1999] Myhr, M., *Industrial New Trends: ABB view of the Future*, International Workshop on Industrial Robotics, New Trends and Perspectives, Parque das Nações, Lisboa, 1999.

- [Nachtigal, 1990] Natchtigal, C. L., *Instrumentation and Control*, Fundamentals and applications, Wiley, Interscience, 1990.
- [Nof, 1999] Nof, S. Y., *Handbook of Industrial Robotics*, 2<sup>nd</sup> edition, 1999.
- [Oppenheim, 1990] Oppenheim, J. J., *Robots in Construction*, en: Concise International Encyclopedia of Robotics, John Wiley and Sons, 1990
- [Pallás, 1989] Pallás, R., *Tansductores de reactância variable y electromagnéticos* en: Transductores y acondicionadores de senãl, Marcombo, Barcelona, 1989.
- [Paul, 1981] Paul, R. P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*, the MIT Press, Massachusetts, 1981.
- [Pedrettii, 1981] Pedrettii, C., *Leonardo Architect*, New York: Rizzoli International Publications, 1981.
- [Pires, 2000] Pires, J. Norberto, *Using Actual Industrial Robot Manipulators With Construction Tasks*, 17<sup>th</sup> IAARC, Taipai, Taiwan, 2000.
- [Pires e Sá da Costa, 2000] Pires, J. Norberto; Sá da Costa, J. M. G., *Object Oriented and Distributed Approach for Programming Robotic Manufacturing Cells*, IFAC Journal on Robotics and Computer Integrated Manufacturing, February 2000.
- [Pires et al., 2001] Pires, J. Norberto; Loureiro, A.; Godinho, T.; Ferreira, P.; Fernando, B.; Morgado, J., *Using Object Oriented and Distributed Software to assist Industrial Robotic Welding Applications*, Submitted to IEEE Robotics and Automation Magazine, July 2001.
- [Pires, 2002] Pires, J. Norberto, *Automação Industrial*, LIDEL – ETEP, Edições Técnicas e Profissionais, 2002.

- [Rehg, 1994] Rehg, J. A., *Computer-Integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 1994.
- [Rembold et al., 1993] Rembold, U., et al., *Computer Integrated Manufacturing and Engineering*, Addison-Wesley, 1993.
- [Rogerson, 1997] Rogerson, D., *Inside COM*, Microsoft Press, 1997.
- [Rosheim, 1994] Rosheim, M., *Robot Evolution: The Development of Anthrobots*, New York: John Willey & Sons, 1994.
- [Russel, 1990] Russel, R. A., *Robot Tactile Sensing*, Prentice, Hall, 1990.
- [Salant, 1990] Salant, Michael A., *Introdução à Robótica*, McGraw-Hill, 1990.
- [Sandler, 1999] Sandler, Ben-Zion, *Robotics: Designing the Mechanisms for Automated Machinery*, 2<sup>nd</sup> edition, Academic Press, United States of America, 1999.
- [Santos e Quintino, 1992] Santos, J. F. O.; Quintino, L., *Automatização e Robotização em Soldadura*, Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade – ISQ, 1992.
- [Schlussel, 1985] Schlussel, K., *Robotics and Artificial Intelligence Across the Atlantic and Pacific*, IEEE Transactions on Industrial Electronics. IE-30,3, pp. 244-251.
- [Sciavicco e Siciliano, 1996] Sciavicco, Lorenzo; Siciliano, Bruno, *Modeling and Control of Robot Manipulators*, McGraw-Hill, Italy, 1996.
- [Soska, 1985] Soska, G. V., *Third Generation Robots: Their Definition, Characteristics and Applications*, Robotics Age. 7, 5, pp. 14-16, 1985.
- [Tesla, 1983] Tesla, N., *My Inventions: Autobiography of Nicola tesla*, Willinston, VT: Hart Brothers, 1983.

[Ueno, 1994] Ueno, T., *A Japanese View on the Role of Automation and Robotics in Next Generation Construction*, Paper presented at 11<sup>th</sup> ISARC, June, 1994.

[Vockroth, 1994] Vockroth, R. W., *Industrial Hydraulics*, Delmar Publishers, Nueva York, 1994.

[Waldner, 1992] Waldner, J. B., *CIM, Principles of Computer Integrated Manufacturing*, John Wiley & Sons, 1992.

[Warszawski e Navon, 1996] Warszawski, A.; Navon, R., *Survey of Building Robots*, Paper presented at 13<sup>th</sup> ISARC, June, 1996.