

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

PLANEAMENTO DINÂMICO E CONTROLO DE TRAJECTÓRIAS DE ROBÔS

Uma abordagem de inspiração biológica

Alexandre Paulo Maia Pinheiro

Licenciado em Engenharia Electrotécnica pelo Instituto Superior de
Engenharia do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos de grau de Mestre
em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Área de especialização de Automação Industrial)

Dissertação realizada sob a orientação de:
Professor Doutor José António Tenreiro Machado,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica
do Instituto Superior de Engenharia do Porto

e sob a co-orientação de:
Professor Doutor Jorge Leite Martins de Carvalho,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Junho 2007

Aos meus filhos

Isabel e Diogo

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho apenas foi possível devido ao empenhamento, dedicação e apoio de muitas pessoas. Algumas delas merecem uma menção especial.

O meu orientador, Prof. José António Tenreiro Machado, e o co-orientador, Prof. Jorge Leite Martins de Carvalho, não só pelo apoio, incentivo e disponibilidade constantemente manifestada, mas pela confiança em mim depositada, guiando-me com o seu saber, experiência, competência e rigor profissional, durante o trabalho de investigação, sempre na direcção correcta. Sem eles a realização desta dissertação não teria sido possível.

A todos os meus familiares e amigos que, directa ou indirectamente, contribuíram para tornar este trabalho realidade.

RESUMO

Ao longo dos tempos a biologia serviu de inspiração e orientação ao desenvolvimento, não só de dispositivos e materiais, mas também de processos e máquinas. Os manipuladores robóticos são um exemplo paradigmático desse processo.

Esta tese propõe o planeamento de trajectórias de um modelo do braço humano. Para tal são utilizados algoritmos inspirados na evolução de Darwin, os algoritmos genéticos. Assim, é apresentada, numa primeira parte, uma visão geral da biomecânica do membro superior humano e, numa segunda parte, dos algoritmos genéticos. São analisados os resultados de investigação na área do planeamento de trajectórias para manipuladores mecânicos com duas juntas rotacionais, baseadas num processamento através de algoritmos genéticos e utilizando a cinemática directa no espaço operacional. O algoritmo para além de planear as trajectórias, optimiza ainda os deslocamentos das juntas do robô. Neste trabalho é também desenvolvido um modelo do membro superior humano, relativamente ao qual é aplicado um algoritmo genético para o planeamento de trajectórias. Por último, são estudados os resultados onde se verifica a minimização, quer dos deslocamentos das articulações, quer das elongações dos músculos.

ABSTRACT

This dissertation proposes the trajectory planning of a human upper limb model. To accomplish this task is adopted a method inspired in the natural evolution, the genetic algorithms. In an initial phase are presented overviews of the biomechanics of the human upper limb and the genetic algorithms. Based on these concepts are analyzed the results of trajectory planning for a two revolute joints mechanical manipulator using genetic algorithms. The algorithm minimises also the joint angular increments. This work develops also a model of the human upper limb, for which is also applied the trajectory planning through a genetic algorithm. Finally are studied the results which reveal the minimization of the joint angular increments of the articulations as well as the muscle length variation.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XXIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS	2
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 ELEMENTOS ESTRUTURAIS DO MOVIMENTO HUMANO	5
2.1 O OSSO ELEMENTO ESTRUTURAL DO CORPO HUMANO	5
2.1.1 <i>Introdução</i>	5
2.1.2 <i>Características biomecânicas do osso</i>	6
O tecido ósseo	6
Força e dureza do osso	9
Tipos de ossos	12

2.1.3	<i>Articulações Ósseas</i>	13
	Articulação diartrodial ou Sinovial	13
	Características da Articulação Diartrodial	14
	Estabilidade da Articulação Diartrodial	16
	Tipos de Articulações diartrodiais	16
	Outros Tipos de Articulações	19
	Articulações Sinartrodiais ou Fibrosas	19
	Articulações Anfiartrodiais ou Cartilaginosas	19
2.2	O MÚSCULO – O MOTOR DO CORPO HUMANO	20
2.2.1	<i>Introdução</i>	20
2.2.2	<i>Estrutura Macroscópica do Músculo</i>	20
	Organização Física do Músculo	20
	Grupos de Músculos	21
	Organização Muscular Individual	21
	Organização das Fibras	23
	Músculos Fusiformes	23
	Músculos Peniformes	24
	Tipos de Fibras	25
	Fibras de Contração Lenta	25
	Fibras de Contração Rápida e Intermediária	26
	A inserção Muscular	26
	Características do Tendão	26
	Origem e Inserção	28
2.2.3	<i>Características Funcionais do Músculo</i>	29
	Propriedades da Fibra Muscular	29
	Iritabilidade	29
	Contractilidade	29
	Extensibilidade	29
	Elasticidade	30
	Funções do Músculo	30
	Produzir Movimento	31
	Manter Posturas e Posições	31
	Estabilizar Articulações	31
	Outras Funções	31
	Função interna do Músculo	31
	Movimentador Primário ou Movimentador Assistente	32
	Agonistas e Antagonistas	32
	Estabilizadores e Neutralizadores	33
	Componentes Mecânicas do Músculo	33
	Componente Contráctil ou Activo	33
	Componentes Elásticos ou Passivos	34
	Acções Musculares Gerais	35
	Acção Muscular Isométrica	35

Acção Muscular Concêntrica	36
Acção Muscular Excêntrica	36
Comparação entre as acções musculares	37
2.2.4 <i>Factores que influenciam a força muscular</i>	38
Ângulo de Inserção do Músculo	38
Características Força-Tempo	40
Relação Comprimento-Tensão	40
Relação Força-Velocidade	41
Músculos Uni e Biarticulares	41
2.3 RESUMO	42
3 O MEMBRO SUPERIOR HUMANO	45
3.1 INTRODUÇÃO	45
3.2 O COMPLEXO DO OMBRO	46
3.2.1 <i>Características Anatómicas e Funcionais das Articulações</i>	46
3.2.2 <i>Características de Movimentos Combinados do Complexo do Ombro</i>	52
3.2.3 <i>Acções Musculares</i>	53
3.2.4 <i>Força dos Músculos do Ombro</i>	57
3.3 COTOVELO E ARTICULAÇÕES RADIOULNARES	58
3.3.1 <i>Características Anatómicas e Funcionais das Articulações</i>	58
3.3.2 <i>Acções Musculares</i>	62
3.3.3 <i>Força dos Músculos do Antebraço</i>	65
3.4 RESUMO	66
4. ALGORITMOS GENÉTICOS	69
4.1. INTRODUÇÃO	69
4.2. ALGORITMOS EVOLUTIVOS E ALGORITMOS GENÉTICOS	70
4.3. ESTRUTURA E DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO GENÉTICO	72
4.3.1 <i>Codificação dos Algoritmos Genéticos</i>	73
4.3.2 <i>Restrições dos problemas</i>	74
4.3.3 <i>A função aptidão</i>	75
Escalonamento linear	76
Escalonamento por potência	76
Truncamento sigma	76
Tratamento de restrições	77
4.3.4 <i>Métodos de selecção</i>	77
Seleccção proporcional	78
Seleccção por posto	78
Seleccção por torneio	79
Seleccção de Boltzman	79
Outras características dos métodos de selecção	79
Elitistas	80
Seleccção pura	80
Estáticos	80

Dinâmicos	80
Geracionais	80
Substituição mediata	80
4.3.5. Operador de cruzamento	80
4.3.6. Operador de mutação	82
4.3.7. Mecanismo de reinserção	84
4.3.8. Condições de finalização dos algoritmos	85
Convergência	85
4.4. A TEORIA DO ESQUEMA	85
4.5. AGS NÃO BINÁRIOS	89
4.5.1. Introdução	89
Representação	90
Factores que distinguem os AGs binários dos não binários	90
4.5.2. Operador de cruzamento	91
4.5.3. Operador de mutação	93
4.6. PARALELISMO E DIVERSIDADE	94
4.6.1. Paralelismo global	95
4.6.2. Separação geográfica	95
4.6.3. Especiação	96
4.6.4. Métodos de nicho	96
4.7. ALGORITMOS EVOLUTIVOS MULTIOBJECTIVO	96
4.8. RESUMO	98
5. PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS – DO BRAÇO ROBÓTICO AO HUMANO	99
5.1. INTRODUÇÃO	99
5.2. PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS DE UM ROBÔ	100
5.2.1. Cinemática e dinâmica de um manipulador robótico	101
5.2.2. Aplicação de algoritmos genéticos na robótica	105
5.3. PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS UTILIZANDO AGS	105
5.3.1. Introdução	105
5.3.2. Formulação do problema	106
5.3.3. Representação da trajectória	107
5.3.4. Comportamento do AG com a variação da probabilidade de cruzamento	110
Introdução	110
Resultados das simulações obtidos para uma probabilidade de cruzamento	110
Comparação das probabilidades de cruzamento para 20 AGs	112
Conclusões	113
5.3.5. Comportamento do AG com a variação da probabilidade de mutação	113
Introdução	113
Resultados das simulações obtidos para uma $p_m = 0,04$	113
Comparação das probabilidades de mutação para 20 AG	115
Conclusões	116
5.3.6. Comportamento do AG com a variação dos coeficientes da função aptidão	116
Introdução	116

Resultados das simulações obtidos para $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$	117
Comparação dos valores de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$ para 20 AGs	118
Conclusões	120
5.3.7. Variação do critério de paragem	120
Introdução	120
Resultados das simulações obtidos para vários critérios de paragem	120
5.3.8. Conclusões	122
5.3.9. Simulação para várias trajectórias no espaço operacional	122
Posições sucessivas do robô	124
Trajectória do robô no espaço das juntas	125
Evolução do AG ao longo das gerações para a trajectória entre os pontos $P_i = (1, 1)$ e $P_f = (0, 2)$	127
5.3.10. Evolução temporal	128
introdução	128
5.4. O MODELO DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA	130
5.4.1. Introdução	130
5.4.2. O modelo do membro superior Humano	130
5.4.3. O ag aplicado ao modelo do MSH	136
Resultados das experiências	137
Evolução temporal	138
5.5. CONCLUSÕES	141
6 CONCLUSÕES	141
6.1 INTRODUÇÃO	141
6.2 SÍNTESE CONCLUSIVA DO TRABALHO REALIZADO	142
6.3 PERSPECTIVAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	143
BIBLIOGRAFIA	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Secção média da ponta proximal do fémur	8
Figura 2.2 – Curva carga-deformação do osso	9
Figura 2.3 – Curvas carga-deformação de materiais maleáveis (A), frágeis (B) e do osso (C)	10
Figura 2.4 – Classificação de vários materiais segundo a sua força e a sua dureza	11
Figura 2.5 – Os cinco tipos de ossos do esqueleto	12
Figura 2.6 – Constituição do osso longo	12
Figura 2.7 – Estrutura das articulações diartrodiais	14
Figura 2.8 – Tipos de articulações diartrodiais ou sinoviais	17
Figura 2.9 – Organização muscular individual	22
Figura 2.10 – Organização das fibras	23
Figura 2.11 – Características dos músculos fusiformes e dos músculos peniformes	25
Figura 2.12 – Os três tipos de inserções	26
Figura 2.13 – Diferenças nas características de força e desempenho do tendão versus músculo ou osso	27
Figura 2.14 – O músculo psoas	28
Figura 2.15 – Movimento de abdução do braço	33
Figura 2.16 – Modelo mecânico de três componentes do músculo	34
Figura 2.17 – Acções musculares gerais	35

Figura 2.18 – Relação entre a força flexora e a actividade do bíceps braquial	37
Figura 2.19 – Curvas do binário para as três acções musculares	38
Figura 2.20 – O bíceps braquial	39
Figura 2.21 – Força isométrica dos flexores e dos extensores do ombro	40
Figura 2.22 – Recto femoral em pé (A) e agachamento (B), isquiotibiais em pé (C) e agachamento (D)	42
Figura 3.1 – Articulação esternoclavicular	46
Figura 3.2 – Movimento da clavícula	47
Figura 3.3 – A articulação acromioclavicular	47
Figura 3.4 – As três direcções do movimento da escápula	48
Figura 3.5 – Articulação do ombro ou articulação glenoumeral	49
Figura 3.6 – Movimentos do braço (abdução/adução e flexão/extensão)	51
Figura 3.7 – Os movimentos de braço e escápula	52
Figura 3.8 – Vista posterior das relações entre os movimentos de braço e escápula	53
Figura 3.9 – Músculos do complexo do ombro que actuam sobre o braço	54
Figura 3.10 – A interacção entre o deltóide e a bainha rotadora em abdução e flexão	54
Figura 3.11 – Direcção da tracção de vários músculos da cintura escapular	55
Figura 3.12 – Estruturas ósseas do cotovelo	58
Figura 3.13 – As articulações ulnoverbra, radioumeral e radioulnar proximal	59
Figura 3.14 – Membrana interóssea	60
Figura 3.15 – Flexão/extensão do antebraço	62
Figura 3.16 – Pronação/supinação do antebraço	62
Figura 3.17 – Músculos flexores	63
Figura 3.18 – Músculos extensores	64
Figura 4.1 – Cruzamento simples	81
Figura 4.2 – Cruzamento duplo	81
Figura 4.3 – Cruzamento uniforme	82
Figura 4.4 – Mutação	83
Figura 4.5 – Inversão	83
Figura 4.6 – Cruzamento simples	91
Figura 4.7 – Modelo das ilhas	95
Figura 5.1 – Manipulador planar com dois elos de comprimento l_1 e l_2 e duas juntas rotacionais R	101
Figura 5.2 – Robô de dois elos	107

Figura 5.3 – Posições sucessivas do robô na trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com probabilidade de cruzamento de $P_c = 0,4$ e $P_m = 0,02$	111
Figura 5.4 – A trajectória do robô no espaço das juntas entre os pontos $Q_i = (0,90)$ e $Q_f = (90,0)$ [graus] com probabilidade de cruzamento de $P_c = 0,4$ e $P_m = 0,02$	111
Figura 5.5 – Trajectória do órgão terminal no espaço operacional entre os pontos $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com probabilidade de cruzamento de $P_c = 0,4$ e $P_m = 0,02$	112
Figura 5.6 – Geração onde foi encontrada a melhor aptidão para 20 experiências com variação da probabilidade de cruzamento $P_c = \{0,2, 0,4, 0,8\}$, $P_m = 0,02$	112
Figura 5.7 – Melhor aptidão encontrada para 20 experiências e probabilidade de cruzamento $P_c = \{0,2, 0,4, 0,8\}$, $P_m = 0,02$	113
Figura 5.8 – Posições sucessivas do robô na trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com probabilidade de mutação de $P_m = 0,04$ e $P_c = 0,8$	114
Figura 5.9 – A trajectória do robô no espaço das juntas entre os pontos $Q_i = (0,90)$ e $Q_f = (90,0)$ [graus] com probabilidade de mutação de $P_m = 0,04$ e $P_c = 0,8$	114
Figura 5.10 – Trajectória do órgão terminal no espaço operacional entre os pontos $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com probabilidade de mutação de $P_m = 0,04$ e $P_c = 0,8$	115
Figura 5.11 – Geração onde foi encontrada a melhor aptidão para 20 experiências com variação da probabilidade de mutação $P_m = \{0,02, 0,04, 0,06\}$ e $P_c = 0,8$	115
Figura 5.12 – A melhor aptidão encontrada para 20 experiências com variação da probabilidade de mutação $P_m = \{0,02, 0,04, 0,06\}$ e $P_c = 0,8$.	116
Figura 5.13 – Posições sucessivas do robô na trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$	117
Figura 5.14 – A trajectória do robô no espaço das juntas entre os pontos $Q_i = (0,90)$ a $Q_f = (90,0)$ [graus] com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$	118
Figura 5.15 – Trajectória do órgão terminal no espaço operacional entre os pontos $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$	118
Figura 5.16 – A melhor aptidão encontrada para 20 experiências com variação da geração de paragem com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$	119
Figura 5.17 – A melhor aptidão encontrada para 20 experiências com variação do critério de paragem pelo número de repetições com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$.	119
Figura 5.18 – Resultado da aptidão encontrada para várias experiências com variação do critério de paragem (número de repetições)	121
Figura 5.19 – Resultado da aptidão encontrada para várias experiências com variação do critério de paragem (número de gerações)	121
Figura 5.20 – Sucessivas posições do robô na trajectória:	123
Figura 5.21 – A trajectória do robô no espaço das juntas entre os pontos:	124
Figura 5.22 – Trajectória do órgão terminal no espaço operacional entre os pontos:	125

Figura 5.23 – Evolução do melhor cromossoma e da média dos cromossomas para a trajectória entre os pontos $P_i = (1, 1)$ e $P_f = (0, 2)$	126
Figura 5.24 – Evolução do melhor cromossoma e da média dos cromossomas ao longo de um AG para a trajectória entre os pontos $P_i = (1;1)$ e $P_f = (0;2)$ entre as gerações $T = 4000$ e $T = 6000$.	126
Figura 5.25 – Evolução temporal do órgão terminal:	127
Figura 5.26 – Evolução temporal das posições angulares	127
Figura 5.27 – Evolução temporal das velocidades do órgão terminal:	128
Figura 5.28 – Evolução temporal das velocidades angulares:	128
Figura 5.29 – Músculos mais relevantes na flexão e extensão do braço (I-deltóide anterior, II-grande peitoral, III-trapézio, IV-serrátil, V-deltóide posterior, VI-redondo maior, VII-grande dorsal, VIII-redondo menor)	129
Figura 5.30 – Músculos mais relevantes na flexão e extensão do antebraço (I-bíceps braquial, II-braquial, III-tríceps braquial)	130
Figura 5.31 – Modelo geométrico da estrutura biomecânica do braço humano no plano sagital	131
Figura 5.32 – Sucessivas posições do MSH na trajectória de $P_i = (1, -1)$ a $P_f = (2, 0)$	136
Figura 5.33 – A trajectória do MSH no espaço das juntas entre os pontos $Q_i = (-90,90)$ e $Q_f = (0,0)$ [graus]	137
Figura 5.34 – Trajectória do órgão terminal do MSH no espaço operacional entre os pontos $P_i = (1, -1)$ e $P_f = (2, 0)$	137
Figura 5.35 – Evolução temporal do órgão terminal do MSH	138
Figura 5.36 – Evolução temporal das posições angulares do MSH	138
Figura 5.37 – Evolução temporal das velocidades do órgão terminal do MSH:	138
Figura 5.38 – Evolução temporal das velocidades angulares do MSH:	139
Figura 5.39 – Evolução temporal do comprimento dos músculos do braço do MSH:	139
Figura 5.40 – Evolução temporal do comprimento dos músculos do antebraço do MSH:	140

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais articulações do corpo	19
Tabela 4.1 – Exemplo de um arranjo $\{01\# \}$ e as <i>strings</i> que representa	86
Tabela 4.2 – Exemplo de arranjos e as respectivas <i>strings</i> representadas	86
Tabela 5.1 – Pontos iniciais P_i e finais P_f das trajectórias simuladas	122
Tabela 5.2 – Parâmetros numéricos do modelo do MSH.	134

LISTA DE ACRÓNIMOS

AE _____ Algoritmo Evolutivo

AG _____ Algoritmo Genético

AGMO _____ Algoritmo Genético MultiObjectivo

CX _____ *Cycle Crossover* (Cruzamento Cíclico)

gl _____ graus de liberdade

MSH _____ Membro Superior Humano

OX _____ *Order Crossover* (Cruzamento Ordenado)

PMX _____ *Partially Matched Crossover* (Cruzamento parcialmente semelhante)

VEGA _____ *Vector Evaluated Genetic Algorithm*

1 INTRODUÇÃO

O sonho relativo à construção de máquinas que se assemelhem aos seres vivos existe há milhares de anos. Ao longo da história o ser humano desejou mimetizar a aparência, a funcionalidade e a longevidade, assim como os processos cognitivos e adaptativos, das criaturas biológicas. Durante milhões de anos de evolução a natureza descobriu múltiplas soluções “inteligentes” para os problemas complexos que foram surgindo. Os seres vivos demonstram uma agilidade, robustez, flexibilidade e eficiência, bem como uma capacidade para aprender e para adaptar-se, na procura da sobrevivência no mundo em que vive. O mundo biológico provou ser uma infindável fonte de inspiração e de orientação para o desenvolvimento, não só de dispositivos e materiais, mas também de processos e de máquinas. Os manipuladores robóticos são um exemplo paradigmático.

Num esforço para a criação de robôs que executem tarefas sofisticadas em ambientes complexos, um número crescente de investigadores da área da robótica procuram na natureza a sua fonte de inspiração e de orientação. No entanto, existe ainda uma grande diferença entre o desempenho motor dos robôs e dos seres vivos. Por exemplo, os músculos são considerados sistemas altamente otimizados, pois eles são fundamentalmente os mesmos para todos os animais e as diferenças entre espécies são relativamente pequenas. Além disso, os músculos dos seres vivos são comandados por

mecanismos complexos e são capazes de levantar grandes cargas com um pequeno tempo de resposta (milissegundos). O braço humano, no qual se inspiram os manipuladores robóticos, tem um desempenho muito superior aos seus equivalentes mecânicos, nomeadamente no que diz respeito à eficiência, flexibilidade e adaptação a cargas diferentes. No entanto, o processo de traduzir características dos sistemas biológicos para uma manifestação tecnológica não é fácil. A evolução não é apenas um “projectista” poderoso, mas também um “adaptador”, adaptando e reutilizando estruturas biológicas para vários fins. Como resultado, é difícil decifrar a constituição de um sistema biológico e descobrir os princípios responsáveis por um dado atributo. Muitas vezes os atributos estão situados dentro de uma complexa rede de sistemas interdependentes que também não são muito bem entendidos. Por outro lado, a evolução representa o princípio de unificação principal da biologia moderna. A evolução pode ser entendida como o resultado de processos estocásticos interactivos (reprodução, mutação, cruzamento e selecção) sobre populações ao longo de gerações. Todavia, a teoria da evolução estende-se para além dos sistemas biológicos, quando utilizada por máquinas computadorizadas, com o fim de resolver problemas de aprendizagem e optimização.

Nas últimas décadas têm sido propostos algoritmos inspirados em certos processos biológicos, dando origem à área da inteligência computacional que engloba a computação evolutiva. A computação evolutiva abrange uma série de algoritmos, sendo os algoritmos genéticos um dos seus principais ramos. Esta área está em forte expansão, pelo que a sua sistematização não se encontra ainda totalmente realizada. A aplicação destes conceitos no campo da robótica está numa fase em que existe um vasto campo de investigação e desenvolvimento de novos algoritmos.

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS

Os sistemas robóticos são estruturas mecânicas que pretendem simular meios de manipulação e de locomoção existentes nos seres vivos. Estes sistemas mecânicos exibem fenómenos cinemáticos e dinâmicos de natureza complexa o que torna difícil o seu estudo e o controlo usando técnicas clássicas, levando a que a utilização destes tipos de sistemas esteja confinada a situações de desempenho relativamente baixo.

O braço humano tem um desempenho superior aos manipuladores robóticos, mas a compreensão da contribuição de todas as estruturas envolvidas no movimento do braço é

bastante complexa. Os algoritmos genéticos (AGs) tornaram-se bastante populares pela sua simplicidade e robustez, podendo ser aplicados a um vasto número de aplicações. Logo, parece ser uma boa solução a utilização de AGs na resolução de dois temas tão complexos, como o planeamento de trajectórias de robôs e a modelização do braço humano.

A motivação deste trabalho resultou da necessidade em desenvolver modelos de manipuladores com um alto desempenho, tomando como modelo o braço humano, e a necessidade em desenvolver metodologias robustas para os movimentos nos sistemas robóticos utilizando abordagens baseadas em AGs. Assim, o objectivo deste trabalho consiste em investigar a adopção de AGs no planeamento de trajectórias para um modelo do membro superior humano no plano sagital.

Nesta ordem de ideias, é necessário desenvolver um modelo do membro superior humano e um programa inspirado num AG para planear as trajectórias. Por um lado, deve ser estudado o membro superior humano (MSH) no que diz respeito à sua constituição e às suas propriedades biomecânicas. Por outro lado, é necessário estudar os conceitos fundamentais dos AGs.

Com vista ao teste e à optimização dos vários parâmetros a implementar no AG, este é aplicado a um manipulador robótico 2R. Posteriormente, um AG do mesmo tipo é aplicado ao modelo do MSH, sendo estudado o comportamento das trajectórias, tanto ao nível do deslocamento, como ao nível das velocidades das juntas do robô e do MSH.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A tese está organizada em seis capítulos. Neste primeiro capítulo é elaborada uma introdução ao trabalho, aos seus objectivos e à estrutura da dissertação. No capítulo 2 com o título “Elementos estruturais do movimento humano” são apresentadas, na óptica da biomecânica, as principais características dos ossos e dos músculos do corpo humano. No capítulo 3, sob o título “O membro superior humano” é feita uma análise do ponto de vista da cinesiologia do MSH, sendo descritos os principais movimentos do MSH e respectivas estruturas ósseas e musculares envolvidas. No capítulo 4, “Algoritmos genéticos”, são apresentados os conceitos fundamentais dos algoritmos genéticos. No capítulo 5, “Planeamento de trajectórias – do braço robótico ao humano”, é feita numa primeira parte a introdução ao planeamento de trajectórias para manipuladores robóticos e é desenvolvido

um AG para a geração de trajectórias num manipulador 2R. Numa segunda parte é apresentado um modelo do MSH, sendo utilizado um AG para a geração de trajectórias. Por último, no capítulo 6, designado “Conclusões”, é feita uma breve reflexão relativa ao trabalho desenvolvido nesta dissertação, sendo enumerados os principais resultados e abordadas algumas perspectivas para desenvolvimento futuro.

2 ELEMENTOS ESTRUTURAIS DO MOVIMENTO HUMANO

2.1 O OSSO ELEMENTO ESTRUTURAL DO CORPO HUMANO

2.1.1 INTRODUÇÃO

O sistema esquelético desempenha várias funções: alavanca, suporte, protecção, armazenamento e formação de células sanguíneas. Duas dessas funções, a alavanca e o suporte, são importantes para o movimento humano. O sistema esquelético fornece as alavancas e os eixos de rotação, sobre os quais o sistema muscular cria os movimentos. As alavancas são essencialmente os ossos longos do corpo e os eixos são as articulações a que os ossos estão ligados. O modo como partes do esqueleto contribuem para o movimento é determinado pelo formato dos ossos, pelo arranjo estrutural dos ossos e pelas características das articulações que os ligam. Por exemplo, se o antebraço é movido numa posição de máxima flexão ficando levantado contra o braço, sendo depois estendido até que pare, a hiperextensão será limitada e o antebraço irá parar devido ao formato dos ossos que formam a articulação do cotovelo. Por outro lado, se o braço é movido em flexão de modo que fique acima da cabeça e, em seguida, estendido, o braço irá continuar a descer

até uma posição hiperestendida, porque a estrutura da articulação do ombro permite o movimento. Outra função importante do sistema esquelético é fornecer uma estrutura de suporte, usada para manter a postura erecta. O esqueleto pode manter uma postura e, ao mesmo tempo, ser capaz de absorver grandes forças externas. Os ossos que constituem o sistema esquelético aumentam de tamanho de cima para baixo, isso verifica-se à medida que mais peso corporal é assumido pela estrutura do esqueleto, assim, os ossos do membro inferior, as vértebras inferiores e os ossos pélvicos são mais largos do que os seus correspondentes no membro e no tronco superior. Uma comparação visual do úmero com o fémur proporciona um bom exemplo do aumento do tamanho dos ossos no sentido descendente do corpo. Existem ainda três funções ósseas adicionais não relacionadas especificamente com o movimento humano e, como tal, não serão muito desenvolvidas. São elas a protecção, o armazenamento e a formação de células sanguíneas. Os ossos protegem o cérebro e os órgãos internos. O osso também armazena gordura e minerais. Finalmente, a formação de células sanguíneas, chamada hematopoiese, ocorre dentro das cavidades ósseas.

Assim, nesta secção iremos analisar as características biomecânicas do osso e o modo como ele se estrutura para suportar e/ou absorver os diferentes tipos de cargas a que está sujeito. Em seguida serão apresentados os vários tipos de ossos e as suas funções, bem como os vários tipos de articulações, com especial incidência na articulação diartrodial ou sinovial. Estes são os dois elementos essenciais para a formação de alavancas no corpo humano, que permitem a produção de movimento.

2.1.2 CARACTERÍSTICAS BIOMECÂNICAS DO OSSO

O TECIDO ÓSSEO

Para poder desempenhar estas funções é necessário que o osso tenha uma relativa rigidez, que é obtida através da sua composição química. Os ossos são constituídos por uma elevada quantidade de material inorgânico (fosfato de cálcio, carbonato de cálcio e fosfato de magnésio) e por material proteico (fibras de colagénio). Este conjunto é responsável por aproximadamente 60 a 70% do tecido ósseo. A água constitui aproximadamente 25 a 30% do peso do tecido ósseo. O tecido ósseo é um material viscoelástico, cujas propriedades mecânicas são afectadas pelo seu grau de deformação. As propriedades de maleabilidade do osso são proporcionadas pelo colagénio do osso. O conteúdo de colagénio dá ao osso

resistência e elasticidade às extensões (suporte de cargas tensoras). O osso é também um material frágil e a sua força depende do mecanismo de carga. O grau de fragilidade do osso depende dos constituintes minerais que lhe dão uma elevada resistência mecânica à compressão (cargas compressivas). A eventual perda de água faz com que o osso seja mais frágil, enquanto que a perda de sais minerais faz com que fique com demasiada maleabilidade. A composição correcta destes elementos proporciona ao osso o grau ideal de rigidez e elasticidade para não ser frágil ao choque.

O osso é um dos elementos característicos da adaptabilidade e flexibilidade do corpo humano. É um material altamente adaptável e muito sensível ao desuso, imobilização ou actividade vigorosa e altos níveis de carga. O tecido ósseo consegue auto-reparar-se e pode alterar as suas propriedades e configuração em resposta às necessidades mecânicas. A teoria sobre o desenvolvimento ósseo denominada Lei de Wolff, afirma que: "Cada mudança na forma e na função de um osso, ou apenas na sua função, é seguida por certas alterações definitivas na sua arquitectura interna e alterações secundárias igualmente definitivas na sua conformação externa, de acordo com as leis da matemática".

O osso é remodelado e reparado e é um tecido dinâmico e activo em que grandes volumes de osso são removidos pela reabsorção óssea e substituídos através de depósito ósseo. Esse processo não é igual em todos os ossos, nem mesmo num único osso. Por exemplo, o osso na parte distal do fémur é substituído a cada 5 a 6 meses, enquanto que o osso no corpo do fémur é substituído muito mais lentamente. O peso corporal e nível de actividade são exemplos de factores que regulam a densidade óssea nos ossos sustentadores de peso. Se o nível de actividade aumenta, ocorre um aumento moderado na massa óssea. Em astronautas sujeitos a redução na actividade e perda das influências do peso corporal ocorre uma perda óssea importante em períodos de tempo relativamente curtos. Algumas das mudanças que ocorrem no osso após uma viagem espacial incluem: menor dureza, maior deslocamento no encurvamento, uma diminuição no comprimento ósseo e na área da secção transversa e uma redução na velocidade de formação óssea.

O tecido ósseo arranja-se de modo a adaptar-se às requisições mecânicas impostas sobre o sistema esquelético. A figura 2.1 mostra uma secção média da cabeça femoral e ilustra a arquitectura interna do osso longo. O tecido ósseo no exterior de um osso é feito de osso compacto ou cortical, que é muito denso e possui uma porosidade menor do que 15%.

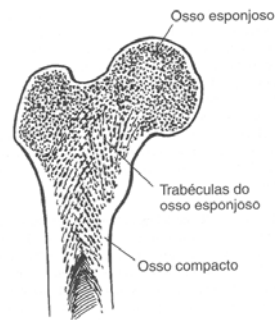


Figura 2.1 – Secção média da ponta proximal do fémur [3]

O osso compacto consiste num sistema de tubos ocos, lamelas, que são colocados um dentro do outro para formar o sistema haversiano de canais. O arranjo desses pilares sustentadores de peso e a densidade do osso compacto proporcionam força e dureza ao nosso sistema esquelético. O osso compacto pode suportar altos níveis de apoio de peso ou tensão muscular na direcção longitudinal antes de falhar e fracturar.

O osso compacto é especialmente capaz de absorver cargas tensoras se as fibras de colagénio estiverem paralelas à carga. Tipicamente, o colagénio fica disposto em camadas que vão em direcções diferentes em configurações longitudinais, circunferenciais e oblíquas. Isso oferece resistência às forças tensoras em diferentes locais, porque quanto maior for o número de camadas, mais força e dureza terá o osso. Também onde estão os músculos, ligamentos e tendões que se inserem no esqueleto, as fibras de colagénio são dispostas paralelamente à inserção do tecido mole, oferecendo maior força tensiva a essas inserções.

Uma camada espessa de osso compacto é encontrada nos corpos dos ossos longos, as diáfises, em que a força é necessária para responder às altas cargas impostas sobre a extensão do osso durante o apoio de peso, ou em resposta a uma tensão muscular. As camadas finas de osso compacto são encontradas nas pontas dos ossos longos, as epífises, e também a cobrir os ossos curtos ou irregulares. O tecido ósseo no interior do osso é o esponjoso ou trabecular, excepto no corpo dos ossos longos. Esse osso é esponjoso e semelhante a uma treliça, com uma porosidade maior do que 70%. A estrutura do osso esponjoso, embora quase rígida, é mais fraca e menos rija que a do osso compacto. As pequenas lascas de osso que constituem o osso esponjoso são chamadas trabéculas. As trabéculas adaptam-se na direcção da tensão mecânica imposta ao osso, fornecendo força e, ao mesmo tempo, mantendo baixo peso na estrutura. O colagénio corre ao longo do eixo

do osso trabecular, dando ao osso esponjoso uma resistência, tanto tensiva, como compressiva. A alta porosidade dá ao osso esponjoso alta capacidade de armazenamento de energia, de modo que se torna um elemento crucial na absorção de energia e na distribuição de cargas quando estas são aplicadas à estrutura esquelética. O osso esponjoso não é tão forte como o compacto.

FORÇA E DUREZA DO OSSO

O comportamento de qualquer material sob diferentes condições de carga é determinado pela sua força e dureza. A força pode ser avaliada, examinando a relação entre a carga imposta (força externa) e a quantidade de deformação (reação interna) que ocorre no material (curva carga-deformação). O tecido ósseo é um material anisotrópico, pois o comportamento do osso varia com a direção da aplicação da carga. Em geral, o tecido ósseo pode lidar com cargas maiores no sentido longitudinal e uma quantidade menor de carga, quando aplicada ao longo da superfície do osso. O osso é forte para suportar cargas no sentido longitudinal, porque está habituado a receber cargas nessa direção. O osso é também viscoelástico, visto que responde de forma diferente dependendo da velocidade com que a carga é aplicada e da duração da carga. Em velocidades mais rápidas de incidência de carga, o osso pode lidar com cargas maiores antes que falhe ou fracture.

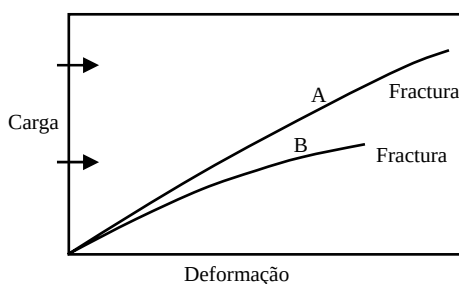


Figura 2.2 – Curva carga-deformação do osso [3]

Como mostra a figura 2.2, quando o osso recebe a carga rapidamente (curva A) responde com mais rigidez e suporta uma carga maior antes de fracturar, enquanto que ao receber a carga lentamente (curva B) o osso não se mostra tão forte, fracturando sob cargas menores. Quando a carga é inicialmente aplicada o osso deforma-se, mudando o seu comprimento ou formato angular. O osso não se deforma mais que aproximadamente 3%. Essa é considerada a amplitude elástica da curva carga-deformação pois, quando a carga é removida, o osso recupera o formato ou comprimento original. Com a evolução continuada

de carga sobre o tecido ósseo ele atinge o ponto de deformação, após o qual as fibras externas do tecido ósseo começarão a ceder, originando microrrupturas e desconexão do material dentro do osso, a fase plástica ou não elástica na curva carga-deformação. O tecido ósseo começa a deformar-se permanentemente e, eventualmente, fractura caso a carga continue na fase não elástica. Assim, quando a carga é removida, o tecido ósseo não retoma o seu comprimento original e fica permanentemente alongado.

A curva carga-deformação para materiais maleáveis, para materiais frágeis e para o osso está representada na figura 2.3. Um material duro responderá com mínima deformação ao aumento de carga. O osso não é tão duro como o vidro ou o metal e, ao contrário desses materiais, não responde de forma linear, pois cede e deforma-se de modo não uniforme durante a fase de colocação de carga. Se a carga excede os limites elásticos do material, haverá deformação permanente e falha do material. Nos materiais maleáveis, como é o caso da pele, existe uma deformação considerável antes da falha. O osso é um material que possui propriedades que respondem de um modo tanto frágil como maleável. Quando a carga é aplicada, um material frágil responde linearmente e falha ou fractura-se antes de sofrer qualquer deformação permanente. Um material maleável entrará na região plástica e deforma-se consideravelmente antes da falha ou fractura. O osso deforma-se ligeiramente antes da falha.

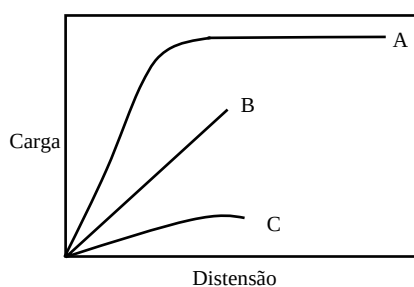


Figura 2.3 – Curvas carga-deformação de materiais maleáveis (A), frágeis (B) e do osso (C) [3]

Uma variedade de materiais foi assinalada num gráfico na figura 2.4, de acordo com a sua força e a sua dureza. Exemplos de materiais considerados duros e fracos são o vidro e o cobre, materiais duros e fortes são o aço e o ferro, materiais flexíveis e fortes são a fibra de vidro e a seda e materiais flexíveis e fracos são a madeira de carvalho, o chumbo e uma teia de aranha. O osso é considerado um material flexível e fraco.

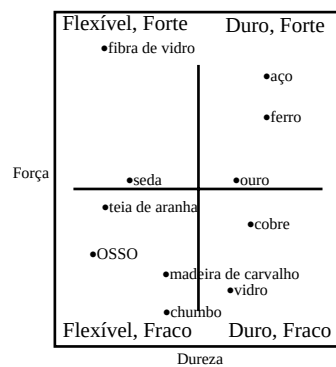


Figura 2.4 – Classificação de vários materiais segundo a sua força e a sua dureza [3]

A carga e a consequente distensão podem ocorrer perpendicularmente ao plano da secção transversa do objecto que recebe a carga, ou paralelamente ao plano da secção transversa. Por exemplo, numa distensão perpendicular à secção transversa existe uma mudança no comprimento de um objecto, enquanto que uma distensão paralela é caracterizada por uma mudança no ângulo original do objecto. Deve-se então analisar o tipo de cargas a que os ossos estão sujeitos.

Os ossos estão sujeitos a diversos tipos de cargas: forças compressivas (é produzida por músculos, apoio de peso, gravidade ou alguma carga externa que se manifeste sobre a extensão do osso), forças tensoras (a fonte de força tensiva é geralmente o músculo), ou forças de cisalhamento (são aplicadas paralelamente à superfície do osso), criando deformação internamente numa direcção angular. As forças de cisalhamento são criadas quando um osso é sujeito a forças compressivas, forças tensoras ou ambas. O osso falha mais rapidamente quando exposto a uma força de cisalhamento do que a uma força tensiva ou compressiva. Existem ainda as forças de encurvamento, que são aplicadas numa área que não tem o suporte directo oferecido pela estrutura. Quando um osso é sujeito a uma força de encurvamento e ocorre deformação, um lado do osso formará uma convexidade em que estarão presentes forças tensoras e do outro lado do osso vai-se formar uma concavidade em que estarão presentes forças compressivas. Tipicamente, o osso irá falhar e fracturar no lado convexo em resposta a grandes forças tensoras, já que o osso pode suportar maiores forças compressivas que tensoras. A amplitude das forças compressiva e tensiva produzidas pelo encurvamento torna-se tanto maior quanto mais distante se está do eixo do osso, assim elas são maiores nas partes externas do osso.

TIPOS DE OSSOS

O sistema esquelético é constituído por diferentes tipos de ossos, classificados de acordo com o tamanho, a função e a proporção entre tecido ósseo esponjoso e compacto. Como já foi referido, o osso esponjoso é um osso de alta porosidade com grande capacidade de absorver energia e o osso compacto é denso e oferece força e dureza ao esqueleto. A figura 2.5 ilustra os cinco tipos diferentes de ossos: longos, curtos, chatos, irregulares e sesamóides.

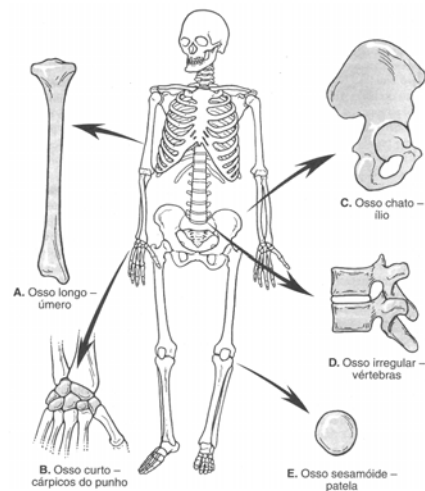


Figura 2.5 – Os cinco tipos de ossos do esqueleto [3]

Os ossos longos são mais compridos que largos. Os ossos longos que existem no corpo são a clavícula, o úmero, o rádio, a ulna, o fémur, a tíbia, a fíbula, os metatarsos, os metacarpos e as falanges. O osso longo tem um corpo, a diáfise, que é uma camada espessa de osso compacto em redor da cavidade medular do osso (figura 2.6). O corpo alarga-se em direcção à parte final chamada metáfise. A ponta do osso longo é chamada epífise, separada do corpo por um disco cartilaginoso no esqueleto imaturo. As pontas consistem numa camada externa fina de osso compacto, cobrindo o osso esponjoso interno. Uma membrana branca fina, o perióstio, cobre a parte externa do osso.

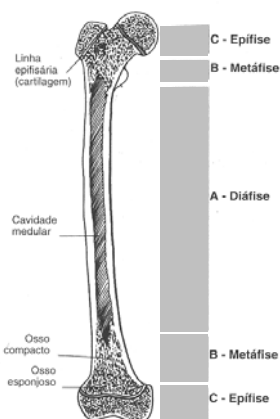


Figura 2.6 – Constituição do osso longo [3]

Os ossos longos oferecem suporte ao corpo e também fornecem uma série de alavancas interligadas, bem como elos que permitem criar o movimento. A maioria dos ossos longos tem uma forma que lhes permite lidar com as cargas de encurvamento impostas sobre eles e minimizá-las.

Os ossos curtos, como os carpos e os tarsos, são constituídos por esponjoso convertido numa fina camada de osso compacto. Esses ossos têm um papel importante na absorção do choque e na transmissão de forças. Um terceiro tipo de osso, o osso chato, é representado pelas costelas, pelo ílio, pelo esterno e pela escápula. Esses ossos consistem em duas camadas de osso compacto, com osso esponjoso e medula entre elas. Os ossos chatos protegem estruturas internas e oferecem amplas superfícies para inserção muscular. Os ossos irregulares, como os encontrados no crânio, na pelve e nas vértebras, consistem em osso esponjoso, com um osso compacto exterior fino. Esses ossos têm um formato e uma função especializados. Os ossos irregulares realizam uma série de funções diferentes, que incluem: o suporte de peso, a dissipação de cargas, a proteção da medula espinal, a contribuição para os movimentos e ainda servem de locais para inserção muscular. O último tipo de osso, o sesamóide, é um osso curto embebido por um tendão ou cápsula articular. A patela é um osso sesamóide na articulação do joelho, que se encontra embebida no tendão do quadríceps. Outros ossos sesamóides podem ser encontrados na base do primeiro metatarso no pé, onde os ossos estão embebidos no tendão distal do músculo flexor curto do hálux e no polegar, onde os ossos estão embebidos no tendão do músculo flexor curto do polegar. O papel do osso sesamóide é alterar o ângulo de inserção do músculo.

2.1.3 ARTICULAÇÕES ÓSSEAS

ARTICULAÇÃO DIARTRODIAL OU SINOVIAL

O potencial de movimento de um segmento é determinado pela estrutura e pela função da articulação diartrodial ou sinovial. A articulação diartrodial é uma articulação com baixa fricção, capaz de suportar uso e desgaste significativos. As características de todas as articulações diartrodiais são similares, logo, a articulação do joelho, por exemplo, tem estruturas parecidas com as articulações dos dedos.

Características da Articulação Diartrodial

A placa terminal articular é uma camada fina de osso compacto, sobre o osso esponjoso que faz o contorno das pontas dos ossos. Sobre a placa terminal está a cartilagem articular, um tecido conectivo firme, que contorna as pontas dos ossos. A cartilagem articular é cartilagem hialina, uma substância avascular com 60 a 80% de água e uma matriz sólida composta de colagêneo e gel proteoglican. A cartilagem não tem alimentação sanguínea e é nutrida pelo líquido que há dentro da articulação. As propriedades da cartilagem tornam-na muito adequada para resistir às forças de cisalhamento, pois responde à carga de uma maneira viscoelástica: ela deforma-se instantaneamente quando há uma carga baixa ou moderada e, se receber uma carga rapidamente, responderá com rigidez e demorará um período mais longo de tempo até se deformar. A distribuição de força pela área da articulação causa a carga a que está sujeita a cartilagem e a distribuição de força depende da espessura da cartilagem.

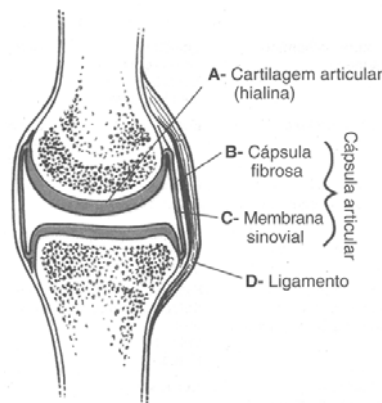


Figura 2.7 – Estrutura das articulações diartrodiais [3]

A cartilagem tem entre 1 a 7 mm de espessura, dependendo da carga a que está sujeita e da incongruência das superfícies articulares. Por exemplo, nas articulações do tornozelo e do cotovelo a cartilagem é bastante fina, enquanto que nas articulações do quadril e joelho ela é espessa. A cartilagem é fina no tornozelo devido à arquitetura da articulação. Existe uma área substancial de distribuição de força que impõe menor carga sobre a cartilagem. Por outro lado, a articulação do joelho é exposta a forças menores, mas a área de distribuição da força é menor, provocando maior carga sobre a cartilagem. Uma das cartilagens mais espessas do corpo é encontrada no lado de baixo da patela, com aproximadamente 5 mm de espessura.

A cartilagem é muito importante para a estabilidade e para a função da articulação, já que ela distribui as cargas sobre a superfície e reduz para metade as cargas de contacto. Ela permite o movimento entre dois ossos com o mínimo de atrito e desgaste.

Nas articulações tibiofemoral, acromioclavicular, temporomandibular, esternoclavicular e radioulnar distal existe uma cartilagem adicional, a fibrocartilagem ou menisco, um tecido fibroso ligado à cápsula. Essa cartilagem permite a transmissão de carga adicional, estabilidade, melhora o ajuste das superfícies, a protecção das margens articulares e a lubrificação da articulação.

As fibras de colagénio no menisco estão dispostas de modo a suportar cargas, no caso do joelho o menisco medial transmite 50% da carga compressiva. Tem-se mostrado que a remoção, mesmo de uma pequena parte do menisco, aumenta a carga de contacto até 350%.

Outra característica importante da articulação diartrodial é a cápsula, um tecido conectivo fibroso branco feito principalmente de colagénio. Ela protege a articulação. Os espessamentos da cápsula, chamados ligamentos, são comuns onde é necessário suporte adicional. A cápsula basicamente define a articulação, criando a parte interarticular da articulação, ou a parte de dentro da articulação, que possui uma cavidade articular com pressão atmosférica reduzida. Embora as cargas dos tecidos moles sejam difíceis de calcular, a cápsula absorve parte da carga imposta sobre a articulação.

Na superfície interna da cápsula articular encontra-se a membrana sinovial, um tecido conectivo vascularizado frouxo, que segrega líquido sinovial dentro da articulação para a lubrificar e a nutrir. Quando a articulação se move lentamente, o líquido é altamente viscoso, dando grande suporte. Quando a articulação se move rapidamente, o líquido tem uma resposta elástica, diminuindo a fricção na articulação.

As estruturas finais de maior relevo, dentro e em redor da articulação diartrodial, são os ligamentos. O ligamento liga osso com osso e é feito de colagénio, elastina e fibras reticulínicas. As fibras de colagénio têm um arranjo num ligamento, de modo a que ele possa lidar tanto com cargas tensoras como com cargas de cisalhamento, contudo, ele é mais adequado para cargas tensoras. Os ligamentos podem ser capsulares, extracapsulares, ou intra-articulares. Os ligamentos capsulares são apenas espessamentos na parede da cápsula, como os ligamentos glenoumerais na parte da frente da cápsula do ombro. Os

extracapsulares estão localizados fora da articulação. Os colaterais existentes em numerosas articulações do corpo são exemplos de ligamentos extracapsulares (por exemplo, o ligamento colateral fibular do joelho). Finalmente, os ligamentos intra-articulares estão localizados dentro da articulação diartrodial, como os ligamentos cruzados no joelho e os da cabeça do fêmur dentro da articulação do quadril. A função dos ligamentos é estabilizar, controlar e limitar o movimento articular.

Estabilidade da Articulação Diartrodial

A estabilidade numa articulação diartrodial é obtida através da estrutura, dos ligamentos que cercam a articulação, da cápsula, dos tendões que atravessam a articulação, da gravidade e do vácuo na articulação produzido pela pressão atmosférica negativa. A articulação do quadril é uma das articulações mais estáveis do corpo, porque tem bom suporte muscular, capsular e ligamentar. A estrutura da articulação do quadril apresenta congruência entre as superfícies com um alto grau de contacto osso-osso. Contudo, a maior parte da estabilidade do quadril deriva dos efeitos da gravidade e do vácuo na articulação. A pressão negativa na articulação é suficiente para sustentar o fêmur dentro da articulação caso todas as outras estruturas, como os ligamentos e os músculos de suporte, sejam removidos.

Em contraste, a estabilidade do ombro é dada somente pela cápsula e pelos músculos que cercam a articulação. Também a congruência da articulação do ombro é limitada somente por uma pequena parte da cabeça do úmero, que faz contacto com a cavidade glenóide.

Tipos de Articulações diartrodiais

- Articulações Simples, Compostas e Complexas

As superfícies articulares encontradas nas diferentes articulações do corpo variam em tamanho e formato. Tipicamente, existe uma superfície côncava que encontra uma superfície convexa no osso adjacente, sendo denominadas por superfícies fêmea e macho, respectivamente. Também pode haver mais de dois pontos de contacto ou superfícies articuladoras. Uma articulação com apenas duas superfícies articuladoras é uma articulação simples, enquanto que uma articulação com três ou mais superfícies articuladoras é uma articulação composta. Uma articulação com mais de duas superfícies articuladoras e com um disco ou fibrocartilagem é uma articulação complexa. Um exemplo de articulação

simples é o quadril, de uma articulação composta é o punho e de uma articulação complexa é o joelho.

Existe um sistema de classificação articular que distingue sete tipos diferentes de articulações diartrodiais, de acordo com as diferenças nas superfícies articulares, nos graus de liberdade permitidos por elas e no tipo de movimento que ocorre entre os segmentos (figura 2.8).

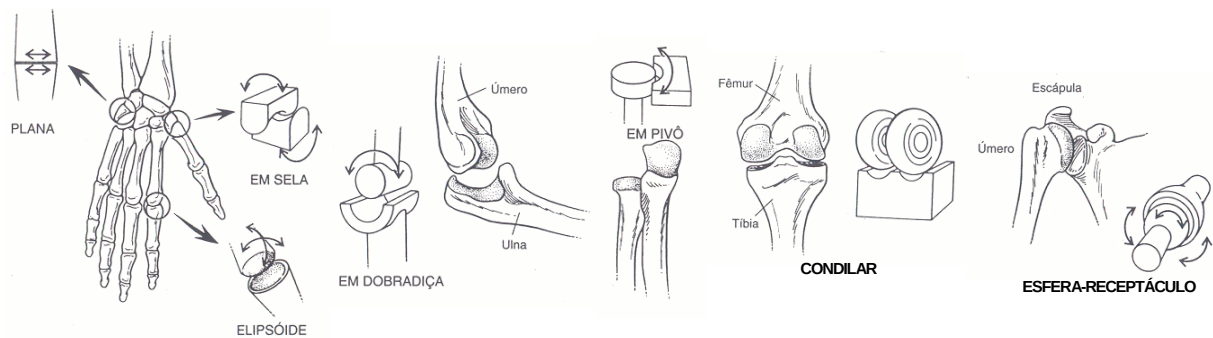


Figura 2.8 – Tipos de articulações diartrodiais ou sinoviais [3]

- Articulação Plana ou Deslizante

A articulação plana ou deslizante é encontrada no pé, entre os tarsos e na mão, entre os carpos. O movimento nesse tipo de articulação não ocorre sobre um eixo e é denominado não axial, consistindo em duas superfícies planas que deslizam uma sobre a outra, para permitir o movimento. Na mão, por exemplo, os carpos escorregam um sobre o outro à medida que a mão se move em flexão, extensão, desvio radial ou desvio ulnar. Do mesmo modo, no pé, os tarsos desviam-se durante a pronação e a supinação, deslizando um sobre o outro nesse processo.

- Articulação em Dobradiça

A articulação em dobradiça (gínglimo) permite o movimento num plano (flexão, extensão), sendo por isso uniaxial. Exemplos de articulações em dobradiça no corpo são as articulações interfalângicas dos dedos do pé e da mão e articulação ulnoumeral do cotovelo.

- Articulação em Pivô

A articulação em pivô também permite o movimento num plano (rotação, pronação, supinação) sendo por isso uniaxial. As articulações em pivô são localizadas na articulação radioulnar superior e inferior e na articulação atlantoaxial na base do crânio.

- Articulação Condilar

A articulação condilar é aquela que permite o movimento primário num plano (flexão, extensão) com pequenas quantidades de movimento noutra plano (rotação). É encontrada na articulação do joelho.

- Articulação Elipsóide

A articulação elipsóide permite o movimento em dois planos (flexão, extensão; abdução, adução) sendo por isso biaxial. Exemplos dessa articulação podem ser encontrados na articulação radiocárpica do punho e na articulação metacarpofalângica das falanges.

- Articulação em Sela

A articulação em sela, encontrada apenas na articulação carpometacárpica do polegar, permite dois planos de movimento (flexão, extensão, abdução, adução) com uma pequena quantidade de rotação.

- Articulação em Esfera-receptáculo

A articulação em esfera-receptáculo permite o movimento nos três planos (flexão, extensão; abdução, adução, rotação) e é a mais móvel das articulações diartrodiais. As articulações de quadril e ombro são exemplos de articulações tipo esfera-receptáculo. A tabela 2.1 tipifica algumas das principais articulações do corpo.

Tabela 2.1 – Principais articulações do corpo

Articulação	Tipo	gl
Vértebras	Anfiartrodial	3
Quadril	Esfera-receptáculo	3
Ombro	Esfera-receptáculo	3
Joelho	Condilóide	2
Punho	Elipsóide	2
Metacarpofalângicas (dedos)	Elipsóide	2
Carpometacárpica (polegar)	Sela	2
Cotovelo	Dobradiça	1
Radioulnar	Pivô	1
Tornozelo	Dobradiça	1
Interfalângica	Dobradiça	1

OUTROS TIPOS DE ARTICULAÇÕES

Articulações Sinartrodiais ou Fibrosas

Existem outras articulações que são limitadas nas características de movimento, mas têm um papel importante na estabilização do sistema esquelético. Alguns ossos são mantidos unidos por articulações fibrosas, como as encontradas nas suturas do crânio. Essas articulações, denominadas sinartrodiais, permitem a ocorrência de pouco ou nenhum movimento entre os ossos e mantêm-nos firmemente unidos.

Articulações Anfiartrodiais ou Cartilaginosas

Existem também articulações cartilaginosas chamadas anfiartrodiais, que são ossos mantidos unidos por cartilagem hialina, como se vê nas placas epifisárias, ou fibrocartilagem, encontradas na sínfise púbica e articulações intervertebrais. O movimento nessas articulações é também muito limitado, embora não tanto como nas articulações sinartrodiais.

2.2 O MÚSCULO – O MOTOR DO CORPO HUMANO

2.2.1 INTRODUÇÃO

Os músculos e a gravidade são os principais produtores do movimento humano. Os músculos são usados para manter uma posição, levantar ou baixar uma parte do corpo, desacelerar um movimento rápido e para imprimir grande velocidade no corpo ou num objecto. Os músculos são capazes de contracções rápidas e vigorosas, mas cansam-se rapidamente e requerem repouso após períodos de actividade, mesmo que breves.

A tensão desenvolvida pelos músculos gera compressão nas articulações, aumentando a sua estabilidade. Contudo, em algumas posições articulares, a tensão produzida pelos músculos pode traccionar os segmentos de forma a separá-los, criando instabilidade. Os músculos são usados assimetricamente na maioria das actividades, quando um lado do corpo utiliza um grupo específico de músculos e o outro lado utiliza músculos diferentes ou opostos. Os músculos são usados simetricamente em actividades em que os dois lados do corpo fazem o mesmo movimento, utilizando os mesmos músculos.

Como os músculos são responsáveis pela locomoção, pelos movimentos dos membros, pela postura e pela estabilidade articular, é necessário uma boa compreensão das características e limitações da acção muscular.

Nesta secção será analisada a estrutura do músculo, as suas propriedades e as várias funções que desempenha. Em seguida, será estudado um equivalente mecânico do músculo, para melhor se perceber o seu desempenho. Serão ainda estudados os vários tipos de acções musculares, o seu comportamento e a sua utilização, bem como os vários factores que podem influenciar a força muscular. Finalmente será analisada a função dos músculos biarticulares.

2.2.2 ESTRUTURA MACROSCÓPICA DO MÚSCULO

ORGANIZAÇÃO FÍSICA DO MÚSCULO

Os músculos e os grupos musculares organizam-se de modo a poder contribuir, individual ou colectivamente, para produzir um movimento muito pequeno, ou um muito amplo e potente. Os músculos raramente actuam individualmente; geralmente actuam com outros

músculos, numa variedade de papéis possíveis. Para melhor compreender a função muscular é preciso, primeiro examinar a organização estrutural do músculo a partir da anatomia macroscópica externa, seguindo até ao nível microscópico da acção muscular. Assim, será analisada a anatomia macroscópica e o arranjo externo dos músculos, bem como a visão microscópica das fibras musculares.

Grupos de Músculos

Os grupos musculares ficam contidos em compartimentos que são definidos pela fáscia, uma bainha de tecido fibroso. Esses compartimentos dividem os músculos em grupos funcionais e é comum que os músculos de um compartimento sejam estimulados pelo mesmo nervo. Na coxa existem três compartimentos: o anterior, que contém o quadríceps femoral, o posterior, que contém os isquiotibiais e o medial, que contém os adutores. Os compartimentos servem para manter os músculos organizados e contidos numa região.

Organização Muscular Individual

De um modo geral, cada músculo individual tem uma parte central, na qual o músculo é mais espesso, denominada ventre muscular. Alguns músculos, como o bíceps braquial, têm um ventre muito pronunciado, enquanto outros músculos, como os flexores e extensores do punho, têm ventres que não são tão aparentes para o observador.

Revestindo a parte externa do músculo existe outro tecido fibroso, o epimísio, que tem um papel vital na transferência de tensão muscular para o osso. As tensões no músculo são produzidas em vários locais e o epimísio transfere as diferentes tensões para o tendão, permitindo uma aplicação suave da força muscular no osso.

Cada músculo pode conter milhares de fibras musculares (fascículos) que são cuidadosamente organizadas em compartimentos dentro do próprio músculo. Cada fascículo pode conter até 200 fibras musculares. O fascículo é coberto por uma bainha conectiva densa (perimísio), que protege as fibras musculares e cria caminhos para os nervos e vasos sanguíneos. O tecido conectivo no perimísio e no epimísio dá ao músculo grande parte da sua capacidade de alongamento e de retorno ao comprimento em repouso. Os fascículos dispõem-se paralelamente uns aos outros no músculo. Cada fascículo contém fibras musculares cilíndricas longas, as células dos músculos esqueléticos, onde a força é produzida. As fibras musculares podem ter até 50 μm de largura e 10 cm de comprimento.

As fibras também se dispõem paralelamente e são cobertas por uma membrana, o endomísio.

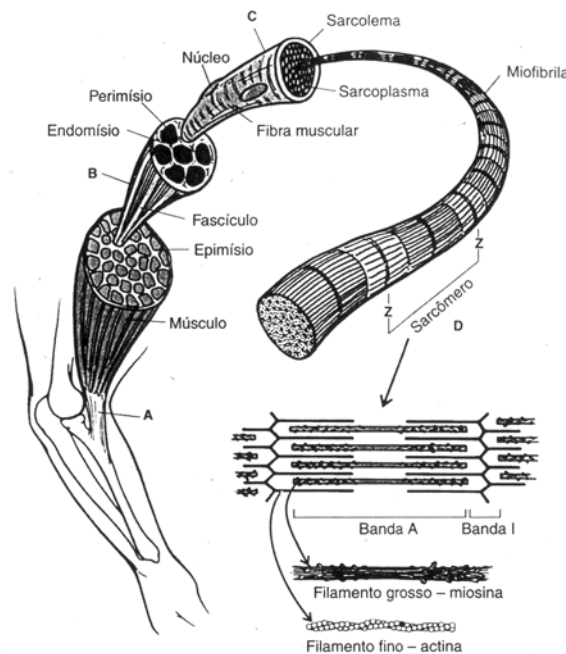


Figura 2.9 – Organização muscular individual [3]

O endomísio é uma bainha muito fina que leva os capilares e nervos que nutrem e estimulam cada fibra muscular. Os vasos e os nervos entram, geralmente, no meio do músculo e são distribuídos pelo endomísio. O endomísio também serve como isolante para a actividade neurológica dentro do músculo. Directamente sob o endomísio encontra-se o sarcolema, uma fina superfície na membrana do plasma que se ramifica dentro do músculo. A estimulação neurológica do músculo percorre o sarcolema e, eventualmente, atinge cada unidade contráctil individual pela neurotransmissão química.

Ao nível microscópico, a fibra pode ser dividida novamente em numerosas miofibrilas, filamentos delicados em forma de haste que percorrem todo o comprimento do músculo. Podem existir centenas ou milhares de miofibrilas em cada fibra muscular e cada fibra é preenchida com 80% de miofibrilas. A parte restante da fibra é constituída por organelas usuais, como mitocôndrias, sarcoplasma, retículo sarcoplasmático e túbulos T. As miofibrilas têm 1 a 2 μm de diâmetro e percorrem todo o comprimento da fibra muscular.

As miofibrilas apresentam estrias transversas, devido aos filamentos claros e escuros colocados numa ordem que forma padrões repetidos de bandas. A banda preta é a proteína espessa, a miosina, e a clara é o polipeptídeo fino, a actina. Uma unidade dessas bandas

denomina-se por sarcómero, a unidade contráctil muscular propriamente dita, que desenvolve tensão à medida que os filamentos de actina deslizam em direcção ao meio dos filamentos de miosina.

ORGANIZAÇÃO DAS FIBRAS

O formato e arranjo das fibras no músculo determina se o músculo é capaz de gerar grandes quantidades de força, ou se tem boa capacidade de encurtamento. No segundo caso, a capacidade de encurtamento de um músculo reflecte-se, tanto na mudança de comprimento, como na velocidade, dependendo da situação do movimento. Existem dois tipos básicos de arranjos de fibras encontrados no músculo: fusiformes e peniformes.

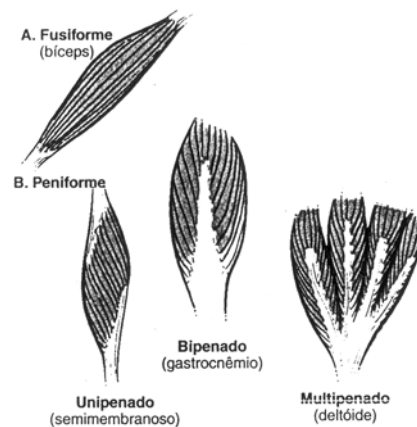


Figura 2.10 – Organização das fibras [3]

Músculos Fusiformes

O arranjo das fibras fusiformes é paralelo às fibras musculares e os fascículos dispõem-se ao longo do comprimento do músculo. As fibras num músculo fusiforme dispõem-se paralelamente à linha de tracção do músculo, de modo que a força da fibra é na mesma direcção da musculatura.

Esse arranjo das fibras em forma de fuso fornece o potencial para grandes quantidades de encurtamento e movimentos de alta velocidade no corpo. Isso é possível porque os músculos fusiformes são tipicamente mais compridos que os outros tipos de músculos e o comprimento da fibra muscular é maior que o comprimento do tendão.

Um músculo que tem uma proporção maior de comprimento muscular em relação ao comprimento do tendão tem um potencial de encurtamento maior. Podem ocorrer grandes distâncias de encurtamento porque o músculo esquelético pode encurtar-se até aproximadamente 30 a 50% do seu comprimento de repouso. Alguns exemplos de músculos fusiformes no corpo são o sartório, o bíceps braquial e o braquial.

Músculos Peniformes

No segundo tipo de arranjo de fibras, o peniforme, as fibras dispõem-se diagonalmente em relação a um tendão que atravessa o músculo. A forma geral do músculo peniforme é de pena, uma vez que os fascículos são curtos e dispõem-se obliquamente. As fibras do músculo peniforme dispõem-se num ângulo relativo à linha de tracção do músculo, de modo que a força da fibra é numa direcção diferente da força muscular. As fibras são mais curtas que o músculo e a alteração no comprimento da fibra individual não é igual à alteração no comprimento muscular.

As fibras podem correr diagonalmente saindo de um lado do tendão, as unipenadas, dos dois lados do tendão, as bipenadas, ou uma combinação dos dois, que são as multipenadas.

Como as fibras musculares são mais curtas e correm diagonalmente para dentro do tendão, as fibras peniformes criam movimentos mais lentos e não são capazes de produzir movimentos de grande amplitude. A vantagem é uma secção transversa fisiológica muito maior no músculo, que pode geralmente produzir mais força.

A secção transversa fisiológica é a soma total de todas as secções transversas de fibras no músculo, medindo a área perpendicular à direcção das fibras. A secção transversal anatómica, por outro lado, é a secção transversal em ângulo recto com o eixo longitudinal do músculo (figura 2.11). No tipo de fibras fusiformes as secções transversas fisiológica e anatómica são equivalentes. No tipo de músculo peniforme a secção transversal fisiológica é maior, porque tem um número maior de fibras. Assim, um músculo peniforme, que tenha a mesma secção transversa anatómica que um músculo fusiforme, será capaz de produzir mais força, porque possui uma maior secção transversa fisiológica (maior número de fibras). Os músculos peniformes são músculos do corpo de alta força e grande produção de potência. Alguns exemplos de músculos unipenados são o flexor longo do polegar, o tibial posterior, o semimembranoso e o extensor longo dos dedos. Os músculos bipenados são o

gastrocnémio, o sóleo, o vasto medial, o vasto lateral e o recto femoral. Exemplos de músculos multipenados são o deltóide e o glúteo máximo.

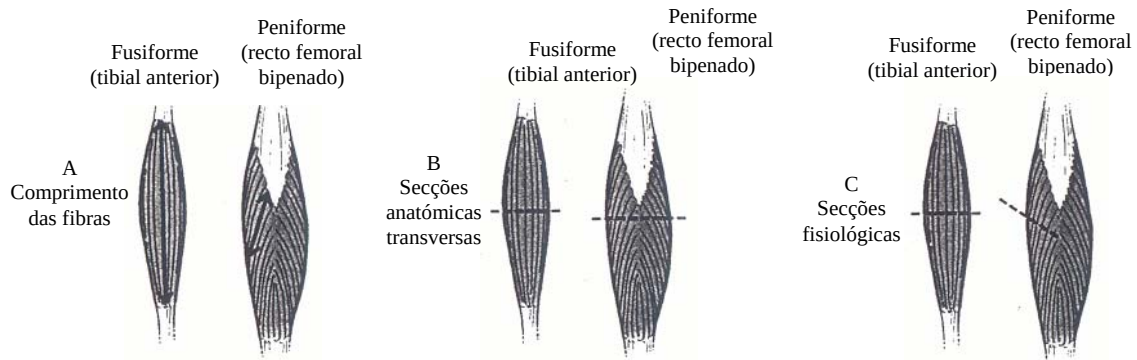


Figura 2.11 – Características dos músculos fusiformes e dos músculos peniformes[3]

As acções mecânicas de músculos penados largos, como o peitoral maior ou trapézio, que têm fibras que se inserem directamente no osso sobre um local de inserção largo, são difíceis de descrever usando um movimento para todo o músculo. Por exemplo, o trapézio inferior insere-se na escápula num ângulo oposto ao trapézio superior; assim essas secções do mesmo músculo são funcionalmente independentes. Quando a cintura escapular é elevada e abduzida, enquanto o braço se move para cima em frente ao corpo, a parte inferior do trapézio pode ficar inactiva. Isso representa um problema complicado, quando se estuda a função do músculo como um todo e requer múltiplas linhas de acção e efeito.

TIPOS DE FIBRAS

Cada músculo contém uma combinação de diferentes tipos de fibras, classificadas como fibras de contracção rápida ou lenta. Os tipos de fibras são uma consideração importante na área do metabolismo muscular e consumo de energia. Existem diferenças mecânicas na resposta das fibras musculares de contracção lenta e rápida que tornam importante a análise de cada tipo.

Fibras de Contracção Lenta

As fibras musculares oxidativas de contracção lenta, ou Tipo I, são encontradas em maiores quantidades nos músculos posturais do corpo, como os músculos da parte superior das costas e o sóleo. Essas fibras têm tempos de contracção baixos e são adequadas para trabalho prolongado e de baixa intensidade.

Fibras de Contracção Rápida e Intermediária

As fibras de contracção rápida, ou Tipo II, são subdivididas em Tipo IIa, oxidativas-glicolíticas, e Tipo IIb, glicolíticas. O Tipo IIa é um músculo vermelho, conhecido como fibra de contracção rápida intermediária, porque pode permanecer em actividade por longos períodos ou pode contrair-se com um disparo de força e então fatigar. A fibra branca, Tipo IIb, proporciona uma rápida produção de força e fatiga rapidamente. A maioria dos músculos, se não todos, contém os dois tipos de fibras.

A INSERÇÃO MUSCULAR

Existem três maneiras para o músculo se inserir no osso: directamente no osso, por um tendão, ou por uma aponeurose. Esses três tipos de inserções estão representados na figura 2.12. O músculo pode inserir-se directamente no perióstio do osso por uma fusão entre o epimísio e a superfície do osso, como a inserção do trapézio. O músculo pode inserir-se por um tendão que se funde com a fáscia muscular, como ocorre com o isquiotibiais, o bíceps braquial e o flexor radial do carpo. Ou pode inserir-se por uma bainha de tecido fibroso conhecida como aponeurose, encontrada nos abdominais e na inserção do grande dorsal no tronco.

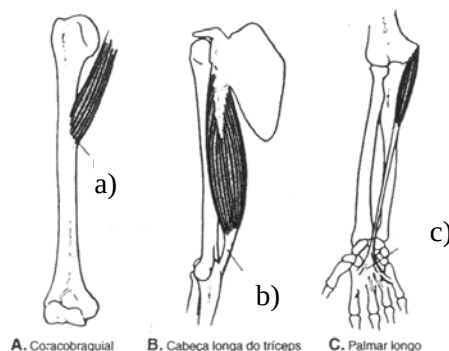


Figura 2.12 – Os três tipos de inserções

a) directamente b) por um tendão c) por uma aponeurose [3]

Características do Tendão

A forma mais comum de inserção, o tendão, é um feixe inelástico de fibras de colagénio, arranjadas paralelamente na direcção da aplicação de força do músculo. Embora as fibras sejam inelásticas, o tendão pode responder de modo elástico, pelo recuo e elasticidade do tecido conectivo. Os tendões podem suportar altas forças tensoras produzidas pelos músculos e exibem comportamento viscoelástico em resposta à carga. O tendão de

Aquiles, segundo relatos, resiste a cargas tensoras num grau igual ou maior que o aço de dimensões similares. A resposta carga-deformação do tendão é similar à do ligamento.

Tanto os tendões como os ligamentos respondem muito rigidamente quando expostos a cargas em alta velocidade. As diferenças nas características de força e desempenho do tendão versus músculo ou osso estão representadas na figura 2.13.

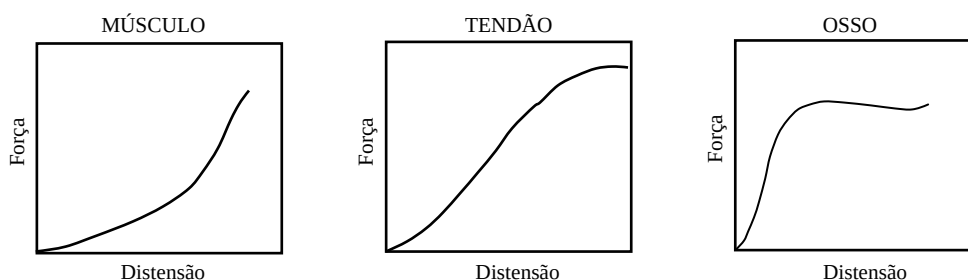


Figura 2.13 – Diferenças nas características de força e desempenho do tendão versus músculo ou osso [3]

O tendão e o músculo unem-se na junção miotendínea, onde as verdadeiras miofibrilas da fibra muscular encontram as fibras de colagénio do tendão, para produzir uma ligação com múltiplas camadas. A ligação do tendão com o osso consiste numa ligação do tendão com fibrocartilagem, que se une com fibrocartilagem mineralizada e com o osso lamelar. Essa ligação mistura-se com o perióstio e o osso subcondral.

Os tendões e os músculos trabalham juntos para absorver ou produzir tensão no sistema. Os tendões têm um arranjo em série ou são alinhados com os músculos; consequentemente, o tendão suporta a mesma tensão que o músculo. A interacção mecânica entre o músculo e o tendão depende da quantidade de força que está a ser aplicada ou produzida, da velocidade da acção muscular e da folga no tendão.

Se é produzida tensão nas fibras musculares enquanto o tendão está frouxo, este irá recuar ou voltar ao seu comprimento inicial. À medida que a folga no tendão é absorvida pela acção de recuo, o tempo que leva para alongar o tendão causa um atraso na aquisição do nível requerido de tensão nas fibras musculares.

O recuo do tendão também reduz a velocidade com que o músculo pode encurtar, que, por sua vez, aumenta a carga que um músculo pode suportar. Se o tendão está rígido e não há recuo a tensão será transmitida directamente para as fibras musculares, criando altas

velocidades e diminuindo a carga que o músculo pode suportar. A resposta rígida num tendão permite o desenvolvimento de rápidas tensões no músculo e resulta em movimentos rápidos e precisos.

Muitos tendões percorrem protuberâncias ósseas que servem para reduzir parte da tensão sobre o tendão mudando o ângulo de tracção do músculo e reduzindo a tensão produzida nela. Exemplos podem ser encontrados com os músculos quadríceps femorais e a patela, e com tendões dos isquiotibiais e gastrocnémio quando passam sobre os côndilos femorais.

A tensão desenvolvida nos tendões também produz as saliências e protuberâncias que há no osso. As apófises encontradas num osso são desenvolvidas por forças tensoras aplicadas sobre o osso por um tendão.

Origem e Inserção

O músculo tipicamente liga-se ao osso pelas duas pontas. A ligação mais próxima do meio do corpo, ou mais proximal, é denominada origem. A ligação mais afastada da linha média ou mais distal é denominada inserção. É um erro comum denominar a origem como a ligação óssea que não se move quando o músculo se contrai, tal está errado pois os músculos traccionam da mesma forma nas duas pontas, de modo que, os dois locais de ligação recebem forças iguais. Os dois ossos não se movem quando um músculo se contrai apenas porque existe uma força estabilizadora nos músculos adjacentes ou a uma diferença na massa dos dois segmentos ou ossos em que o músculo está inserido, que não o permite. Existem numerosos exemplos no corpo no qual um músculo pode alternar entre mover uma ponta de sua ligação, ou a outra ponta, dependendo da actividade. Um exemplo é o músculo psoas, o qual cruza o quadril que flexiona a coxa quando se faz um levantamento da perna estendida ou levanta o tronco quando se faz um abdominal. O exemplo do psoas está representado na figura 2.14.

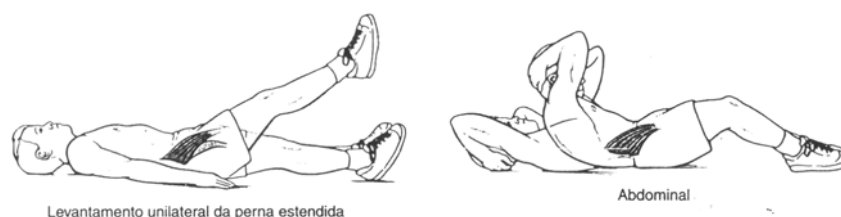


Figura 2.14 – O músculo psoas [3]

2.2.3 CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO MÚSCULO

PROPRIEDADES DA FIBRA MUSCULAR

O músculo esquelético é muito resistente e pode ser alongado ou encurtado em velocidades bastante altas sem que ocorram grandes danos no tecido. O desempenho da fibra muscular em situações de velocidade e de carga variáveis é determinado por quatro propriedades do tecido muscular esquelético:

Irritabilidade

É a capacidade para responder à estimulação. Num músculo, a estimulação é feita por um neurotransmissor químico. O tecido muscular esquelético é um dos tecidos mais sensíveis e responsivos do corpo. Somente o tecido nervoso é mais sensível que o tecido muscular esquelético. Como um tecido excitável, o músculo esquelético pode ser recrutado rapidamente com grande controle sobre quais e quantas fibras musculares serão estimuladas para um movimento.

Contractilidade

É a capacidade de encurtamento de um músculo quando o tecido muscular recebe estimulação suficiente. Alguns músculos podem encurtar-se até 50 a 70% do seu comprimento de repouso. A média é cerca de 57% do comprimento de repouso para todos os músculos esqueléticos.

O comprimento que o músculo encurta é geralmente limitado pelas restrições físicas do corpo. Por exemplo, o sartório pode encurtar-se mais de metade de seu comprimento se for removido e estimulado numa laboratorialmente, porém no corpo, a distância de encurtamento é restringida pela articulação do quadril e pelo posicionamento do tronco e da coxa.

Extensibilidade

É a capacidade de alongamento do músculo para além do comprimento de repouso. O músculo sozinho não consegue produzir alongamento, sendo necessário outro músculo ou

outra força externa. Um bom exemplo de alongamento no tecido muscular é mover uma articulação até à amplitude de movimento passiva, na qual um indivíduo empurra o membro do outro para além do comprimento de repouso. A extensibilidade do músculo é determinada pelo tecido conectivo encontrado no perimísio, epimísio e fáscia que cerca o músculo.

Elasticidade

É a capacidade da fibra muscular retomar o seu comprimento de repouso depois da força de alongamento do músculo ter sido removida. A elasticidade do músculo é determinada mais pelo tecido conectivo dentro do músculo que pelas próprias fibrilas. As propriedades de elasticidade e extensibilidade são mecanismos de protecção no músculo que mantêm a integridade e o comprimento básico do músculo. A elasticidade é também um componente bastante crítico para potenciar uma acção muscular de encurtamento, quando é precedida por um alongamento. Isso denomina-se ciclo alongamento-encurtamento.

Usando o ligamento como comparação, é fácil ver como a propriedade da elasticidade beneficia o tecido muscular. O ligamento, de natureza amplamente colagénica, possui pouca ou nenhuma elasticidade, e quando é alongado além de seu comprimento de repouso não volta ao seu comprimento original, mas permanece estendido. Isso pode criar frouxidão ao redor da articulação quando o ligamento é longo demais para exercer controle suficiente sobre o movimento articular. Por outro lado, o tecido muscular irá sempre voltar ao seu comprimento original. Se o músculo é alongado demais, o tecido muscular irá eventualmente romper-se.

FUNÇÕES DO MÚSCULO

Os músculos esqueléticos realizam uma variedade de funções, todas elas importantes para o desempenho eficiente do corpo humano. As três funções que se relacionam especificamente com o movimento humano são: a contribuição para a produção do movimento esquelético, a assistência na estabilidade articular e a manutenção da postura e do posicionamento corporal.

Produzir Movimento

O movimento esquelético é criado à medida que as acções musculares produzem tensão que é transferida para o osso. Os movimentos resultantes são necessários para locomoção e outras manipulações segmentares.

Manter Posturas e Posições

As acções musculares de menor amplitude são utilizadas para manter posturas. Essa actividade muscular é contínua e resulta em pequenos ajustes, na medida em que a cabeça é mantida na posição ou o peso corporal é equilibrado sobre os pés.

Estabilizar Articulações

As acções musculares também contribuem significativamente para a estabilidade articular. As tensões musculares são geradas e aplicadas pelas articulações através dos tendões, dando estabilidade às partes da articulação por onde eles se cruzam. Na maioria das articulações, especialmente as do ombro e as do joelho, os músculos que atravessam a articulação através dos tendões estão entre os estabilizadores articulares primários.

Outras Funções

Os músculos esqueléticos também proporcionam quatro outras funções que não têm relação directa com o movimento humano. Os músculos suportam e protegem os órgãos viscerais e os tecidos internos de lesão. A tensão no tecido muscular pode alterar e controlar pressões dentro das cavidades. O músculo esquelético também contribui para a manutenção da temperatura corporal pela produção de calor. Finalmente, os músculos controlam as entradas e saídas do corpo pelo controle voluntário da deglutição, defecação e eliminação de urina.

FUNÇÃO INTERNA DO MÚSCULO

No desempenho de uma actividade motora apenas é usada uma parte muito pequena da capacidade de movimento potencial do sistema músculo-esquelético. São necessários 20 a 30 graus de liberdade para levantar um braço acima da cabeça e pentear os cabelos. Contudo, muitos dos movimentos disponíveis podem ser indesejáveis em termos do

movimento desejado, que é pentear os cabelos. Para eliminar os movimentos indesejáveis e criar o movimento desejado, os músculos ou grupos musculares precisam de desempenhar vários papéis. Para realizar uma habilidade motora num tempo determinado, é usada somente uma pequena percentagem da capacidade de movimento potencial do sistema motor.

Movimentador Primário ou Movimentador Assistente

O movimentador primário é o músculo, ou os músculos, inicialmente responsável pela produção de um determinado movimento. Quando é requerida uma maior força outros músculos contribuem como movimentadores assistentes. Por exemplo, o grande dorsal e o peitoral maior são movimentadores primários quando se encurtam para produzir extensão do braço. Quando o movimento de extensão exige mais força, o redondo maior e o tríceps braquial podem colaborar no movimento.

Agonistas e Antagonistas

Os músculos que criam o mesmo movimento articular são chamados de agonistas. Por outro lado, músculos opostos, ou que produzem o movimento articular oposto, são chamados antagonistas. Os antagonistas precisam de se relaxar para permitir que ocorra um movimento, ou precisam de se contrair ao mesmo tempo que os agonistas, para controlar ou reduzir a rapidez de um movimento articular. Assim, ao balançar a coxa para frente e para cima, os agonistas que produzem o movimento são os flexores do quadril, que compreendem o iliopsoas, o recto femoral, o pectíneo, o sartório e o grácil. Os antagonistas, ou músculos que opõem o movimento de flexão do quadril, são os extensores do quadril, ou seja, o isquiotibiais e o glúteo máximo. São os antagonistas e a gravidade que travam o movimento de flexão do quadril e terminam a acção muscular.

Quando um músculo está a fazer o papel de antagonista fica mais susceptível a uma lesão no local de inserção muscular, ou na própria fibra muscular. Isso acontece, porque o músculo está a contrair-se para desacelerar o movimento do membro, ao mesmo tempo que está a ser alongado.

Estabilizadores e Neutralizadores

Os músculos são também usados como estabilizadores, actuando num segmento de modo que possa ocorrer um movimento específico numa articulação adjacente. A estabilização é muito importante na cintura escapular que precisa de ser suportada, de modo que os movimentos do braço possam ocorrer de forma homogénea e eficiente. É também importante na cintura pélvica e na região do quadril, durante a caminhada. Quando um pé está no chão durante a caminhada ou corrida, o glúteo médio contrai-se para manter a estabilidade da pelve, evitando que caia para o lado. O último papel que os músculos necessitam de desempenhar é o de sinergistas, ou neutralizadores. Neste caso o músculo precisa de se contrair para eliminar uma acção articular indesejada, causada por outro músculo. Por exemplo, o glúteo máximo contrai-se na articulação do quadril para produzir extensão de coxa, mas o glúteo máximo também tentará girar externamente a coxa. Se a rotação externa for uma acção indesejada, o glúteo mínimo e o tensor da fáscia lata irão contrair-se para produzir uma acção neutralizadora de rotação interna, de modo a cancelar a acção de rotação externa do glúteo máximo, deixando apenas o movimento de extensão desejado.

A figura 2.15 apresenta os vários papéis de músculos seleccionados num simples exercício de abdução do braço.

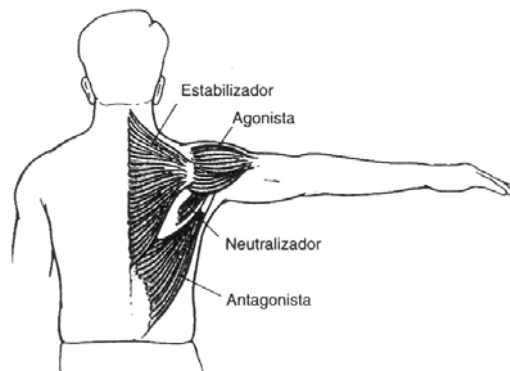


Figura 2.15 – Movimento de abdução do braço [3]

COMPONENTES MECÂNICAS DO MÚSCULO

Componente Contráctil ou Activo

A contracção muscular ocorre muito rapidamente e a duração da contracção depende dos elementos contrácteis e da modificação de comprimento dos elementos elásticos. Foi desenvolvido um modelo mecânico de três componentes do músculo, para descrever

acções musculares (figura 2.16). Esse modelo utiliza um componente contráctil e dois componentes elásticos no músculo. O componente contráctil ou activo do músculo é encontrado nas miofibrilas em que existem pontes transversas de filamentos de actina e miosina, que causam o encurtamento da fibra muscular.

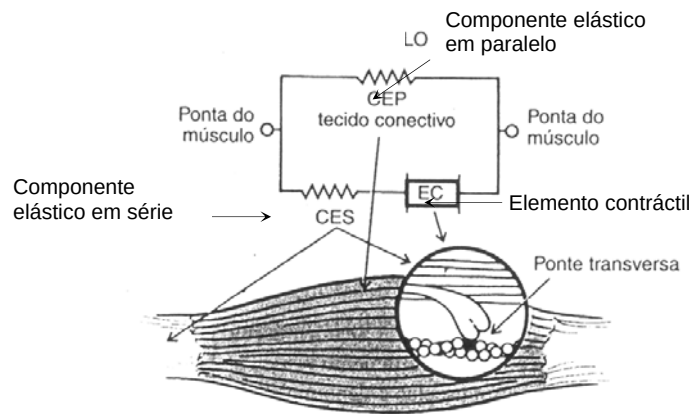


Figura 2.16 – Modelo mecânico de três componentes do músculo [3]

Componentes Elásticos ou Passivos

O componente elástico ou passivo do músculo serve para absorver, transmitir e armazenar energia. Esse componente passivo é subdividido em mais dois componentes: o componente elástico série e o componente elástico paralelo. O componente elástico série está localizado no tendão (85%) e nas pontes transversas de actina e miosina (15%) quando os filamentos de miosina rodam durante o alongamento de um músculo. Como esse componente está em série com o elemento contráctil, ele comporta-se como uma mola. O componente activo encurta-se e alonga o componente elástico série, permanecendo constante o comprimento total do complexo músculo-tendão. Isso também ameniza a força muscular produzida.

O componente elástico paralelo localiza-se no sarcolema e no tecido conectivo em redor do músculo, que inclui o endomísio, perimísio e epimísio. O componente elástico paralelo tem um papel importante quando um músculo passivo está a ser alongado. Ao mesmo tempo que o músculo é alongado, o componente elástico paralelo oferece uma força de oposição e impede que os elementos contrácteis sejam traccionados por forças externas. Quando os elementos contrácteis estão activos, a influência do componente elástico paralelo é insignificante. Num alongamento rápido as pontes transversas de miosina contribuem com o componente elástico em série do músculo, enquanto num alongamento lento as pontes transversas escorregam e, consequentemente, não contribuem nesse local. Os componentes

elásticos paralelos e série no músculo oferecem uma tensão resistiva quando alongados e armazenam energia mecânica para uso num movimento articular subsequente. Assim, ao receber a tensão produzida pela força contráctil do músculo, os componentes elásticos alongam-se e armazenam a tensão que pode ser então transmitida ao osso.

ACÇÕES MUSCULARES GERAIS

As acções musculares dividem-se em três tipos: as isométricas, as concêntricas e as excêntricas. A figura 2.17 ilustra os três tipos de acções no membro superior e no membro inferior humano.

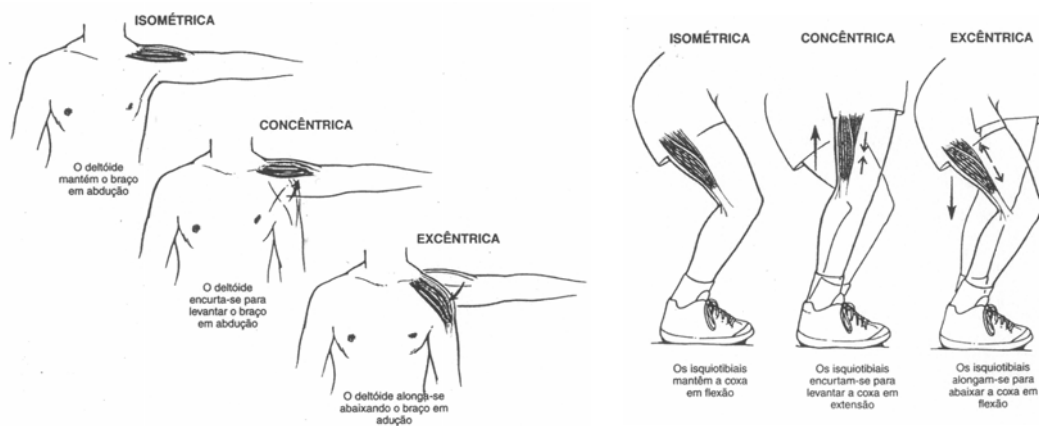


Figura 2.17 – Acções musculares gerais [3]

Acção Muscular Isométrica

A tensão muscular é produzida contra uma resistência para manter a posição, levantar um segmento ou objecto, ou ainda baixar ou controlar um segmento. Se o músculo está activo e desenvolve tensão, mas não há uma mudança visível ou externa na posição articular, a acção muscular é denominada isométrica.

Quando se faz uma flexão do tronco (por exemplo de 30 graus) e se mantém a posição, a acção muscular usada para manter essa posição pode ser chamada de isométrica, já que não ocorre movimento. Os músculos que se contraem isometricamente para manter o tronco flexionado são os músculos das costas, que estão a resistir à gravidade que, por sua vez, quer flectir ainda mais o tronco.

Outro exemplo é o movimento em que o indivíduo deitado dorsalmente levanta o tronco até 30 graus e pára. Para manter essa posição de flexão de tronco, é produzida uma acção

muscular isométrica usando os flexores do tronco. Essa acção muscular resiste à gravidade que está a tentar estender o tronco.

Acção Muscular Concêntrica

Se um músculo gera tensão activamente com um encurtamento visível na extensão do músculo, a acção muscular é denominada concêntrica. Na acção articular controlada concentricamente, as forças musculares somadas que produzem a rotação encontram-se na mesma direcção que a mudança no ângulo articular, o que implica que os agonistas são os músculos controladores numa acção muscular concêntrica. O movimento do membro produzido numa acção muscular concêntrica é também denominado positivo, uma vez que as acções musculares são geralmente contra a gravidade, ou são a fonte geradora do movimento de uma massa.

A maioria dos movimentos articulares para cima é criada por uma acção muscular concêntrica. Por exemplo, a flexão do braço ou do antebraço quando se está em pé será produzida pela acção muscular concêntrica dos agonistas respectivos, ou músculos flexores. As acções musculares concêntricas são usadas para gerar forças contra resistências externas, como levantar um peso ou levantar-se do solo.

Acção Muscular Excêntrica

Quando um músculo é sujeito a um binário externo maior que o interno dentro do músculo ocorre alongamento do músculo e a acção é chamada excêntrica. A fonte de força externa que desenvolve o binário externo que, por sua vez, produz uma acção muscular excêntrica é geralmente a gravidade ou a acção muscular de um grupo muscular antagonista.

Na acção articular excêntrica, as forças musculares totais que geram a rotação são em direcção oposta à mudança no ângulo articular, o que significa que os antagonistas são os músculos controladores na acção muscular excêntrica. Também o movimento do membro produzido na acção muscular excêntrica é chamado negativo, já que as acções articulares são geralmente um movimento a favor da gravidade, ou são os controladores, em vez de iniciadores do movimento de uma massa.

A maioria dos movimentos para baixo, a não ser que sejam muito rápidos, são controlados por uma acção excêntrica dos grupos musculares antagonistas. Ao estender o braço ou o

antebraço da posição flectida, a acção muscular necessita de ser controlada excentricamente pelos flexores, ou pelo grupo muscular antagonista. Do mesmo modo, ao baixar-se numa posição de agachamento, em que há flexão do quadril e do joelho, requer um movimento excêntrico controlado pelos extensores do quadril e do joelho. No entanto, os movimentos inversos de extensão da coxa e da perna contra a gravidade devem ser produzidos concentricamente pelos extensores.

Comparação entre as acções musculares

As acções musculares isométrica, concêntrica e excêntrica não são usadas isoladamente, mas combinadas. Tipicamente, as acções isométricas são usadas para estabilizar uma parte do corpo e as acções musculares excêntricas e concêntricas são usadas sequencialmente para maximizar o armazenamento de energia e o desempenho muscular. Essa sequência natural da função muscular durante a qual uma acção excêntrica precede uma acção concêntrica é conhecida como ciclo alongamento-encurtamento (“tomar lanço”).

Essas três acções musculares são muito diferentes em termos de custo energético e resultado de força. A acção muscular excêntrica pode desenvolver a mesma força que os outros dois tipos de acções musculares, com menos fibras musculares activadas. Consequentemente, essa acção muscular é mais eficiente e pode produzir a mesma força com menor consumo de oxigénio.

Além disso, a acção muscular excêntrica é capaz de produzir maior força que as acções musculares isométrica ou concêntrica (figura 2.18). Isso ocorre ao nível do sarcómero, onde a força aumenta além da força isométrica máxima se as miofibrilas forem alongadas e estimuladas.

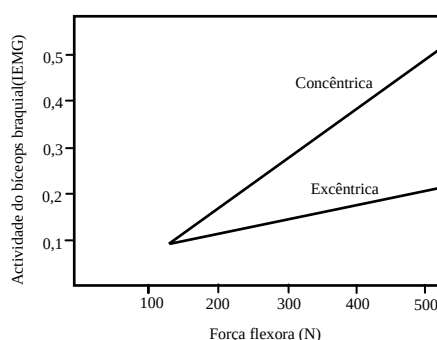


Figura 2.18 – Relação entre a força flexora e a actividade do bíceps braquial [3]

As acções musculares concêntricas são as que produzem menor força dos três tipos de acção muscular. A força depende do número de pontes transversas formadas na miofibrila. Na acção muscular isométrica, o número de pontes ligadas permanece constante. À medida que o músculo se encurta o número de pontes ligadas é reduzido com aumento de velocidade. Isso reduz o nível de força produzida pela tensão nas fibras musculares. Na figura 2.19 está representada uma curva hipotética do resultado do binário para as três acções musculares.

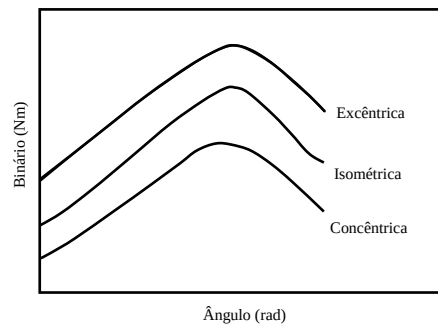


Figura 2.19 – Curvas do binário para as três acções musculares [3]

Um factor adicional que contribui para as diferenças de resultado de força observáveis entre as acções musculares excêntrica e concêntrica está presente quando as acções musculares estão a produzir movimentos no sentido vertical. Nesse caso, o resultado e a força tanto nas acções musculares concêntricas quanto excêntricas são influenciados por binários criados pela gravidade. A força da gravidade cria um binário que contribui para a força resultante numa acção muscular excêntrica enquanto que os músculos geram um binário que controla o abaixamento do corpo ou de um membro. A força resultante numa acção de abaixamento resulta tanto dos binários musculares quanto dos binários criados pela gravidade.

A força da gravidade inibe o movimento de um membro para cima, e, antes que qualquer movimento possa ocorrer, a acção muscular concêntrica tem que desenvolver uma força maior que a força da gravidade sobre o membro ou corpo (peso).

2.2.4 FACTORES QUE INFLUENCIAM A FORÇA MUSCULAR

ÂNGULO DE INSERÇÃO DO MÚSCULO

O músculo fornece uma certa quantidade de tensão que é transferida para o osso pelo tendão ou aponeurose. Nem toda a tensão ou força produzida pelo músculo será usada para produzir a rotação do segmento. Dependendo do ângulo de inserção do músculo, alguma

força será dirigida para estabilizar ou desestabilizar o segmento, traccionando o osso para afastá-lo ou aproximá-lo da articulação.

A força muscular será dirigida primariamente ao longo da extensão do osso e para dentro da articulação quando o ângulo do tendão for agudo. Quando o antebraço está na posição estendida, o tendão do bíceps braquial fica inserido no rádio com um ângulo baixo. Para flexionar o braço a partir dessa posição precisa-se de mais força muscular que em outras posições, porque a maior parte da força produzida pelo bíceps braquial é dirigida para dentro da articulação do cotovelo em vez de ser dirigida para mover os segmentos ao redor da articulação. Felizmente, a resistência oferecida pelo peso do antebraço é também mínima na posição estendida, de modo que a pouca força muscular disponível para mover o segmento geralmente é suficiente. Tanto a força dirigida pela extensão do osso, como a que é aplicada perpendicularmente ao osso para criar movimento articular podem ser determinadas resolvendo o ângulo de força muscular aplicada dentro dos seus respectivos componentes paralelos e rotatórios. Os componentes paralelos e rotatórios da força do bíceps braquial para diferentes ângulos de inserção estão representados na figura 2.20.

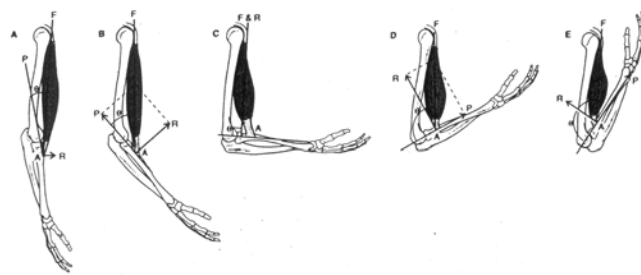


Figura 2.20 – O bíceps braquial [3]

Embora a tensão muscular possa ser mantida durante um movimento articular, o componente rotatório e o binário vão variar dependendo do ângulo de inserção. Muitas das posições iniciais neutras são posições "fracas", já que a maior parte da força muscular é dirigida ao longo do comprimento do osso. À medida que o segmento se move numa amplitude média do movimento articular, o ângulo de inserção geralmente aumenta e direcciona mais força muscular para mover o segmento. Consequentemente, quando se inicia um movimento de levantamento de peso a partir da posição completamente estendida, menos peso pode ser levantado em comparação com um levantamento iniciado com alguma flexão na articulação. O resultado da força isométrica dos flexores e dos extensores do ombro pode ser visto para diferentes posições articulares na figura 2.21.

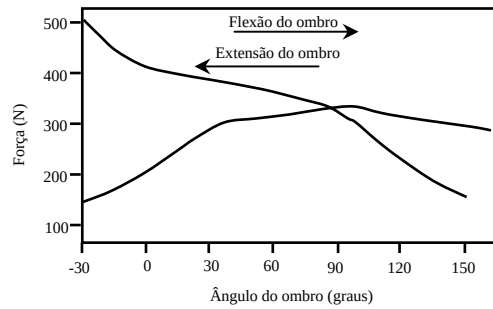


Figura 2.21 – Força isométrica dos flexores e dos extensores do ombro [3]

No final de alguns movimentos articulares, o ângulo de inserção pode mover-se para além dos 90 graus, ponto em que a força de movimento começa novamente a diminuir e a força ao longo do comprimento do osso actuará para traccionar o osso para longe da articulação. Essa força deslocadora está presente na articulação do cotovelo e do ombro quando existe um alto grau de flexão nas articulações.

Características Força-Tempo

A relação força-tempo na acção muscular isométrica está, até certo ponto, relacionada com o ângulo de tracção muscular sobre o músculo. Quando um músculo começa a desenvolver tensão por meio do componente contráctil do músculo, a força aumenta de modo não linear com o tempo, porque os componentes elásticos passivos encontrados no tendão e o tecido conectivo alongam-se e absorvem parte da força. Após o alongamento dos componentes elásticos, a tensão exercida pelo músculo sobre o osso aumenta linearmente com o tempo até que seja alcançada a força máxima.

O tempo para atingir uma força máxima e a amplitude da força produzida vai variar com a mudança na posição articular. Numa posição articular, a força máxima pode ser produzida muito rapidamente enquanto em outras posições articulares isso pode ocorrer mais tarde na contracção. Isso reflecte as mudanças na frouxidão do tendão e não as mudanças nas capacidades de gerar tensão dos componentes contrácteis. Se o tendão está frouxo, a força máxima ocorrerá mais tarde e vice-versa.

RELAÇÃO COMPRIMENTO-TENSÃO

A quantidade de força produzida por um músculo também depende do comprimento a que o músculo é mantido. A tensão máxima que pode ser produzida na fibra muscular ocorrerá

quando um músculo for activado num comprimento levemente maior que o comprimento de repouso (entre 80 a 120% do comprimento de repouso). O comprimento da maioria dos músculos no corpo fica dentro dessa amplitude de máxima produção de força.

RELAÇÃO FORÇA-VELOCIDADE

As fibras musculares encurtam-se a uma velocidade ou rapidez específica ao mesmo tempo que desenvolvem a força usada para mover um segmento ou carga externa. Os músculos criam uma força activa que se iguala à carga no encurtamento, e a força activa ajusta-se continuamente com a velocidade com que o sistema contráctil se move. Sob baixas condições de carga, a força activa é ajustada aumentando a velocidade de contracção. Com cargas altas, o músculo ajusta a força activa reduzindo a velocidade de encurtamento.

MÚSCULOS UNI E BIARTICULARES

Não é possível determinar a função ou contribuição de um músculo para um movimento articular levando apenas em consideração os locais de inserção. Uma acção muscular pode mover um segmento numa ponta da sua inserção ou dois segmentos nas duas pontas da sua inserção. De facto, um músculo pode acelerar e criar movimento noutras articulações, passando ou não pela articulação. Por exemplo, o sóleo é um flexor plantar do tornozelo, mas também pode forçar o joelho em extensão apesar de não atravessar o joelho. Isso acontece na posição em pé. O sóleo contrai-se e cria flexão plantar na articulação do tornozelo. Como o pé está no solo, o movimento de flexão plantar cria extensão da articulação do joelho. Desta forma, o sóleo acelera a articulação do joelho com o dobro da aceleração que provoca no tornozelo, embora não cruze o joelho.

A maioria dos músculos cruza somente uma articulação e, conseqüentemente, a acção dominante do músculo uniarticular é na articulação que ele atravessa. O músculo biarticular é um caso especial em que o músculo cruza duas articulações, criando uma variedade de movimentos articulares que geralmente acontecem em sequências opostas. Por exemplo, o recto femoral é um músculo biarticular que cria tanto flexão do quadril quanto extensão do joelho.

A acção dos músculos biarticulares depende da posição do corpo e da interacção do músculo com objectos externos como o solo. No caso do recto femoral, o músculo contribuirá primariamente com a extensão do joelho devido à posição articular do quadril.

Essa posição resulta na força do recto femoral que actua próximo da articulação do quadril, limitando assim a acção do músculo e a sua eficiência na produção de flexão do quadril (figura 2.22).

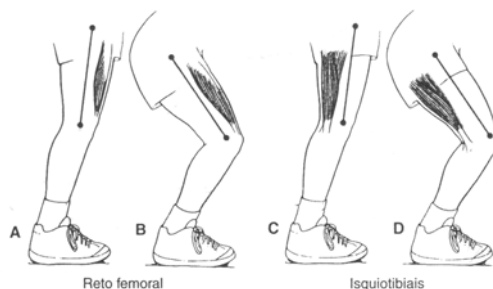


Figura 2.22 – Recto femoral em pé (A) e agachamento (B), isquiotibiais em pé (C) e agachamento (D) [3]

No caso de um músculo biarticular, como a força é idêntica, o músculo actua em primeiro lugar na articulação em que tiver o maior braço de binário ou a que estiver mais distante da articulação. O grupo dos isquiotibiais irá criar primeiro extensão do quadril em vez de flexão de joelho devido ao maior braço de binário no quadril.

A contribuição mais importante do músculo biarticular no membro inferior é a redução do trabalho requerido dos músculos uniarticulares. Os músculos biarticulares iniciam o acoplamento mecânico das articulações, permitindo uma rápida libertação da energia elástica armazenada no sistema.

Os músculos biarticulares economizam energia permitindo o trabalho positivo numa articulação e trabalho negativo na articulação adjacente. Assim, enquanto os músculos que agem no tornozelo estão a produzir uma acção concêntrica ou trabalho positivo, os músculos da articulação do joelho podem estar excentricamente armazenando energia elástica pelo trabalho negativo.

2.3 RESUMO

O sistema esquelético, entre outras coisas, fornece um sistema de alavancas que permitem uma variedade de movimentos nas articulações. O tecido ósseo é uma das estruturas mais duras do corpo e organiza-se de maneiras diferentes, dando origem ao osso compacto, que se encontra no exterior dos ossos ou no corpo dos ossos longos, suportando altos níveis de compressão e grandes cargas tensoras produzidas pelos músculos e ao osso esponjoso, que se encontra no interior dos ossos, tendo uma grande capacidade de armazenamento de

energia e facilitando a distribuição das cargas dentro do osso. O osso responde de forma diferente à diversidade da direcção da carga e à velocidade a que a carga é aplicada, tendo capacidade para suportar cargas compressivas maiores do que tensoras ou de cisalhamento. Os movimentos dos ossos longos ocorrem na articulação sinovial. A quantidade de movimento entre dois segmentos é grandemente influenciada pelo tipo de articulação sinovial que define os graus de liberdade do movimento. Estas articulações têm sistemas de protecção, como a cartilagem articular, a cápsula, ou a membrana sinovial, e ligamentos que distribuem, transmitem e absorvem a carga sobre a articulação e delimitam os movimentos dentro dos parâmetros fisiológicos.

Os grupos de músculos ficam contidos em compartimentos de fáscia que podem ser classificados pela função comum. Os músculos individuais no grupo são cobertos por um epimísio e geralmente têm uma parte centralizada chamada ventre. O músculo pode ainda ser dividido internamente em fascículos cobertos pelo perimísio e os fascículos contêm as fibras musculares propriamente ditas cobertas pelo endomísio. Cada fibra muscular contém miofibrilas em que se localiza a unidade contráctil da fibra muscular, o sarcómero. Ao nível do sarcómero ocorre a formação de pontes transversas entre filamentos de actina e miosina, resultando num encurtamento da fibra muscular.

As fibras musculares podem ser organizadas num arranjo fusiforme em que elas se dispõem paralelas umas às outras e se ligam a um tendão pelas duas extremidades, ou podem ter um arranjo peniforme em que correm diagonalmente a um tendão que atravessa o músculo. No músculo peniforme a secção transversa anatómica, medida em ângulo recto com a direcção das fibras, é menor que a secção transversa fisiológica, que é a soma de todas as secções transversas na fibra. No músculo fusiforme as secções transversas anatómica e fisiológica são iguais.

Cada músculo contém tipos diferentes de fibras que influenciam na sua capacidade para produzir tensão. Os tipos de fibras de contracção lenta têm tempos de contracção lentos e são adequadas para trabalhos prolongados de baixa intensidade. As fibras dos tipos contracção intermédia e rápida são mais adequadas para produção de força de maior intensidade durante períodos de tempo mais curtos.

Um músculo insere-se no osso por uma aponeurose ou tendão. O tendão pode suportar altas forças tensoras e responder com rigidez a altas frequências de carga e menor rigidez a

cargas colocadas com menor frequência. O tendão recua durante a contracção muscular e retarda o desenvolvimento de tensão no músculo. Essa acção de recuo aumenta a carga que o músculo pode suportar.

O músculo esquelético tem quatro propriedades: irritabilidade, contractilidade, extensibilidade e elasticidade. Essas propriedades permitem que o músculo responda à estimulação, se encurte, se alongue além do comprimento de repouso e retome o comprimento de repouso após um alongamento, respectivamente. Devido a essas propriedades, os músculos podem realizar uma variedade de funções que incluem: produzir movimento, manter posturas e posições, estabilizar articulações, suportar órgãos internos, controlar pressões nas cavidades, manter a temperatura corporal e controlar entradas e saídas do corpo. Os músculos também desempenham vários papéis: movimentador primário, agonista ou antagonista e estabilizador ou neutralizador.

Um modelo mecânico de contracção muscular divide o músculo em componentes activos e passivos. O componente activo inclui os componentes contrácteis encontrados nas miofibrilas e nas pontes transversas dos filamentos de actina e miosina. Os componentes passivos ou elásticos estão localizados no tendão e nas pontes transversas (elásticos em série) e no sarcolema e tecido conectivo (elásticos paralelos).

A tensão muscular é produzida para provocar três tipos diferentes de acções musculares: isométrica, concêntrica e excêntrica. A acção muscular isométrica é usada para estabilizar um segmento, a acção concêntrica cria um movimento e a acção muscular excêntrica controla o movimento. As acções musculares concêntricas geram a menor produção de força das três e a acção muscular excêntrica gera a mais alta produção de força.

Existem vários factores que influenciam a quantidade de força que pode ser produzida por um músculo, incluindo o ângulo de inserção do tendão, a frouxidão ou rigidez no tendão, que tem influência na relação força-tempo, o comprimento do músculo, as contribuições do componente elástico e a velocidade da acção muscular.

Os músculos biarticulares são característicos por agirem em duas articulações adjacentes. A sua influência numa articulação depende do posicionamento da outra articulação, dos braços de binário em cada articulação e da presença de sinergias musculares no movimento.

3 O MEMBRO SUPERIOR HUMANO

3.1 INTRODUÇÃO

O membro superior humano serviu de modelo para a elaboração dos manipuladores robóticos. No entanto, apesar dos avanços da tecnologia, o membro superior humano continua a ter um desempenho muito superior, nomeadamente no que diz respeito à flexibilidade e à eficiência. Será pois importante compreender melhor o seu funcionamento e a interacção dos elementos que o constituem.

Nesta ordem de ideias, nesta secção vamos analisar o funcionamento do membro superior, as articulações que o compõem, levando em conta os movimentos possíveis, bem como os seus mecanismos de protecção e de estabilização. São ainda estudadas as acções musculares que incidem sobre as articulações, produzindo os movimentos do membro superior. Para tal, na secção 3.2 é analisado o complexo do ombro. Na secção 3.3 são estudados o cotovelo e as articulações radioulnares. Por último, na secção 3.4 é feito um resumo do presente capítulo.

3.2 O COMPLEXO DO OMBRO

O complexo do ombro tem várias articulações e cada uma contribui para o movimento do braço, através de acções articulares coordenadas. O movimento da escápula é o melhor modo de observar os movimentos que são produzidos nas duas articulações: a esternoclavicular e a acromioclavicular. Os movimentos do braço são produzidos na articulação glenoumeral. Apesar de ser possível criar uma pequena quantidade de movimento em qualquer uma dessas articulações isoladamente, de uma forma geral o movimento é produzido pelas três articulações concomitantemente quando o braço é levantado, baixado ou quando é produzido qualquer outro movimento significativo.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS E FUNCIONAIS DAS ARTICULAÇÕES

O único ponto de ligação do membro superior com o tronco ocorre na articulação esternoclavicular. É nesse ponto que a clavícula se liga ao manúbrio do esterno. A articulação esternoclavicular (figura 3.1) é uma articulação sinovial deslizante, que possui um disco de fibrocartilagem. A articulação é reforçada por três ligamentos: o interclavicular, o costoclavicular e o esternoclavicular, sendo o costoclavicular o principal sustentador da articulação. A articulação é também reforçada e suportada por músculos, como o subclávio. E ainda, uma cápsula articular contribui para tornar a articulação resistente à ruptura.

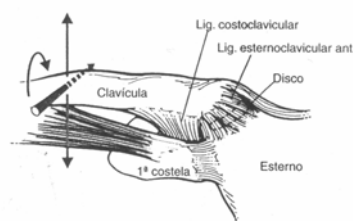


Figura 3.1 – Articulação esternoclavicular [3]

Os movimentos da clavícula na articulação esternoclavicular fazem-se em três direcções, tendo por isso três graus de liberdade (figura 3.2). A clavícula pode mover-se para cima e para baixo, respectivamente, em movimentos de elevação e de depressão. Esse movimento ocorre entre a clavícula e o menisco, na articulação esternoclavicular, tendo uma amplitude de movimento entre 30 a 40 graus.

A clavícula pode também mover-se anteriormente e posteriormente, por movimentos denominados respectivamente protração e retracção. Esses movimentos ocorrem entre o esterno e o menisco, na articulação, ao longo de uma amplitude de movimento de aproximadamente 30 graus. Finalmente, a clavícula pode também rodar anterior e posteriormente no seu eixo longo numa amplitude de aproximadamente 40 a 50 graus.

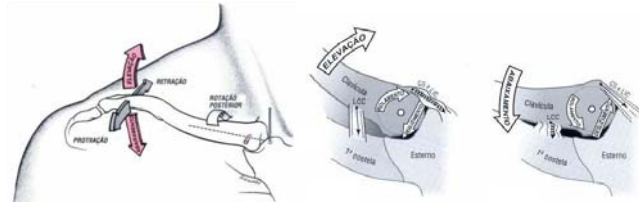


Figura 3.2 – Movimento da clavícula [4]

A clavícula está ligada à escápula na sua extremidade distal pela articulação acromioclavicular (figura 3.3). É uma articulação sinovial deslizante pequena, que não existe em todos os indivíduos. Possui frequentemente um disco fibrocartilagenoso como a articulação esternoclavicular. É nessa articulação que ocorre a maioria dos movimentos da escápula sobre a clavícula.

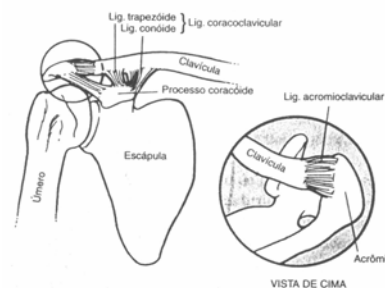


Figura 3.3 – A articulação acromioclavicular [3]

A articulação acromioclavicular fica sobre o topo da cabeça do úmero e pode servir como restrição óssea para os movimentos do braço acima da cabeça. A articulação é reforçada com uma cápsula muito densa e com uma série de ligamentos acromioclaviculares, que ficam acima e abaixo da articulação. Perto da articulação acromioclavicular existe o importante ligamento coracoclavicular, que serve como eixo de rotação durante os movimentos da escápula.

O movimento da escápula na articulação acromioclavicular pode ocorrer em três direcções diferentes (figura 3.4).

A escápula pode mover-se anterior e posteriormente sobre um eixo vertical, sendo esses movimentos conhecidos como protração ou abdução e retracção ou adução. A protração e a retracção ocorrem à medida que o acrómio se move sobre o menisco na articulação e à medida que a escápula gira sobre o ligamento coracoclavicular medial, o conóide. Nesse local pode haver algo entre 30 a 50 graus de protração e de retracção da escápula.

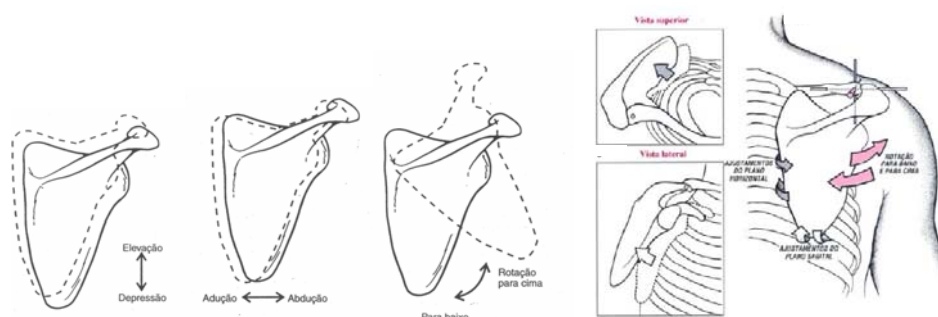


Figura 3.4 – As três direcções do movimento da escápula [3] [4]

O segundo movimento escapular é o movimento alar para fora e para dentro, no plano frontal, denominado rotação para cima e rotação para baixo. Esse movimento ocorre à medida que a clavícula se move sobre o menisco na articulação e à medida que a escápula roda sobre o ligamento coracoclavicular lateral, a porção trapezóide. Esse movimento pode ocorrer numa amplitude de aproximadamente 60 graus.

O terceiro e último movimento potencial, ou grau de liberdade, é o movimento da escápula para cima e para baixo, denominado elevação e depressão. Esse movimento ocorre na articulação acromioclavicular e não é assistido pelas rotações que ocorrem sobre o ligamento coracoclavicular. A amplitude de movimento na articulação acromioclavicular para a elevação e para a depressão é de aproximadamente 30 graus.

Os movimentos da escápula dependem também do movimento e da posição da clavícula. Os movimentos na articulação esternoclavicular são opostos aos movimentos na articulação acromioclavicular para a elevação, a depressão, a protração e a retracção. Por exemplo, enquanto ocorre elevação na articulação acromioclavicular, ocorre depressão na articulação esternoclavicular e vice-versa. Isso não é válido para a rotação, já que a clavícula irá girar na mesma direcção ao longo do seu comprimento. A clavícula roda em

direcções diferentes para acomodar os movimentos da escápula, rodando anteriormente com a protração e com a elevação e rodando posteriormente com a retracção e com a depressão.

A escápula faz contacto com o tórax pela articulação escapulotorácica. Essa não é uma articulação típica, osso com osso, e designa-se por articulação fisiológica. Na verdade, a escápula apoia-se sobre dois músculos, o serrátil anterior e o subescapular, que estão ligados à escápula e deslocam-se um sobre o outro quando a escápula se move. Por baixo desses dois músculos fica o tórax. A escápula move-se ao longo do tórax, como consequência de acções nas articulações acromioclavicular e esternoclavicular e a amplitude de movimento total para a articulação escapulotorácica é de aproximadamente 60 graus de movimento para 180 graus de abdução ou flexão de braço. Aproximadamente 65% dessa amplitude de movimento é resultado do movimento que ocorre na articulação esternoclavicular e 35% do movimento ocorre como resultado do movimento na articulação acromioclavicular.

A última articulação do complexo do ombro consiste na articulação do ombro, ou articulação glenoumeral (figura 3.5). Trata-se de uma articulação sinovial em esfera e receptáculo (multiaxial), que permite a maior amplitude e maior potencial de movimento de todas as articulações do corpo. A razão para a frouxidão e excessiva amplitude de movimento permitida pela articulação é a constituição estrutural, uma cápsula articular frouxa e de suporte ligamentar limitado.

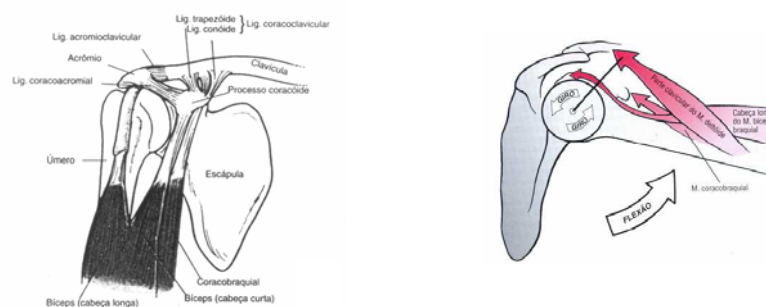


Figura 3.5 – Articulação do ombro ou articulação glenoumeral [3] [4]

A articulação contém um pequeno receptáculo raso, a cavidade glenóide, que tem apenas um quarto do tamanho da cabeça umeral que deveria encaixar nela. A cavidade articular é aprofundada por uma margem de fibrocartilagem, o lábio da glenóide, que recebe reforço

suplementar dos ligamentos e dos tendões em seu redor. O lábio da glenóide aumenta em 75% a área de contacto. A cápsula articular tem aproximadamente o dobro do volume da cabeça umeral, permitindo que o braço seja levantado numa amplitude de movimento considerável. Como há um contacto mínimo entre a cavidade glenóide e a cabeça do úmero, a articulação do ombro depende de estruturas ligamentares e musculares para ter estabilidade. No lado anterior da articulação, o suporte é dado pela cápsula, pelo lábio da glenóide, pelos ligamentos glenoumerais, por três reforços na cápsula, pelo ligamento coracoumeral e pelas fibras do subescapular e do peitoral maior que se unem à cápsula articular. Tanto o ligamento coracoumeral como o glenoumeral medial suportam e sustentam o braço quando este está relaxado. Estes ligamentos oferecem também suporte aos movimentos de abdução, de rotação externa e de extensão. Posteriormente, a articulação é reforçada pela cápsula, pelo lábio da glenóide e pelas fibras do redondo menor e do infraespinoso que se unem à cápsula.

A parte superior da articulação do ombro é geralmente denominada por área de compressão. O suporte na parte superior da articulação do ombro é feito pela cápsula, pelo lábio da glenóide e pelo ligamento coracoumeral. O suporte muscular e o reforço capsular são feitos pelo supraespinoso e pela cabeça longa do bíceps braquial. Acima do músculo supraespinoso fica a bolsa subacromial e o ligamento coracoacromial, formando um arco sob a articulação acromioclavicular.

Uma bolsa é um saco cheio de líquido encontrado em locais estratégicos em redor das articulações sinoviais, reduzindo o atrito na articulação. O músculo supraespinoso e as bolsas nessa área são comprimidos à medida que o braço se levanta acima da cabeça e podem ser irritados se a compressão for de amplitude ou duração suficientes. A parte inferior da articulação do ombro é reforçada minimamente pela cápsula e pela cabeça longa do tríceps braquial.

A amplitude de movimento do braço na articulação do ombro é considerável, devido às razões estruturais já mencionadas. O braço pode mover-se por aproximadamente 180 graus de flexão até aproximadamente 60 graus de hiperextensão no plano sagital (figura 3.6). A quantidade de flexão pode ser muito limitada se a articulação do ombro for também externamente rodada e, com a articulação em máxima rotação externa, o braço apenas pode ser flectido em 30 graus. Também durante movimentos passivos de flexão e de extensão

ocorre concomitantemente translação anterior e posterior, respectivamente, da cabeça do úmero sobre a glenóide.

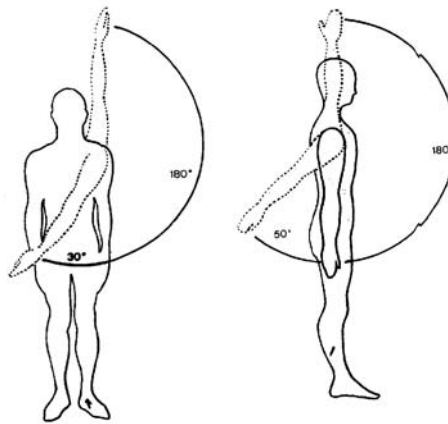


Figura 3.6 – Movimentos do braço (abdução/adição e flexão/extensão) [3]

O braço também pode fazer 180 graus de abdução. O movimento de abdução pode ser limitado pela quantidade de rotação interna que ocorre simultaneamente com a abdução. Se a articulação é rodada internamente ao máximo, o braço apenas pode produzir cerca de 60 graus de abdução. À medida que o braço aduz para a posição neutra, ele pode continuar para além da posição neutra por aproximadamente 75 graus de hiperadição pelo corpo.

O braço pode rodar 90 graus interna e externamente, num total de 180 graus de rotação. A rotação é limitada pela abdução do braço. Na posição neutra, o braço pode rodar 180 graus completos, mas em 90 graus de abdução o braço pode rodar somente 90 graus. Finalmente, o braço pode mover-se pelo corpo, numa posição elevada em 135 graus de flexão horizontal ou de adução e 45 graus de extensão horizontal ou de abdução.

Com o braço na posição neutra, os ligamentos e muitos dos músculos de suporte ficam frouxos. Se o braço é rodado externamente nessa posição, a cápsula fica sobre tensão.

A parte inferior da cápsula articular fica frouxa, permitindo que o braço abduza e gire externamente, numa amplitude de movimento significativa. À medida que o braço se move em abdução por 45 graus, o subescapular e o ligamento glenoumeral inferior começam a ficar em tensão e a suportar a articulação. A articulação pode ser estabilizada, mesmo com mais rotação externa.

Outros músculos, como o supraespinoso, o infraespinoso e o redondo menor, proporcionam também estabilidade acima de 90 graus de abdução, comprimindo a cabeça

do úmero na cavidade. A sua contribuição para a estabilidade na articulação diminui acima de 90 graus de abdução. Contudo, em abdução extrema com rotação externa, a articulação do ombro fica numa posição de tensão com os ligamentos esticados em seu redor, oferecendo alguma estabilidade.

3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE MOVIMENTOS COMBINADOS DO COMPLEXO DO OMBRO

Depois de analisado o movimento potencial de cada articulação, nesta secção será estudado o movimento do complexo do ombro, como um todo, por vezes denominado ritmo escapuloumeral. Cada vez que o braço é levantado em flexão ou em abdução, existem conjuntamente movimentos escapulares e claviculares (figura 3.7).

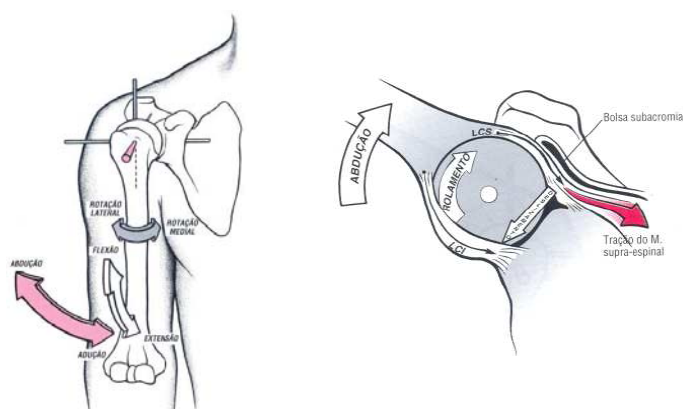


Figura 3.7 – Os movimentos de braço e escápula [4]

Nos primeiros 30 graus de abdução, ou nos primeiros 45 a 60 graus de flexão, a escápula move-se em direcção à coluna vertebral ou afasta-se dela, procurando uma posição para estabilizar o tórax. Após a estabilização ter sido conseguida, a escápula move-se lateral, anterior e superiormente, fazendo movimentos descritos como rotação para cima, protração ou abdução e elevação. A clavícula também roda posteriormente, eleva-se e protrai, enquanto o braço se move em flexão ou abdução.

Nos estágios iniciais de abdução ou flexão, os movimentos são primariamente glenoumerais, excepto no que diz respeito aos movimentos de estabilização da escápula. Passando os 30 graus de abdução, ou 45 a 60 graus de flexão, a relação entre os movimentos glenoumerais e os escapulares torna-se 5:4, de modo que ocorrem 5 graus de movimento umeral para cada 4 graus de movimento escapular no tórax. Para a amplitude de movimento total de 180 graus de abdução ou flexão, a relação glenoumeral para

escapular é 2:1. Assim, os 180 graus de amplitude de movimento são produzidos com 120 graus de movimento glenoumeral e com 60 graus de movimento escapular (figura 3.8). As acções articulares que contribuem para o movimento escapular são os 20 graus produzidos na articulação acromioclavicular, os 40 graus produzidos na articulação esternoclavicular e os 40 graus de rotação claviclar posterior.

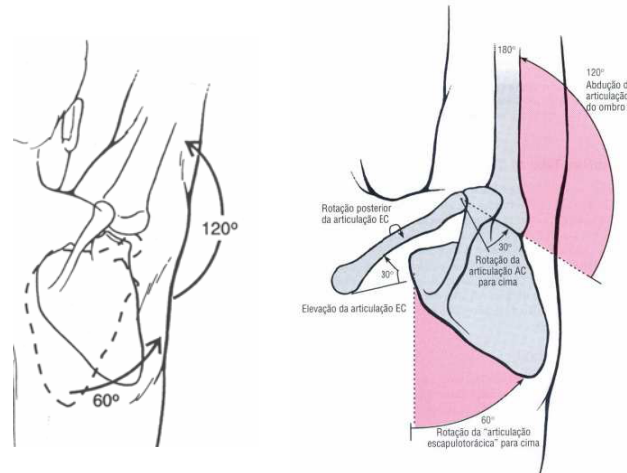


Figura 3.8 – Vista posterior das relações entre os movimentos de braço e escápula [3] [4]

À medida que o braço abduz acima de 90 graus, o tubérculo maior na cabeça do úmero aproxima-se do arco coracoacromial. A compressão dos tecidos moles começa a limitar uma abdução adicional e a tuberosidade faz contacto com o acrómio. Se o braço é rodado externamente, podem ocorrer mais 30 graus de abdução, quando o tubérculo maior é movido para fora do arco. A abdução é limitada ainda mais e pode ocorrer somente em 60 graus com rotação interna do braço, já que o tubérculo maior é mantido sob o arco. Também a abdução completa não pode ser conseguida sem alguma extensão do tronco superior para assistir o movimento.

3.2.3 ACÇÕES MUSCULARES

Os músculos que contribuem para os movimentos de abdução e de flexão de ombro são similares (figura 3.9). O deltóide gera cerca de metade da força muscular para elevação do braço em abdução ou flexão. A contribuição do deltóide aumenta, na medida em que a abdução aumenta e o músculo fica mais activo entre os 90 e os 180 graus. Contudo, o deltóide parece ser mais resistente à fadiga na amplitude de movimento entre 45 a 90 graus de abdução.

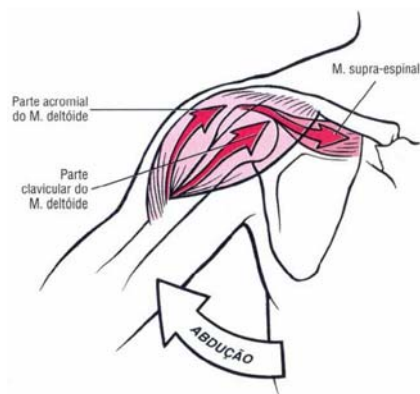


Figura 3.9 – Músculos do complexo do ombro que actuam sobre o braço [4]

Quando o braço se eleva, a bainha rotadora (redondo menor, subescapular, infraespinoso e supraespinoso) desempenha também um papel importante, já que o deltóide não pode abduzir ou flectir o braço sem a estabilização da cabeça umeral. A bainha rotadora, como grupo, é ainda capaz de gerar movimento de flexão ou de abdução do braço, com cerca de 50% da força normalmente gerada nesses movimentos.

Nos estágios iniciais de flexão ou de abdução do braço, o redondo menor trabalha com o deltóide para deprimir a cabeça do úmero e estabilizá-la, de modo que o braço possa ser levantado pelo deltóide. A força muscular do redondo menor é igual e oposta à do deltóide, formando assim um par de forças. O subescapular e o infraespinoso unem-se um pouco mais tarde, na flexão ou abdução, para assistir na estabilização da cabeça do úmero.

O grande dorsal contrai-se também excêntricamente, para assistir a estabilização da cabeça umeral e aumentar a actividade, à medida que o ângulo aumenta. A força para baixo e para dentro exercida pela bainha rotadora permite que o deltóide eleve o braço (figura 3.10).

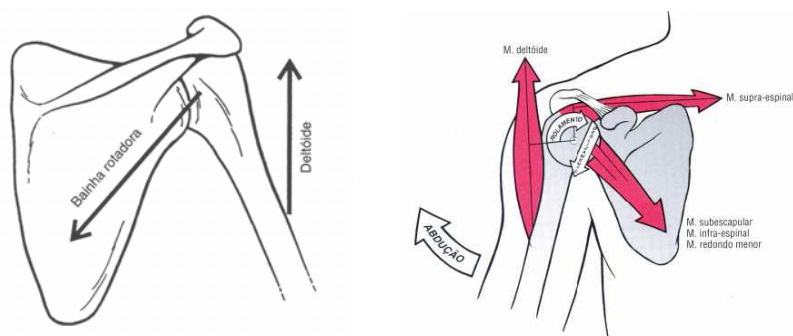


Figura 3.10 – A interacção entre o deltóide e a bainha rotadora em abdução e flexão [3] [4]

Acima de 90 graus de flexão ou de abdução, a força da bainha rotadora diminui. Contudo, um dos músculos da bainha rotadora, o supra-espinoso, continua a ser um grande contribuinte acima dos 90 graus de flexão ou de abdução. Na amplitude de movimento superior, o deltóide começa a traccionar a cabeça do úmero para baixo e para fora da cavidade articular, criando uma força de subluxação. Para se mover entre 90 e 180 graus de flexão ou abdução, é preciso rotação externa na articulação. Se o úmero gira externamente 20 graus ou mais, o bíceps braquial pode também abduzir o braço.

Quando o braço é abduzido ou flectido, a cintura escapular precisa de se protrair ou de se abduzir, depois elevar-se e girar para cima, com rotação clavicular posterior para manter a cavidade glenóide na posição ideal (figura 3.11). O serrátil anterior e o trapézio trabalham como uma dupla de forças para criar os movimentos laterais, superiores e de rotação da escápula. Essas acções musculares ocorrem após o deltóide e o redondo menor terem iniciado os movimentos de elevação do braço e continuam até 180 graus, com a maior actividade muscular a ocorrer entre 90 e 180 graus. O serrátil anterior é também responsável por manter a escápula na parede torácica e por impedir movimento alar da borda vertebral.

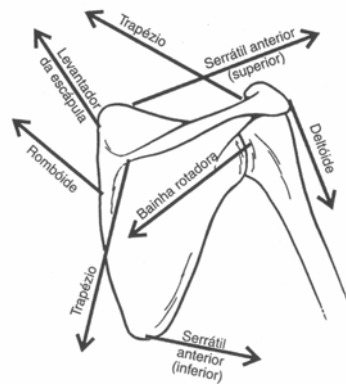


Figura 3.11 – Direcção da tracção de vários músculos da cintura escapular [3]

Se o braço é baixado lentamente as acções musculares são excêntricas, sendo, desse modo, controladas pelos músculos descritos previamente na abdução e flexão do braço. Contudo, se o braço é forçado a baixar, então a acção muscular que ocorre será concêntrica.

Numa adução ou numa extensão concêntrica, contra uma resistência externa, os músculos responsáveis pela criação dessas acções articulares são o grande dorsal, o redondo maior e a porção esternal do peitoral maior. O redondo maior fica activo apenas quando o

movimento é contra uma resistência, enquanto o grande dorsal fica activo nesses movimentos, mesmo quando não é oferecida qualquer resistência.

À medida que o braço é aduzido ou estendido, a cintura escapular retrai-se, deprime e roda para baixo, com rotação da clavícula para a frente. O rombóide roda a escápula para baixo e trabalha com o redondo maior e com o grande dorsal, num par de forças, para controlar os movimentos do braço e da escápula durante o abaixamento. Outros músculos que contribuem activamente durante o movimento da escápula de volta à posição de repouso, durante trabalho contra resistência, são o peitoral menor, que deprime e gira a escápula para baixo, e as porções média e inferior do trapézio, que contribuem para a retracção da escápula com o rombóide.

Outros dois movimentos do braço muito importantes acima de 90 graus (medido a partir do braço lateralmente) são a rotação interna e externa. A rotação externa é um componente importante da fase preparatória ou de posicionamento da mão, e a rotação interna é importante na aplicação de força e na fase de seguimento.

A rotação externa é necessária quando o braço está acima de 90 graus; sendo produzida pelo infra-espinoso e pelo redondo menor. A actividade desses dois músculos aumenta com a rotação externa na articulação. Como o infraespinoso também é um músculo importante na estabilização da cabeça do úmero, ele fatiga-se rapidamente em actividades nas quais o braço fica elevado.

A rotação interna é produzida primariamente pelo subescapular, pelo grande dorsal, pelo redondo maior e por porções do peitoral maior. O redondo maior é um contribuinte activo para a rotação interna apenas quando o movimento é produzido contra uma resistência. Os músculos que contribuem para o movimento articular de rotação interna são capazes de gerar uma grande quantidade de força. Contudo, as acções de rotação interna, na maioria das actividades, nunca requerem ou usam grandes intensidades de força.

Os movimentos de cintura escapular que acompanham a rotação interna e externa dependem da posição do braço. Numa posição com o braço elevado, podem ser necessários os movimentos da cintura escapular descritos na abdução e flexão. A rotação produzida com o braço em posição neutra pode requerer uma assistência mínima da cintura escapular. É também nessa posição que se consegue obter uma amplitude de movimento completa de 180 graus, porque, à medida que o braço é levantado, os músculos usados para rodar o

úmero vão também sendo usados para estabilizar a cabeça do úmero e esta fica restrita à rotação na amplitude e no movimento superior. Especificamente a rotação interna é muito difícil em posições com o braço elevado, já que o tecido sob o acrómio fica muito comprimido pelo tubérculo maior.

Duas acções articulares finais que são, na verdade, combinações das posições elevadas do braço, são a flexão horizontal, ou adução e a extensão horizontal, ou abdução. Como o braço é elevado, os mesmos músculos descritos anteriormente para abdução e flexão contribuem também para esses movimentos do braço, através do corpo.

Os músculos que contribuem mais significativamente para o movimento articular de flexão horizontal são o peitoral maior e a cabeça anterior do deltóide. Esse movimento traz os braços cruzados pelo corpo na posição elevada. O movimento de extensão horizontal, no qual o braço é trazido de volta na posição elevada, é produzido primariamente pelo infraespinoso, pelo redondo menor e pela cabeça posterior do deltóide.

3.2.4 FORÇA DOS MÚSCULOS DO OMBRO

No movimento de adução, os músculos do ombro podem ter uma grande produção de força. Neste caso, as fibras do grande dorsal, do redondo maior e do peitoral maior contribuem para o movimento. A força de adução dos músculos do ombro é o dobro da força do movimento de abdução oposto, embora o movimento de abdução e o seu grupo muscular sejam usados mais frequentemente em actividades diárias.

O movimento capaz de gerar o nível seguinte mais alto de força, a seguir ao dos adutores, consiste no movimento de extensão, que usa os mesmos músculos que contribuem para a adução do braço. A acção de extensão é levemente mais forte que o seu movimento oposto, a flexão. Depois da flexão, a acção articular mais forte é a abdução.

As acções articulares mais fracas no ombro são os movimentos articulares de rotação, sendo a rotação externa a mais fraca delas. A produção de força dos rotadores é influenciada pela posição do braço e a maior rotação interna pode ser obtida com o braço na posição neutra, enquanto a maior força de rotação externa pode ser obtida com o ombro numa posição de 90 graus de flexão.

A actividade muscular no complexo do ombro gera altas forças na articulação do ombro propriamente dita. O grupo muscular da bainha rotadora, como um todo, é capaz de gerar uma força 9,6 vezes o peso do membro e gera o máximo de força com 60 graus de abdução. Como o peso de cada braço é aproximadamente 7% do peso corporal, a bainha rotadora gera uma força na articulação do ombro de aproximadamente 70% do peso corporal. Com 90 graus de abdução, o deltóide gera uma força que é, em média, oito a nove vezes o peso do membro, criando uma força na articulação do ombro que varia entre 40 a 50% do peso corporal. De facto, as forças na articulação do ombro com 90 graus de abdução parecem estar próximas dos 90% do peso corporal. Essas forças podem ser reduzidas para metade se o antebraço for flectido 90 graus no cotovelo.

3.3 COTOVELO E ARTICULAÇÕES RADIOULNARES

O papel do movimento do antebraço produzido nas articulações do cotovelo ou nas articulações radioulnares, é assistir o ombro na aplicação da força e no controlo da colocação da mão no espaço. A combinação dos movimentos do cotovelo e da articulação radioulnar dá ao ser humano a capacidade de posicionar a mão em centenas de milhares de posições diferentes, proporcionando-lhe uma grande versatilidade. A posição da mão é importante e é produzida pela relação de trabalho entre o complexo do ombro e o antebraço.

3.3.1 CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS E FUNCIONAIS DAS ARTICULAÇÕES

A articulação do cotovelo é considerada uma articulação muito estável, tendo integridade estrutural, bom suporte ligamentar e bom suporte muscular. Na região da articulação do cotovelo existem três articulações que permitem o movimento entre os três ossos do braço e do antebraço (rádio, ulna e úmero, figura 3.12).

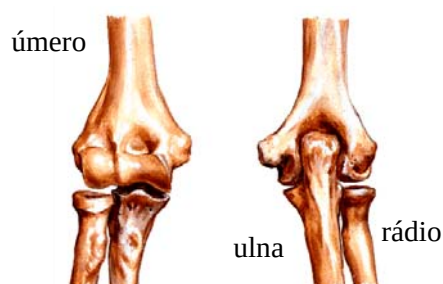


Figura 3.12 – Estruturas ósseas do cotovelo [6]

O movimento entre o antebraço e o braço ocorre nas articulações ulnoumeral e radioumeral, enquanto que os movimentos entre o rádio e a ulna ocorrem nas articulações radiolnares (figura 3.13).

A articulação ulnoumeral representa a articulação entre a ulna e o úmero e é a maior contribuinte articular para as acções de flexão e de extensão do antebraço. A articulação consiste na união da tróclea em forma de carroto na ponta distal do úmero e da incisura troclear na ulna. Na frente da ulna encontra-se o processo coronóide, que faz o bloqueio contra a cavidade coronóide do úmero e limita a flexão na amplitude do movimento terminal. Do mesmo modo, no lado posterior da ulna encontra-se o olécrano, que faz o impacto da cavidade do olécrano sobre o úmero e termina a extensão.



Figura 3.13 – As articulações ulnoumeral, radioumeral e radiolnare proximal [3]

A incisura troclear na ulna ajusta-se em redor da tróclea, oferecendo boa estabilidade estrutural. A tróclea tem uma cartilagem articular sobre as superfícies anterior, inferior e posterior, e é assimétrica com uma projecção oblíqua posterior. Na posição estendida, essa tróclea assimétrica cria uma angulação da ulna lateralmente, criando uma posição em valgo. Isso é denominado de ângulo de carregamento e varia entre 10 a 15 graus nos homens e entre 20 a 25 graus nas mulheres. À medida que o antebraço flexiona, essa posição em valgo é reduzida e até pode resultar na posição em varo com flexão completa.

A segunda articulação que participa na flexão e na extensão do antebraço é a articulação radioumeral. Na ponta distal do úmero encontra-se a superfície articular para essa articulação, o capitúlo, que tem forma esferóide e é coberto com cartilagem nas partes anterior e inferior. A ponta da cabeça radial arredondada bate contra o capitúlo, permitindo o movimento radial em redor do úmero, durante a flexão ou a extensão.

A terceira articulação, a radioulnar, estabelece as características de movimento entre o rádio e a ulna, em pronação e supinação. Existem actualmente duas articulações radioulnares, a superior, na região da articulação do cotovelo, e a inferior, no punho. Também na porção média entre o rádio e a ulna existe outra ligação fibrosa entre os dois ossos, identificada por alguns como uma terceira articulação.

A articulação radioulnar superior ou proximal consiste na articulação entre a cabeça do rádio e a cavidade radial no lado da ulna. A cabeça do rádio gira num anel ósseo e fibroso, no sentido horário ou anti-horário, criando um movimento do rádio em relação à ulna. Na posição neutra o rádio e a ulna ficam próximos um do outro, mas em pronação completa o rádio cruza sobre a ulna diagonalmente. À medida que o rádio faz o cruzamento na pronação, a ponta distal da ulna move-se lateralmente e vice-versa durante a supinação.

Uma membrana interóssea liga o rádio e a ulna em toda a extensão dos dois ossos (figura 3.14). Essa fásia aumenta a área para inserção muscular e assegura que o rádio e a ulna mantenham uma relação específica entre eles. A membrana interóssea transmite também as forças recebidas distalmente do rádio para a ulna. A membrana fica tensionada na posição semipronada.



Figura 3.14 – Membrana interóssea [6]

Os dois últimos componentes estruturais da região do cotovelo que merecem ser examinados são os epicôndilos medial e lateral, pontos de referência proeminentes nas faces medial e lateral do cotovelo. Essas extensões do úmero servem como local de inserção muscular para muitos dos músculos da mão. Os dois epicôndilos servem como bons pontos de referência anatómicos para a articulação do cotovelo.

A articulação do cotovelo é suportada, nos lados medial e lateral, pelos ligamentos colaterais. O ligamento medial, ou ulnar, liga a ulna ao úmero e oferece suporte e resistência às sobrecargas em valgo, impostas sobre a articulação do cotovelo. O suporte na direcção em valgo é muito importante na articulação do cotovelo, já que a maioria das

forças é direccionada medialmente, criando uma força em valgo. Consequentemente, o colateral ulnar fica tensionado em todas as posições articulares. Existe também um conjunto de ligamentos colaterais na parte lateral da articulação, denominados ligamentos laterais ou radiais. Como as sobrecargas em varo são raras, esses ligamentos não são tão significativos para suportar a articulação.

Um ligamento importante para a função e para o suporte do rádio é o ligamento anular, que envolve a cabeça do rádio, prendendo-se no lado da ulna. Esse ligamento segura o rádio na articulação do cotovelo, mas permite ao mesmo tempo que ele gire nos movimentos de pronação e de supinação.

As três articulações no complexo do cotovelo não atingem a posição tensionada no mesmo ponto da amplitude do movimento. A posição tensionada para a articulação radioumeral é alcançada quando o antebraço está flectido 80 graus e se encontra na posição semipronada. A posição completamente estendida é a posição tensionada, ou posição de máximo contacto da superfície articular e de máximo suporte ligamentar, para a articulação ulnoural. Assim, quando a articulação ulnoural está mais estável na posição estendida, a articulação radioumeral está frouxa e menos estável. A articulação radioulnar proximal fica na posição tensionada quando se encontra na posição semipronada, complementando a posição tensionada da articulação radioumeral.

A amplitude do movimento no cotovelo em flexão e em extensão é aproximadamente de 145 graus de flexão activa, 160 graus de flexão passiva e 5 a 10 graus de hiperextensão (figura 3.15). O movimento de extensão é limitado pela cápsula articular e pelos flexores. É também restrita terminalmente pelo impacto osso a osso com o olécrano.

A flexão na articulação é limitada pelos tecidos moles, pela cápsula posterior, pelos músculos extensores e pelo contacto osso a osso do processo coronóide com a sua cavidade respectiva. São necessários aproximadamente 100 a 140 graus de flexão e de extensão para a maioria das actividades quotidianas, que ocorrem entre uma amplitude de movimento de 30 até 130 graus de flexão. Por exemplo, para pentear os cabelos atrás da cabeça, são precisos 140 graus de flexão, enquanto que para apertar um sapato são precisos apenas 15 graus de flexão.

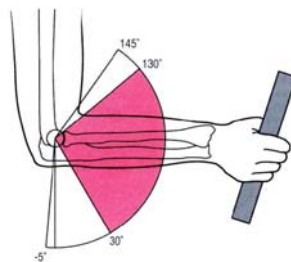


Figura 3.15 – Flexão/extensão do antebraço [4]

A amplitude de movimento para a pronação é de aproximadamente 70 graus, sendo essa amplitude limitada pelos ligamentos, pela cápsula articular e pelos tecidos moles que fazem compressão à medida que os ossos se cruzam. A amplitude de movimento para a supinação é de 85 graus e fica limitada pelos ligamentos, pela cápsula e pelos músculos pronadores. São necessários aproximadamente 50 graus de pronação e 50 graus de supinação para realizar a maioria das nossas actividades quotidianas (figura 3.16).

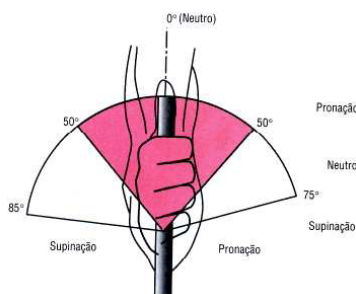


Figura 3.16 – Pronação/supinação do antebraço [4]

3.3.2 ACÇÕES MUSCULARES

Vinte e quatro músculos cruzam a articulação do cotovelo, alguns deles agem exclusivamente na articulação do cotovelo e outros agem nas articulações do punho e dedos. A maioria desses músculos é capaz de produzir três movimentos diferentes nas articulações do cotovelo, do punho, ou das falanges, mas existe um movimento dominante, com o qual o músculo ou grupo muscular se associa.

Os principais flexores do antebraço (bíceps braquial, braquial) tornam-se mais preponderantes à medida que a flexão progride, porque a sua eficiência mecânica cresce com o aumento no braço do binário (figura 3.17). O flexor mais forte do grupo é o braquial, porque é o único flexor puro e produz a maior quantidade de trabalho em comparação com outros músculos. A acção do braquial não é influenciada pela pronação, nem pela supinação do antebraço e atinge a sua produção máxima com aproximadamente 120 graus de flexão. Fica activo em todas as posições, todas as velocidades, com ou sem resistência.

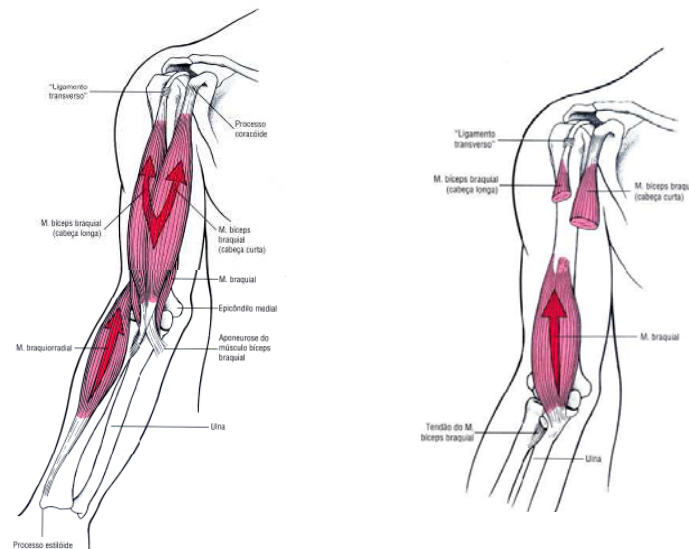


Figura 3.17 – Músculos flexores [4]

O bíceps braquial tem uma cabeça longa e uma cabeça curta, que se inserem na parte superior da articulação do ombro e no processo coracóide da escápula, sendo as duas cabeças biarticulares. Na outra extremidade do bíceps braquial, o músculo insere-se na tuberosidade do rádio, que pode ser movido com a supinação e a pronação do antebraço. Consequentemente, a contribuição do bíceps braquial para a flexão do antebraço depende da posição do braço e da posição do antebraço, na pronação e na supinação.

O bíceps braquial é mais eficaz como flexor na posição de supinação do antebraço, quando a inserção do rádio não fica torcida. A actividade diminui na posição semipronada, quando ele se torna activo apenas contra resistência, enquanto que na posição pronada o bíceps braquial contribui minimamente mesmo contra resistência. A sua maior contribuição para a

acção de flexão ocorre durante os 90 graus de flexão média, indo de 30 a 120 graus de flexão.

No grupo muscular extensor encontra-se o tríceps braquial, o mais forte de todos os músculos do antebraço, com grande potencial de força e capacidade de trabalho, devido ao volume muscular e à eficácia mecânica que obtém do seu grande braço de binário. O tríceps braquial está dividido três porções: a cabeça longa, a cabeça medial e a cabeça lateral. Dessas três porções, apenas a cabeça longa cruza a articulação do ombro, tornando-o parcialmente dependente da posição do ombro para a sua eficácia (figura 3.18).

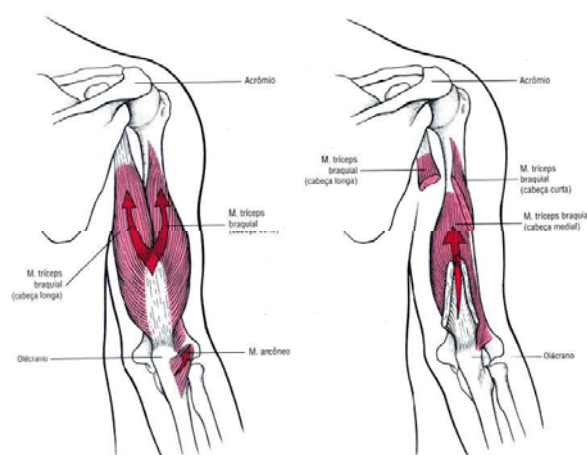


Figura 3.18 – Músculos extensores [4]

A cabeça medial do tríceps braquial tem uma importância preponderante no movimento de extensão, porque fica activa em todas as posições, em todas as velocidades e contra resistência máxima ou mínima. A cabeça lateral do tríceps braquial, embora seja a mais forte, permanece relativamente inactiva, a menos que o movimento ocorra contra resistência. A acção do tríceps braquial não é influenciada pelas posições de pronação e de supinação do antebraço.

Um terceiro movimento do antebraço que ocorre nas articulações radioulnares é a pronação, produzida pelo pronador quadrado e pelo pronador redondo. A actividade e a contribuição geral do pronador quadrado é consideravelmente maior que as do pronador redondo. O pronador quadrado fica mais activo independente da posição do antebraço, seja a actividade lenta ou rápida, trabalhando contra resistência ou não. O pronador redondo é

requisitado para ficar mais activo quando a pronação se torna rápida, ou contra uma grande carga. O pronador redondo fica mais activo com 60 graus de flexão do antebraço.

O último movimento do antebraço, a supinação, é produzido pelo músculo supinador e pelo bíceps braquial, sob certas circunstâncias. O supinador é a única contribuição muscular para uma supinação lenta e sem resistência, em todas as posições do antebraço. O bíceps braquial pode supinar durante movimentos rápidos ou com apoio, quando o cotovelo está flectido. A acção do bíceps braquial é neutralizada por acções do tríceps braquial, permitindo a contribuição para a acção de supinação. O bíceps torna-se um supinador muito eficaz com 90 graus de flexão.

3.3.3 FORÇA DOS MÚSCULOS DO ANTEBRAÇO

O grupo muscular flexor é quase duas vezes mais forte que o dos extensores em todas as posições, o que faz com que o ser humano seja melhor nos movimentos em que tem de puxar do que nos movimentos em que tem de empurrar. As forças articulares criadas por uma flexão isométrica máxima na posição estendida são iguais a aproximadamente duas vezes o peso do corpo.

A posição semipronada é a posição na qual a força máxima em flexão pode ser desenvolvida, seguida pela posição supinada e, por último, pela posição pronada. A posição semipronada é geralmente mais usada em actividades quotidianas.

A força de extensão é maior a partir de uma posição de 90 graus de flexão. Por último, a força de pronação/supinação é maior a partir da posição semipronada, com o binário diminuindo consideravelmente em ângulos mais altos ou mais baixos.

A capacidade de carregar carga da articulação do cotovelo é considerável. Numa flexão de braços, as forças axiais de pico sobre a articulação do cotovelo têm, em média, 45% do peso corporal. Essas forças dependem da posição da mão, sendo a força reduzida a 42,7% do peso corporal, quando as mãos são colocadas um pouco mais separadas que a posição normal.

3.4 RESUMO

O membro superior é um membro com bastante mobilidade sendo muito mais ágil que o membro inferior. O complexo do ombro consiste na articulação esternoclavicular, na articulação acromioclavicular e na articulação glenoumeral. A articulação esternoclavicular é bastante estável e permite que a clavícula se mova em elevação e depressão, protração e retracção, e ainda em rotação. A articulação acromioclavicular é uma articulação pequena, que permite que a escápula faça protração e retracção, elevação e depressão, e rotação para cima e para baixo. A articulação glenoumeral permite o movimento do úmero em flexão e extensão, abdução e adução, rotação medial e lateral e ainda movimentos combinados de abdução, de adução horizontal e de circundução. Uma articulação final, a articulação escapulotorácica, é denominada articulação fisiológica, devido à falta de ligação entre dois ossos. É nesse local que a escápula se move sobre o tórax.

Os movimentos do braço na articulação do ombro são consideráveis. O braço pode mover-se em 180 graus de abdução, de flexão e de rotação, devido à interacção de movimentos que existem entre todas as articulações. A cadência dos movimentos entre movimentos de braço, da escápula e da clavícula é denominada ritmo escapuloumeral. Ao longo de 180 graus de elevação (flexão ou abdução), existe uma relação de aproximadamente 2:1 graus de movimento umeral para escapular.

Os músculos que criam movimentos no ombro e na cintura escapular são também muito importantes para manter a estabilidade na região. Por exemplo, na abdução e na flexão, o deltóide produz cerca de 50% da força muscular para o movimento, mas requer assistência da bainha rotadora (redondo menor, subescapular, infraespinoso e supraespinoso) para estabilizar a cabeça do úmero, de modo que possa existir elevação. Também os músculos da cintura escapular, como o serrátil anterior e o trapézio, contribuem para ajudar na estabilização da escápula e para produzir os movimentos acompanhantes de elevação, de rotação para cima e de protração.

Os músculos do ombro podem produzir uma força considerável nos movimentos de adução e de extensão em que a massa muscular é maior. O seguinte movimento mais forte é a flexão e os movimentos mais fracos são a abdução e a rotação. Os músculos que circundam a articulação do ombro são capazes de produzir forças de grande intensidade, que variam de 8 a 9 vezes o peso do membro.

O cotovelo e as articulações radioulnares assistem o ombro na aplicação de força e colocam a mão na posição apropriada. As articulações que constituem a articulação do cotovelo são a ulnoumeral e a radioumeral, onde existe flexão e extensão, e a radioulnar superior, na qual ocorre pronação e supinação do antebraço. A região é bem suportada por ligamentos e pela membrana interóssea que existe entre o rádio e a ulna. As estruturas articulares permitem aproximadamente 145 a 160 graus de flexão e 70 a 85 graus de pronação e de supinação.

Existem 24 músculos que passam pela articulação do cotovelo, podendo esses ser ainda classificados em flexores (bíceps braquial, braquiorradial, braquial, pronador redondo e extensor radial do carpo), extensores (tríceps braquial e ancóneo), pronadores (pronador quadrado e pronador redondo) e supinadores (bíceps braquial e supinador). O grupo muscular flexor é consideravelmente mais forte que o dos extensores. A força máxima de flexão pode ser desenvolvida a partir da posição semipronada do antebraço. A força de extensão é máxima a partir de uma posição de flexão de 90 graus, e a pronação e a supinação são mais fortes também na posição semipronada.

4. ALGORITMOS GENÉTICOS

4.1. INTRODUÇÃO

A utilização de princípios biológicos como fonte de inspiração levou ao desenvolvimento de algoritmos de aprendizagem, pesquisa e optimização. Os algoritmos genéticos, introduzidos por Holland [8] em 1975, fazem parte dos algoritmos evolutivos. Estes imitam os princípios básicos da natureza, selecção natural e sobrevivência dos mais aptos, criando algoritmos de optimização que têm sido aplicados com sucesso a um largo espectro de problemas.

Neste capítulo é feita uma abordagem das principais características dos algoritmos genéticos e das suas propriedades. Neste contexto, são também apresentadas técnicas com vista a melhorar e optimizar os algoritmos genéticos (AGs). Assim, na secção 4.2 introduz-se o conceito de evolução natural e aborda-se a sua influência no desenvolvimento dos algoritmos evolutivos (AEs), onde se enquadram os algoritmos genéticos. Na secção 4.3 é apresentada a estrutura e os elementos mais relevantes no desenvolvimento de um AG. De modo a aprofundar-se a compreensão do sucesso dos AGs, é apresentada na secção 4.4 a teoria que está na base do seu desenvolvimento: a teoria do esquema. Na secção 4.5 são apresentados os AGs não binários e são enumeradas as principais diferenças em relação aos AGs binários. De seguida, na secção 4.6 é feita uma análise do paralelismo e dos

mecanismos para preservar a diversidade dos AG. Por último, na secção 4.7, devido à grande expansão que tem tido nos últimos anos, é feita uma breve referência aos AGs multiobjectivo.

4.2. ALGORITMOS EVOLUTIVOS E ALGORITMOS GENÉTICOS

No mundo biológico a adaptação evolutiva dos seres dá-se através da teoria da selecção natural, ou seja, através da sobrevivência dos mais aptos. Logo, a selecção natural opera em todos os organismos de modo a que estes criem descendentes com as melhores características possíveis de adaptação à sua evolução (sobrevivência). Os descendentes resultam, normalmente, do crescimento de uma célula que contém um exemplar de material genético dessa espécie. Assim, é através da criação desse material específico que os progenitores influenciam a estrutura e as funções hereditárias dos descendentes. Espécies diferentes criam material genético distinto para os respectivos descendentes. No entanto, em todas as espécies, esse material é fornecido pelos ascendentes. Quando existem dois progenitores, o material genético criado para gerar o descendente consiste numa combinação do material genético dos progenitores. Nos casos em que existe só um progenitor, o material genético hereditário sofre mutações (modificações aleatórias do material genético) garantindo desta forma que o descendente não seja igual ao seu progenitor. Desta forma, dá-se possibilidades de o descendente se tornar mais apto do que o seu progenitor. A evolução da espécie através da capacidade de reprodução e a criação do plano genético dos descendentes pode ser aplicada à adaptação evolutiva de estruturas computacionais, daí resultando a área da computação evolutiva (CE) também conhecida como dos algoritmos evolutivos.

A teoria da computação evolutiva consiste em aplicar os conceitos da selecção natural, baseados na aptidão de uma população de estruturas, num algoritmo de computador. Com base num critério de desempenho, um indivíduo de uma população é afectado por outros indivíduos (*e.g.*, a competição por alimentos, a existência de predadores e o acasalamento), bem como pelo ambiente (*e.g.*, comida e clima existentes). Assim, a capacidade do indivíduo nestas funções dita a possibilidade de sobrevivência e de ter mais ou menos descendentes (quanto maior a esperança de vida maiores as possibilidades de gerar descendentes). Desta forma, a geração seguinte será portadora essencialmente da informação genética dos mais aptos. A natureza aleatória da reprodução conduz à introdução de nova informação genética e, consequentemente, à criação de descendentes

com características diferentes. A evolução é então um processo de optimização que é simulado num computador, adicionando-se eventualmente outros métodos comuns nas ciências de engenharia. As aplicações deste tipo de algoritmos têm vindo a substituir os métodos clássicos em diversas áreas como, por exemplo, em síntese de circuitos eléctricos [9], no reconhecimento de padrões [11, 12], em identificação de sistemas [13], em sistemas de controlo [14, 15], no planeamento do uso da terra e dos transportes [16, 17], na biologia molecular [10], na epidemiologia genética [18], em sistemas de energia [19] e programas de análise económica e financeira [20].

Dentro da CE existem três ramos principais de estudo: estratégias de evolução (EEs), programação evolutiva (PE) e algoritmos genéticos. Dentro dos AGs, para além da estrutura comum existem outras variantes, como a programação genética (PG) e os sistemas de classificação (SCs), que desenvolveram as suas próprias direcções de pesquisa e de aplicação. A computação evolutiva ou os algoritmos evolutivos (AEs) são os termos utilizados para denominar este tipo de técnicas. A diferença entre os algoritmos referidos consiste no tipo de alterações que são introduzidas nas soluções com vista a criar os respectivos descendentes, no método de selecção dos novos progenitores e na estrutura de dados que representa as soluções.

A principal vantagem na utilização da pesquisa evolutiva tem a ver com a sua adaptabilidade a diferentes tarefas e com a robustez de desempenho (que obviamente depende do tipo de problema), em contraponto com a capacidade de execução de uma pesquisa global. Assim, os algoritmos evolutivos conduzem frequentemente a resultados excelentes quando aplicados a problemas complexos, enquanto que outros métodos de optimização não são aplicáveis ou são pouco satisfatórios.

A grande adaptabilidade dos AEs deve-se a estes fazerem poucas suposições sobre o domínio do problema. Contudo, quando aplicados a problemas de grande dimensão, as soluções geradas através da explosão combinatória vão aumentar o custo do método. Para minimizar este fenómeno, pode ser introduzido no AE conhecimento inerente ao problema, de modo a lidar melhor com as características do mesmo. Consequentemente, este AE particular não poderá ser utilizado directamente noutro tipo de problema.

A terminologia utilizada nos AEs é baseada na terminologia da genética natural. Assim, a *string* ou vector é considerado o cromossoma. Este é constituído por genes, que serão os

caracteres ou parâmetros do vector. Os genes possuem alelos, onde um alelo será o valor atribuído a esse parâmetro. O cromossoma terá uma dada estrutura de codificação, que é o genótipo. Que quando instanciada (descodificada) e tipificada corresponderá ao fenótipo.

Os AGs, fazendo parte dos AEs, são algoritmos de pesquisa baseados em mecanismos da selecção natural e da genética natural. Existem três características que distinguem os AGs canónicos dos outros AEs: a representação (binária), o método de selecção (selecção proporcional) e o método dominante na produção de variações (cruzamento). Com estes mecanismos, os indivíduos com melhores capacidades são normalmente os vencedores num ambiente altamente competitivo. Assim, os AGs combinam a sobrevivência dos indivíduos mais aptos com vectores de estruturas. A informação criada aleatoriamente nestas estruturas é trocada para formar um algoritmo de pesquisa. Em cada geração é criada uma nova população artificial de vectores, desenvolvida a partir de bits (codificação binária) e/ou conjunto de bits dos vectores mais aptos, substituindo a população anterior.

Um tema central da investigação nos AGs tem sido a robustez, bem como o balanço entre o tempo necessário para encontrar uma solução e a qualidade dessa mesma solução. Os AGs funcionam bem num espectro largo do problema, enquanto que a maior parte dos algoritmos tradicionais funciona eficientemente apenas numa gama estreita de valores. Deve-se salientar que os AGs, tal como outros métodos heurísticos, não garantem que o valor óptimo seja encontrado. No entanto, encontram sempre uma solução razoável, de acordo com a complexidade do problema.

4.3. ESTRUTURA E DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO GENÉTICO

A estrutura de um AG simples é fornecida pelo algoritmo:

```
Início
T = 0;
Inicializa aleatoriamente P(G);
Avalia P(T);
repetir
cruzamento P(T);
mutação P(T);
avalia P(T);
gera P(T + 1);
T = T + 1;
até condição de finalização;
Fim
```

Onde $P(T)$ representa a população na geração T .

Para implementar o algoritmo é necessário especificar:

- O esquema de representação, considerando:
 1. A dimensão do alfabeto;
 2. O tipo de selecção e a projecção entre os vectores e os pontos do espaço;
- O método adoptado para criar a população inicial;
- A função de aptidão;
- Os parâmetros e as variáveis necessários para controlar o algoritmo tendo em conta:
 1. O número de indivíduos da população (N);
 2. O número de gerações ($T_{\max}$);
 3. A probabilidade de cruzamento (p_c);
 4. A probabilidade de mutação (p_m);
 5. A percentagem de população que vai ser substituída;
- O método de selecção;
- O tipo dos operadores de Cruzamento;
- O tipo dos operadores de Mutação;
- O modo de preservar o(s) vector(es) que representa(m) o(s) melhor(es) resultado(s), garantindo a diversidade;
- O método de implementação das restrições do problema;
- O critério para terminar o processo evolutivo.

Nas próximas subsecções serão vistos os principais elementos de especificação de um AG, assim como alguns factores a ter em consideração nessa especificação.

4.3.1. CODIFICAÇÃO DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Os AGs canónicos utilizam uma representação vectorial binária de dimensão fixa, onde cada carácter do vector pode ter o valor '0' ou '1'. Assim, os AGs utilizam frequentemente funções de codificação e decodificação, de modo a facilitar a projecção entre os vectores binários e as soluções do problema. A qualidade da função de codificação condiciona o desempenho dos AGs. No caso de problemas de optimização com parâmetros contínuos, os algoritmos genéticos representam normalmente o conjunto de parâmetros reais através de um vector, sendo este dividido em vários segmentos (um por cada parâmetro (gene)) com o

mesmo comprimento. Cada segmento contém um valor inteiro, V_c , que é projectado linearmente no intervalo que o parâmetro real correspondente pode tomar. Este valor, v_r , pode ser calculado através de l_p caracteres binários, com uma resolução π_r , de acordo com a seguinte fórmula:

$$v_r = \pi_r V_c + U_{\min} \quad (4.1)$$

$$\pi = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^{l_p} - 1} \quad (4.2)$$

onde $U_{\max}$ representa o valor máximo do parâmetro a codificar e $U_{\min}$ o valor mínimo desse mesmo parâmetro.

O argumento fundamental que justifica o uso do alfabeto binário nos AGs é o facto do número de arranjos ser máximo para um conjunto de pontos de pesquisa num algoritmo binário [21]. Consequentemente, o teorema do esquema favorece a representação binária das soluções.

4.3.2. RESTRIÇÕES DOS PROBLEMAS

As restrições podem ser implementadas introduzindo penalidades nos indivíduos que não as satisfazem, seja ao nível da função de aptidão, seja através de funções de descodificação (permitindo a representação apenas dos vectores que verifiquem essas restrições). No caso das restrições serem resolvidas ao nível da função de aptidão podem surgir alguns inconvenientes. Se for introduzida uma penalidade muito grande na função de aptidão, e se as restrições do domínio forem violadas pela representação dos indivíduos, então o algoritmo pode criar um grande número de vectores não admissíveis. Nesse caso, quando é encontrado um vector que satisfaz essas restrições pode acontecer que este conduza os restantes na sua direcção, caminhando para um óptimo local, sem se encontrarem as melhores soluções. Por outro lado, se a penalidade introduzida é pequena, então o sistema pode apresentar soluções que não verifiquem as restrições, tendo um desempenho superior ao de outros vectores que satisfazem as mesmas restrições. Isto acontece quando a parte da solução que satisfaz o domínio de um vector apresenta um desempenho superior ao dos outros vectores. Se as restrições são implementadas ao nível da descodificação então a representação, considerando inviáveis os indivíduos ilegais, é bastante intensiva sob o ponto de vista computacional e, por vezes, é difícil ou mesmo impossível de implementar.

4.3.3. A FUNÇÃO APTIDÃO

A aptidão de um indivíduo é o parâmetro que condiciona a probabilidade de participação no processo evolutivo. Quanto maior a aptidão de um indivíduo maior será a probabilidade de participar na geração de um descendente. O seu valor é quantificado através da função aptidão. Esta função está intimamente ligada à função objectivo, que é a função que quantifica o desempenho dos objectivos. No entanto, a função aptidão, para além de representar o desempenho da solução, pode incorporar outros factores que visem controlar certas características do algoritmo. Consequentemente a função de aptidão constitui uma ligação importante entre os AGs e o sistema a tratar.

A função de aptidão deve ser definida positiva no intervalo $[0, 1]$. No entanto, pode não existir a garantia de que a função objectivo de um dado indivíduo seja positiva. Do mesmo modo, existem problemas onde interessa minimizar a função objectivo. Para ultrapassar estas questões pode-se projectar a função objectivo numa função aptidão.

Para o caso de o problema ser um problema de maximização poderá utilizar-se a equação:

$$f = \begin{cases} C_{\min} + f_o, & f_o + C_{\min} > 0; \\ 0, & \text{Outros casos.} \end{cases} \quad (4.3)$$

Sendo a função f_o a função objectivo inicial, a função f a nova função objectivo (função aptidão) e o valor $C_{\min}$ o valor negativo do mínimo da função.

Quando o objectivo é minimizar, para se transformar num problema de maximização pode-se utilizar a seguinte função:

$$f = \begin{cases} C_{\max} - f_o, & f_o < C_{\max}; \\ 0, & \text{Outros casos.} \end{cases} \quad (4.4)$$

Onde $C_{\max}$ é o valor máximo da função f_o observado na geração i .

A projecção da função objectivo também pode servir para garantir a uniformidade entre os diversos problemas. De facto, para diferentes problemas temos diferentes parâmetros a otimizar e diferentes restrições ao problema. Assim, com vista à uniformização da função aptidão utilizam-se vários tipos de projecções, sendo de seguida apresentados alguns exemplos.

ESCALONAMENTO LINEAR

O valor de aptidão ($f(v_j)$) do vector j tem a seguinte relação linear com o valor objectivo:

$$f(v_j) = af_o(v_j) + b \quad (4.5)$$

onde os coeficientes a e b podem ser escolhidos de diversos modos. Um exemplo consiste em assegurar a igualdade entre a média da função objectivo e a média dos valores de aptidão. Assim, com o uso do procedimento de selecção, espera-se que cada membro médio da população contribua com um descendente para a geração seguinte. Se n é a relação entre o valor de aptidão máximo e o valor médio de aptidão então n é o número de descendentes esperados pelo melhor vector da população. Deste modo, o valor de aptidão máximo pode ser escolhido como um múltiplo da média da aptidão, de forma a controlar o número esperado de descendentes do melhor vector da população. Quando se utiliza esta projecção deve-se assegurar que os valores de aptidão não apresentem valores negativos. Se os parâmetros a e b forem constantes ao longo das gerações, este escalonamento é independente da evolução do problema.

ESCALONAMENTO POR POTÊNCIA

O valor de aptidão é calculado a partir da potência de ordem k do valor objectivo:

$$f(v_j) = f_o(v_j)^k \quad (4.6)$$

onde k varia de acordo com o problema ou, eventualmente, durante a sua execução. A gama de valores típica de k é próxima de 1 (*e.g.*, $k = 1,005$).

TRUNCAMENTO SIGMA

O valor de aptidão ($f(v_j)$), do vector j , é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$f(v_j) = f_o(v_j) + (\bar{f}_o - c\sigma) \quad (4.7)$$

onde c é um valor inteiro pequeno (normalmente $1 \leq c \leq 5$), $\bar{f}_o$ é a média dos valores objectivos e σ é o desvio padrão da população.

TRATAMENTO DE RESTRIÇÕES

Na função aptidão também pode ser incorporado o controlo de restrições do problema. Para o fazer basta que, depois de avaliadas as funções objectivo, se existir alguma restrição que não seja verificada, a solução seja considerada não admissível. E, por tal facto, é-lhe atribuído o valor de pior aptidão à sua função de aptidão (zero se o problema é de maximização). No entanto, este método, quando o problema tem muitas restrições, pode levar a que seja difícil encontrar soluções admissíveis, tornando o processo evolutivo mais lento. Soluções “quase” admissíveis serão ignoradas, perdendo-se assim o potencial evolutivo. Para ultrapassar este problema pode-se utilizar o método das penalidades, onde um problema com restrições é transformado noutra sem restrições. Esta transformação é feita associando um custo, ou penalidade, a todas as restrições que não são satisfeitas. Este custo é incorporado na função objectivo. Assim, o seguinte problema com restrições:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } & g(x) \\ \text{Sujeito a: } & b_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4.8)$$

é transformado no seguinte problema sem restrições:

$$\min \{g(x)\} + r \sum_{i=1}^n \phi[b_i(x)] \quad (4.9)$$

onde: x é um vector; $g(x)$ é a função a minimizar, b_i é a restrição i do problema, ϕ é a função de penalidade e r é o coeficiente de penalidade.

A função de penalização pode ter muitas representações como, por exemplo, a equação:

$$\phi[b_i(x)] = b_i^2(x) \quad (4.10)$$

4.3.4. MÉTODOS DE SELECÇÃO

Com vista à evolução da população, é necessário seleccionar os progenitores que irão dar origem à nova geração. O objectivo da selecção consiste em dar relevância aos indivíduos mais aptos, de modo a que os seus descendentes tenham uma melhor aptidão. A selecção deverá ser balanceada com a mutação e o cruzamento, de forma a permitir, não só a sobrevivência dos mais aptos, mas também a exploração do espaço de pesquisa. Uma grande pressão na selecção originará que, um pequeno grupo de indivíduos, com boa

aptidão, domine a população. Tal facto irá reduzir a diversidade necessária a futuras mudanças e evolução, o que irá provocar a condução da solução a um óptimo local. Uma fraca pressão na selecção levará a uma evolução muito lenta. Os métodos de selecção baseiam-se essencialmente nos valores de aptidão de cada indivíduo, variando na forma como seleccionam e diferenciam as melhores soluções. De seguida serão descritos os métodos mais comuns de selecção.

SELECÇÃO PROPORCIONAL

Os AG originais usavam a selecção proporcional, onde o número expectável de vezes de selecção para reprodução de um indivíduo é dado pelo quociente entre o valor da sua aptidão e o valor da aptidão média da população. A implementação, também conhecida como método da roleta, consiste em considerar uma roleta circular, onde cada fatia é proporcional à aptidão de cada indivíduo, e de cada vez que é necessário escolher um progenitor se roda a roleta. A probabilidade de escolher um vector (v_i) de uma população de dimensão N é dada pela equação (4.11), onde os valores de aptidão $f(v_k)$ devem ser positivos.

$$p(v_i) = \frac{f(v_i)}{\sum_{k=1}^{pop_{dim}} f(v_k)} \quad (4.11)$$

Embora estatisticamente cada indivíduo reproduza o número de descendentes esperado, para populações pequenas tal pode não ocorrer. Pode-se evitar esse facto recorrendo ao modelo do valor esperado. Este modelo associa a cada indivíduo um contador, cujo valor inicial é o número expectável de vezes de selecção. De cada vez que este indivíduo é seleccionado para reprodução o seu contador é decrementado. Quando o contador atinge zero o indivíduo deixa de estar disponível para reprodução.

SELECÇÃO POR POSTO

Os indivíduos são ordenados de acordo com a sua aptidão. A probabilidade de reprodução depende do seu posto e não do valor absoluto da sua aptidão, permitindo, assim, evitar uma convergência prematura.

SELECÇÃO POR TORNEIO

A selecção por torneio é similar à selecção por posto em termos de pressão de selecção, mas mais eficiente computacionalmente. É também mais fácil de gerir no caso de computação paralela. Uma amostra de n indivíduos ($n > 1$) é retirada aleatoriamente da população, seleccionando-se o indivíduo mais apto da amostra. Este processo é repetido até se atingir o número de progenitores pretendido. A pressão de selecção pode ser controlada através do tamanho da amostra.

SELECÇÃO DE BOLTZMAN

A selecção de Boltzman procura variar a pressão de selecção ao longo das gerações. O valor da aptidão é calculado de acordo com a distribuição probabilística de Boltzman (4.12), onde o valor de T_k é análogo à variação da temperatura no processo de arrefecimento de metais. No início com o valor de T_k grande existe uma fraca pressão de selecção, produzindo uma grande diversidade de soluções. Com o decrescimento da temperatura a pressão de selecção aumenta dando primazia aos mais aptos. Este parâmetro pode ser reduzido de um modo pré-definido ao longo das gerações.

$$\frac{1}{1 + e^{-\frac{f(v_j)}{T_k}}} \quad (4.12)$$

OUTRAS CARACTERÍSTICAS DOS MÉTODOS DE SELECÇÃO

Existem dois factores relevantes para a selecção na pesquisa genética: a diversidade da população e a pressão de selecção. Sendo dois objectivos antagónicos, a obtenção do balanceamento correcto entre estes dois factores produzirá os melhores resultados. Pois se o método de selecção exerce uma grande pressão de selecção perde-se diversidade, correndo o risco de atingir um óptimo local (convergência prematura). Se o método é pouco selectivo existirá uma grande diversidade, sendo o ciclo evolutivo mais lento.

Os métodos de selecção podem ser:

Elitistas

Permitem que alguns progenitores passem para a geração seguinte em função do seu valor de aptidão.

Seleccção pura

O tempo de vida dos indivíduos é de somente uma geração.

Estáticos

As probabilidades de selecção mantêm-se ao longo das gerações.

Dinâmicos

As probabilidades de selecção podem variar ao longo das gerações.

Geracionais

Os progenitores são fixos até que a nova geração seja gerada.

Substituição mediata

Os descendentes são inseridos na população após a sua criação.

4.3.5. OPERADOR DE CRUZAMENTO

O cruzamento de ponto simples (figura 4.1) foi o primeiro operador de cruzamento a ser utilizado. Consiste na selecção de dois indivíduos da população, sendo de seguida escolhido aleatoriamente um ponto nos vectores (o ponto de cruzamento). O ponto de cruzamento irá servir como ponto de quebra do vector. Um descendente é criado a partir dos bits da parte esquerda de um progenitor com os bits da parte direita do segundo progenitor. As partes complementares são utilizadas para formar um segundo descendente. No entanto, este operador de cruzamento simples tem tendência para destruir blocos longos de informação e para preservar os bits de informação das pontas.

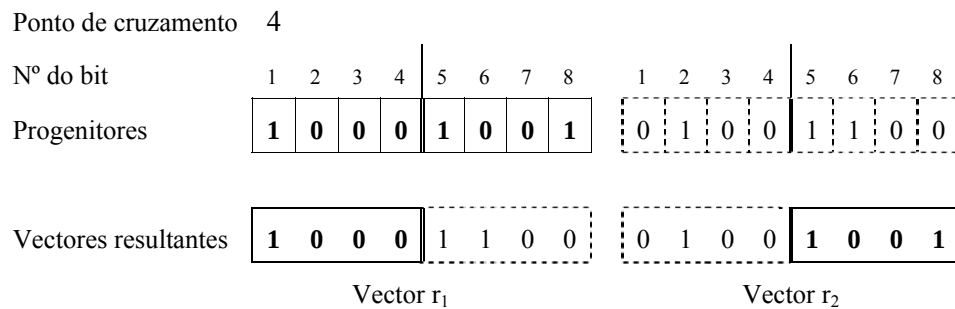


Figura 4.1 – Cruzamento simples

De modo a colmatar estas desvantagens existem várias extensões, tais como o cruzamento com um maior número de pontos (ex: cruzamento de ponto duplo ver figura 4.2) e o cruzamento uniforme (ver figura 4.3).

No cruzamento de ponto duplo, os pontos de cruzamento irão servir para criar dois blocos de bits. Um bloco (interior) será constituído pelos bits que se encontram entre os dois pontos de cruzamento. O outro bloco (exterior) será formado pelos bits que não se encontram entre os dois pontos de cruzamento. Assim, um descendente é criado a partir do bloco de bits interior de um progenitor e do bloco de bits exterior do segundo progenitor. As partes complementares são utilizadas para formar um segundo descendente.

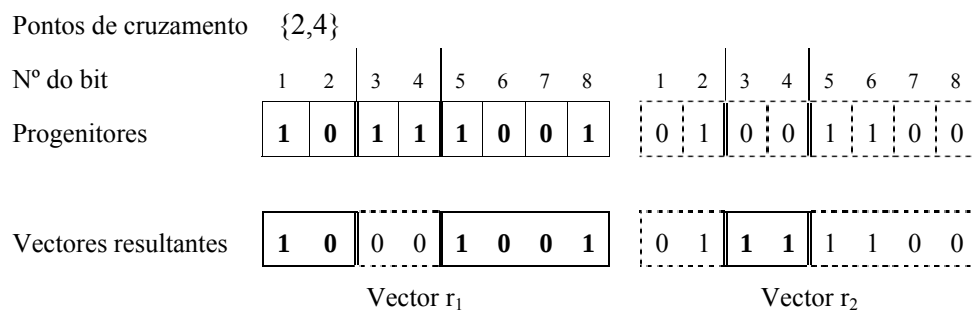


Figura 4.2 – Cruzamento duplo

No cruzamento uniforme cada bit do descendente é escolhido a partir do bit da posição correspondente de um dos progenitores escolhido aleatoriamente. Para esse fim, é utilizada uma máscara gerada aleatoriamente, que define qual o progenitor a ceder o bit para cada posição do descendente. Um exemplo de um cruzamento deste tipo é exemplificado na

figura 4.3. O número de pontos de cruzamento não é fixo mas tem, em média, $l/2$ pontos de cruzamento (onde l é o comprimento do vector). Este operador é aplicado à população com uma probabilidade p_c (normalmente $p_c \approx 0,6$ para populações grandes $N \geq 100$ e $p_c \approx 0,9$ para populações pequenas $N \leq 30$). O aumento da probabilidade de cruzamento provoca o aumento da recombinação na construção de blocos. A recombinação com vários progenitores consiste em criar um descendente a partir de vários vectores (*i.e.*, mais do que dois vectores).

Máscara cruzamento	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1
Nº do bit	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
Progenitores	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0
Vectores resultantes	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
	Vector r_1								Vector r_2							

Figura 4.3 – Cruzamento uniforme

Na natureza, o local de cruzamento pode ocorrer entre genes ou até dentro de genes. O cruzamento entre genes (*i.e.*, o cruzamento que não divide genes) é chamado cruzamento de segregação [22]. Quando os parâmetros com vários símbolos têm significado natural, o cruzamento dentro destes grupos pode ter um efeito de ruptura no genótipo e, consequentemente, no fenótipo.

4.3.6. OPERADOR DE MUTAÇÃO

Nos AGs canónicos o operador de cruzamento é que era considerado o grande responsável pela variedade e inovação. O operador de mutação foi introduzido como um operador secundário e de menor importância, para impedir a fixação da população num local específico. O operador canónico de mutação inverte um bit com uma probabilidade p_m bastante baixa: $p_m \in [0,005, 0,01]$ ou $p_m = 1/l$ (onde l é o comprimento do vector) [23]. Normalmente $p_m \approx 0,001$ para grandes populações ($N \geq 100$ indivíduos) e $p_m \approx 0,01$ para populações pequenas ($N \leq 30$ indivíduos). A mutação é responsável pela perda de alelos. Deste modo previne possíveis convergências prematuras e introduz uma pequena pesquisa aleatória. Se a probabilidade de mutação for elevada, então aumenta o tempo de

convergência do algoritmo, promovendo uma maior diversidade e prevenindo uma convergência prematura. De facto, o aumento da probabilidade de mutação transforma o AG num algoritmo de pesquisa aleatório e permite a reintrodução de material genético perdido. Este operador é aplicado a todos os descendentes depois da recombinação. Cada bit pode ser alterado com uma probabilidade p_m . O bit que sofre a mutação é modificado para o valor complementar. Deste modo, garante-se que todos os pontos de pesquisa têm probabilidade não nula de serem examinados.

Na figura 4.4 está ilustrado o efeito da mutação no bit 3 de um vector. Inicialmente o bit tem o valor '1' e ao ocorrer a mutação o valor passa a ter o seu valor complementar '0'.

Nº do bit a mutar	3							
Nº do bit	1	2	3	4	5	6	7	8
Vector inicial	1	0	1	1	1	0	0	1
Vector resultante	1	0	0	0	1	1	0	1

Figura 4.4 – Mutação

Outros operadores que podem ser considerados variantes do operador de mutação são os operadores de reordenação e de inversão. Estes operadores têm como finalidade encontrar ordenações dos genes que tenham um potencial evolutivo superior ao normal. O principal mecanismo que deu origem à reordenação foi o operador de inversão. Para efectuar a inversão escolhem-se dois pontos aleatórios do vector. De seguida retiram-se os bits que se situam entre esses dois pontos. Finalmente recolocam-se os bits mas na ordem inversa à original. Na figura 4.5 pode-se ver o funcionamento do operador de inversão, onde os valores dos bits 3, 4 e 5 são invertidos.

Pontos de inversão	{2,5}							
Nº do bit	1	2	3	4	5	6	7	8
Vector inicial	1	0	0	1	1	0	0	1
Vectores resultante	1	0	1	1	0	0	0	1

Figura 4.5 – Inversão

Na natureza os genes são independentes do lugar que ocupam. Para ter uma certa flexibilidade na representação utilizam-se nomes para os genes. Com esta representação o valor dos símbolos é independente do seu lugar. Os operadores de reordenação não têm qualquer influência na função de decodificação e na função de aptidão.

Nas populações onde os vectores contêm fracas ordenações, os alelos com epistase elevada ou com interacções não-lineares estão espaçados através de grandes distâncias. Consequentemente, o cruzamento tem uma grande probabilidade de destruir importantes arranjos de alelos. Contudo, se o operador de reordenação modificar a posição dos alelos, então existe uma certa probabilidade de se conseguirem boas ordenações de alelos que permitam a construção de blocos com uma eficiência superior à inicial.

Os seguintes operadores de reordenação combinam características de reordenação e de cruzamento: cruzamento parcialmente semelhante (*Partially Matched crossover*, PMX), cruzamento ordenado (*Order crossover*, OX) e cruzamento cíclico (*Cycle crossover*, CX). Estes tipos de operadores são bastante utilizados no problema do caixeiro viajante [24] e em problemas de escalonamento em que a ordem dos parâmetros a otimizar seja crucial [25].

O operador de translocação (*translocation*) garante que o cromossoma esteja organizado de uma determinada forma, de modo que o operador de segregação possa explorar essa organização. Assim, é necessário referenciar os alelos, através do nome de gene, para identificar a sua função quando mudam (no cromossoma) para outras posições relativas, através do operador de translocação.

4.3.7. MECANISMO DE REINSERÇÃO

O mecanismo de reinserção está intimamente ligado ao método de selecção, pois se o método de selecção for de substituição imediata, então os descendentes gerados são imediatamente incluídos na população. Caso o método seja geracional, depois de gerada a população de descendentes, existem várias estratégias de substituição da população antiga. Se o método de selecção for de selecção pura, a população antiga é totalmente substituída pela nova geração. Assim, será gerado um número de descendentes igual ao número de indivíduos existentes na população anterior. No entanto, existe uma desvantagem neste tipo de reposição, que é o facto do indivíduo com a melhor aptidão não ser seleccionado como progenitor, perdendo-se, assim, um elemento importante na evolução da população.

Para salvaguardar esse facto, esta estratégia é normalmente combinada com uma estratégia elitista, de modo a que seja introduzido o melhor indivíduo, ou um conjunto dos melhores indivíduos, da geração presente na geração futura. Esta estratégia elitista corre o risco do domínio da população por um indivíduo ou conjunto de indivíduos, mas garante um aumento do desempenho do algoritmo. Em certos casos, o pior vector é também inserido na nova população juntamente com os restantes vectores, de modo a reforçar a diversidade.

4.3.8. CONDIÇÕES DE FINALIZAÇÃO DOS ALGORITMOS

Um algoritmo termina quando converge ou quando excede o número máximo de gerações estabelecidas (depende do problema em questão). A convergência é atingida quando são satisfeitas certas características de pesquisa. As características de pesquisa podem ser baseadas nas estruturas dos vectores (genótipo) ou baseadas no significado de um vector em particular (fenótipo). A condição de paragem do algoritmo, de acordo com a estrutura, mede a convergência da população através da verificação do número de alelos que convergiram. A condição de finalização, de acordo com o significado de um vector, mede o progresso feito pelo algoritmo num número pré-definido de gerações.

CONVERGÊNCIA

A convergência de uma população dá-se quando todos os genes convergiram. Considera-se que um gene convergiu quando os genes de 95% da população têm o mesmo valor nesse gene. Assim, um algoritmo converge quando as funções de aptidão do melhor indivíduo e da média da população aumentam ao longo das sucessivas gerações, no sentido do óptimo global. Quando a população converge para um óptimo local diz-se que houve uma convergência prematura. A convergência do algoritmo depende de muitos factores, tais como a função de aptidão, o tamanho da população, as probabilidades da recombinação, o método de selecção, etc.

4.4. A TEORIA DO ESQUEMA

Os fundamentos teóricos dos AGs incidem na representação binária das *strings* e na notação de arranjo. Um arranjo (*schemata*) é implementado através da introdução do símbolo # no alfabeto dos genes. O carácter # pode ser substituído por qualquer outro símbolo existente no alfabeto. Um arranjo representa qualquer *string* (um hiperplano, ou

um subconjunto do espaço de pesquisa), que seja igual em todas as posições, excepto naquelas onde existe o símbolo #. Dois exemplos estão ilustrados nas seguintes tabelas:

Tabela 4.1 Exemplo de um arranjo $\{01\# \}$ e as *strings* que representa

Arranjo	<i>Strings</i> que representa
$\{01\# \}$	$\{010\}$
	$\{011\}$

Tabela 4.2 Exemplo de arranjos e as respectivas *strings* representadas

Arranjo	<i>Strings</i> que representa
$\{##0\}$	$\{000\}$
	$\{010\}$
	$\{100\}$
	$\{110\}$

Um arranjo com k símbolos # representa 2^k *strings*. Uma *string* com comprimento L pode ser representada por 2^L arranjos. Obviamente arranjos diferentes têm propriedades diferentes.

A ordem de um arranjo ($o(S)$) é o número de símbolos existentes na *string*, diferentes do carácter #.

O comprimento de um arranjo ($\delta(S)$) é distância entre o primeiro e o último símbolo fixo que ocorre na *string*.

Para as *strings* $\{101##10\#, 01##1001\}$ a ordem e o comprimento do arranjo são, respectivamente, $\{(o = 5, \delta = 7 - 1 = 6), (o = 6, \delta = 8 - 1 = 7)\}$.

A ordem e o comprimento de um arranjo permitem calcular as probabilidades de sobrevivência de um arranjo, após a mutação e o cruzamento.

Seja $\varphi(S, t)$ o número de strings que o arranjo S representa. A função de aptidão do arranjo, $S (f(S, t))$, é dada pela média do valor de aptidão de todas as *strings* que o arranjo representa:

$$f(S, t) = \sum_{j=1}^p \frac{f(S_j, t)}{p} \quad (4.13)$$

Assim, a probabilidade de uma string ser copiada durante o processo de selecção de acordo com a sua função de aptidão é:

$$p_i = \frac{f(S_i)}{F(t)} \quad (4.14)$$

onde $F(t)$ é a soma das funções de aptidão de todas *strings* da população na geração t .

Após a selecção espera-se que o número de *strings* representadas pelo arranjo seja

$$\varphi(S, t+1) = \mu \frac{f(S, t)}{F(t)} \quad (4.15)$$

Considerando:

$$F_m(t) = \frac{F(t)}{\mu} \quad (4.16)$$

Onde μ é o número de strings na população, então:

$$\varphi(S, t+1) = \varphi(S, t) \frac{f(S, t)}{F_m(t)} \quad (4.17)$$

Isto significa que o número de *strings* que o arranjo representa na população cresce de acordo com a taxa de aptidão do arranjo e com a média da função de aptidão da população. Assim, se o número de *strings* que um arranjo representa tem um valor de aptidão superior (inferior) à média dos valores de aptidão da população, então o número de *strings* representadas pelo arranjo aumenta (diminui) na geração seguinte.

Se a média do valor de aptidão do arranjo se mantém superior à média ε , então:

$$f(S, t) = F(t) + \varepsilon F(t) \quad (4.18)$$

$$\varphi(S, t) = \varphi(S, 0)(1 + \varepsilon)^t \quad (4.19)$$

Assim, a representação do arranjo aumenta exponencialmente de geração para geração.

A recombinação irá influenciar o número de arranjos esperados na geração seguinte. De seguida, é analisado o efeito que a recombinação introduz no número de arranjos que são esperados na geração seguinte.

O comprimento do arranjo tem um papel bastante importante para a sua sobrevivência após o cruzamento, uma vez que arranjos com grande comprimento têm uma maior probabilidade de serem destruídos.

Se o ponto de cruzamento for escolhido uniformemente então a probabilidade de destruição do arranjo é:

$$p_d = \frac{\delta(S)}{l-1} \quad (4.20)$$

Consequentemente, a probabilidade do arranjo sobreviver é dada por:

$$p_s = 1 - \frac{\delta(S)}{l-1} \quad (4.21)$$

Sendo a probabilidade de cruzamento p_c então vem:

$$p_s(S) = 1 - p_c \frac{\delta(S)}{l-1} \quad (4.22)$$

Mesmo que o ponto de cruzamento seja seleccionado entre posições fixas existe a possibilidade do arranjo sobreviver. Isto acontece quando a segunda *string* tem os mesmos valores que a primeira *string* para aquelas posições fixas. Deste modo:

$$p_s(S) \geq 1 - p_c \frac{\delta(S)}{l-1} \quad (4.23)$$

Considerando a probabilidade de ocorrer uma mutação p_m , a probabilidade de alterar um simples símbolo é p_m e a probabilidade do símbolo sobreviver é $1 - p_m$. Assim, a probabilidade de um arranjo de k símbolos fixos ($o(S)$) sobreviver é:

$$p_s(S) = (1 - p_m)^{o(S)} \quad (4.24)$$

Como $p_m \ll 1$ a equação anterior pode ser aproximada por:

$$p_s(S) \approx 1 - p_m o(S) \quad (4.25)$$

Combinando a selecção, o cruzamento e a mutação, o crescimento de um arranjo pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$\varphi(S, t+1) \geq \varphi(S, t) \frac{f(S, t)}{F_m(t)} \left[1 - p_c \frac{\delta(S)}{l-1} - o(S)p_m \right] \quad (4.26)$$

Esta expressão é válida para funções de aptidão sempre positivas.

O crescimento exponencial das *strings* que o arranjo representa deve-se à selecção. Para arranjos de comprimento pequeno e de baixa ordem, o efeito destrutivo do cruzamento e da mutação num arranjo não é significativo.

O teorema do esquema mostra que arranjos pequenos de baixa ordem e com valor de aptidão superior à média, têm um aumento exponencial no número de *strings* que representam nas gerações seguintes.

4.5. AGS NÃO BINÁRIOS

4.5.1. INTRODUÇÃO

Nesta secção iremos analisar os AGs não binários. Os AGs não binários diferem dos AGs canónicos basicamente na sua representação e nos operadores de variação. Assim, nesta secção iremos descrever a sua representação e o funcionamento dos operadores de cruzamento e de mutação.

REPRESENTAÇÃO

Um cromossoma (vector) é uma sequência de símbolos que, ao contrário da representação binária que só podem ter os valores $\{0,1\}$, nas representações não binárias podem ser representados por n caracteres diferentes. Os símbolos utilizados representam valores inteiros ou reais, dependendo do tipo de parâmetros a codificar. Com este tipo de representação já não é necessária a decodificação dos parâmetros, sendo os operadores de variação mais fáceis de especificar para cada tipo de problema. A representação não binária apresenta um melhor desempenho para problemas onde os parâmetros a codificar são reais ou inteiros. A convergência prematura é mais baixa, tem maior precisão e não necessita de funções de codificação. Os operadores utilizados apresentam diferenças relativamente aos adoptados para os AGs clássicos.

FACTORES QUE DISTINGUEM OS AGs BINÁRIOS DOS NÃO BINÁRIOS

Existem implementações de AGs com parâmetros reais, onde os operadores de cruzamento e de mutação são aplicados directamente nos parâmetros de valor real. Uma vez que os parâmetros reais são usados directamente, sem qualquer vector de codificação, resolver problemas de optimização com parâmetros reais é um processo fácil quando comparado com os AGs de codificação binária. Ao contrário do AG de codificação binária, as variáveis de decisão podem ser usadas directamente no cálculo do valor de aptidão. Uma vez que o operador de selecção trabalha com o valor de aptidão, qualquer operador de selecção usado no AG binário pode ser usado no AG real. Para além disso, o código binário, quando usado em problemas com espaço de pesquisa linear, tem alguns problemas. Por exemplo, ocorrem os picos de Hamming, que estão associados a certos vectores (como 01111 e 10000) nos quais uma transição para a solução vizinha (no espaço binário) requer a transição de todos os bits. Outra dificuldade é a precisão. No AG binário a precisão da solução está intimamente ligada ao comprimento do vector. Quanto maior é a precisão maior deve ser o comprimento do vector. Quanto maiores forem os vectores maiores deverão ser as populações. Como o intervalo do valor das variáveis deve conter o valor óptimo, o não conhecimento da ordem de grandeza desse valor pode trazer dificuldades na definição do vector.

No AG real, o maior desafio consiste em saber como utilizar um par de vectores com parâmetros reais para gerar novos vectores, ou saber como perturbar o vector, para obter

um vector mutado de forma consistente. Em muitos casos o cruzamento não tem grande desempenho e pode ser visto como um operador secundário.

4.5.2. OPERADOR DE CRUZAMENTO

O cruzamento de ponto simples é similar ao cruzamento utilizado no AG binário. Os pontos de cruzamento estão compreendidos entre os limites das variáveis $[1, n - 1]$. Na figura está exemplificado um caso com o ponto de cruzamento 2 (*i.e.*, entre as posições 2 e 3) obtendo-se os vectores descendentes D_1 e D_2 a partir dos progenitores P_1 e P_2 :

$$\begin{aligned} P^{(1,T)} &= (x_1^{(1,T)}, x_2^{(1,T)}, x_3^{(1,T)}, \dots, x_n^{(1,T)}) \\ P^{(2,T)} &= (x_1^{(2,T)}, x_2^{(2,T)}, x_3^{(2,T)}, \dots, x_n^{(2,T)}) \\ D^{(1,T)} &= (x_1^{(1,T)}, x_2^{(1,T)}, x_3^{(2,T)}, \dots, x_n^{(2,T)}) \\ D^{(2,T)} &= (x_1^{(2,T)}, x_2^{(2,T)}, x_3^{(1,T)}, \dots, x_n^{(1,T)}) \end{aligned}$$

Figura 4.6 – Cruzamento simples

O cruzamento de ponto duplo, com $n > 2$ ou uniforme, é também realizado de forma similar à utilizada nos AGs binários.

O cruzamento linear introduzido por Wright [26], a partir de dois progenitores $X^{(1,T)}$ e $X^{(2,T)}$ numa dada geração, dá origem a três potenciais descendentes através das equações (4.27 a 4.29), sendo escolhidas as duas melhores soluções.

$$D^{(1,T+1)} = 0,5 \cdot (X^{(1,T)} + X^{(2,T)}) \quad (4.27)$$

$$D^{(2,T+1)} = 1,5 \cdot X^{(1,T)} - 0,5 \cdot X^{(2,T)} \quad (4.28)$$

$$D^{(3,T+1)} = -0,5 \cdot X^{(1,T)} + 1,5 \cdot X^{(2,T)} \quad (4.29)$$

Como se pode verificar, um dos potenciais descendentes irá ser a média dos dois progenitores, outro irá ser menor do que o menor dos progenitores, e o terceiro será maior que o maior dos progenitores.

O operador de cruzamento aritmético é definido como uma combinação linear de dois vectores. Assim, sendo $P^{(1,T)}$ e $P^{(2,T)}$ os vectores progenitores, os vectores resultantes do cruzamento são:

$$D^{(1,T)} = \alpha \cdot P^{(1,T)} + (1 - \alpha) \cdot P^{(2,T)} \quad (4.30)$$

$$D^{(2,T)} = \alpha \cdot P^{(2,T)} + (1 - \alpha) \cdot P^{(1,T)} \quad (4.31)$$

Se o valor da variável α for constante, então o cruzamento é aritmético uniforme. Se a variável α variar com a idade da população, o cruzamento é dito aritmético não uniforme.

No cruzamento por média o descendente é criado a partir da média aritmética dos progenitores.

No cruzamento geométrico o descendente é criado a partir da média geométrica (*i.e.*, da raiz quadrada do produto) dos progenitores.

Eshelmann e Schaffer [26] propuseram o cruzamento combinado (*Blend crossover*), BLX- α , para a codificação real. Assim, considerando dois progenitores onde $x_i^{(1,T)} < x_i^{(2,T)}$, para os elementos $x_i^{(1,T)}$ e $x_i^{(2,T)}$ o operador gera aleatoriamente o elemento i do descendente no intervalo:

$$\left[x_i^{(1,T)} - \alpha \cdot (x_i^{(2,T)} - x_i^{(1,T)}), x_i^{(2,T)} + \alpha \cdot (x_i^{(2,T)} - x_i^{(1,T)}) \right] \quad (4.32)$$

Sendo μ um número aleatório do intervalo $[0,1]$, o descendente será obtido através da equação:

$$x_i^{(1,T+1)} = (1 - \gamma_i) \cdot x_i^{(1,T)} + \gamma_i \cdot x_i^{(2,T)} \quad (4.33)$$

$$\gamma_i = (1 + 2\alpha) \cdot \mu_i - \alpha \quad (4.34)$$

O factor α vai influenciar a amplitude do intervalo de variação dos descendentes. Para $\alpha = 0$ o operador cria uma solução aleatória no intervalo $(x_i^{(1,T)}, x_i^{(2,T)})$. Os autores indicam que o valor de $\alpha = 5$ é aquele que obtém melhores resultados. A diferença entre os descendentes é proporcional à diferença entre os progenitores. Esta propriedade do operador de pesquisa

permite formar uma pesquisa adaptativa. É de notar que γ_i tem uma distribuição uniforme para um valor fixo de α . No entanto, o intervalo dos descendentes depende das soluções progenitoras (4.35).

$$(x_i^{(1,T+1)} - x_i^{(1,T)}) = \gamma_i \cdot (x_i^{(2,T)} - x_i^{(1,T)}) \quad (4.35)$$

Se a diferença entre os progenitores for pequena, então a diferença entre os descendentes é também pequena. Esta propriedade do operador de pesquisa permite formar uma pesquisa adaptativa. Se a diversidade da população progenitora é grande, é esperado um descendente com uma diversidade significativa e vice-versa. Assim, com um operador deste tipo permite a pesquisa de todo o espaço (quando a população é inicializada em todo o espaço de pesquisa) e permite uma pesquisa focalizada quando a população tende a convergir numa região.

4.5.3. OPERADOR DE MUTAÇÃO

A mutação simples consiste em criar uma solução dentro de todo o espaço de pesquisa conforme a equação (4.36). O valor de r_i é um número aleatório no intervalo $[0, 1]$. Este operador é independente da solução progenitora, sendo equivalente à inicialização aleatória.

$$y_i^{(1,T+1)} = r_i \cdot (x_i^{(\max)} - x_i^{(\min)}) \quad (4.36)$$

Uma variante deste operador consiste em criar a solução numa vizinhança do seu progenitor conforme a equação (4.3.7). O descendente será então dependente do progenitor e da perturbação máxima considerada. Essa perturbação é dada pelo parâmetro Δ_i , que é definida pelo utilizador.

$$y_i^{(1,T+1)} = x_i^{(1,T)} + (r_i - 0,5) \cdot \Delta_i \quad (4.37)$$

O uso da mutação não-uniforme, tem como principal objectivo criar soluções próximas das soluções progenitoras. Ou seja, a probabilidade da nova solução ser criada perto da solução inicial é maior do que a probabilidade da nova solução ser criada afastada da solução progenitora.

$$y_i^{(1,T+1)} = x_i^{(1,T+1)} + \tau \cdot (x_i^{(\max)} - x_i^{(\min)}) \cdot \left(1 - r_i \left(\frac{1 - T_i}{T_i} \right)^b \right) \quad (4.38)$$

Na expressão (4.38) onde τ pode tomar os valores $\{-1;1\}$ com a mesma probabilidade, o parâmetro T_i representa o número máximo de gerações, sendo T a geração actual. O parâmetro b é controlado pelo utilizador. Nas gerações iniciais a mutação será praticamente uniforme, nas gerações finais terá uma pesquisa altamente focalizada no progenitor.

O método com distribuição normal (4.39) usa a função densidade de probabilidade gaussiana de média zero e desvio padrão σ_i . O parâmetro σ_i , constante, tem um papel importante e deve ser escolhido correctamente de acordo com o problema em questão. O parâmetro também pode ser adaptativo, variando ao longo das gerações ou através de uma regra pré-definida.

$$y_i^{(1,T+1)} = x_i^{(1,T+1)} + N(0, \sigma_i) \quad (4.39)$$

Para problemas onde a representação é numérica, a representação dos AGs, em vírgula flutuante, tem uma velocidade superior, tem mais consistência e os resultados são mais exactos do que para o caso da representação binária.

4.6. PARALELISMO E DIVERSIDADE

Para além do paralelismo implícito, fornecido pela teoria do esquema, a abordagem baseada na população dos AGs torna-os ideais para uma implementação em paralelo, ou em computadores ligados em rede [27]. O uso da implementação paralela permite um aumento da velocidade de processamento, pois aumenta a potência computacional, mas possibilita também uma melhoria do desempenho dos AG, nomeadamente no que diz respeito à diversidade. Por outro lado, o paralelismo permite que o AG possa ser transportado para domínios onde seja requerida a identificação e a manutenção de múltiplas soluções (*e.g.*, problemas com vários óptimos e problemas com múltiplos objectivos).

4.6.1. PARALELISMO GLOBAL

Tratam a população como uma unidade mas atribuem indivíduos distintos a diferentes processadores. Na sua forma mais simples, utiliza um processador para controlar a selecção e os operadores genéticos e outras máquinas para calcular a função objectivo. Este método só tem vantagens se o cálculo da função aptidão for muito pesado do ponto de vista computacional.

4.6.2. SEPARAÇÃO GEOGRÁFICA

Para algumas populações, especialmente para populações grandes, não é razoável considerar que um indivíduo pode acasalar com qualquer outro indivíduo à sua escolha. Mesmo o conceito de elitismo é posto em causa, tanto do ponto de vista prático, como do ponto de vista biológico. Em populações relativamente pequenas (*i.e.* $N \leq 750$) a informação necessária para manter o controlo centralizado torna-se pesado. Além disso, populações grandes requerem tempos de execução excessivamente longos, mesmo para um número reduzido de gerações. Assim, esses casos são normalmente implementados em máquinas paralelas, onde o controlo centralizado é evitado tanto quanto possível. Para evitar uma centralização excessiva, é usada uma notação de isolamento por distância. Duas técnicas bastante utilizadas são:

O modelo das ilhas, que tenta imitar a separação geográfica de sub populações existentes na vida natural. Isto é conseguido permitindo que subpopulações (ou demes) de cromossomas evoluam separadamente, provocando uma migração ocasional de indivíduos entre subpopulações (figura 4.7).

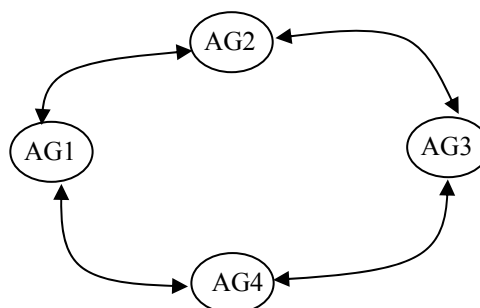


Figura 4.7 – Modelo das ilhas

O modelo difuso, ou celular, que retira as barreiras existentes entre sub populações utilizadas no modelo das ilhas e substitui-as pelo conceito de distância geográfica. Aos indivíduos só é permitido procriar com vizinhos próximos.

4.6.3. ESPECIAÇÃO

Os métodos de especiação restringem os acasalamentos de modo a ocorrerem apenas entre soluções semelhantes (no genótipo ou no fenótipo). Inicialmente, são identificadas as soluções que pertencem aos diferentes picos. De seguida, estas são divididas em subpopulações de acordo com os picos encontrados. Posteriormente, as subpopulações evoluirão de forma independente, criando-se desta forma uma pesquisa paralela.

4.6.4. MÉTODOS DE NICHOS

As técnicas de nicho têm como principal objectivo distribuir a população pelos diversos picos do espaço de pesquisa. Desta forma, as técnicas de nicho são incapazes de focalizar a pesquisa dentro de cada pico e terão mais dificuldade em encontrar a solução óptima correspondente a esses picos. Isto deve-se ao esforço gasto na recombinação de soluções de diferentes picos, que pode produzir soluções que não pertençam a nenhum dos picos.

4.7. ALGORITMOS EVOLUTIVOS MULTI-OBJECTIVO

Apesar de não ser utilizado neste trabalho, devido à diversidade de problemas multiobjectivo existentes no mundo real bem como à grande expansão na utilização dos AG multiobjectivo, será aqui feita uma breve referência.

Na maioria dos problemas reais é necessário tomar decisões que envolvem frequentemente múltiplas medidas de desempenho ou vários objectivos, que devem ser optimizados simultaneamente. Na prática, raramente é conseguido optimizar todos os objectivos, pois alguns são conflituosos. Para além desse facto, as escalas dos múltiplos objectivos dificilmente se encontram harmonizadas. Assim, a qualidade de uma solução é melhor expressa, não por um escalar, mas por um vector de valores, onde cada elemento desse vector representa o desempenho de um objectivo. Contrariamente ao que sucede num problema uniobjectivo, num problema multiobjectivo, pela natureza muitas vezes conflituosa dos vários objectivos, a optimização não consiste em encontrar o óptimo para todos os objectivos, pois isso normalmente é impossível.

A otimização de problemas multiobjectivo tem sido frequentemente adaptada e resolvida como problemas de otimização de um único objectivo. Neste caso o problema multiobjectivo é transformado num problema com um só objectivo através de uma função agregada (4.40).

$$f_{MO} = \sum_{i=1}^{n_{obj}} \beta_i \cdot f_i(x), \quad x \in R^N \quad (4.40)$$

Onde f_{MO} é a função multiobjectivo, β_i o peso do objectivo i na f_{MO} e $f_i(x)$ valor da função objectivo relativamente ao objectivo i .

Para este efeito, é executado o algoritmo diversas vezes, variando os pesos β_i para se obter um conjunto de soluções não dominadas (soluções segundo as quais um objectivo prédefinido não pode ser melhorado sem que outro sofra uma degradação). Este processo tem o inconveniente de obter apenas uma solução por cada execução e, ao usar um espaçamento uniforme dos pesos β_i , raramente obtém uma distribuição uniforme das soluções ao longo do espaço dos n_{obj} objectivos.

Notar que um dos principais objectivos dos algoritmos multiobjectivo consiste em encontrar tantas soluções não dominadas quanto possível. Assim, como é usada uma população de soluções em cada iteração, pode-se tirar partido da população de soluções dos AEs e introduzir-lhes pequenas alterações, com o intuito de obter um conjunto de soluções não dominadas. Consequentemente, é eliminada a necessidade de repetir o método de otimização usando uma combinação de objectivos, como medida de desempenho, por cada execução do algoritmo. Assim, este processo elimina a necessidade de usar certos parâmetros como os pesos dos vectores, β_i e, consequentemente, simplifica a tarefa de procura das soluções não dominadas. Por outro lado, a população do AE pode ser explorada de modo a manter as soluções não dominadas e preservar, simultaneamente, um conjunto diverso das mesmas, usando operadores que promovam e preservem nichos genéticos. Após algumas gerações, e dependendo do problema, este processo pode levar a população a convergir para a frente óptima de Pareto, que é o conjunto de soluções não dominadas no espaço de pesquisa, representando assim cada solução da população uma solução não dominada.

Mesmo nos casos onde se pretende obter apenas uma solução óptima, a frente óptima de Pareto permite auxiliar na escolha da solução mais adequada ao problema. O agente de decisão pode não ter a certeza da relação exacta dos pesos que deve atribuir a cada objectivo, de modo a obter a solução pretendida. Neste cenário, de um ponto de vista prático, é melhor encontrar primeiro a frente de Pareto e depois escolher uma solução do conjunto final pelo uso de informação ou considerações de nível superior.

Schaffer [29] implementou o primeiro AGMO (Algoritmo Genético Multiobjectivo) para determinar um conjunto de soluções não dominadas. O algoritmo usa como medida de desempenho um vector, em vez de usar um escalar, onde cada elemento do vector representa o desempenho relativo a um dado objectivo. O algoritmo VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*) é simplesmente uma extensão do AG clássico para problemas de optimização multiobjectivo. Como são considerados n_{obj} objectivos, Schaffer divide aleatoriamente, em cada geração, a população em n_{obj} subpopulações. De seguida, a cada elemento de uma subpopulação é atribuída a aptidão, baseada apenas na função objectivo correspondente. A selecção, o cruzamento e a mutação são processados de forma independente, de acordo com a subpopulação a que pertencem. Posteriormente, as soluções vencedoras de cada subpopulação são agrupadas e o algoritmo prossegue para nova iteração. O algoritmo VEGA tem a tendência para encontrar soluções próximas dos óptimos de cada objectivo. Contudo, não é conseguida uma frente de Pareto uniforme, ou seja, as soluções não se encontram uniformemente distribuídas ao longo da frente óptima de Pareto [26]. Mesmo quando se cruzam indivíduos próximos dos diferentes objectivos constata-se que o AG é incapaz de manter a diversidade, convergindo apenas para os óptimos de cada objectivo.

4.8. RESUMO

Neste capítulo foram revistos alguns conceitos dos AGs, que serão aplicados no capítulo seguinte. Assim, foram apresentados os conceitos básicos da selecção natural, foram descritos os aspectos fundamentais dos AGs e foi analisado o paralelismo e os mecanismos para preservar a diversidade da população. Por último, foi ainda feita uma breve referência aos AG multiobjectivo.

5. PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS

— DO BRAÇO ROBÓTICO AO HUMANO

5.1. INTRODUÇÃO

Os robôs imitam o movimento biológico e os AG imitam a sobrevivência biológica. Nesta perspectiva, a junção dos dois temas parece perfeita [30].

No estudo da robótica, a ligação entre esta área de estudo e o ser humano é óbvia [31]. O estudo da robótica tenta muitas vezes mimetizar o comportamento das funções humanas através do uso de juntas rotacionais, sensores, actuadores, controladores e computadores. Existem várias áreas de investigação no campo da robótica, sendo de destacar: o projecto de manipuladores, o planeamento de trajectórias, a locomoção de robôs, a visão por computador, entre outras.

Nas secções anteriores foram já estudados o braço biológico e um algoritmo de inspiração biológica, nomeadamente os Algoritmos Genéticos (AGs). Neste capítulo é desenvolvido e aplicado um AG num modelo baseado no membro superior humano (MSH).

Para tal, este capítulo encontra-se organizado em três secções principais. Na secção 5.2 é descrito o planeamento de trajectórias para manipuladores robóticos, sendo ainda referidas aplicações robóticas usando AGs. De seguida, na secção 5.3 é desenvolvido um AG para geração de trajectórias num manipulador 2R. Por último, na secção 5.4 são realizadas as experiências para o planeamento de trajectórias de um modelo do MSH, através de um algoritmo genético.

5.2. PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS DE UM ROBÔ

O planeamento de trajectórias para manipuladores robóticos consiste no processo de criar trajectórias livres de colisões, que permitam aos manipuladores desempenhar as tarefas pretendidas. Os planeadores de trajectórias têm como função substituir automaticamente o operador na especificação das trajectórias. Assim, o operador fica livre para se concentrar na tarefa, em vez de se preocupar com o movimento do robô. O operador necessita apenas de especificar os pontos inicial e final da trajectória, ficando o planeador encarregue de gerar uma trajectória adequada para o manipulador percorrer.

As trajectórias são compostas por sucessivos incrementos de deslocamento do braço robótico. Assim, uma trajectória pode ser vista como uma sequência de pontos, nos quais o órgão terminal deve passar. Como resultado da movimentação do braço ao longo dos pontos discretos, obtém-se uma trajectória contínua. Consequentemente, a optimização da trajectória de um robô implica a identificação da combinação óptima de pontos e do número de posições intermédias. A optimização de um manipulador robótico é bastante difícil, devido às não-linearidades correlacionadas da dinâmica e à dimensão do espaço de pesquisa das trajectórias.

O planeamento de trajectórias pode ser implementado usando a cinemática directa ou a inversa. Quando é usada a cinemática directa, o problema é resolvido directamente no espaço das juntas. Por seu lado quando o problema é resolvido através da cinemática inversa, é inicialmente determinada a trajectória do órgão terminal no espaço operacional. De seguida, usando a cinemática inversa, são calculados os valores das juntas. No entanto, quando a cinemática inversa é usada, devido à existência de pontos singulares, podem surgir alguns problemas [32].

De facto na vizinhança de singularidades:

- A mobilidade do manipulador é reduzida, ou seja, não é possível seguir movimentos em certas direcções;
- A eventual ocorrência de múltiplas soluções para o problema da cinemática inversa;
- Baixas velocidades no espaço operacional podem requerer muito altas velocidades no espaço das juntas.

De seguida é analisada a cinemática e a dinâmica de um manipulador robótico.

5.2.1. CINEMÁTICA E DINÂMICA DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO

Considere-se o manipulador representado na figura 5.1, onde as coordenadas $\{x, y\}$ referenciam a mão posicionada no órgão terminal.

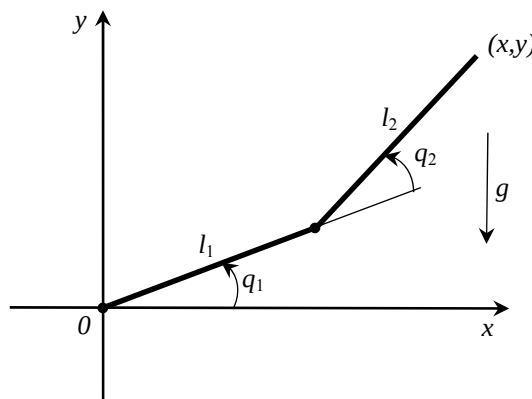


Figura 5.1 – Manipulador planar com dois elos de comprimento l_1 e l_2 e duas juntas rotacionais R

A cinemática directa calcula, para um conjunto de valores dos ângulos das juntas e de parâmetros dos elos, a posição/orientação do actuador final. A cinemática inversa fornece as variáveis das juntas, para um dado conjunto de parâmetros dos elos e para uma posição/orientação do actuador final. Sendo assim, a cinemática directa para este robô de dois elos é dada pela equação:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_{12} \\ l_1 \sin q_1 + l_2 \sin q_{12} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Onde: $q_{12} = q_1 + q_2$

Por seu lado, a cinemática inversa vem:

$$q_2 = \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (5.2)$$

$$q_1 = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) - \arctan\left(\frac{l_2 \sin q_2}{l_1 + l_2 \cos q_2}\right) \quad (5.3)$$

Analisando as equações (5.1) facilmente se conclui que no caso da cinemática directa só existe uma solução (x, y) para cada par de valores (q_1, q_2) . Tal já não acontece no caso da cinemática inversa. De facto da equação (5.2) conclui-se que, em geral, existem dois pares de soluções (q_1, q_2) para cada par de coordenadas (x, y) , que se designam genericamente por cotovelo para cima (“*Upper elbow*”, q_2 negativo) e cotovelo para baixo (“*Lower elbow*”, q_2 positivo). Adicionalmente, verifica-se a existência de singularidades quando:

- $l_1 = l_2$ e $x = y$, pois existe um número infinito de configurações do robô ($q_2 = \pm 180^\circ$ e q_1 qualquer ângulo);
- $x^2 + y^2 = (l_1 + l_2)^2$, neste caso o robô encontra-se totalmente estendido no sentido radial e a mão está no limite exterior do espaço de trabalho ($q_2 = 0^\circ$ e q_1 qualquer ângulo);
- $l_1 \neq l_2$ e $x^2 + y^2 = (l_1 - l_2)^2$, neste caso o robô encontra-se totalmente recolhido no sentido radial e a mão encontra-se no limite interno do espaço de trabalho ($q_2 = \pm 180^\circ$ e q_1 qualquer ângulo).

É ainda de salientar o facto de que a solução para a cinemática inversa só é geometricamente possível dentro do espaço de trabalho, ou seja quando $(l_1 - l_2)^2 \leq x^2 + y^2 \leq (l_1 + l_2)^2$.

Considerando a seguinte nomenclatura:

$$S_1 = \sin q_1, S_2 = \sin q_2, C_1 = \cos q_1, C_2 = \cos q_2, S_{12} = \sin(q_1 + q_2) \text{ e } C_{12} = \cos(q_1 + q_2)$$

E derivando as equações (5.1) e (5.2 e 5.3) em relação ao tempo, obtêm-se as equações para a cinemática diferencial de um robô 2R.

A equação para a cinemática diferencial directa vem:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 - l_2 C_{12} & -l_2 S_{12} \\ l_1 C_1 + l_2 C_{12} & l_2 C_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

e a equação para a cinemática diferencial inversa vem:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 S_2} \begin{bmatrix} l_2 C_{12} & l_2 S_{12} \\ -l_1 C_1 - l_2 C_{12} & -l_1 S_1 - l_2 S_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Verifica-se novamente a singularidade para $S_2 = 0$ ou seja $q_2 = 0^\circ$ ou $q_2 = 180^\circ$. Derivando novamente as equações (5.4) e (5.5) em relação ao tempo, obtêm-se agora as relações cinemáticas diferenciais de segunda ordem de um robô 2R.

A relação cinemática diferencial directa de segunda ordem é:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 & -l_2 S_{12} \\ l_1 C_1 & l_2 C_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -l_1 C_1 & l_2 C_{12} \\ l_1 S_1 & l_2 S_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1^2 \\ \dot{q}_2^2 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

e a relação cinemática diferencial inversa de segunda ordem é:

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 S_2} \begin{bmatrix} l_2 C_{12} & l_2 S_{12} \\ -l_1 C_1 & -l_1 S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \frac{1}{l_1 l_2 S_2} \begin{bmatrix} l_1 l_2 C_2 & l_2^2 \\ -l_1^2 & -l_1 l_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1^2 \\ \dot{q}_2^2 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

No cálculo da trajectória, o planeador deve ter em atenção o esforço a realizar pelos motores do manipulador durante a trajectória, de modo a que esta não exceda o binário máximo que os motores possam suportar. Para esse fim, o modelo dinâmico tem um papel fundamental no desenvolvimento da trajectória. Este modelo pode ser determinado, por exemplo, a partir do formalismo de Lagrange:

$$L = E_c - E_p; \quad (5.8)$$

$$T_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i}; \quad (5.9)$$

onde:

L é o lagrangeano;

E_c é a energia cinética;

E_p é a energia potencial;

T_i é o binário generalizado no eixo i ($i = 1, 2, \dots, n$);

q_i é a posição generalizada no eixo i ;

$\dot{q}_i$ é a velocidade generalizada no eixo i .

As equações da dinâmica para um manipulador robótico planar encontram-se na equação (5.10): Sendo $\mathbf{T}$ o vector $n \times 1$ relativo aos binários dos actuadores; $\mathbf{J}$ a matriz das inércias $n \times n$; $\mathbf{C}$ a matriz $n \times 1$ dos binários coriolis/centrípetos; $\mathbf{G}$ o vector $n \times 1$ dos binários gravitacionais; $\mathbf{q}$, $\dot{\mathbf{q}}$ e $\ddot{\mathbf{q}}$ são os vectores $n \times 1$ da posição, velocidade e aceleração das juntas, respectivamente.

$$\mathbf{T} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (5.10)$$

A partir da equação de Lagrange (5.9) e das equações das energias cinética e potencial podem-se determinar as equações dos binários T_i relativos à junta $i = \{1, 2\}$.

$$\begin{cases} T_1 = j_{11}\ddot{q}_1 + j_{12}\ddot{q}_2 + c_{111}\dot{q}_1^2 + c_{122}\dot{q}_2^2 + c_{112}\dot{q}_1\dot{q}_2 + g_1 \\ T_2 = j_{21}\ddot{q}_1 + j_{22}\ddot{q}_2 + c_{211}\dot{q}_1^2 + c_{222}\dot{q}_2^2 + c_{221}\dot{q}_1\dot{q}_2 + g_2 \end{cases} \quad (5.11)$$

onde:

os símbolos j_{11} e j_{22} representam as inércias principais e $j_{12} = j_{21}$ é a inércia de acoplamento:

$$\begin{cases} j_{11} = m_1 l_1^2 + m_2 (l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos q_2) \\ j_{12} = j_{21} = m_2 (l_2^2 + l_1 l_2 \cos q_2) \\ j_{22} = m_2 l_2^2 \end{cases} \quad (5.12)$$

os símbolos c_{111} , c_{122} , c_{112} , c_{211} , c_{222} e c_{221} representam termos coriolis/centrípetos:

$$\begin{cases} c_{111} = 0 \\ c_{122} = -m_2 l_1 l_2 \sin q_2 \\ c_{112} = -2m_2 l_1 l_2 \sin q_2 \\ c_{211} = m_2 l_1 l_2 \sin q_2 \\ c_{222} = 0 \\ c_{221} = 0 \end{cases} \quad (5.13)$$

e os símbolos g_1 e g_2 são os termos gravitacionais:

$$\begin{cases} g_1 = g[(m_1 + m_2)l_1 \cos q_1 + m_2 l_2 \cos q_{12}] \\ g_2 = g m_2 l_2 \cos q_{12} \end{cases} \quad (5.14)$$

5.2.2. APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS NA ROBÓTICA

Os AGs têm sido aplicados em diversos campos da robótica, nomeadamente: no planeamento de trajectórias para robôs móveis [33, 34], na geração de trajectórias para manipuladores robóticos [35, 36], na selecção ou síntese de manipuladores [37, 38], na locomoção de robôs [39, 40], na calibração de manipuladores [41, 42], entre outros.

O primeiro a aplicar os AGs ao planeamento de trajectórias foi Davidor [43]. Para esse fim, usou um vector binário com comprimento variável para representar a trajectória 3R e mediu o seu desempenho através do erro entre a trajectória pretendida e a realizada. Para determinar as configurações do manipulador adoptou a cinemática inversa. Para um robô 7R outra aplicação semelhante foi proposta por Nearchour e Aspragathos [44]. Neste problema, foi considerado o movimento ponto-a-ponto do manipulador robótico num ambiente com obstáculos. O problema consistiu em determinar a configuração que o manipulador deveria adoptar para posicionar e orientar o órgão terminal. Também Lavoie e Boudreau [35] resolveram um problema semelhante para manipuladores com 7 ou 10 graus de liberdade. Na resolução do problema foi usada a cinemática inversa, devendo passar o manipulador pelos pontos intermédios pré-definidos. O AG tinha como objectivo minimizar o deslocamento angular do manipulador, sem colidir com os obstáculos do ambiente de trabalho. Por outro lado, Doyle e Jones [45] propuseram um AG para determinar as configurações sucessivas de um manipulador. O algoritmo procedia à pesquisa do espaço das configurações, de modo a encontrar o melhor caminho.

5.3. PLANEAMENTO DE TRAJECTÓRIAS UTILIZANDO AGS

5.3.1. INTRODUÇÃO

Nesta subsecção é desenvolvido um algoritmo tendo em vista a geração de trajectórias para um manipulador 2R (R - articulação rotacional), de modo a aplicar o algoritmo a um

modelo do membro superior do ser humano, tendo como objectivo a minimização do deslocamento angular.

O método proposto adopta um AG que minimiza, não somente os deslocamentos angulares dos braços, mas que também garante que o ponto de destino é alcançado.

Nesta ordem de ideias, esta subsecção está organizada da seguinte maneira. Na subsecção 5.3.2 é descrito o problema que se pretende resolver. De seguida, na subsecção 5.3.3 é proposta a representação usada pelo AG para determinar as trajectórias. Nas subsecções 5.3.4 e 5.3.5 é verificado o comportamento do AG com a variação da probabilidade de cruzamento e a probabilidade de mutação. Nas subsecções 5.3.6 e 5.3.7 é analisado o comportamento do AG para uma variação dos coeficientes da função aptidão e do critério de paragem. Com vista a testar a robustez do AG, são realizadas na subsecção 5.3.8 experiências para várias trajectórias no espaço operacional. Por último, na subsecção 5.3.9 é analisada a evolução temporal das posições e velocidades respeitantes às experiências.

5.3.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho é considerado um manipulador constituído por dois elos rotacionais, que se pretende mover entre um determinado ponto inicial e um ponto final. Os incrementos angulares dos elos do robô devem ser minimizados no cálculo dessa trajectória. O robô é constituído por dois elos, perfazendo um comprimento total de $l_1 + l_2 = 2$ [m], tendo cada elo um comprimento de $l_i = 1$ [m], ($i = 1, 2$). Como o que se pretende é minimizar os deslocamentos angulares, com vista a tornar o algoritmo mais eficiente ao nível do tempo de computação, o problema será resolvido através da cinemática directa.

A configuração inicial do robô dependerá do ponto de partida. Assim, para um ponto inicial $P_i = (0, -2)$ [m] corresponderá no espaço das juntas uma configuração inicial angular de $Q_i = (-90, 0)$ [graus]. Para o cálculo da trajectória será usado um AG onde a representação da solução é um cromossoma constituído por $N = 15$ genes.

5.3.3. REPRESENTAÇÃO DA TRAJECTÓRIA

No AG implementado para calcular as trajectórias do robô, a trajectória é codificada num vector de valores reais, conforme ilustra a figura 5.2:

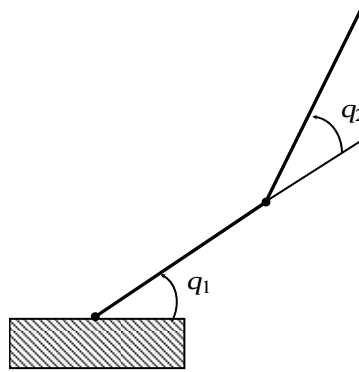


Figura 5.2 – Robô de dois elos

Assim, as trajectórias são codificadas através dos deslocamentos angulares das juntas do robô, num vector de incrementos angulares:

$$\left[\left(\Delta q_1^{(1,T)}, \Delta q_2^{(1,T)} \right), \dots, \left(\Delta q_1^{(j,T)}, \Delta q_2^{(j,T)} \right), \dots, \left(\Delta q_1^{(N,T)}, \Delta q_2^{(N,T)} \right) \right] \quad (5.15)$$

O incremento da junta i ($i = 1, 2$) na posição intermédia j ($j = 1, 2, \dots, N$) e na geração T é designado por $\Delta q_i^{(j,T)}$. O vector (5.15) é constituído por $N = 15$ configurações (genes) e cada configuração é formada pelo par de valores relativos aos incrementos das juntas. Os valores $\Delta q_i^{(j,0)}$ são inicializados no intervalo $]-0,8, +0,8]$ [rad]. Consequentemente, o gene é composto por um par de valores, sendo o primeiro valor respeitante ao deslocamento angular do “ombro” do robô e o segundo valor respeitante ao deslocamento angular do “cotovelo” do robô.

Para determinar a configuração da posição angular intermédia j do robô $q_i^{(j,T)}$, adiciona-se ao valor da posição inicial q_{0i} o somatório dos deslocamentos angulares do cromossoma até essa posição j . Assim, o valor do ângulo j do robô na posição i é dado pela seguinte expressão:

$$q_i^{(j,T)} = q_{0i} + \sum_{k=1}^j \Delta q_i^{(k,T)} \quad (5.16)$$

Para a configuração da posição final, o valor dos ângulos é obtido através de:

$$\left[\left(q_{01} + \sum_{k=1}^{15} \Delta q_1^{(k,T)} \right), \left(q_{02} + \sum_{k=1}^{15} \Delta q_2^{(k,T)} \right) \right] \quad (5.17)$$

O desvio angular máximo permitido a cada junta entre duas posições consecutivas é de $\Delta q_{i\max} = 0,8$ [rad].

As características do AG utilizado nas simulações são as seguintes:

A população inicial constituída por $P = 100$ vectores (cromossomas) é gerada aleatoriamente e, de seguida, a pesquisa é efectuada através dessa população. O método de selecção utilizado consiste na selecção por torneio, geracional e elitista. De seguida, são aplicados os operadores de cruzamento e mutação. Para o cruzamento, os elementos são agrupados em pares, sobre os quais é executado o operador de cruzamento uniforme. Como o operador de cruzamento é de segregação, os pontos de cruzamento só podem ocorrer entre configurações (*i.e.*, o operador de cruzamento não pode “cortar” uma configuração ao meio). O critério de paragem utilizado verifica o número de gerações das simulações e foi fixado em $T_{\max} = 6000$.

A função aptidão escolhida levou em conta os requisitos do problema, ou seja, obter uma trajectória suave capaz de atingir o ponto terminal desejado, de modo a que as actuações nas juntas sejam reduzidas. Para tal, utilizou-se a expressão (5.18) cujo primeiro termo visa garantir que o ponto pretendido é realmente alcançado e o segundo termo contribui para que o custo da trajectória ao nível da actuação nas juntas seja minimizado.

$$f = \alpha_1 \cdot \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_{if}^{(k,T)} \right)^2 + \alpha_2 \cdot \sum_{k=1}^{14} \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_i^{(k,T)} \right)^2 \quad (5.18)$$

onde:

$\Delta q_{if}^{(k,T)}$ é o deslocamento angular da junta i , necessário para atingir o ângulo correspondente ao ponto final a partir da penúltima posição angular da junta i ;

α_1 e α_2 são os pesos atribuídos a cada factor;

$\Delta q_i^{(k,T)}$ é o incremento angular correspondente ao alelo i do gene k ;

T é a geração;

k é o número do gene.

O facto de se utilizar a soma dos quadrados permite suavizar a trajectória angular, quer ao nível da junta 1, quer ao nível da junta 2. Da mesma forma, a expressão leva a que a aproximação ao ponto final não tenha uma preponderância do ponto terminal do robô. Para evitar que a solução onde o robô permanece no ponto de partida tenha um desempenho superior a soluções onde o robô se desloca no sentido do ponto que se pretende atingir, o peso α_1 deve ser sempre superior ao peso α_2 .

O algoritmo genético com as características atrás enunciadas será:

```
Início
Gera aleatoriamente população de trajectórias
Avalia
Geração=0
Selecciona por torneio
Cruzamento uniforme
Mutação
Avalia
Gera o = Gera o +1
Até Gera o=Tmax
Fim
```

Uma vez que o significado dos vários parâmetros está definido   preciso quantificá-los. Para isso, foram realizadas experiências no sentido de apurar qual o melhor valor para esses parâmetros, assim como o melhor balanceamento entre eles. Para tal, levou-se em considera o factores como o tempo de computa o, a manuten o da diversidade da popula o e a eficiência do critério de paragem.

5.3.4. COMPORTAMENTO DO AG COM A VARIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE CRUZAMENTO

INTRODUÇÃO

Para verificar o comportamento do AG com a variação da probabilidade de cruzamento P_c , foram realizadas simulações, mantendo todos os outros parâmetros constantes e variando apenas a probabilidade de cruzamento.

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES OBTIDOS PARA UMA PROBABILIDADE DE CRUZAMENTO $P_c=0,4$

Esta experiência consiste em realizar a trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$, com uma probabilidade de mutação de $P_m = 0,02$. Os pesos da função aptidão são $\alpha_1 = 13 \cdot 10^7$ e $\alpha_2 = 10^7$, ficando a função aptidão assim definida como:

$$f = 13 \cdot 10^7 \cdot \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_{if}^{(k,T)} \right)^2 + 10^7 \cdot \sum_{k=1}^{14} \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_i^{(k,T)} \right)^2 \quad (5.19)$$

onde:

$\Delta q_{if}^{(k,T)}$ é o deslocamento angular da junta i , necessário para atingir o ângulo correspondente ao ponto final a partir da penúltima posição angular da junta i ($i=1,2$);

$\Delta q_i^{(k,T)}$ é o incremento angular correspondente ao alelo i ($i=1,2$) do gene k ($k=1,2,\dots,14$);

T é a geração;

k é o número do gene.

A geração onde foi encontrada a melhor solução ocorreu na iteração $T = 3655$. Os resultados obtidos para as sucessivas posições do robô encontram-se ilustrados na figura 5.3:

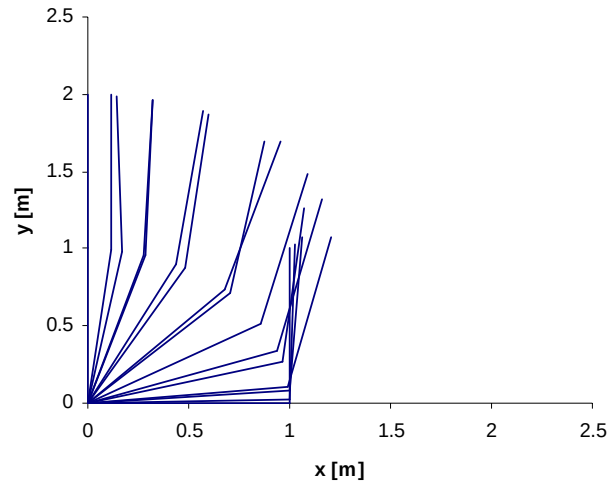


Figura 5.3 – Posições sucessivas do robô na trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com probabilidade de cruzamento de $P_c=0,4$ e $P_m=0,02$

Os resultados obtidos para a trajectória do robô no espaço das juntas e do órgão terminal no espaço operacional estão ilustradas nas figuras 5.4 e 5.5:

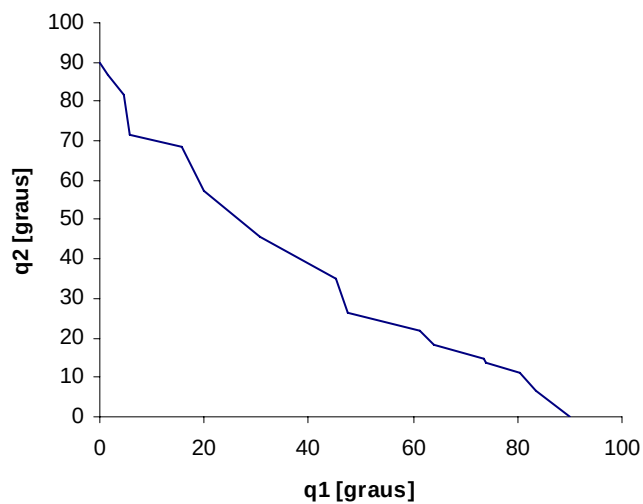


Figura 5.4 – A trajectória do robô no espaço das juntas entre os pontos $Q_i = (0,90)$ e $Q_f = (90,0)$ [graus] com probabilidade de cruzamento de $P_c = 0,4$ e $P_m = 0,02$

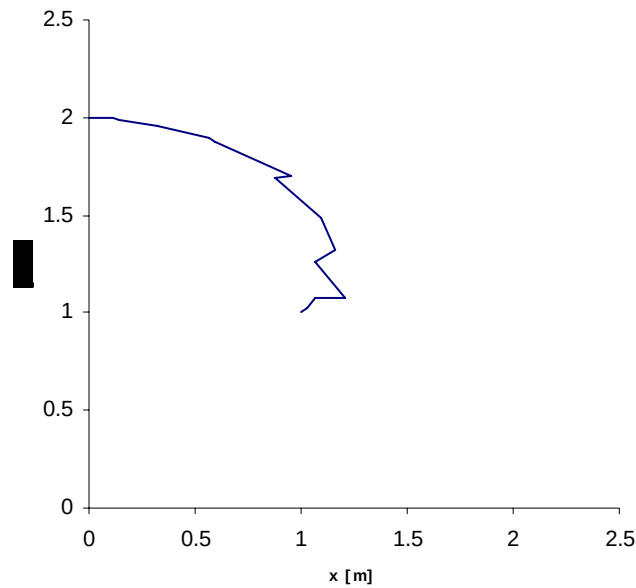


Figura 5.5 – Trajectória do órgão terminal no espaço operacional entre os pontos $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com probabilidade de cruzamento de $P_c = 0,4$ e $P_m = 0,02$

COMPARAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE CRUZAMENTO PARA 20 AGS

A comparação das simulações descritas anteriormente com todos os parâmetros inalterados, excepto a probabilidade de cruzamento, pode ser observada no gráfico da figura 5.6. Esta comparação é feita, tomando como amostra o comportamento de 20 execuções do algoritmo genético. A variação da geração onde foi encontrada a melhor solução foi a seguinte:

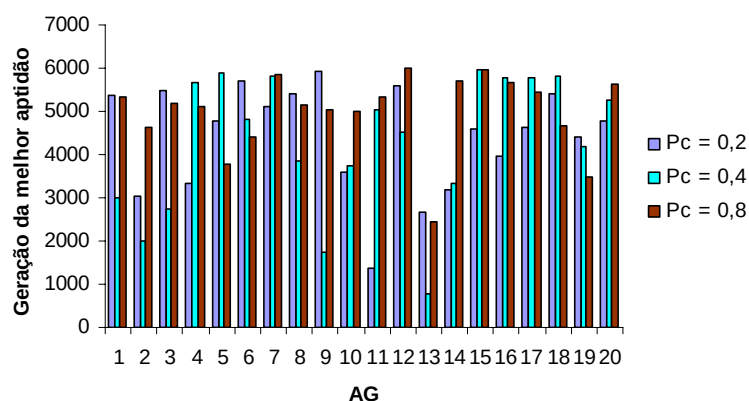


Figura 5.6 – Geração onde foi encontrada a melhor aptidão para 20 experiências com variação da probabilidade de cruzamento $P_c = \{0,2, 0,4, 0,8\}$, $P_m = 0,02$

O valor da função aptidão para várias experiências e diferentes valores da probabilidade de cruzamento está representado na figura 5.7:

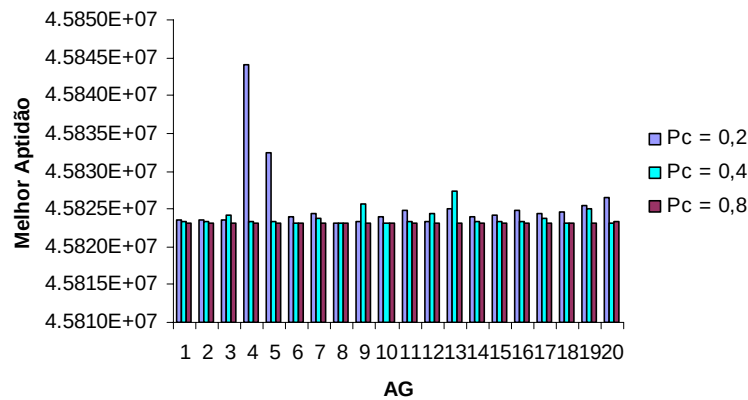


Figura 5.7 – Melhor aptidão encontrada para 20 experiências e probabilidade de cruzamento $P_c = \{0,2, 0,4, 0,8\}$, $P_m = 0,02$

CONCLUSÕES

Através das experiências realizadas verificou-se que o operador de cruzamento não tem uma grande influência no algoritmo utilizado, sendo muito mais importante por exemplo o operador de mutação, como se poderá verificar a seguir.

5.3.5. COMPORTAMENTO DO AG COM A VARIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE MUTAÇÃO

INTRODUÇÃO

Para verificar o comportamento do AG com a variação da probabilidade de mutação, P_m , foram realizadas várias simulações, mantendo todos os outros parâmetros inalterados e variando apenas P_m .

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES OBTIDOS PARA UMA $P_m = 0,04$

Esta experiência foi realizada na trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$, com uma probabilidade de cruzamento $P_m = 0,8$. Os pesos da função aptidão são $\alpha_1 = 13 \cdot 10^7$ e $\alpha_2 = 10^7$. A geração onde foi encontrada a melhor solução ocorreu na iteração $T = 2576$. Os resultados obtidos para as sucessivas posições do robô estão ilustrados na figura 5.8:

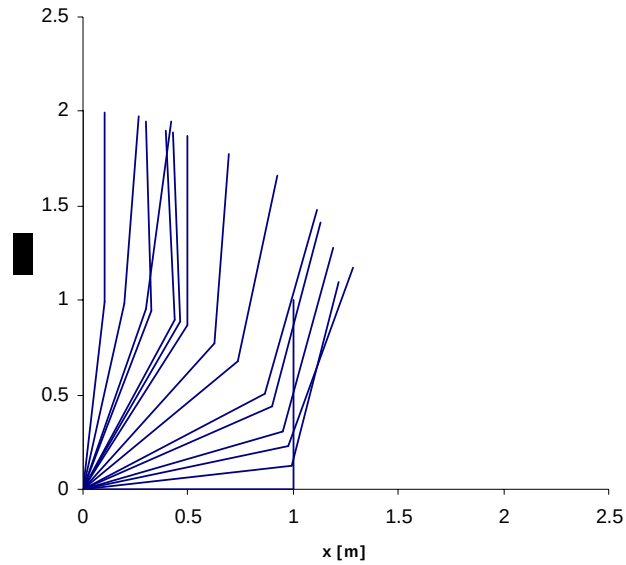


Figura 5.8 – Posições sucessivas do robô na trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com probabilidade de mutação de $P_m = 0,04$ e $P_c = 0,8$

Os resultados obtidos para a trajectória do robô no espaço das juntas e do órgão terminal no espaço operacional estão ilustrados nas figuras 5.9 e 5.10:

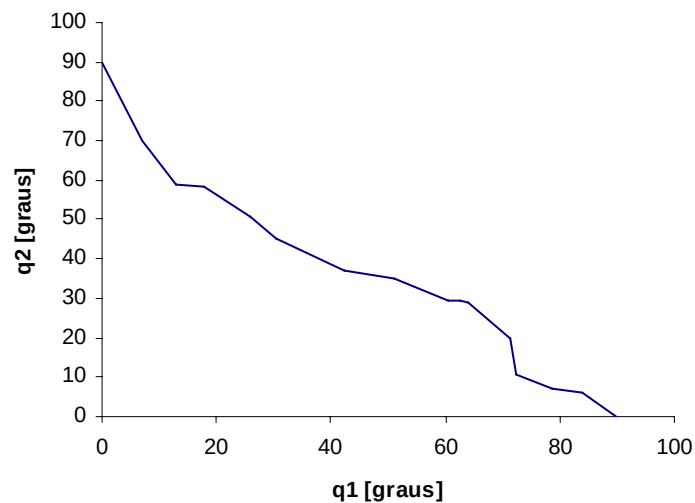


Figura 5.9 – A trajectória do robô no espaço das juntas entre os pontos $Q_i = (0,90)$ e $Q_f = (90,0)$ [graus] com probabilidade de mutação de $P_m = 0,04$ e $P_c = 0,8$

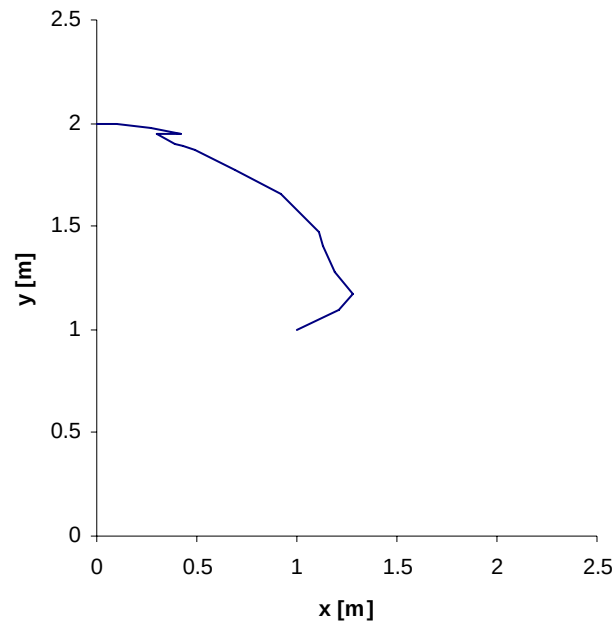


Figura 5.10 – Trajectória do órgão terminal no espaço operacional entre os pontos $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com probabilidade de mutação de $P_m = 0,04$ e $P_c = 0,8$

COMPARAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE MUTAÇÃO PARA 20 AG

A comparação atrás descrita, mantendo todos os parâmetros inalterados com excepção da probabilidade de mutação, pode ser observada no gráfico da figura 5.11. Esta comparação é feita tomando como amostra o comportamento de 20 algoritmos genéticos. A variação da geração onde foi encontrada a melhor solução foi a seguinte:

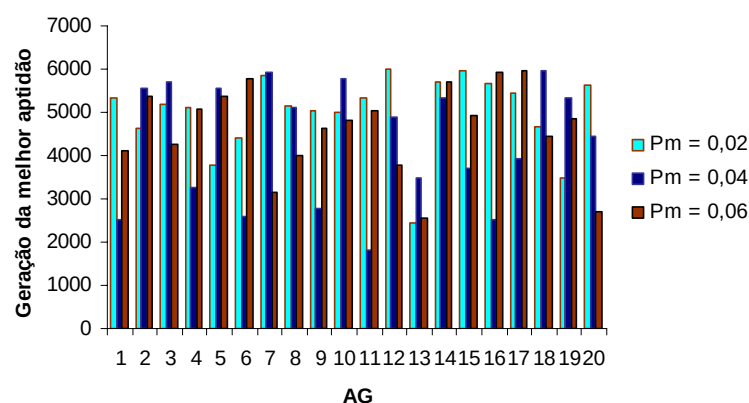


Figura 5.11 – Geração onde foi encontrada a melhor aptidão para 20 experiências com variação da probabilidade de mutação $P_m = \{0,02, 0,04, 0,06\}$ e $P_c = 0,8$

A variação do valor da função aptidão com a probabilidade de mutação está expressa na figura 5.12:

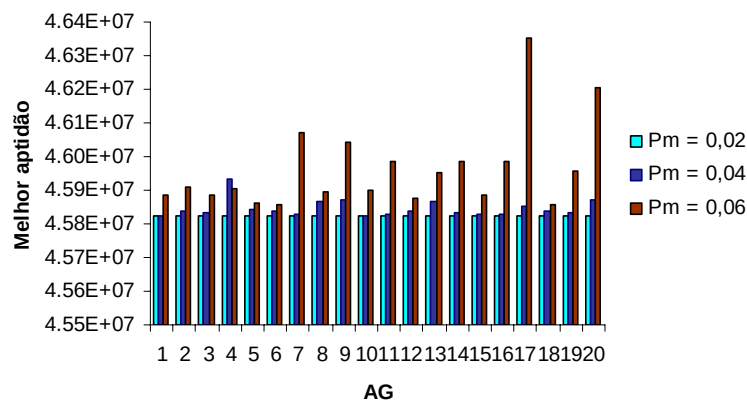


Figura 5.12 – A melhor aptidão encontrada para 20 experiências com variação da probabilidade de mutação $P_m = \{0,02, 0,04, 0,06\}$ e $P_c = 0,8$.

CONCLUSÕES

Através das experiências realizadas, verificou-se que o operador de mutação tem uma grande influência no algoritmo utilizado, sendo o grande responsável pela manutenção da diversidade da população. No entanto, se o valor da probabilidade de mutação for muito elevado, a existência de uma grande diversidade faz com que a qualidade da solução encontrada diminua. Este efeito também está relacionado com o critério de paragem utilizado ($T = 6000$ gerações).

5.3.6. COMPORTAMENTO DO AG COM A VARIAÇÃO DOS COEFICIENTES DA FUNÇÃO APTIDÃO

INTRODUÇÃO

Para verificar o comportamento do AG com a variação dos coeficientes da função aptidão foram realizadas simulações, mantendo todos os outros parâmetros inalterados e variando apenas os coeficientes da função aptidão.

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES OBTIDOS PARA $\alpha_1 = 13$ E $\alpha_2 = 2$

Esta experiência foi realizada na trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$, com uma probabilidade de cruzamento de $P_c = 0,8$ e uma probabilidade de mutação de $P_m = 0,02$. A função aptidão com os novos valores de α_1 e α_2 ficou assim definida:

$$f = 13 \cdot \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_{if}^{(k,T)} \right)^2 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{14} \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_i^{(k,T)} \right)^2 \quad (5.20)$$

A geração onde foi encontrada a melhor solução ocorreu para o caso $T = 4553$. Os resultados obtidos para as sucessivas posições do robô estão ilustrados na figura 5.13:

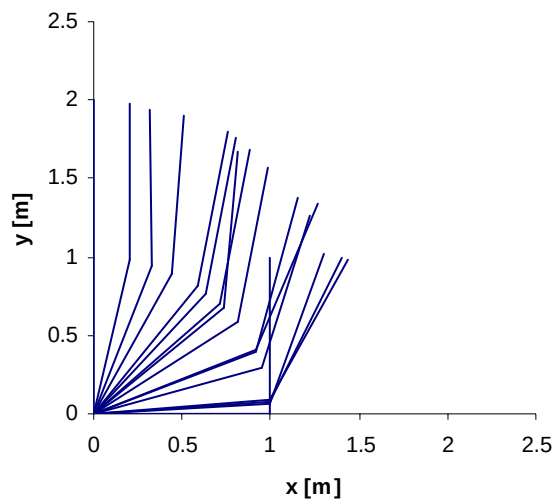


Figura 5.13 – Posições sucessivas do robô na trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$

Os resultados obtidos para a trajectória do robô no espaço das juntas e do órgão terminal no espaço operacional estão ilustrados nas figuras 5.14 e 5.15:

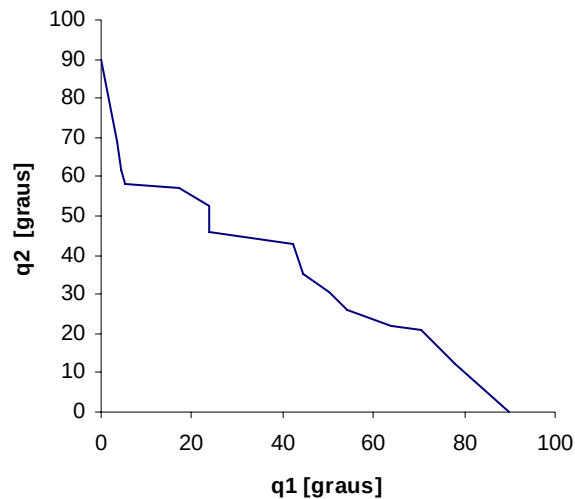


Figura 5.14 – A trajetória do robô no espaço das juntas entre os pontos $Q_i = (0,90)$ a $Q_f = (90,0)$ [graus] com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$

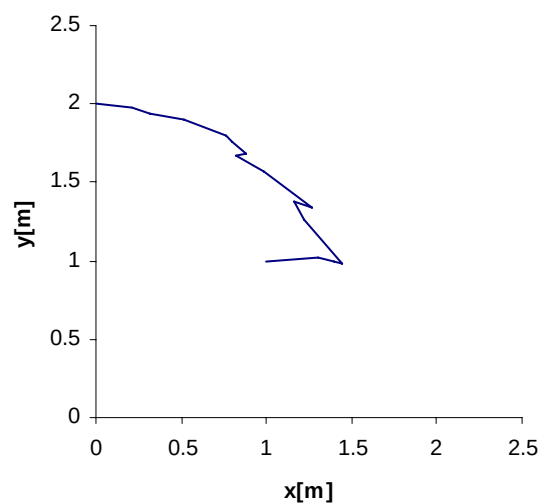


Figura 5.15 – Trajetória do órgão terminal no espaço operacional entre os pontos $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$ com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$

COMPARAÇÃO DOS VALORES DE $\alpha_1 = 13$ E $\alpha_2 = 2$ PARA 20 AGs

Nesta secção pretende-se avaliar a influência dos factores (α_1, α_2) presentes na função de aptidão, mantendo idênticos os restantes parâmetros do AG. Nota-se que variando (α_1, α_2) resultam diferentes valores de f , pelo que não são comparáveis os correspondentes valores

absolutos. Todavia, pode-se facilmente comparar a convergência e a influência de cada uma das parcelas de f .

A evolução de AG com características semelhantes ao da simulação atrás descrita, com critérios de paragem de geração e de número de repetições, pode ser observada nos gráficos das figuras 5.16 e 5.17.

A variação da geração onde foi encontrada a melhor solução foi a seguinte:

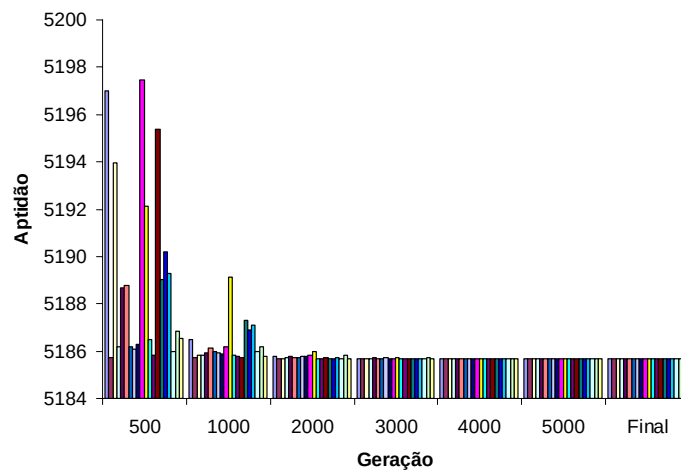


Figura 5.16 – A melhor aptidão encontrada para 20 experiências com variação da geração de paragem com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$

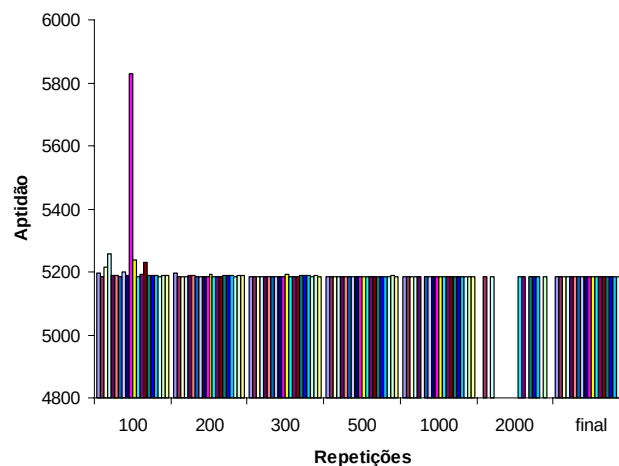


Figura 5.17 – A melhor aptidão encontrada para 20 experiências com variação do critério de paragem pelo número de repetições com coeficientes da função aptidão de $\alpha_1 = 13$ e $\alpha_2 = 2$, $P_m = 0,02$ e $P_c = 0,8$.

CONCLUSÕES

Através das experiências realizadas, verificou-se que os coeficientes da função aptidão têm uma grande influência no algoritmo utilizado. Se existir uma pressão muito baixa o algoritmo não evolui tão rapidamente quanto o desejado. Outro factor que se revelou de grande importância foi a relação de grandeza entre α_1 e α_2 . No caso onde o valor de α_1 é muito superior ao valor de α_2 o algoritmo tende para um óptimo local, com o ângulo final Δq_{if} pequeno. Se a relação de α_1 com α_2 não for suficientemente grande, o algoritmo pode escolher uma trajectória onde o incremento final Δq_{if} é desproporcionado relativamente aos restantes.

5.3.7. VARIAÇÃO DO CRITÉRIO DE PARAGEM

INTRODUÇÃO

Para verificar o comportamento do AG com a variação do critério de paragem foram realizadas simulações, mantendo todos os parâmetros inalterados e apenas variando critério de paragem. O critério de paragem permite estabelecer a relação entre a qualidade da solução e o custo computacional.

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES OBTIDOS PARA VÁRIOS CRITÉRIOS DE PARAGEM

As experiências realizadas têm por base a execução da trajectória de $P_i = (1,1)$ a $P_f = (0,2)$, variando os critérios de paragem. Os AGs foram simulados com uma probabilidade de cruzamento de $P_c = 0,8$ e probabilidade de mutação $P_m = 0,02$. Os pesos da função aptidão foram $\alpha_1 = 13 \cdot 10^7$ e $\alpha_2 = 10^7$. Ficando a função aptidão:

$$f = 13 \cdot 10^7 \cdot \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_{if}^{(k,T)} \right)^2 + 10^7 \cdot \sum_{k=1}^{14} \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_i^{(k,T)} \right)^2 \quad (5.21)$$

Foram realizadas experiências variando os critérios de paragem, onde se leva em conta o número de repetições da melhor solução encontrada. Assim, foram executados 20 AGs com um número máximo de $T_{\max} = 6000$ iterações, mas incluiu-se um contador de repetições do “melhor” valor consecutivo da função aptidão. Desta forma, é possível analisar qual o valor fornecido pelo AG no caso de se ter adoptado como critério de

paragem um número igual ou inferior ao do contador. O comportamento de 20 algoritmos genéticos para vários valores de repetições está ilustrado na figura 5.18:

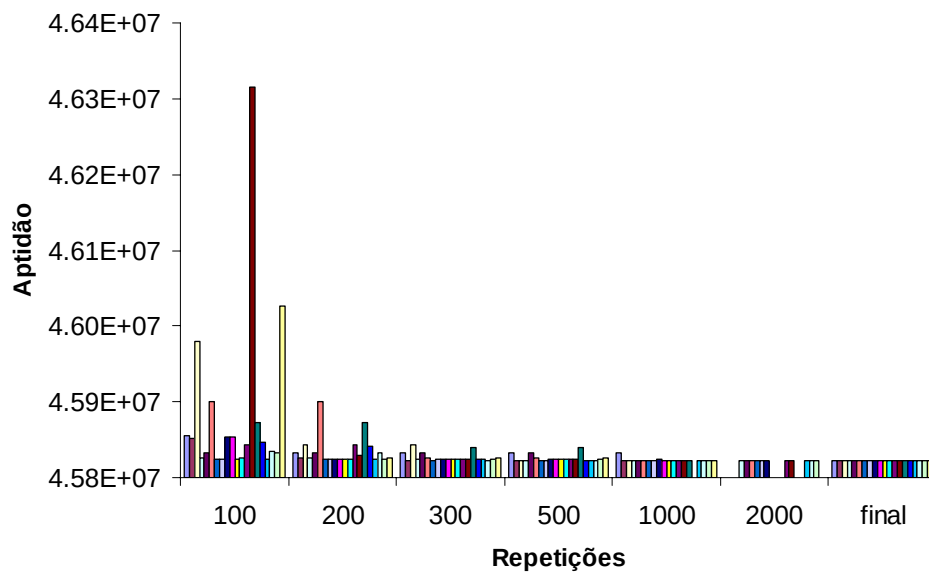


Figura 5.18 – Resultado da aptidão encontrada para várias experiências com variação do critério de paragem (número de repetições)

O comportamento de 20 algoritmos genéticos para vários valores de geração de paragem está ilustrado na figura 5.19:

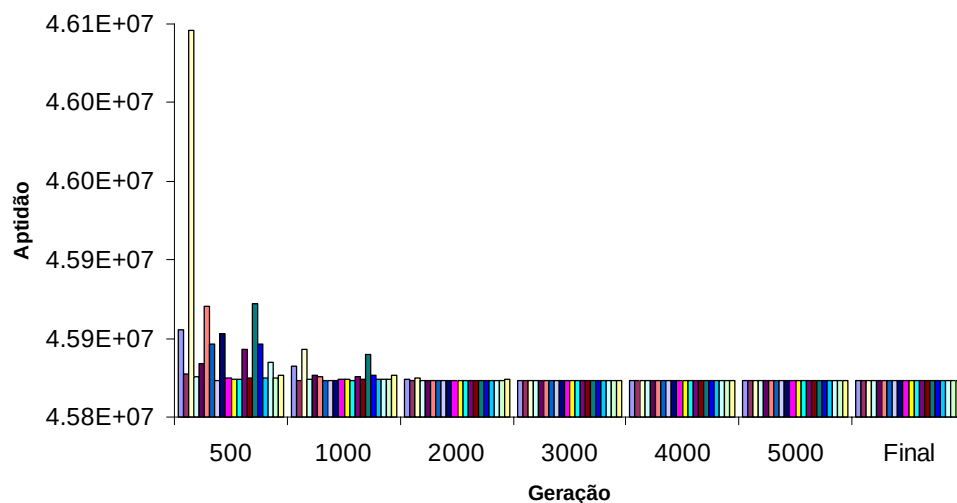


Figura 5.19 – Resultado da aptidão encontrada para várias experiências com variação do critério de paragem (número de gerações)

5.3.8. CONCLUSÕES

Verificou-se que os AG apresentam uma boa solução. No entanto, não há a garantia da solução óptima. Com o aumento do número de gerações pode-se “robustecer” o AG, de modo a obter soluções mais próximas da óptima.

5.3.9. SIMULAÇÃO PARA VÁRIAS TRAJECTÓRIAS NO ESPAÇO OPERACIONAL

Com o intuito de testar a configuração dos parâmetros escolhidos foram calculadas trajectórias entre vários pontos do espaço operacional.

No AG adoptou-se uma probabilidade de cruzamento $P_c = 0,08$ e uma probabilidade de mutação $P_m = 0,04$. Os coeficientes utilizados são $\alpha_1 = 13 \cdot 10^7$ e $\alpha_2 = 10^7$, obtendo-se assim a seguinte função aptidão:

$$f = 13 \cdot 10^7 \cdot \sum_{i=1}^2 (\Delta q_{if}^{(k,T)})^2 + 10^7 \cdot \sum_{k=1}^{14} \sum_{i=1}^2 (\Delta q_i^{(k,T)})^2 \quad (5.22)$$

O critério de paragem da simulação consiste no número máximo de gerações $T_{\max} = 6000$.

Os parâmetros assim definidos são utilizados nas simulações para várias trajectórias no espaço de operacional.

As experiências foram realizadas para as trajectórias cujos pontos iniciais P_i e finais P_f estão descritos na tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Pontos iniciais P_i e finais P_f das trajectórias simuladas

Trajectória	P_i	P_f
a)	(1 , -1)	(2 , 0)
b)	(1 , -1)	(1 , 0)
c)	(1 , -1)	(1 , 1)
d)	(1 , 1)	(0 , 2)

POSIÇÕES SUCESSIVAS DO ROBÔ

Os resultados obtidos para as posições sucessivas do robô nas diferentes trajetórias estão ilustrados na figura 5.20:

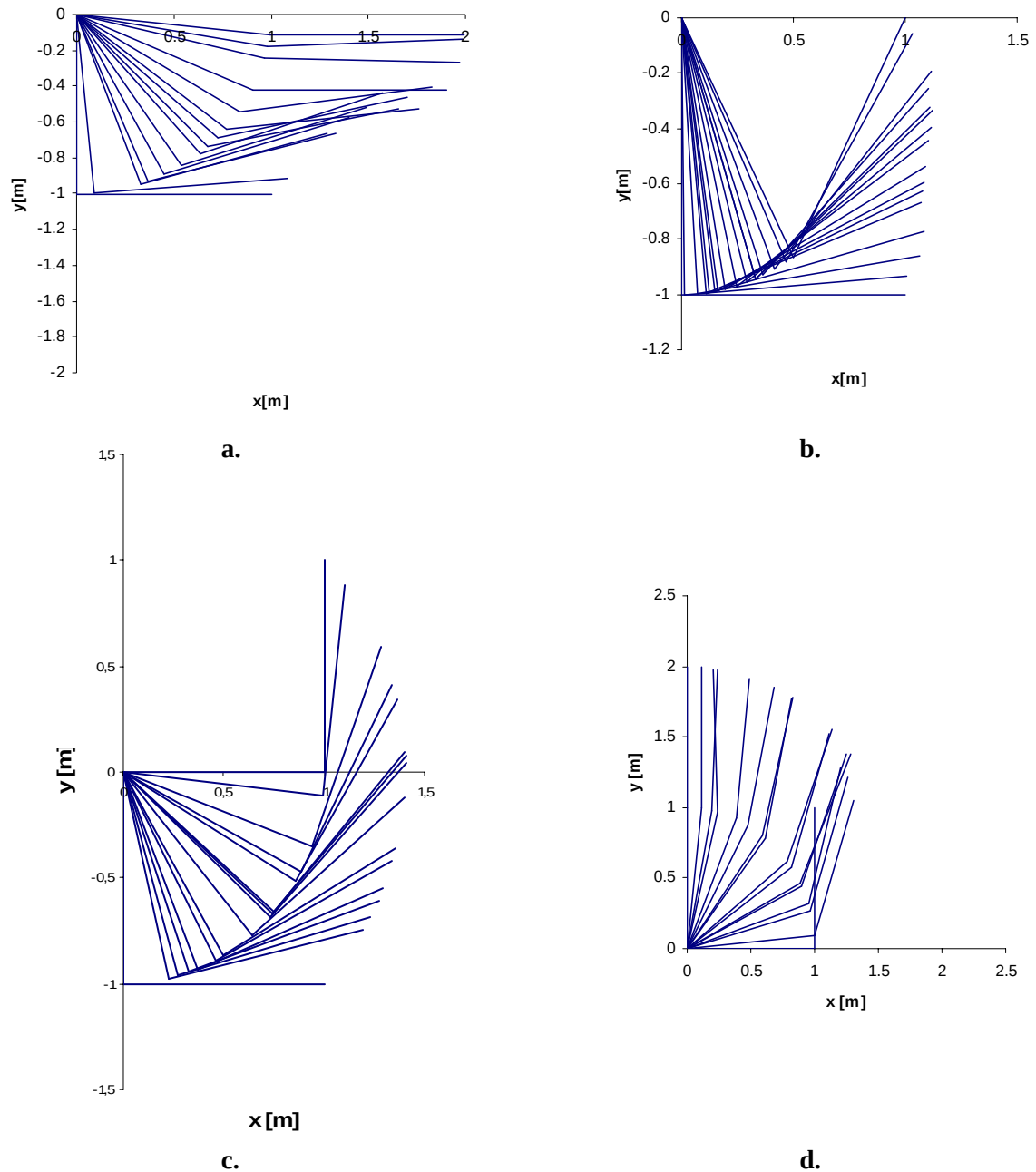


Figura 5.20 – Sucessivas posições do robô na trajetória:

- a. de $P_i = (1, -1)$ a $P_f = (2, 0)$
- b. de $P_i = (1, -1)$ a $P_f = (1, 0)$
- c. de $P_i = (1, -1)$ a $P_f = (2, 0)$
- d. de $P_i = (1, 1)$ a $P_f = (0, 2)$

TRAJECTÓRIA DO ROBÔ NO ESPAÇO DAS JUNTAS

Os resultados obtidos para as trajectórias do robô no espaço das juntas estão ilustrados na figura 5.21:

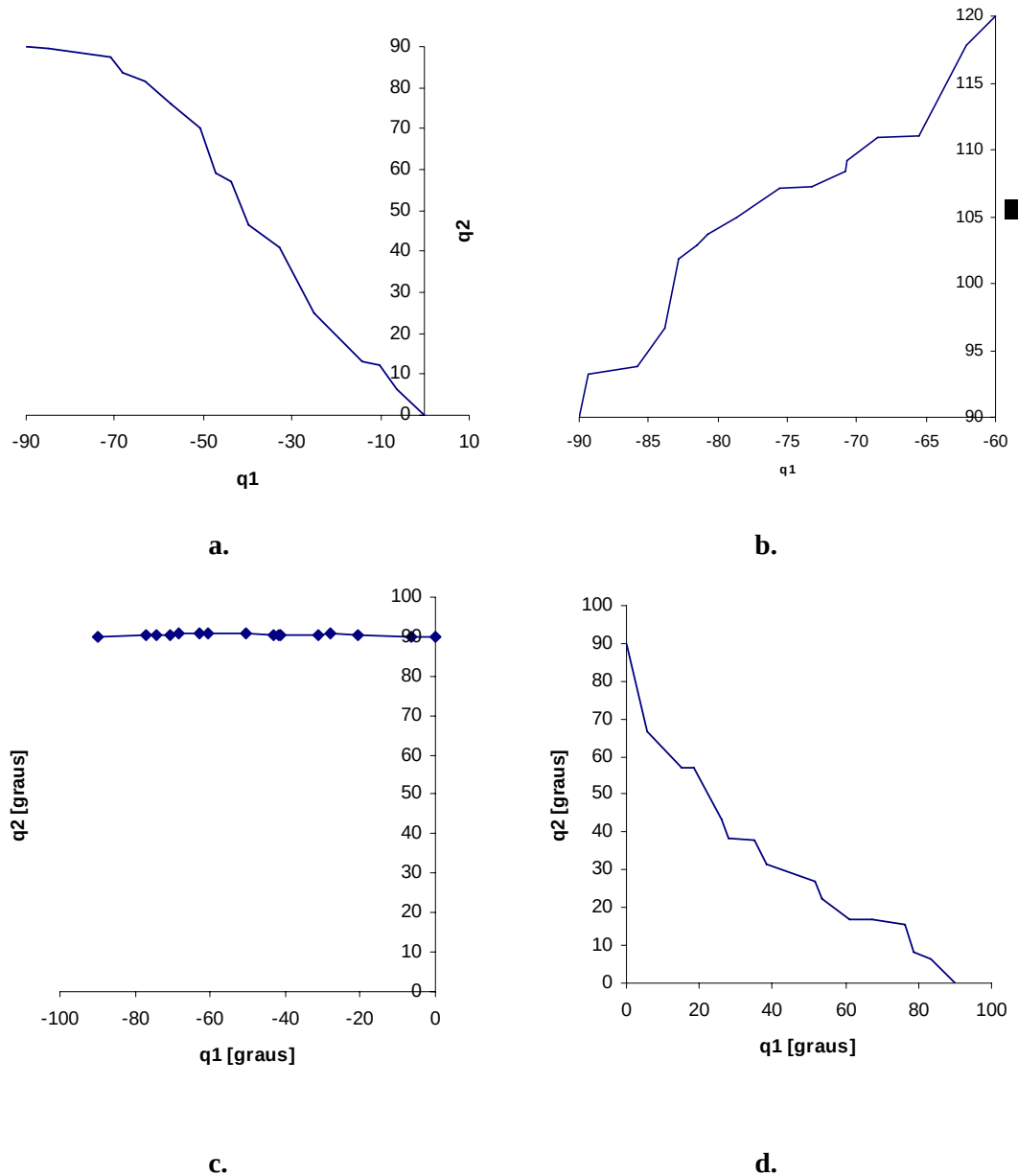


Figura 5.21 – A trajectória do robô no espaço das juntas entre os pontos:

- a. $Q_i = (-90, 90)$ a $Q_f = (0, 0)$ [graus]
- b. $Q_i = (-90, 90)$ a $Q_f = (-60, 120)$ [graus]
- c. $Q_i = (-90, 90)$ a $Q_f = (0, 90)$ [graus]
- d. $Q_i = (0, 90)$ a $Q_f = (90, 0)$ [graus]

Os resultados obtidos para as trajectórias do órgão terminal do robô no espaço operacional estão ilustrados na figura 5.22:

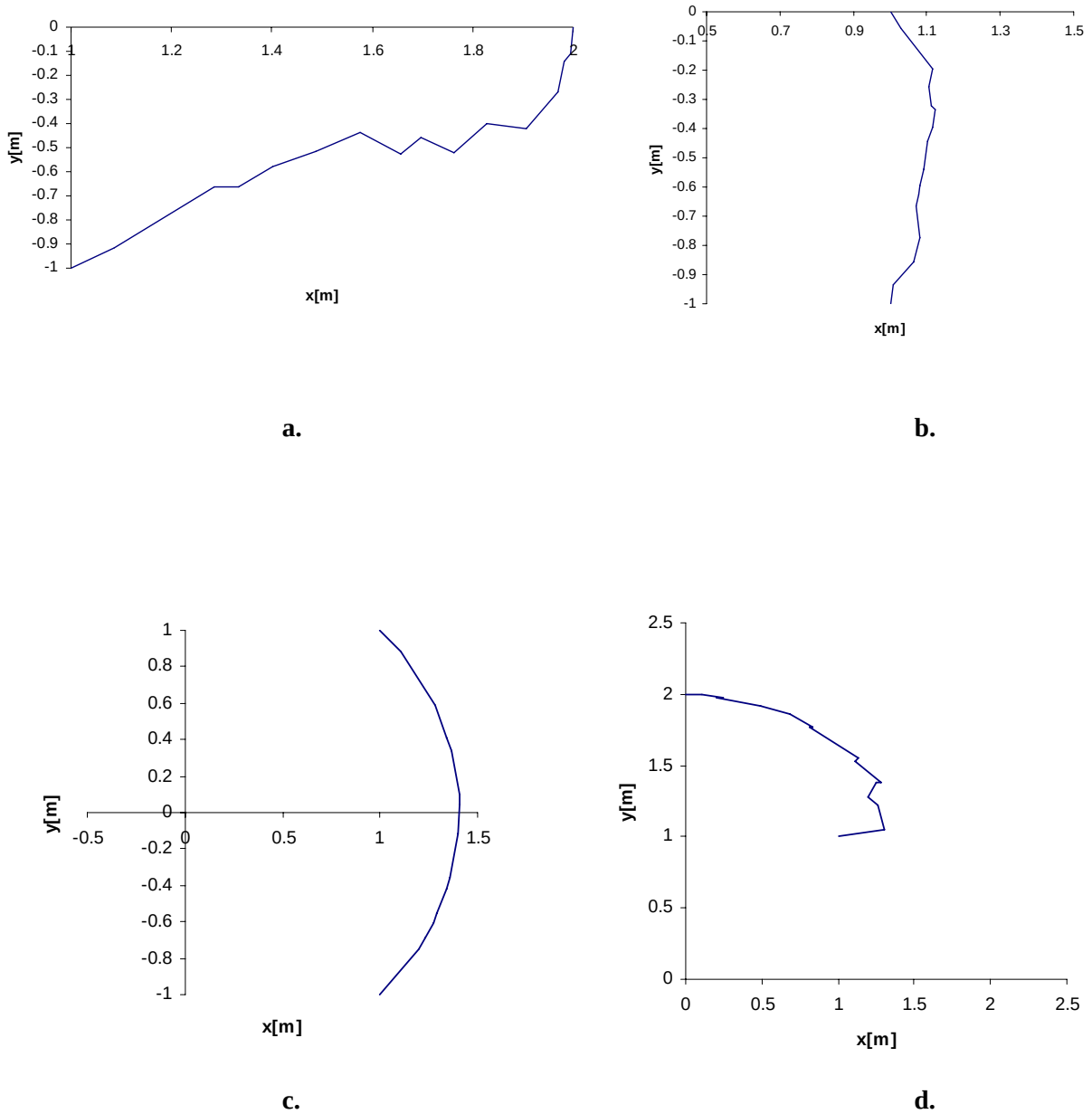


Figura 5.22 – Trajectória do órgão terminal no espaço operacional entre os pontos:

- a. $P_i = (1, -1)$ a $P_f = (2, 0)$
- b. $P_i = (1, -1)$ a $P_f = (1, 0)$
- c. $P_i = (1, -1)$ a $P_f = (2, 0)$
- d. $P_i = (1, 1)$ a $P_f = (0, 2)$

EVOLUÇÃO DO AG AO LONGO DAS GERAÇÕES PARA A TRAJECTÓRIA ENTRE OS PONTOS $P_i = (1, 1)$ E $P_f = (0, 2)$

Na figura 5.23 pode-se observar a evolução do algoritmo ao longo das gerações. Verifica-se que, seja a média das funções aptidão, seja a melhor aptidão, vai melhorando com as sucessivas gerações.

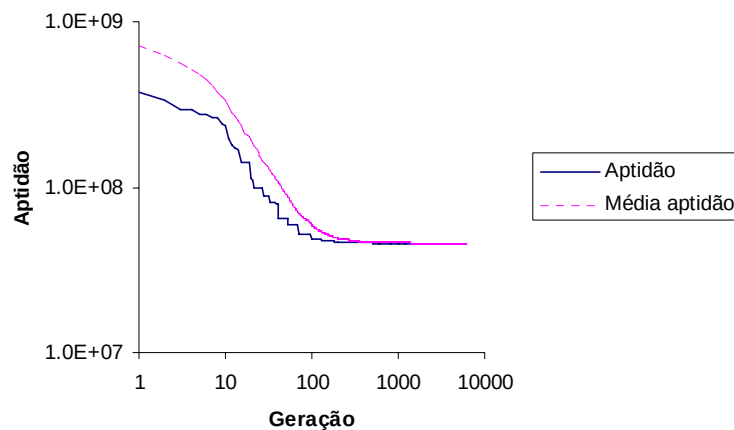


Figura 5.23 – Evolução do melhor cromossoma e da média dos cromossomas para a trajectória entre os pontos $P_i = (1, 1)$ e $P_f = (0, 2)$

Observando o intervalo entre a geração $T = 4000$ e a geração $T = 6000$, distinguem-se alguns detalhes da evolução temporal:

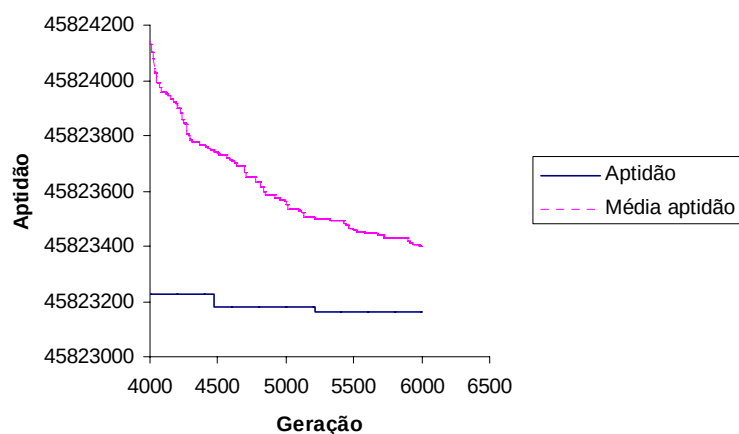


Figura 5.24 – Evolução do melhor cromossoma e da média dos cromossomas ao longo de um AG para a trajectória entre os pontos $P_i = (1,1)$ e $P_f = (0,2)$ entre as gerações $T = 4000$ e $T = 6000$.

5.3.10. EVOLUÇÃO TEMPORAL

INTRODUÇÃO

Nesta subsecção adopta-se um AG com as mesmas características da subsecção 5.3.9. De seguida é observada a evolução temporal das posições e velocidades respeitantes às experiências, tendo-se em atenção a ondulação residual (*ripple*). Para tal, considerou-se que cada incremento angular se faz ao longo de um valor normalizado de $\Delta t = 1$ [s].

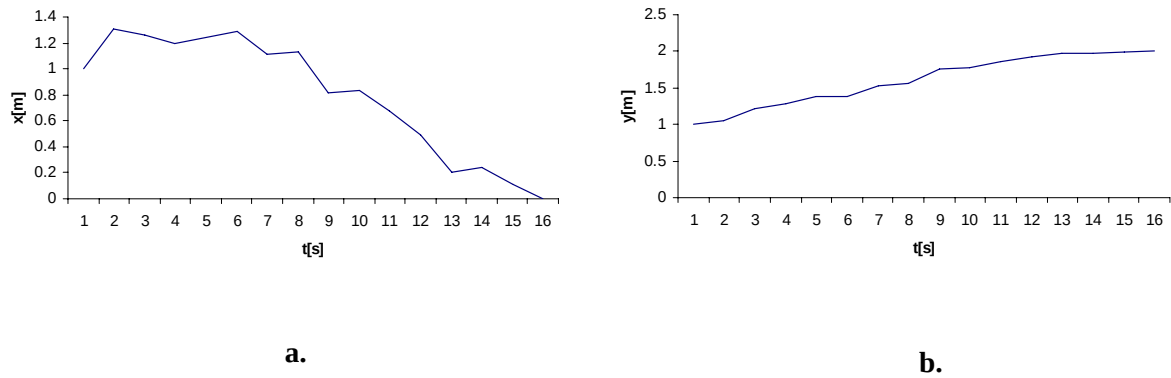


Figura 5.25 – Evolução temporal do órgão terminal:
a. segundo o eixo dos xx
b. segundo o eixo dos yy

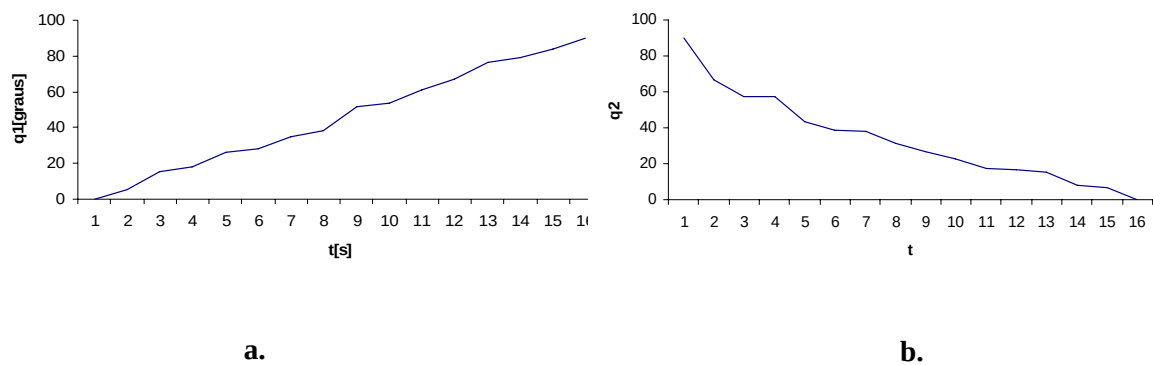


Figura 5.26 – Evolução temporal das posições angulares
a. da junta 1
b. da junta 2

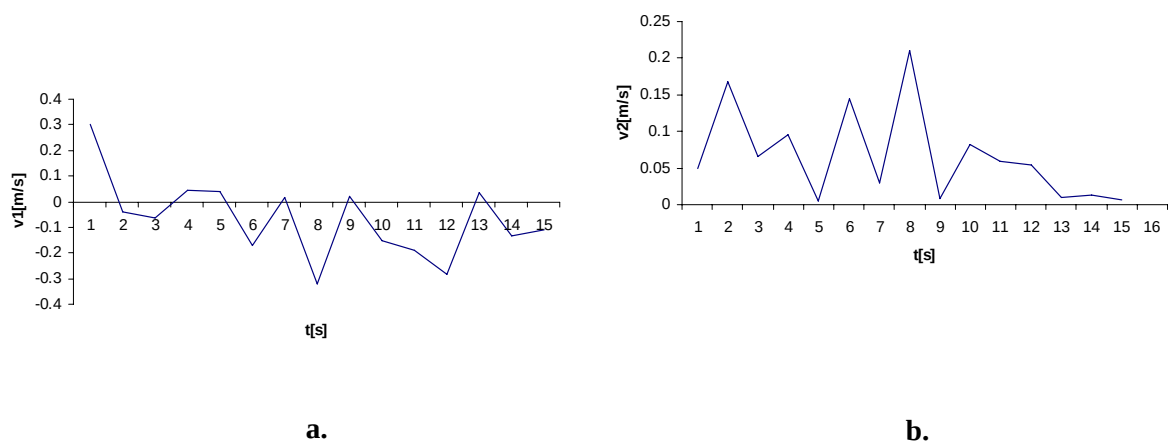


Figura 5.27 – Evolução temporal das velocidades do órgão terminal:

- a. segundo o eixo dos xx
- b. segundo o eixo dos yy

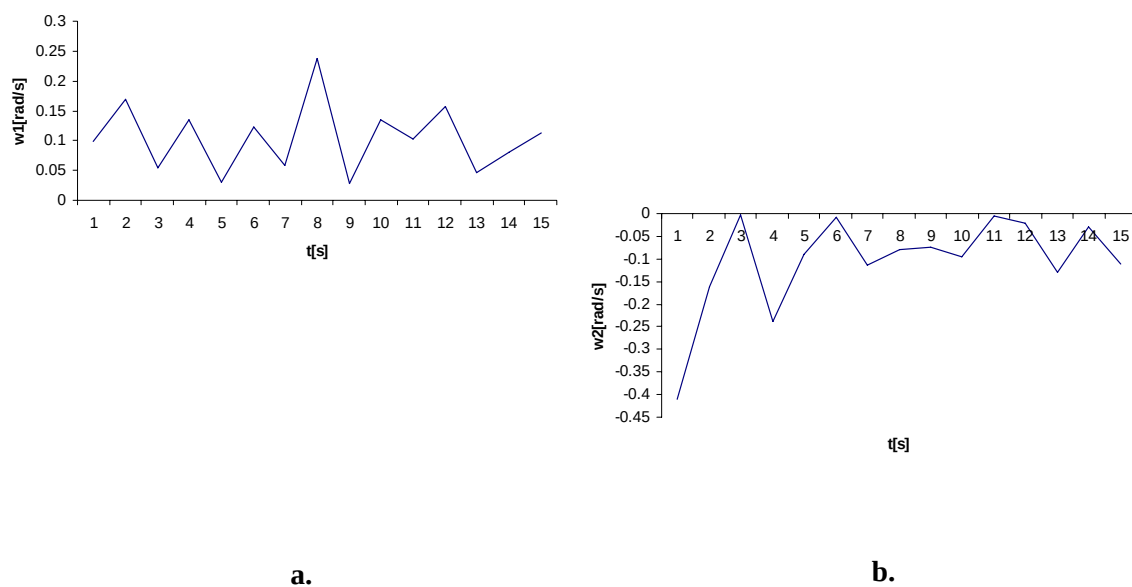


Figura 5.28 – Evolução temporal das velocidades:

- a. da junta 1
- b. da junta 2

5.4. O MODELO DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA

5.4.1. INTRODUÇÃO

Nesta subsecção é descrito o modelo do membro superior humano. De seguida é apresentado um algoritmo também de inspiração biológica, nomeadamente um AG, para o cálculo de trajectórias do braço.

Nesta ordem de ideias, na subsecção 5.4.2 é descrito o modelo do braço biológico, assim como o seu modo de actuação, tendo em consideração apenas o plano sagital. Na subsecção 5.4.3 é definido o AG a utilizar na determinação das trajectórias. De seguida, na subsecção 5.4.4 são apresentados os resultados das experiências realizadas. Por último, na subsecção 5.4.5 são apresentadas as conclusões sobre as experiências realizadas.

5.4.2. O MODELO DO MEMBRO SUPERIOR HUMANO

O modelo do membro superior humano (MSH) inspirou-se no funcionamento do MSH já apresentado no capítulo 3. A análise biomecânica do MSH mostra que o seu movimento envolve estruturas musculares e articulares complexas. Devido à interacção e às diferentes funcionalidades dessas estruturas, que nem sempre estão relacionadas directamente com a criação do movimento, não foi ainda possível atingir-se uma compreensão da totalidade dos fenómenos que ocorrem. Assim, para o desenvolvimento do modelo do MSH foram considerados os músculos e as estruturas ósseas mais relevantes na movimentação do MSH no plano vertical anteroposterior (plano sagital).

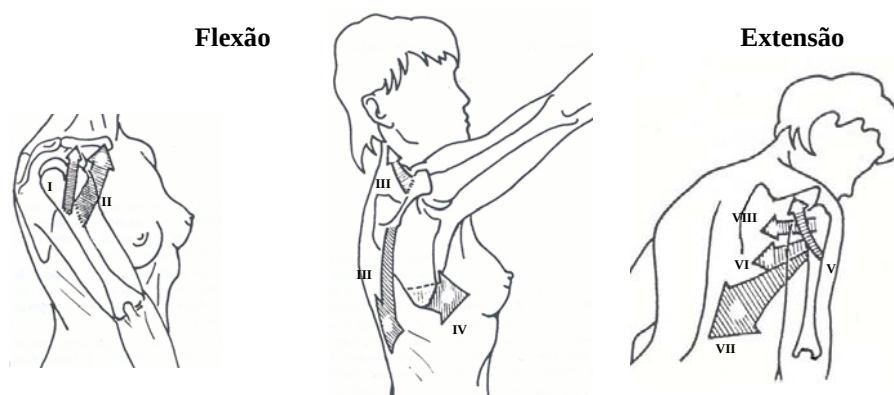


Figura 5.29 – Músculos mais relevantes na flexão e extensão do braço (I-deltóide anterior, II-grande peitoral, III-trapézio, IV-serrátil, V-deltóide posterior, VI-redondo maior, VII-grande dorsal, VIII-redondo menor)

Para o movimento do ombro, no plano sagital, são considerados dois mecanismos fundamentais:

O primeiro mecanismo consiste na conjugação das estruturas óssea (escápula, clavícula, esterno, costelas) com a estrutura muscular (serrátil, trapézio, subclávio, pequeno peitoral, elevador da escápula, rombóides). O modelo geométrico ilustrado na figura 5.31 simula estas estruturas através de dois mecanismos de compensação (h_1 e h_2) centrados na primeira articulação e capazes, quer de permanecer em repouso, quer de ter um movimento próprio controlado.

O segundo mecanismo consiste na conjugação da estrutura óssea (úmero) com a estrutura muscular (deltóide anterior, deltóide posterior, grande peitoral, redondo maior, grande dorsal). Este mecanismo tem uma posição absoluta q_1 em relação ao referencial de base e uma posição relativa q_{01} (flexão) ou q_{02} (extensão) relativamente ao mecanismo de compensação h_1 (flexão) ou h_2 (extensão), respectivamente.

A movimentação do cotovelo no plano sagital deve-se à interacção da estrutura óssea (úmero, ulna, rádio) com a estrutura muscular (bicípide braquial, braquial, tricípide braquial, ancóneo).

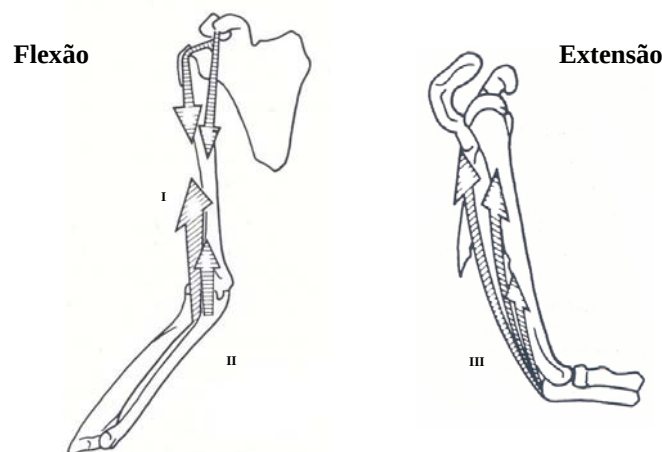


Figura 5.30 – Músculos mais relevantes na flexão e extensão do antebraço (I-bíceps braquial, II-braquial, III-tríceps braquial)

O modelo geométrico simplificado da estrutura biomecânica do braço humano no plano sagital está representado na figura 5.31.

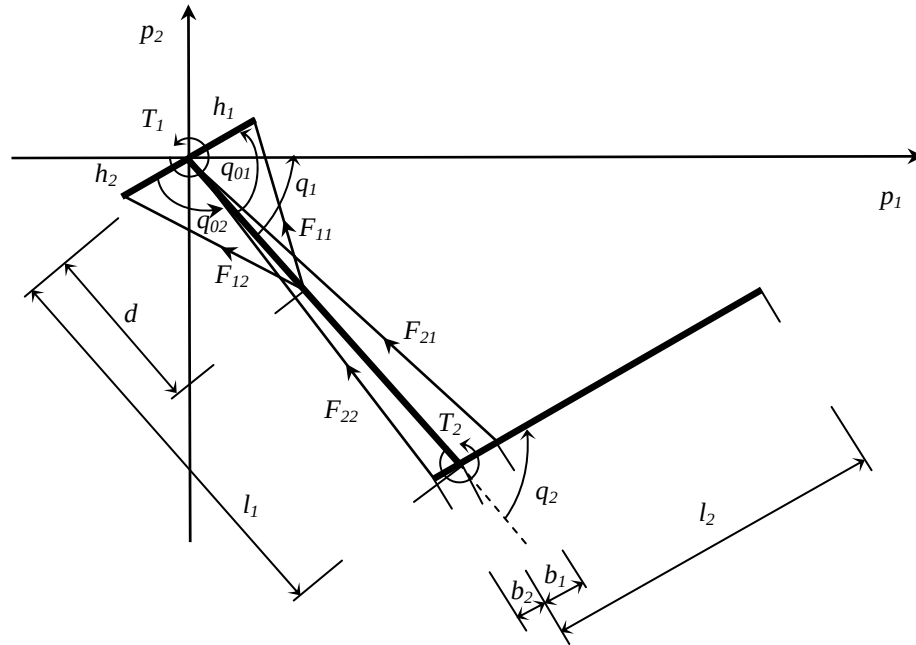


Figura 5.31 – Modelo geométrico da estrutura biomecânica do braço humano no plano sagital

Onde:

l_1 representa o comprimento do braço e l_2 do antebraço;

h_k é a dimensão dos mecanismos de compensação para a flexão ($k = 1$) e extensão ($k = 2$) do braço;

F_{1j} representa as forças dos músculos flexores ($j = 1$) e extensores ($j = 2$) do braço;

F_{2j} representa as forças dos músculos flexores ($j = 1$) e extensores ($j = 2$) do antebraço;

T_i o binário na articulação do ombro ($i = 1$) e na articulação do cotovelo ($i = 2$);

d a distância do ombro ao ponto de inserção dos músculos que actuam no braço;

b_j a distância do cotovelo ao ponto de inserção dos músculos flexores ($j = 1$) e extensores ($j = 2$) do antebraço.

No que diz respeito às relações entre as posições, velocidades e acelerações no espaço operacional e no espaço das juntas, estas são dadas pela cinemática inversa e são semelhantes às encontradas num robot, (ver páginas 101 a 103), que com actualizações de símbolos ficam:

$$q_2 = \cos^{-1} \left(\frac{p_1^2 + p_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \right) \quad (5.23)$$

$$q_1 = \tan^{-1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{l_2 S_2}{l_1 + l_2 C_2} \right) \quad (5.24)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 S_2} \begin{bmatrix} l_2 C_{12} & l_2 S_{12} \\ -l_1 C_1 - l_2 C_{12} & -l_1 S_1 - l_2 S_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 S_2} \begin{bmatrix} l_2 C_{12} & l_2 S_{12} \\ -l_1 C_1 & -l_1 S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{p}_1 \\ \ddot{p}_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{l_1 l_2 S_2} \begin{bmatrix} l_1 l_2 C_2 & l_2^2 \\ -l_1^2 & -l_1 l_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1^2 \\ \dot{q}_2^2 \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

No entanto, se considerarmos a estrutura accionada por músculos do MSH, teremos de passar ainda do espaço das juntas para o espaço dos músculos. Para calcularmos as expressões para a dimensão z_{li} , a velocidade $\dot{z}_{li}$ e a aceleração $\ddot{z}_{li}$, dos músculos flexores ($i = 1$) e extensores ($i = 2$), da articulação do ombro, é necessário definir a relação, quer entre q_1 e q_{01} , quer entre q_1 e q_{02} . Estas relações obedecem a um esquema de controlo cinemático de acordo com as seguintes equações:

- Para o mecanismo de compensação h_1 :

$$q_{01} = \begin{cases} 0.528\pi - 0.5q_1 & -2\pi/3 \leq q_1 \leq -\pi/2 \\ 0.278\pi - q_1 & -\pi/2 \leq q_1 \leq -\pi/6 \\ 0.361\pi - 0.5q_1 & -\pi/6 \leq q_1 \leq \pi/6 \\ 0.411\pi - 0.8q_1 & \pi/6 \leq q_1 \leq 4\pi/9 \end{cases} \quad (5.27)$$

- Para o mecanismo de compensação h_2 :

$$q_{02} = \begin{cases} 1.083\pi - 0.5q_1 & -2\pi/3 \leq q_1 \leq -\pi/2 \\ 0.833\pi - q_1 & -\pi/2 \leq q_1 \leq -\pi/6 \\ 0.917\pi - 0.5q_1 & -\pi/6 \leq q_1 \leq \pi/6 \\ 0.75\pi - 0.5q_1 & \pi/6 \leq q_1 \leq 4\pi/9 \end{cases} \quad (5.28)$$

Estas expressões representam um compromisso de minimização entre os requerimentos impostos aos mecanismos de compensação e os requerimentos impostos ao braço. As expressões para a flexão e para a extensão do braço vêm:

- Para a flexão:

$$-2\pi/3 \leq q_1 \leq 4\pi/9 \quad (5.29)$$

$$z_{11} = \sqrt{d^2 h_1^2 - 2dh_1 C_{01}} \quad (5.30)$$

$$\dot{z}_{11} = \left(\frac{dh_1 S_{01}}{z_{11}} \right) \dot{q}_{01} \quad (5.31)$$

$$\ddot{z}_{11} = \frac{dh_1}{z_{11}} \left(\frac{z_{11}^2 C_{01} - dh_1 S_{01}^2}{z_{11}^2} \right) \dot{q}_{01}^2 + S_{01} \ddot{q}_{01} \quad (5.32)$$

- Para a extensão:

$$-2\pi/3 \leq q_1 \leq 4\pi/9 \quad (5.33)$$

$$z_{12} = \sqrt{d^2 + h_2^2 - 2dh_2 C_{02}} \quad (5.34)$$

$$\dot{z}_{12} = \left(\frac{dh_2 S_{02}}{z_{12}} \right) \dot{q}_{02} \quad (5.35)$$

$$\ddot{z}_{12} = \frac{dh_2}{z_{12}} \left(\frac{z_{12}^2 C_{02} - dh_2 S_{02}^2}{z_{12}^2} \right) \dot{q}_{02}^2 + S_{02} \ddot{q}_{02} \quad (5.36)$$

Para a articulação do cotovelo no plano sagital, as expressões para os deslocamentos z_{2i} , velocidades $\dot{z}_{2i}$ e acelerações $\ddot{z}_{2i}$ para os músculos flexores ($i = 1$) e extensores ($i = 2$) são dadas por:

$$0 \leq q_2 \leq \pi \quad (5.37)$$

$$z_{2i} = \sqrt{l_1^2 + b_i^2 + 2l_1b_iC_2} \quad (5.38)$$

$$\dot{z}_{2i} = -\left(\frac{l_1b_iS_2}{z_{2i}}\right)\dot{q}_2 \quad (5.39)$$

$$\ddot{z}_{2i} = -\frac{l_1b_i}{z_{2i}} \left[C_2 + l_1b_i \left(\frac{S_2}{z_{2i}} \right)^2 \dot{q}_2^2 + S_2 \ddot{q}_2 \right] \quad (5.40)$$

A existência de compensação de singularidades cinemáticas somente no cotovelo indica que, para um manipulador recorrendo a actuadores musculares, a optimização de trajectórias no espaço operacional implica a transferência de imposições de velocidade ou de aceleração, do ombro para o cotovelo. Esta conclusão está de acordo com a experiência que tende associar ao braço uma menor “largura de banda” do que ao antebraço.

Comparando as equações da cinemática do robot, a compensação do factor S_2^{-1} revelada pelo sistema biológico mostra que as estruturas mecânicas convencionais são inferiores, pois são incapazes de produzir uma compensação semelhante [46].

Tabela 5.2 – Parâmetros numéricos do modelo do MSH.

$l_1 = l_2$	0,3 [m]
$b_1 = b_2$	0,034 [m]
d	0,126 [m]
$h_1 = h_2$	0,043[m]

5.4.3. O AG APLICADO AO MODELO DO MSH

As características do AG utilizado nas simulações são as que a seguir se descrevem. A população inicial constituída por $P = 100$ vectores (cromossomas) é gerada aleatoriamente e, de seguida, a pesquisa é efectuada através dessa população. O método de selecção utilizado consiste na selecção por torneio, geracional e elitista. São aplicados os operadores de cruzamento e mutação. Para o operador de cruzamento, os elementos são agrupados em pares, nos quais o operador de cruzamento uniforme é executado sobre cada par. Os pontos de cruzamento (como o operador de cruzamento é de segregação) só podem ocorrer entre configurações. O critério de paragem utilizado consiste na contagem do número de gerações das simulações, que se fixou em $T_{\max} = 6000$.

A função aptidão escolhida levou em conta os requisitos do problema, ou seja, obter uma trajectória que atinja o ponto terminal desejado de modo a que as actuações nos músculos sejam minimizadas. Para tal utilizou-se a expressão (5.41) cujo primeiro termo visa garantir que o ponto pretendido é alcançado, e segundo termo contribui para que o custo da trajectória ao nível da actuação nas juntas seja mínimo.

$$f = \alpha_1 \cdot \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_{if}^{(k,T)} \right)^2 + \alpha_2 \cdot \sum_{k=1}^{15} \sum_{i=1}^2 \left(\Delta z_i^{(k,T)} \right) \quad (5.41)$$

onde:

$\Delta q_{if}^{(k,T)}$ representa o deslocamento angular da junta i , necessário para atingir o ângulo correspondente ao ponto final a partir da penúltima posição angular da junta i ;

α_1 e α_2 são os pesos atribuídos a cada termo;

$\Delta z_i^{(k,T)}$ é o incremento angular correspondente ao alelo i do gene k ;

i é o índice que toma o valor de 1 se corresponde aos músculos do braço, e o valor 2 corresponde aos músculos do antebraço;

T representa a geração;

k é o número de genes.

RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS

No algoritmo adopta-se uma probabilidade de cruzamento $P_c = 0,08$ e uma probabilidade de mutação $P_m = 0,04$. Os coeficientes utilizados são $\alpha_1 = 10^5$ e $\alpha_2 = 10^7$, obtendo-se a seguinte função aptidão:

$$f = 10^5 \cdot \sum_{i=1}^2 \left(\Delta q_{if}^{(k,T)} \right)^2 + 10^7 \cdot \sum_{k=1}^{15} \sum_{i=1}^2 \left(\Delta z_i^{(k,T)} \right) \quad (5.42)$$

O critério de paragem da simulação é o alcance da geração $T_{\max} = 6000$.

Os parâmetros assim definidos são utilizados nas simulações para a trajectória de $P_i = (1, -1)$ a $P_f = (0, 2)$, no espaço operacional.

Nesta trajectória foi encontrada a melhor solução na geração 5983, estando os resultados obtidos para as posições sucessivas do MSH ilustrados na figura 5.32:

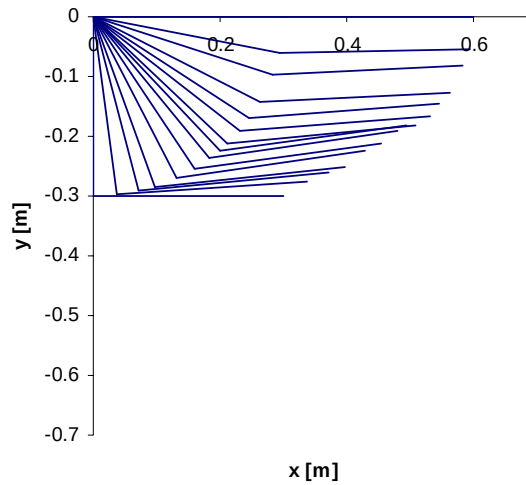


Figura 5.32 – Sucessivas posições do MSH na trajectória de $P_i = (1, -1)$ a $P_f = (2, 0)$

Os resultados obtidos para a trajectória do MSH no espaço das juntas e do órgão terminal no espaço operacional estão ilustrados nas figuras 5.33 e 5.34:

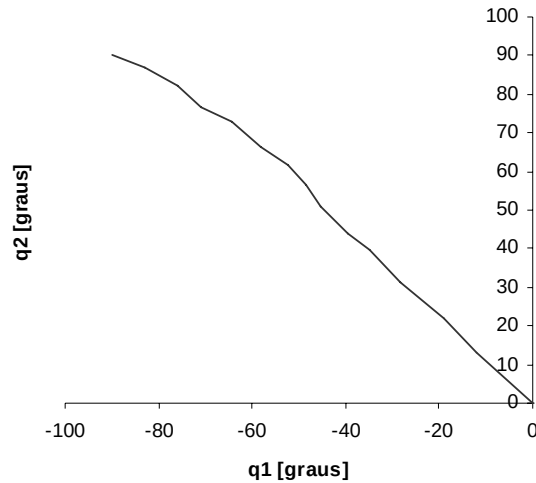


Figura 5.33 – A trajectória do MSH no espaço das juntas entre os pontos $Q_i = (-90, 90)$ e $Q_f = (0, 0)$ [graus]

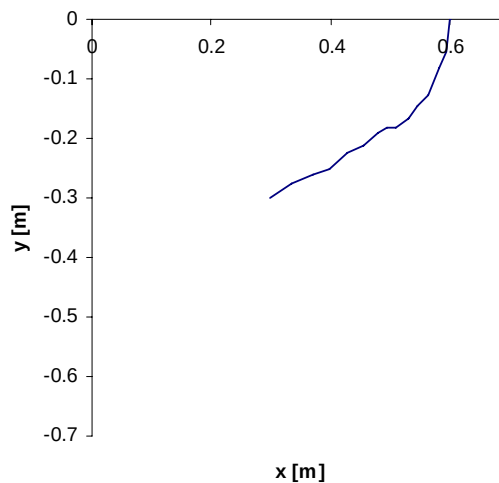


Figura 5.34 – Trajectória do órgão terminal do MSH no espaço operacional entre os pontos $P_i = (1, -1)$ e $P_f = (2, 0)$

EVOLUÇÃO TEMPORAL

Foi observada a evolução temporal das posições e velocidades respeitantes às experiências, onde se poderá observar a ondulação residual (*ripple*). Para tal, considerou-se que cada incremento angular se faz ao longo de um incremento de tempo normalizado de $\Delta t = 1$ [s].

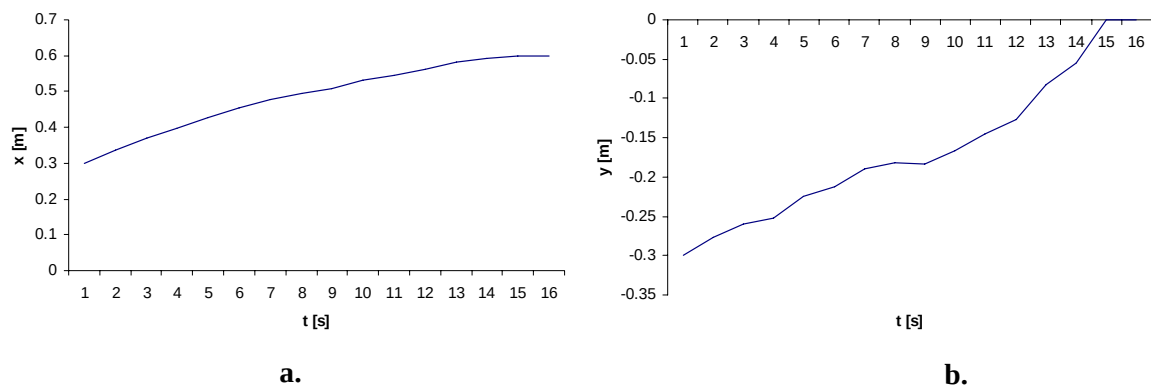


Figura 5.35 – Evolução temporal do órgão terminal do MSH

- a. segundo o eixo dos xx
- b. segundo o eixo dos yy

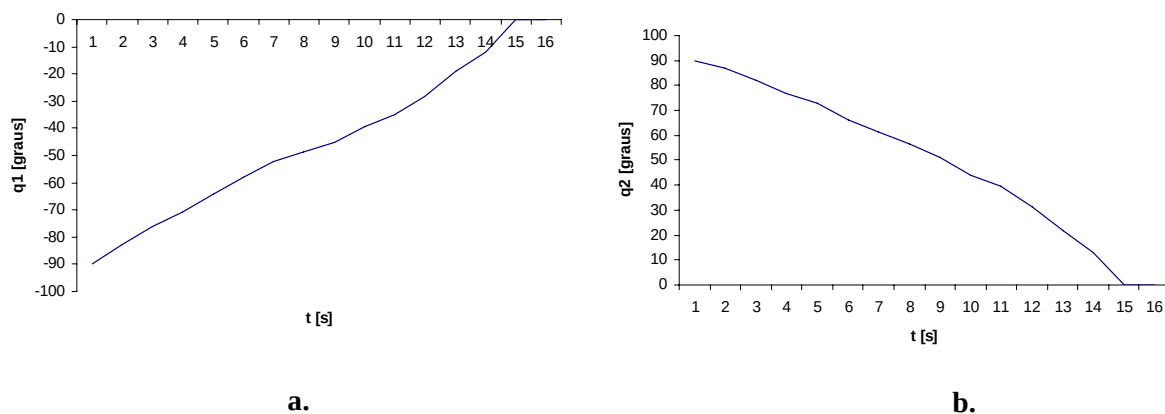


Figura 5.36 – Evolução temporal das posições angulares

- a. da articulação do ombro do MSH
- b. da articulação do cotovelo do MSH

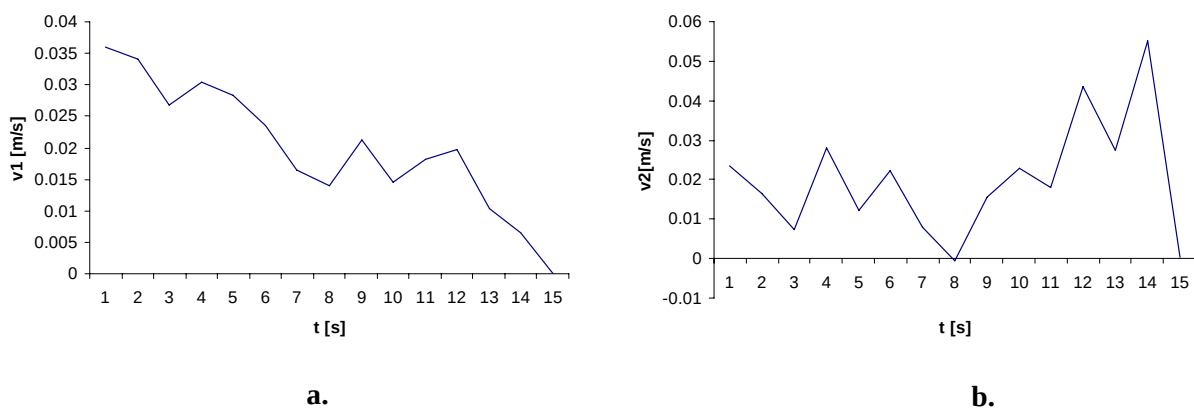


Figura 5.37 – Evolução temporal das velocidades do órgão terminal do MSH:

- a. segundo o eixo dos xx
- b. segundo o eixo dos yy

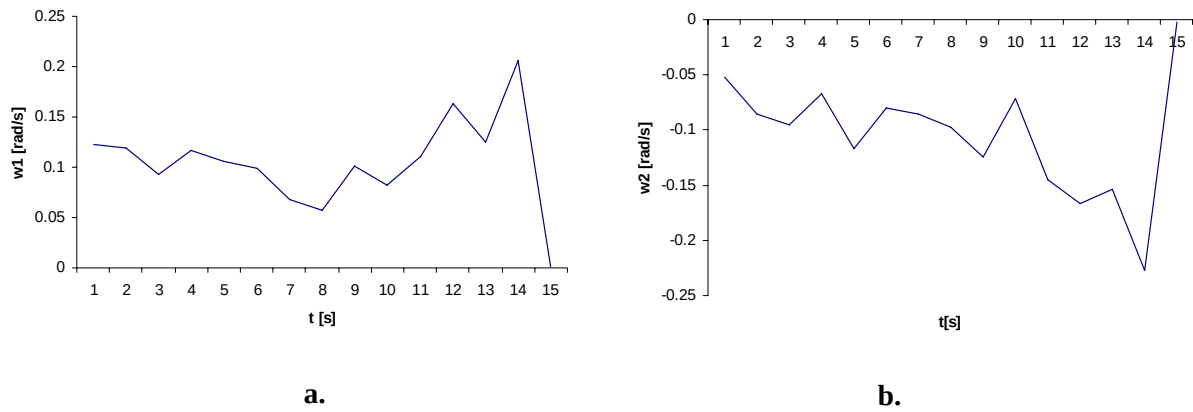


Figura 5.38 – Evolução temporal das velocidades angulares:

- a. da articulação do ombro do MSH
- b. da articulação do cotovelo do MSH

Para os alongamentos dos músculos flexão/extensão:

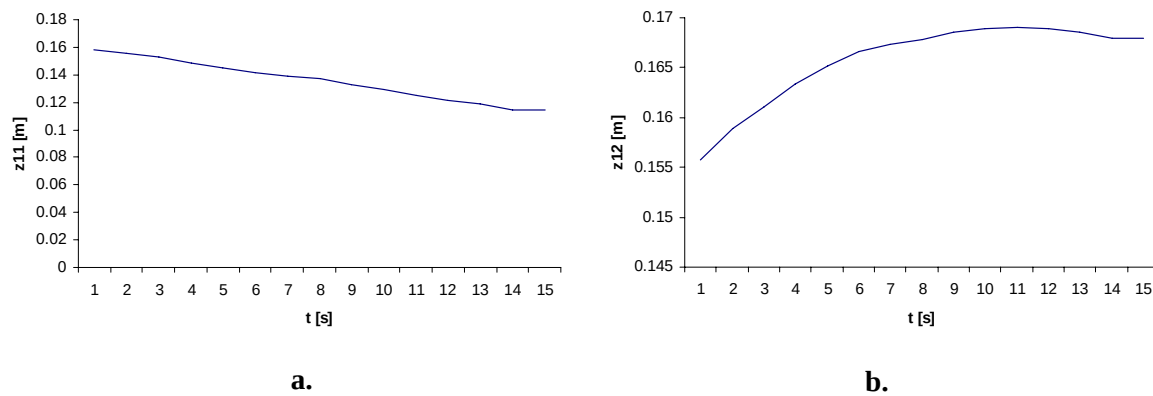


Figura 5.39 – Evolução temporal do comprimento:

- a. do músculo flexor do braço do MSH
- b. do músculo extensor do braço do MSH

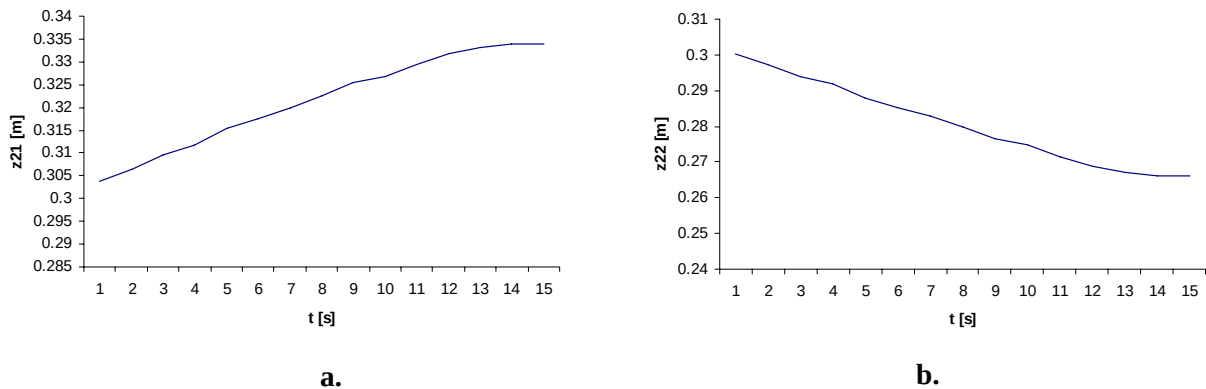


Figura 5.40 – Evolução temporal do comprimento:

- a. do músculo flexor do antebraço do MSH
- b. do músculo extensor do antebraço do MSH

5.5. CONCLUSÕES

Através das experiências realizadas, verificou-se que o AG constitui uma boa solução para a geração de trajectórias para o modelo do MSH, sendo possível promover uma variação gradual do comprimento dos músculos. Com o modelo do MSH foi possível obter trajectórias mais suaves, quer no espaço operacional, quer no espaço das juntas, relativamente às obtidas no modelo robótico. Dado que os AGs utilizados são relativamente próximos, tal facto evidencia a superioridade do MSH relativamente aos manipuladores mecânicos clássicos.

6 CONCLUSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

Os manipuladores robóticos são sistemas que tentam imitar o homem nas suas capacidades de manipulação, de transporte e de montagem de peças. Todavia, o desempenho dos sistemas mecânicos actuais é ainda muito inferior ao dos sistemas biológicos. Assim, a evolução dos manipuladores robóticos passa pelo aperfeiçoamento da “cópia” dos sistemas biológicos. No entanto, a complexidade introduzida pelos fenómenos cinemáticos e dinâmicos destas estruturas mecânicas, se usadas as técnicas clássicas, torna difícil o seu estudo e o seu controlo. Os AGs, pela sua robustez e simplicidade, revelam-se uma boa solução para ultrapassar algumas dessas dificuldades.

Neste capítulo é feita uma síntese do trabalho desenvolvido ao longo da tese e são formuladas as principais conclusões. São também destacados alguns aspectos que poderão vir a ser objecto de uma investigação mais aprofundada.

Nesta ordem de ideias, na secção 6.2 são apontados os aspectos principais do trabalho e na secção 6.3 são referidas algumas perspectivas para desenvolvimento futuro.

6.2 SÍNTESE CONCLUSIVA DO TRABALHO REALIZADO

Uma componente desta dissertação consistiu na apresentação dos aspectos principais da biomecânica do membro superior humano, com especial relevo para a cinesiologia. A partir dessa análise foi desenvolvido um modelo do MSH.

Uma segunda componente desta dissertação consistiu na revisão dos principais tópicos relativos a algoritmos genéticos. A partir dessa análise foi sendo desenvolvido um programa baseado em AGs, para o planeamento de trajectórias em manipuladores robóticos. De seguida, foram realizadas várias experiências onde foi testada a influência de vários parâmetros do AG. A partir dos resultados foi verificado que os parâmetros têm um papel importante na qualidade exibida pela solução final.

O AG inicialmente concebido para um manipulador mecânico foi adaptado para o planeamento de trajectórias no modelo do MSH. Através das experiências realizadas verificou-se que o AG conduzia a uma boa solução para a geração de trajectórias para o modelo do MSH, promovendo uma variação gradual dos comprimentos dos músculos. Com o modelo do MSH foi possível obter trajectórias mais suaves, quer no espaço operacional, quer no espaço das juntas, relativamente às obtidas no modelo robótico. Pode-se concluir que, apesar dos AGs utilizados não serem absolutamente idênticos, tal facto evidencia a superioridade do MSH relativamente aos manipuladores robóticos clássicos.

Os resultados obtidos demonstram, claramente, a viabilidade do planeamento de trajectórias através de AGs. A robustez e a adaptabilidade desta metodologia ficou patente na aplicação ao modelo do MSH, que revelou um desempenho superior ao do conseguido pelo manipulador robótico 2R.

Conclui-se que os AGs têm grandes potencialidades em aplicações deste tipo, pelo que o seu potencial merece uma investigação mais aprofundada. Por outro lado, o desempenho superior do modelo do MSH demonstra que o desenvolvimento de modelos que se aproximem mais do seu equivalente biológico levará a estruturas robóticas mais eficientes.

6.3 PERSPECTIVAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com base no trabalho desenvolvido surgiram os seguintes aspectos que podem ser alvo de uma possível investigação no futuro:

- Planeamento de trajectórias tendo em conta a dinâmica do MSH;
- Planeamento de trajectórias no espaço das juntas (em alternativa ao espaço operacional) utilizando a cinemática inversa e tendo em atenção as singularidades;
- Desenvolvimento de um modelo do MSH para o espaço tridimensional;
- Desenvolvimento de um modelo de outras partes do corpo humano, como, por exemplo, a mão, a perna ou o pé;
- Desenvolvimento de AGs multiobjectivo para optimização, não só da cinemática, mas também da dinâmica do manipulador;
- Desenvolvimento de um AG que optimize a estrutura do modelo relativamente à cinemática e/ou dinâmica;
- Aplicação dos AGs em sistema com vários braços cooperantes, robôs redundantes e sistemas de locomoção;
- Aplicação de outros tipos de AEs no planeamento de trajectórias para manipuladores robóticos e/ou modelos de inspiração biológica, de forma a encontrar o que melhor se adapte a este tipo de problema;
- Estudo de modelos mais evoluídos dos músculos e dos ossos, eventualmente incorporando um sistema de controlo hierárquico;
- Estudo dos sistemas cerebrais e neuromotores com vista à elaboração de uma mímica computacional.

Em conclusão, pode afirmar-se que existe um largo espectro de investigação que, no futuro, poderá permitir aplicações mais sofisticadas com desempenho ainda mais relevante.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Bar-Cohen, C. Breazeal: “Biologically Inspired Robots”, Spie Press, 2003.
- [2] K. F. Man, K. S. Tang, S. Kwong: “Genetic Algorithms: Concepts and Applications”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 5, pp 519-534, October 1996.
- [3] J. Hamill, M. K. Knutzen: “Bases Biomecânicas do Movimento Humano”, Editora Manole Lda, 1999.
- [4] D.A. Neumann: “Cinesiologia do Aparelho Musculoesquelético”, Guanabara Koogan, 2006.
- [5] K. F. Wells: “Kinesiology – Scientific Basis of Human Motion”, W. B. Saunders Company, 1976.
- [6] F. H. Netter: “Atlas de Anatomia Humana”, Novartis, 2003.
- [7] I. A. Kapandji: “Physiologie Articulaire”, Volume I, Maloine S.A. Editeur, 1983.
- [8] J. H. Holland: “An Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introduction Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence”, MIT Press, 1992.
- [9] Y. Thoma, E. Sanchez: “A Reconfigurable Chip for Envolvible Hardware”, In K. D. et al. ed.: Genetic and Evolutionary Computation - GECCO 2004, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Part I, Seattle, Washington, USA, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3102, pp. 816-827, 2004.
- [10] J. Koza, F. Bennett, D. Andre, M. Keane: Genetic Programming III: Darwinian Invention and Problem Solving, 1999.

- [11] M. R. Peterson, T. E. Doom, M. L. Raymer: "GA - Facilitated Knowledge Discovery and Pattern Recognition Applied to the Biochemistry of Protein Solvation", In Genetic and Evolutionary Computation – GECCO 2004, Volume 1 of LNCS, Berlin, Springer-Verlay, pp. 426-437, 2004.
- [12] Marcin Borkowski: "Application of Genetic Algorithm to Pattern Extraction", In Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications - ISDA05, 2005.
- [13] D. B. Fogel: "System Identification through Simulated Evolution: A Machine Learning Approach to Modeling", Ginn Press, 1991.
- [14] M. A. Paz Ramos, J. Torres Jimenez, E. Quintero Marmol Marquez, H. Estrada Esquivel: "Pid Controller Tuning for Stable and Unstable Processes Applying GA", In Genetic and Evolutionary Computation – GECCO 2004, Volume 2 of LNCS, Berlin, Springer-Verlay, pp. 1-10, 2004.
- [15] Kazuaki Itoh, Makoto Iwasaki, Nobuyuki Matsui, "Optimal Design of Robust Vibration Suppression Controller Using Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 5, pp. 947-953, 2004.
- [16] R. Balling: "The Maximin Fitness Function: Multiobjective City and Regional Planning", In Fonseca C.M., Fleming P.J., Zitzler E., Deb K., Thiele L., eds.: Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Second International Conference, EMO 2003, Faro, Portugal, Proceedings, Volume 2632 of Lecture Notes in Computer Science., Springer, pp. 1-15, 2003.
- [17] Li-Cun Fang, Shi-Yin Qin: "Concurrent Optimization for Parameters of Powertrain and Control System of Hybrid Electric Vehicle Based on Multi-Objective Genetic Algorithms", International Joint Conference - SICE-ICASE, 2006.
- [18] M. D. Ritchie, C. S. Coffey, J. H. Moore: "Genetic Programming Neuronal Networks as a Bioinformatics Tool for Human Genetics", In Genetic and Evolutionary Computation - GECCO2004, Berlin, SpringerVerlay, Volume 1 of LNCS, pp. 438-460, 2004.
- [19] L.L. Lai: "Intelligent System Applications in Power Engineering: Evolutionary Programming and Neural Networks", John Wiley & Sons Ltd., 1998.
- [20] J. Kingdon: "Intelligent Systems and Financial Forecasting", Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg GmbH & Co., 1997.
- [21] D.E. Goldberg: "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison – Wesley, 1989.
- [22] Yuval Davidor, "Analogous Crossover", Proceedings of the third International Conference on Genetic Algorithms, pp. 98-103, George Manson University, 1989.
- [23] Thomas Bäck, "Evolutionary Algorithms in Theory and Practice, Evolutionary Strategies – Evolutionary Programming – Genetic Algorithms", Oxford University Press, 1996.
- [24] Q. Zhu K., Liu Z.: "Empirical Study of Population Diversity in Permutation Based Genetic Algorithm", In Genetic and Evolutionary Computation - ECCO 2004,

- Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Part II, Seattle, Washington, USA, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science Vol. 3102, pp. 420-421, 2004.
- [25] P. Baudet, C. Azzaro, L. Pibouleau, S. Domenech: “A genetic algorithm for Batch Chemical Plant Scheduling”, International Congress of Chemical and Process Engineering - CHISA 96, Prague, 1996.
- [26] K. Deb: “Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms”, John Wiley & Sons Ltd., 2001.
- [27] Melanie Mitchell: “An Introduction to Genetic Algorithms” MIT Press, 1999.
- [28] . E. J. Solteiro Pires, Phd, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2005
- [29] J. D. Schaffer: “Multiple Objective Optimization With Vector Evaluated Genetic Algorithms”, In Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms, pp. 93-100, 1985.
- [30] R. L. Haupt, S. E. Haupt: “Practical Genetic Algorithms”, John Wiley & Sons, 2004.
- [31] J. Craig, “Introduction to Robotics – Mechanics and Control”, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [32] F. B. M. Duarte: “Análise de Robots Redundantes”, Phd, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002.
- [33] W. G. Han, S. Min Baek, T. Y. Kuc: “Genetic Algorithm Based Path Planning and Dynamic Obstacle Avoidance of Mobile Robots”, In Conference Proceedings IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Hyatt, Orlando, Florida, USA, pp. 2747-2751, 1997.
- [34] M. Gemeinder, M. Gerke: “GA-based Path Planning for Mobile Robot Systems Employing an Active Search Algorithm”. Applied Soft Computing 3, pp. 149-158, 2003.
- [35] M. H. Lavoie, R. Boudreau: “Obstacle Avoidance for Redundant Manipulators Using a Genetic Algorithm”, In Proceedings of the 2001 CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines and Mechatronics, Montréal, 2001.
- [36] D. P. Garg, M. Kumar: “Optimal Path Planning and Torque Minimization via Genetic Algorithm Applied to Cooperating Robotic Manipulators”, In Congress of American Society of Mechanical Engineers - IMECE, New York, 2001.
- [37] T. M. Sobh, B. Wang, S. H. Patel: “Web Enabled Robot Design and Dynamic Control Simulation Software Solutions from Task Points Description”, In Industrial Electronics Society - IECON’03, Volume 2, pp. 1221-1227, 2003.
- [38] J. Han, W. K. Chung, Y. Youm, S.H. Kim: “Task Based Design of Modular Robotic Manipulator Using Efficient Genetic Algorithm”. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, pp. 507-512, 1997.
- [39] G. Cabodevila, G. Abba: “Quasi Optimal Gait for a Biped Robot Using Genetic Algorithm”, In IEEE International Conference on Systems Man, and Cybernetics Computational Cybernetics and Simulation, Orlando, Florida, pp. 3960-3965, 1997.

- [40] B. L. Luk, S. Galt, S. Chen: "Using Genetic Algorithms to Establish Efficient Walking Gaits for an Eight-legged Robot", *International Journal of Systems Science* 32, pp. 703-713, 2001.
- [41] H. Zhuang, J. Wu, W. Huang: "Optimal Planning Calibration Experiments by Genetic Algorithms", In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota, pp. 981-986, 1996.
- [42] A. G. Calafiore, A. M. Indri, A. B. Bona: "Robot Dynamic Calibration: Optimal excitation trajectories and experimental parameter estimation", *Journal of Robotic Systems*, pp. 55-68, 2001.
- [43] Y. Davidor: "Genetic Algorithms and Robotics, a Heuristic Strategy for Optimization", Number 1 in *Series in Robotics and Automated Systems*, World Scientific Publishing Co. Pte Ltd, 1991.
- [44] A. C. Nearchou, N. A. Aspragathos: "Application of Genetic Algorithms to point-to-point Motion of Redundant Manipulators", *Mecha. Mach. Theory*, Pergamon 31, pp. 261-270, 1995.
- [45] A. B Doyle, D. Jones: "Robot Path Planning with Genetic Algorithms", In *2nd Portuguese Conference on Automatic Control*, Porto, Portugal, pp. 312-318, 1996.
- [46] Alexandra M. S. F. Galhano, J. A. Tenreiro Machado, "Kinematic Robustness of Manipulating Systems", *Journal of Advanced Computational Intelligence*, Vol. 6, No. 2, pp. 93-98, 2002.