



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Análise Cinemática e Planificação de Movimentos de um Robô Endoscópico Accionado Electromagneticamente

Elisa Carina Carreira Pinheiro

Relatório Final do Trabalho de Projecto apresentado à

Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em

Tecnologia Biomédica

Novembro de 2011

**Análise Cinemática e Planificação de Movimentos de um Robô
Endoscópico Accionado Electromagneticamente**

Elisa Carina Carreira Pinheiro

Relatório Final do Trabalho de Projecto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Tecnologia Biomédica

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Jorge Pinto Leitão

Supervisores da empresa:
Dr. Juan Carlos Fraile Marinero
Dr. José Luis González Sánchez

“Este Trabalho de Projecto inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri”

Novembro de 2011

Em memória do meu avô Franklim e a todos aqueles que me auxiliaram ao longo de todo este tempo.

Agradecimentos

Quero demonstrar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma, contribuíram para a realização desta tese de mestrado, em especial:

- Ao meu orientador, o Professor Doutor Paulo Jorge Pinto Leitão, pela paciência, prontidão, encorajamento e por todos os ensinamentos prestados ao longo de todos estes meses.
- Aos meus supervisores da Fundação CARTIF, Dr. Juan Carlos Fraile Marinero e Dr. José Luis González Sánchez pelos ensinamentos transmitidos, pela simpatia demonstrada, bem como, por toda a confiança depositada durante o tempo de mobilidade.
- Ao Instituto Politécnico de Bragança pela atribuição da bolsa “*Student Mobility Placements*” no âmbito do Programa de Aprendizagem ao Longo da Vida, para a realização da tese em cooperação com o Centro Tecnológico CARTIF em Valladolid, Espanha.
- À minha família pela força e encorajamento que sempre transmitiram durante todo este tempo. E sobretudo à minha sobrinha pelo olhar atento e cúmplice de todos os momentos menos bons.
- Aos meus amigos de Espanha pela simpatia, alegria, companheirismo e por todos os momentos bons que me proporcionaram durante esta mobilidade.
- A todos os meus amigos do Instituto Politécnico de Bragança pelo companheirismo, confiança e paciência que sempre demonstraram ao longo do meu percurso académico.

A todos os supracitados, o meu mais sincero e profundo Obrigado!

Resumo

Nos últimos anos, o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos dispositivos endoscópicos, capazes de observar o intestino humano na totalidade têm sido alvo de grande progresso. Estes ocorreram no domínio da miniaturização, da autonomia, do sistema de iluminação e da captação de imagens. O dispositivo mais recente é a cápsula endoscópica, apresenta baixa autonomia, ausência de sistemas de remoção e falta de materiais para biópsia ou tratamento de regiões tecidulares afectadas. Contudo, os investigadores têm trabalhado no desenvolvimento de sistemas robotizados que diminuam o desconforto e os perigos que advêm do uso do endoscópio convencional, assim como de todas as lacunas da cápsula endoscópica. Por isso, o Dr. David de la Fuente Diez projectou um robô endoscópico hiper-redundante de reduzidas dimensões que se move suavemente ao longo de todo o tubo digestivo. Este robô apresenta um sistema de fixação às paredes do lúmen intestinal, que possibilita a monitorização, a biópsia e o tratamento de regiões tecidulares. Como o robô se encontra em fase de desenvolvimento, neste trabalho realiza-se o estudo e a planificação de movimentos do robô endoscópico hiper-redundante, mantendo um dos seus extremos fixo. Para tal, determina-se o modo de locomoção do robô, usando a cinemática directa e inversa, de modo a conhecer a localização espacial e o comportamento dos seus elementos, descrevendo movimentos com baixo custo energético e elevada suavidade. Os algoritmos utilizados para a análise cinemática foram métodos heurísticos realizados através do *software* de computação numérica MATLAB[®].

Palavras-chave: Robô hiper-redundante, Análise cinemática, Planificação de movimentos e Suavidade.

Abstract

In the last few years, the development and perfecting of endoscopic devices, which are capable of observing the human intestine in its entirety, have greatly progressed. This progress has taken place in what concerns miniaturization, autonomy, illumination system and image capture. The latest device is the endoscopic capsule, with a low autonomy, no removal systems and no materials for the biopsy or treatment of afflicted tissue areas. Researchers have, however, been working in developing robot systems that lessen the discomfort and reduce the risks of using a conventional endoscope, as well as the shortcomings of endoscopic capsules. As such, Dr David de la Fuente Diez has designed a hyper-redundant endoscopic robot of small dimension which moves smoothly along all of the digestive tract. This robot possesses a system which allows it to hold on to the walls of the intestinal lumen, enabling the monitoring, biopsy and treatment of tissue areas. As the robot is still being developed, this essay studies and plans the movements of the hyper-redundant endoscopic robot, while keeping a fixed extremity. For this purpose, the robot's mode of locomotion is determined by using direct and inverse kinematic so as to determine the spatial location and behaviour of its elements, performing highly smooth movements at a low energy cost. The algorithms used for kinematic analysis were heuristic methods performed by numerical computation software MATLAB[®].

Keywords: Hyper-redundant robot, Kinematic analysis, Movement Planning and Smoothness.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Problema	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Estrutura do relatório.....	2
2. Sistemas Robotizados para a Endoscopia	5
2.1. Breve Introdução à Endoscopia.....	5
2.2. Métodos Tradicionais de Diagnóstico Endoscópicos	8
2.3. Cápsulas Endoscópicas	14
2.3.1. Cápsulas Intestinais	16
2.3.2. Cápsula Esofágica	18
2.3.3. Cápsula Colónica.....	18
2.3.4. Cápsula de Patência – Agile.....	18
2.3.5. Limitações das cápsulas endoscópicas.....	19
2.4. Métodos Robotizados de Diagnóstico Endoscópico	20
2.4.1. Da Vinci, AESOP e Zeus.....	20
2.4.2. Cápsula robótica.....	22
2.4.3. Robô endoscópico de pernas ciliares	24
3. Robô Endoscópico Hiper-redundante	27
3.1. Breve Introdução.....	27
3.2. Descrição Técnica e Morfológica dos Componentes Modulares	30
3.3. Descrição do Funcionamento do Robô	34
4. Planificação de movimentos	43
5. Análise Cinemática	47
5.1. Análise da Cinemática Directa de um módulo do robô.....	47
5.1.1. O problema da Cinemática Directa	47
5.1.2. Algoritmo da Cinemática Directa	53
5.2. Análise cinemática Inversa de um Módulo do robô.....	63
5.2.1. O Problema da Cinemática Inversa	64
5.2.2. Algoritmo da Cinemática Inversa	65
6. Optimização para a planificação de movimentos	73
6.1 Estratégias para um Menor Custo Energético.....	73
6.2. Suavidade de Movimentos.....	78

7. Conclusões e Trabalho Futuro.....	83
Bibliografia.....	86
Anexo A - Graus de Liberdade e Transformadas.....	91

Índice de Figuras

Figura 1. Endoscópio (3): 1-ocular; 2- entrada dos instrumentos de biópsia; 3-tubo de inserção; 4- botão de sucção; 5- botão de ar/água; 6-controlo da angulação; 7-cordão umbilical; 8- tubo de ar; 9-conector do recipiente da água; 10- ventilação; 11- conector da bomba de sucção; 12- canal de luz; 13- extremidade principal que contém a micro-câmara, a saída do jacto de água/ar, a fonte de luz e o canal dos instrumentos cirúrgicos.....	6
Figura 2. Endoscópio rígido (4) à esquerda, o fibroscópio GQR8-4-1500 (com ocular) (5) ao centro e o vídeo-endoscópio com monitor integrado (6) à direita.....	7
Figura 3. O <i>Lichtleiter</i> à direita e o primeiro endoscópio à esquerda (10).....	8
Figura 4. Esquema do processo de utilização da cápsula endoscópica intestinal (35).....	15
Figura 5. Cápsula endoscópica intestinal (35): 1- extremidade óptica; 2- suporte da lente; 3- lente óptica, 4- LEDs, 5- câmara CMOS, 6- baterias , 7- transmissor ASIC e 8- antena.	16
Figura 6. Cápsula Esofágica <i>PillCam Eso</i> (35).....	18
Figura 7. Cápsula esofágica colónica <i>PillCam Colon</i> (35).	18
Figura 8. Cápsula de Patência Agile (35).....	19
Figura 9. Robô Da Vinci (37).....	20
Figura 10. Controlador ergonómico à esquerda e o endoscópio de alta definição à direita (36). ..	21
Figura 11. À esquerda o sistema ASEOP e à direita o sistema ZEUS (39).	22
Figura 12. Cápsula endoscópica de <i>Paul Glass et al</i> (40).....	23
Figura 13. Cápsula endoscópica de <i>Paul Glass et al</i> (40): A- cavidade cilíndrica oca, B- perna, C- ligações das pernas, D- cavidade de encaixe, E- micromotor, F- encaixe principal, G- adaptador, H- revestimento de acrílico, I- <i>laser-cut Delrin</i> , J- pino de aço.....	24
Figura 14. Robô endoscópico de pernas ciliares (41).	25
Figura 15. Robô <i>Public Anemone</i> do MIT (44).....	28
Figura 16. “ <i>Snake robot</i> ” do Politécnico de Nanyang em Singapura (43).	28
Figura 17. Minhoca.	31
Figura 18. Módulo do robô.....	33
Figura 19. Cabeça dirigível do robô.....	33
Figura 20. Estrutura completa do robô endoscópico hiper-redundante.....	34
Figura 21. Estados de magnetização de um electroímã (adaptado (48)).....	35
Figura 22. Estados de magnetização e desmagnetização dos módulos do robô endoscópico.....	36
Figura 23. Sistema de referência dos componentes do robô.	36
Figura 24. Simulação do controlo do posicionamento do robô endoscópico com avanços e recuos (adaptado (8)).	39

Figura 25. Posições espaciais possíveis entre dois módulos.	41
Figura 26. Estrutura da planificação de movimentos.	43
Figura 27. Diagrama da cinemática directa.	47
Figura 28. Sistema de referência relativo a uma rotação seguida de translação (adaptado (49))... 48	48
Figura 29. Vários passos de rotação e translação do método de Denavit-Hartenberg para a cinemática inversa (50).	50
Figura 30. Comparação da cinemática directa entre o robô hiper-redundante (à direita) e o robô manipulador (à esquerda).	52
Figura 31. Algoritmo da cinemática directa.	54
Figura 32. Representação da equação de α	55
Figura 33. Representação da dedução da equação de h	56
Figura 34. Valores do ângulo θ para todas as configurações possíveis.	56
Figura 35. Representação dos vectores ortonormais \vec{n} , \vec{o} e \vec{a}	57
Figura 36. Rotação do módulo em torno do eixo ZZ	58
Figura 37. Translação h em torno do eixo dos ZZ	58
Figura 38. Rotação de $\frac{\alpha}{2}$ em torno de XX	59
Figura 39. Deslocamento do centro do componente do robô.	60
Figura 40. Rotação de $\frac{\alpha}{2}$ em torno de XX	60
Figura 41. Rotação de $-\theta$ em torno dos ZZ	61
Figura 42. Esquema auxiliar para o cálculo da distância do centro até ao vértice.	62
Figura 43. Representação gráfica da sequência $M=[2\ 4\ 4\ 4\ 5\ 6\ 6\ 12]$ da cinemática directa.	63
Figura 44. Diagrama da cinemática inversa.	64
Figura 45. Algoritmo da cinemática inversa.	66
Figura 46. Trajectória do comportamento pretendido para a espinha dorsal do robô hiper-redundante.	67
Figura 47. Representação do método da bissecção para o cálculo de P_0	68
Figura 48. Exemplo de uma trajectória do corpo do robô endoscópico.	69
Figura 49. Representação da simulação do modelo cinemático inverso para resolver a aproximação ao ponto destino.	70
Figura 50. Representação das três espinhas dorsais (inicial, final e solução) referentes ao modelo da cinemática inversa.	70
Figura 51. Ciclo de Histerese (adaptado (53)).	74
Figura 52. Correntes de <i>Foucault</i> num material magnético (54).	75
Figura 53. Custo energético de 2 trocas para a mudança da sequência de [0124] para [6124].	76

Figura 54. Custo energético de 8 trocas para a mudança da sequência de [0124] para [6124]......	77
Figura 55. Configurações binárias de um componente do robô.	77
Figura 56. Exemplos de caminhos possíveis do robô endoscópio hiper-redundante.	78
Figura 57. Avaliação dos critérios relativa à posição e orientação dos módulos do robô.	79
Figura 58. Configurações intermédias existentes entre a configuração inicial e a final seleccionadas pela suavidade.	80
Figura 59. A ilustração da esquerda representa a mudança de configuração do extremo, a ilustração do meio a configuração do meio e a da direita a mudança da configuração da base. B-sequência inicial (M_i), H- sequência final (M_f).	81
Figura 60. Sistemas com um grau de liberdade (adaptado de (56)).	91
Figura 61. Sistemas com 2 graus de liberdade (adaptado de (56)).	91
Figura 62. Sistemas com 3 graus de liberdade (adaptado de (56)).	92
Figura 63. Graus de liberdade de um corpo rígido (56).	92

Índice de tabelas

Tabela 1. Especificação técnica dos métodos de diagnóstico endoscópicos aplicados ao sistema respiratório.	9
Tabela 2. Especificação técnica dos métodos de diagnóstico endoscópicos aplicados às cavidades corporais.	10
Tabela 3. Especificação técnica dos métodos de diagnóstico endoscópicos aplicados ao sistema digestivo.	11
Tabela 4. Especificação técnica dos métodos de diagnóstico endoscópicos aplicados ao sistema reprodutor feminino e urinário.	13
Tabela 5. Caracterização das várias cápsulas intestinais (35).	17
Tabela 6. Configurações existentes para cada módulo e respectivos binários.	40
Tabela 7. Matriz de custo energético relativa à troca de configurações.	76
Tabela 8. Tabela dos critérios usados para a selecção da sequência mais suave.	80

Acrónimos

3D- Three Dimensional Space

AESOP- Automated Endoscopic System for Optimal Positioning

ALC- Advanced Automatic Light Control

ASIC- Application Specific Integrated Circuit

CCD- Charge-Coupled Device

CMOS- Complementary Metal Oxide Semiconductor

D-H- Denavit-Hartenberg

FDA- Food and Drug Administration

LEDs- Light Emitting Diodes

MIT- Massachusetts Institute of Technology

RFID- Radio Frequency Identification

SMA- Shape Memory Alloy

TC- Tomografía Computorizada

1. Introdução

O domínio da medicina tem assistido a grandes avanços tecnológicos nos últimos anos. No entanto, apesar de todos estes avanços, existe ainda um tipo de exame de diagnóstico, a endoscopia, que é muito temido pelos pacientes por causar traumas e desconforto. Neste sentido, foi desenvolvido um dispositivo de monitorização, a cápsula endoscópica, que tem vindo a substituir o endoscópio tradicional por se tratar de um dispositivo móvel e não causar tanto desconforto. Não obstante, este dispositivo apresenta limitações no que diz respeito à sua autonomia, à ausência de instrumentos na recolha de material tecidual para biópsia e à falta de sistemas de remoção. A cápsula endoscópica apresenta normalmente uma autonomia de oito horas e após este período, caso fique retida no organismo, a única forma de a localizar é através de raio X, tomografia computadorizada ou por intervenção cirúrgica.

A robótica tem assumido um papel preponderante no desenvolvimento socioeconómico actual. Em particular, a sua utilização na área da medicina tem aumentado nos últimos anos, tendo principal destaque nas áreas de cirurgia, reabilitação, diagnóstico, tratamento de patologias, toma de medicamentos, próteses e assistência remota a pacientes. A utilização de sistemas robotizados na medicina introduz elevados benefícios, no que diz respeito à diminuição do trauma cirúrgico, dos riscos de infecção e do tempo de convalescência. Para além disso, tornou-se numa preciosa ajuda em termos de monitorização de pacientes, permitindo a substituição de profissionais qualificados por reduzidos períodos de tempo.

Desta forma, neste domínio de aplicação, a tendência actual é para desenvolver dispositivos robotizados que consigam colmatar as falhas do endoscópio tradicional e da cápsula endoscópica.

1.1 Problema

O problema que se colocou neste trabalho pretendeu contribuir para o desenvolvimento de um sistema robotizado para a endoscopia de pequenas dimensões (isto é, adequadas ao intestino humano), que apresente uma autonomia e um sistema de localização adequados, evitando ocasionais falhas. Este dispositivo foi inicialmente proposto no trabalho de doutoramento do Dr. David de la Fuente Diez, desenvolvido no Centro Tecnológico CARTIF sob orientação do Dr. Javier Pérez Turiel e do Dr. Juan Carlos Fraile Marinero. Este dispositivo robotizado possui um sistema de fixação às paredes do lúmen a partir do aumento de alguns componentes, permitindo uma monitorização mais aprofundada e também a recolha

de material para biópsia. Se com o total desenvolvimento deste robô for possível colmatar todas as falhas dos dispositivos existentes e apresentar um sistema de emergência para eventuais casos excepcionais, poderá tornar-se um dos dispositivos mais usados para diagnóstico no tubo digestivo, uma vez que o intestino delgado é a região menos visível para o endoscópio convencional.

1.2 Objectivos

O principal objectivo deste trabalho incidiu no estudo e planificação de movimentos de um robô endoscópico hiper-redundante accionado electromagneticamente, onde a partir de um extremo fixo se controlam todos os movimentos necessários para a execução de tarefas de diagnóstico, tratamento e recolha endoscópicas. A planificação de movimentos deverá determinar como se deve mover o robô de forma a minimizar os traumas no paciente durante a locomoção, bem como enfrentar os obstáculos devido à estrutura irregular, labiríntica e escorregadia do intestino humano. Desta forma, o sistema robotizado deverá ser capaz de determinar a localização espacial do seu último componente a partir de valores angulares prévios e de um ponto conhecido usando a cinemática directa. Deve ainda encontrar-se apto para determinar as configurações de cada elemento estrutural com o menor custo energético e a maior suavidade de movimentos, a fim de mudar da posição de origem para a posição de destino, através da cinemática inversa.

Este trabalho foi desenvolvido ao longo de um estágio decorrido no Centro Tecnológico CARTIF em Valladolid, Espanha.

1.3. Estrutura do relatório

Este documento é constituído por sete capítulos e um anexo.

No **primeiro capítulo** é apresentada uma breve introdução ao problema, a motivação para o estudo e os objectivos propostos para a sua realização. Em seguida, no **capítulo dois** são introduzidas breves noções de endoscopia, focando os métodos tradicionais endoscópicos e alguns dos métodos de diagnóstico robotizados.

De modo a caracterizar o robô em estudo de forma mais fidedigna, introduz-se no **capítulo três** a definição de robôs hiper-redundantes e faz-se uma descrição técnica e morfológica dos seus componentes modulares. No final deste capítulo, é descrito todo o funcionamento do robô endoscópico hiper-redundante.

No **capítulo quatro** é realizada uma análise da planificação de movimentos para o robô hiper-redundante, e conseqüentemente para os vários módulos constituintes.

A implementação do problema cinemático directo e inverso, bem como os respectivos algoritmos são descritos no **capítulo cinco**.

O **capítulo seis** descreve a problemática do custo energético e da suavidade associados à selecção de movimentos efectuados pelo robô endoscópico.

Por fim, no **capítulo sete** referem-se as conclusões do trabalho realizado e apresentam-se alguns tópicos a desenvolver num trabalho futuro.

Em anexo é apresentada uma breve definição de graus de liberdade e transformadas homogéneas, que servem de complemento à descrição da análise cinemática directa e inversa realizada no capítulo cinco.

2. Sistemas Robotizados para a Endoscopia

A endoscopia é um método que capta imagens do interior do organismo humano ou animal, ou ainda de um dispositivo electrónico, para suporte à realização de diagnóstico. Este método foca essencialmente a sua aplicação no organismo humano, que nos dias que decorrem, é para muitos, um diagnóstico muito temido pelos perigos que dele advêm.

Neste capítulo será introduzido o conceito de endoscopia focando os problemas e os métodos existentes na endoscopia tradicional aplicada à medicina, mais propriamente ao tubo digestivo humano. Em seguida, referem-se alguns dos sistemas robotizados endoscópicos mais utilizados, bem como alguns protótipos em fase de desenvolvimento.

2.1. Breve Introdução à Endoscopia

A endoscopia (do grego *endo-* dentro + *-scopía* ver, que significa visualização interna) é uma técnica de diagnóstico que usa um instrumento para captar imagens do interior de cavidades ou estruturas de origem humana, animal ou de objectos inanimados. A sua aplicação é notória no campo da prevenção e diagnóstico de patologias humanas. No entanto, esta técnica de diagnóstico também pode ser aplicada às indústrias química e petroquímica, mecânica, electrónica, construção civil e no combate à criminalidade. As suas principais funções baseiam-se na observação e alcance a regiões de difícil acesso ao homem, entre elas: a inspecção e reparação de equipamentos, a análise física e integral de dispositivos, a pré-visualização de modelos em escala de edifícios, a desactivação de bombas e a vigilância de espaços apertados (1). Esta prática trouxe muitos benefícios à indústria, nomeadamente, a diminuição de custos com a manutenção de equipamentos.

Para além da indústria, a endoscopia também é utilizada na medicina veterinária como auxílio ao tratamento de determinadas patologias, na visualização interna de superfícies corporais, na realização de biópsias, bem como, na observação do feto de animais (semelhante a uma ecografia) (2).

Apesar das inúmeras aplicações a que esta técnica se dedica, os grandes avanços e a importância têm-se verificado no campo da medicina, ao possibilitar o diagnóstico e tratamento de patologias do interior de órgãos ou até mesmo de cavidades, com o menor trauma cirúrgico. A sua forma de intervenção através do uso de um instrumento, o endoscópio, ocorre essencialmente por orifícios naturais, e em alguns casos, é necessária a realização de uma ou mais incisões nos tecidos.

Analogamente, o endoscópio funciona como a mão do médico por possuir ferramentas cirúrgicas, e como os olhos do médico por possibilitar a sua visualização interna, por intermédio de uma micro-câmara de vídeo e de uma fonte de luz. A figura que se segue apresenta as características gerais de um endoscópio.

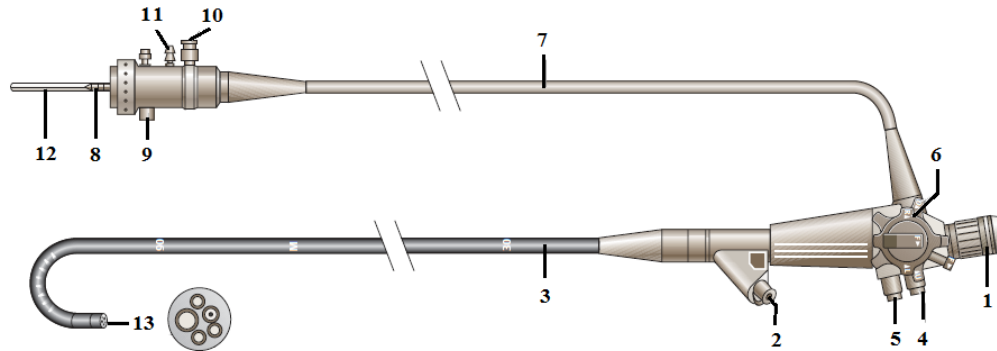


Figura 1. Endoscópio (3): 1- ocular; 2- entrada dos instrumentos de biópsia; 3- tubo de inserção; 4- botão de sucção; 5- botão de ar/água; 6- controlo da angulação; 7- cordão umbilical; 8- tubo de ar; 9- conector do recipiente da água; 10- ventilação; 11- conector da bomba de sucção; 12- canal de luz; 13- extremidade principal que contém a micro-câmara, a saída do jacto de água/ar, a fonte de luz e o canal dos instrumentos cirúrgicos.

O endoscópio é constituído essencialmente por um tubo fino, comprido e flexível, contendo na sua extremidade uma fonte luz e uma micro-câmara de vídeo, possibilitando a adição de instrumentos cirúrgicos, como por exemplo, pinças, balões e tubos para introduzir o ar, a partir da entrada representada pelo número 2 da Figura 1. A sua constituição permite a mobilidade suficiente para conseguir percorrer estruturas muito irregulares e labirínticas, como é o caso do intestino humano. A extremidade, representada pelo número 13 da Figura 1, onde se encontram a micro-câmara de vídeo e a fonte de luz, apresenta mais graus de liberdade que a restante estrutura tubular do endoscópio. Estas características facilitam o avanço do endoscópio e impedem o seu bloqueio.

A transmissão de imagens do endoscópio pode ser realizada de duas maneiras distintas, por fibra óptica (fibroscópio), onde o endoscópio transmite as imagens por meio de um óculo; ou por intermédio de uma micro-câmara CCD (Charge-Couple Device), o vídeo-endoscópio, que transmite as imagens a partir de um monitor integrado ou de um monitor em separado. Tanto o fibroscópio como o vídeo-endoscópio permitem a gravação das imagens projectadas no ecrã, sendo que o fibroscópio necessita de uma micro-câmara na extremidade do dispositivo. Dos dois dispositivos mencionados anteriormente, o mais utilizado é o vídeo-endoscópio, uma vez que consegue obter imagens com maior resolução e possibilita a

manipulação de diferentes espectros de luz, que facilitam a avaliação das imagens com o aumento da nitidez, apesar do seu elevado custo. O aparecimento do fibroscópio foi um passo importante na endoscopia, ao introduzir o uso de endoscópios flexíveis, ao invés dos endoscópios rígidos que possibilitavam menores angulações (3). Nas figuras seguintes, podem ser observados os três tipos de endoscópios abordados anteriormente.



Figura 2. Endoscópio rígido (4) à esquerda, o fibroscópio GQR8-4-1500 (com ocular) (5) ao centro e o vídeo-endoscópio com monitor integrado (6) à direita.

Esta técnica de diagnóstico baseia-se, essencialmente, na observação de cavidades corporais, na visualização do lúmen dos órgãos, no tratamento de patologias internas e na realização de biópsias (extração de amostras de tecido humano para análise). Contudo, pode também ser usada (7; 8; 9):

- Na remoção de objectos estranhos, pólipos e pedras nos canais biliares;
- Na reparação de danos no interior do organismo humano e na desobstrução das vias internas provocada pelas estenoses;
- Na colocação de *stents* (endopróteses expansíveis inseridas nas artérias para prevenir ou impedir a constrição do fluxo local) devido, por exemplo, ao estreitamento do esófago;
- Para tratar problemas de transpiração pelo corte dos nervos simpáticos, eliminando a produção de suor;
- Para a estagnação de hemorragias no tubo digestivo;
- Na introdução de líquidos ou gases, como o sulfato de bário, auxiliando a visualização dos exames de raio X ou tomografia computadorizada (TC), na detecção de determinadas patologias.

O exame endoscópico pode ser realizado em indivíduos de todas as faixas etárias, incluindo os recém-nascidos, existindo nestes casos, algumas restrições nos seus

procedimentos. Além disso, os pacientes podem beneficiar do uso de anestésicos para minimizar a dor.

Na secção seguinte, serão descritos os métodos tradicionais endoscópicos aplicados ao homem, que permitem a prevenção de inúmeras patologias, bem como os riscos e inconvenientes associados.

2.2 Métodos Tradicionais de Diagnóstico Endoscópicos

Numa época mais remota, os médicos não dispunham de dispositivos de auxílio ao diagnóstico, usavam apenas os seus sentidos para avaliar o estado dos pacientes. Por exemplo, se o paciente possuísse os olhos amarelos significaria problemas de fígado, mas se apresentasse papos no queixo seriam problemas intestinais. Existia na altura uma preocupação acrescida em visualizar as estruturas internas do corpo humano. Foi então que *Phillip Bozzini* em 1805 publicou a sua invenção, o *Lichtleiter* (que significa condutor de luz), constituído por um tubo de alumínio equipado com uma vela de cera e um espelho para reflectir as imagens (ver Figura 3).

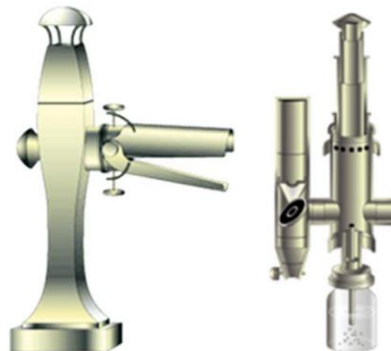


Figura 3. O *Lichtleiter* à direita e o primeiro endoscópio à esquerda (10).

O cirurgião Antoine Jean Desormeaux introduziu pela primeira vez o *Lichtleiter* num paciente e em 1853 desenvolveu o primeiro endoscópio com uma lâmpada de querosene que queimava álcool e uma essência de terebintina (aguarrás) para aumentar a chama e conseguir uma boa visualização (ver Figura 3) (10). Apesar da chama transmitida por este dispositivo endoscópico, o seu método não era de todo o mais eficiente. Por isso, alguns anos depois, com a descoberta da lâmpada eléctrica em 1880, *Johannes Freiherr Von Mikulicz-Radecki* desenvolveu o primeiro endoscópio rígido, o gastroscópio. O gastroscópio era constituído por uma estrutura tubular que permitia uma angulação até 30° e continha uma lâmpada eléctrica na extremidade. No interior da estrutura tubular do gastroscópio, acrescentou um tubo para

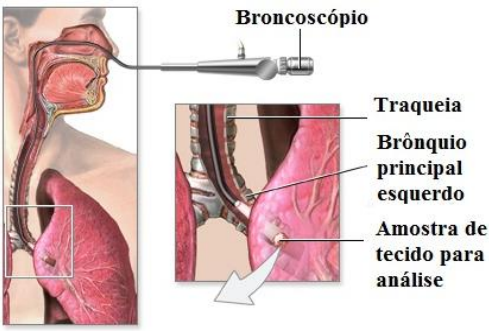
introduzir ar nas cavidades ou órgãos do organismo, com o objectivo de obter uma boa visualização interna (10).

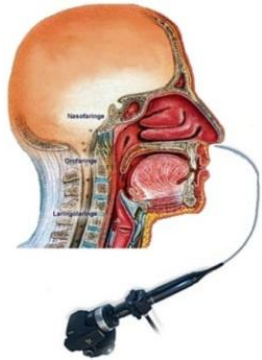
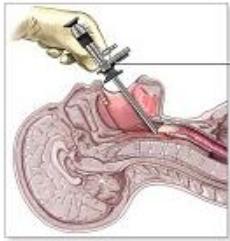
Com o passar dos anos, a ciência tornou o dispositivo endoscópico num instrumento tubular, longo, mais flexível e com um sistema de captação de imagem e iluminação mais eficientes. Estas vantagens permitiram a diminuição do trauma e do temor causados pelos anteriores dispositivos endoscópios. Os actuais dispositivos endoscópicos funcionam como meio de confirmação ao diagnóstico obtido por algumas técnicas preventivas para determinadas patologias associadas ao tracto intestinal e próstata, como é o caso do toque rectal e da análise fecal. O toque rectal consiste na inserção do dedo do médico no recto do paciente para encontrar alguma anomalia, enquanto que a análise fecal se baseia numa reacção química que confirma ou não a existência de sangue. Caso algum destes exames de prevenção indique a presença de alguma anomalia ou a existência de sangue, é necessário proceder ao despiste usando um método endoscópico (8).

As tabelas que se seguem resumem os vários métodos tradicionais endoscópicos referindo o seu local de inserção, o tipo de endoscópio utilizado, e ainda a região que se pretende observar. Dependendo da sua aplicação, o endoscópio pode ainda conter um instrumento cirúrgico associado, como pinças, agulhas, tubos para insuflar ar e balões gástricos.

Na Tabela 1, é possível observar os métodos endoscópicos referentes ao sistema respiratório, cujo dispositivo endoscópico apresenta uma designação adequada a cada tipo de aplicação. A broncoscopia utiliza o broncoscópico para visualizar, essencialmente, os brônquios, a laringoscopia observa a laringe, por intermédio do laringoscópio, e a rinoscopia permite analisar toda a estrutura nasal, através do rinoscópico.


Tabela 1. Especificação técnica dos métodos de diagnósticos endoscópicos aplicados ao sistema respiratório.

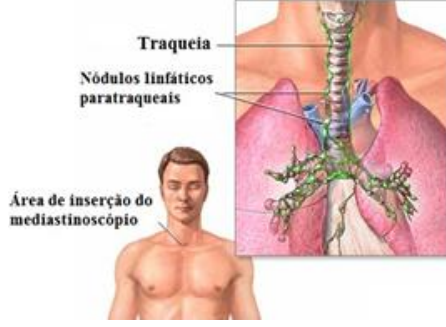
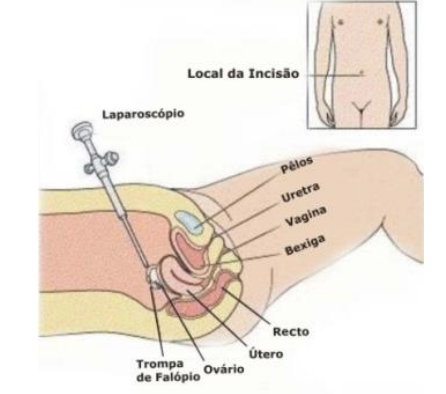
Método: Broncoscopia e Broncoscopia Flexível	
 <p>Broncoscópico</p> <p>Traqueia</p> <p>Brônquio principal esquerdo</p> <p>Amostra de tecido para análise</p>	<p>Regiões a observar: Laringe, traqueia, brônquios e bronquíolos (11; 12).</p> <p>Tipo de endoscópio: Broncoscópico</p> <p>Local de inserção: Boca/nariz</p>

Método: Rinoscopia	
	Regiões a observar: Fossas nasais, rinofaringe e coanos (abertura nasal que permite a comunicação entre a faringe e as fossas nasais) (13).
	Tipo de endoscópio: Rinoscópio
	Local de inserção: Fossas nasais
Método: Laringoscopia	
	Regiões a observar: Laringe (14; 15).
	Tipo de endoscópio: Laringoscópio
	Local de inserção: Boca/nariz

Seguidamente, na Tabela 2, serão enunciados os métodos de diagnóstico endoscópicos aplicados às regiões corporais; tais como: a toracoscopia, a mediastinoscopia e a laparoscopia. Estes métodos permitem obter informações das regiões entre órgãos e até mesmo da sua superfície externa, através de incisões, como meio necessário para alcançar a região pretendida.

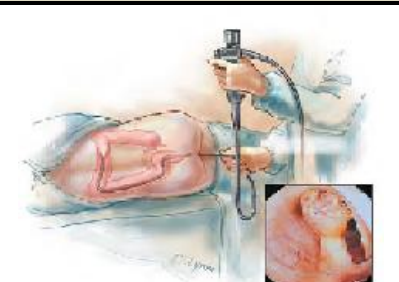
Tabela 2. Especificação técnica dos métodos de diagnóstico endoscópicos aplicados às cavidades corporais.

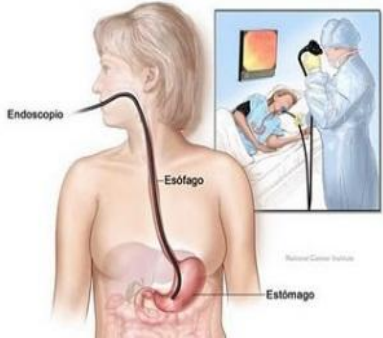
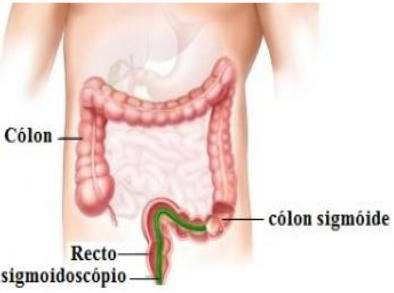
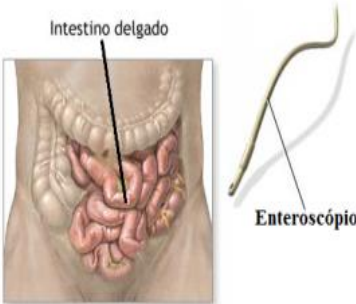
Método: Toracoscopia ou pleuroscopia	
	Regiões a observar: Superfície pulmonar e cavidade pleural (9; 16).
	Tipo de endoscópio: Toracoscópio
	Local de inserção: Numa das incisões (até três) da parede torácica.

Método: Mediastinoscopia	
	<p>Regiões a observar: Mediastino (região do tórax entre os dois pulmões e contém o coração, a traqueia, o esófago, o timo e os gânglios linfáticos) (17; 18).</p>
<p>Tipo de endoscópio: Mediastinoscópio</p>	
<p>Local de inserção: Na incisão da região do esterno</p>	
Método: Laparoscopia ou endoscopia peritoneal	
	<p>Regiões a observar: Estruturas do abdômen (ex: órgãos genitais) (19; 20).</p>
<p>Tipo de endoscópio: Laparoscópio</p>	
<p>Local de inserção: Na incisão da parede abdominal anterior (debaixo do umbigo)</p>	

A tabela seguinte refere os métodos de diagnóstico endoscópicos aplicados ao sistema digestivo, que fazem uso dos orifícios naturais, como a boca e o ânus, para a entrada do endoscópio. Os métodos de colonoscopia, endoscopia digestiva alta, sigmoidoscopia e enteroscopia são exemplos de técnicas de diagnóstico onde ocorre o maior uso dos instrumentos cirúrgicos na realização de biópsias, na introdução de ar ou balões gástricos e ainda no tratamento de inúmeras patologias.

Tabela 3. Especificação técnica dos métodos de diagnóstico endoscópicos aplicados ao sistema digestivo.

Método: Colonoscopia	
	<p>Regiões a observar: Cólon (intestino grosso) e por vezes alguns centímetros da parte terminal do intestino delgado (íleo) (21; 22).</p>
<p>Tipo de endoscópio: Colonoscópio</p>	
<p>Local de inserção: Ânus</p>	

Método: Esofagogastroduodenoscopia ou Endoscopia digestiva alta	
	<p>Regiões a observar: Esôfago. Estômago e porção superior do duodeno (intestino delgado) (23; 24).</p>
	<p>Tipo de endoscópio: Esofagogastroduodenoscópio ou endoscópio</p>
	<p>Local de inserção: Boca</p>
Método: Sigmoidoscopia	
	<p>Regiões a observar: Recto e cólon sigmóide (25; 26).</p>
	<p>Tipo de endoscópio: Sigmoidoscópio</p>
	<p>Local de inserção: Ânus</p>
Método: Enteroscopia	
	<p>Regiões a observar: Intestino delgado (27; 28).</p>
	<p>Tipo de endoscópio: Enteroscópio</p>
	<p>Local de inserção: Boca/nariz</p>

Para além das aplicações endoscópicas referidas anteriormente, existem outras aplicações do endoscópio na área da ginecologia, de que são exemplos a colposcopia e a histeroscopia (ver Tabela 4). Para concluir, existe a necessidade de realçar a importância da endoscopia na visualização dos sistemas urinário masculino e feminino, que para o devido efeito, é utilizado o método da cistoscopia representado na Tabela 4.

Tabela 4. Especificação técnica dos métodos de diagnóstico endoscópicos aplicados ao sistema reprodutor feminino e ao sistema urinário.

Método: Colonoscopia	
	<p>Regiões a observar: Vagina e cólo do útero (29; 30).</p> <p>Tipo de endoscópio: Colposcópio</p> <p>Local de inserção: Vagina</p>
Método: Histeroscopia	
	<p>Regiões a observar: Paredes do útero (31; 32).</p> <p>Tipo de endoscópio: Histeroscópio</p> <p>Local de inserção: Vagina</p>
Método: Cistoscopia ou cistouretoscopia	
	<p>Regiões a observar: Uretra, próstata (homem) e bexiga (33; 34; 16).</p> <p>Tipo de endoscópio: Cistoscópio</p> <p>Local de inserção: Uretra</p>

Embora os métodos tradicionais endoscópicos sejam mais evoluídos do que os anteriores, apresentam alguns riscos inerentes à sua utilização, designadamente (8):

- A perfuração provocada pelo esforço no avanço do endoscópio, ou durante a remoção de pólipos;
- A pancreatite por traumatismo da ampola de *Vater* (ponto de drenagem comum entre os canais pancreático e biliar);
- O sangramento originado pela realização de biópsias, ferimentos provocados pelo endoscópio;
- A reacção alérgica aos anestésicos que provoca insuficiência respiratória e diminuição da pressão arterial;

- As infecções originadas pelo ambiente propício à proliferação de vírus e bactérias, causadas pela fraca higiene do endoscópio, anteriormente e posteriormente à sua utilização;
- As arritmias causadas, possivelmente, pelo uso de substâncias durante a realização do exame endoscópico;
- As náuseas, vômitos, inchaços, e inflamações rectais causados pelos laxantes orais.

Apesar dos riscos, os métodos tradicionais endoscópicos também provocam alguns distúrbios, no que diz respeito à sensibilidade humana em termos de dor, inflamação e mal-estar. Estes estão associados à introdução de ar no tracto intestinal, à exploração do endoscópio ao longo do tubo digestivo e à prévia limpeza do intestino. A experiência do profissional qualificado num exame desta importância é determinante para garantir a eficácia e diminuir os riscos inerentes à sua realização, transmitindo deste modo, segurança ao paciente (8).

Hoje em dia introduzir um balão gástrico, através da endoscopia, tornou-se um privilégio apenas para indivíduos com posses económicas, devido ao elevado custo do exame endoscópico (8).

Por questões de higiene e prevenção o endoscópio deve ser bem desinfectado e guardado em locais acondicionados e esterilizados, para evitar eventuais contaminações (8).

2.3. Cápsulas Endoscópicas

Recentemente foi desenvolvido um novo método endoscópico revolucionário, a cápsula endoscópica, que não provoca dores, nem mal-estares ao paciente e os riscos de morte são nulos. Além das complicações que podem estar associadas a um exame com a cápsula endoscópica, também existem benefícios no que diz respeito à identificação de determinadas patologias como (35):

- O sangramento gastrointestinal obscuro ou oculto;
- A perda de sangue crónica no tracto gastrointestinal;
- O sangramento cíclico em pacientes com resultados negativos em exames endoscópicos;
- A doença de *Crohn* (inflamação crónica do íleo e cólon intestinais);
- A suspeita de tumores no intestino delgado ou a vigilância dos pacientes em relação ao aparecimento de pólipos;

- O síndrome da má absorção;
- A suspeita de esófago de *Barrett* (modificação do tecido inferior do esófago devido a refluxo do suco estomacal);
- A esofagite ou varizes do esófago.

Apesar da diversidade de métodos de diagnóstico endoscópicos, parte do intestino delgado permanece invisível aos olhos do endoscópio, impedindo, deste modo, o diagnóstico de patologias associadas ao mesmo. Foi com o intuito de minimizar esta perda de visibilidade que se desenvolveu uma nova tecnologia, que permite não só visualizar o intestino delgado, como todo o tracto gastrointestinal. Esta tecnologia consiste numa cápsula endoscópica de reduzidas dimensões que entra por via oral, sendo eliminada oito horas depois pelo recto. Esta cápsula assemelha-se a um comprimido que possui na sua estrutura uma micro-câmara de vídeo e um conjunto de LEDs (Light Emitting Diodes) para iluminação do tubo digestivo. As imagens são transmitidas através de um dispositivo externo que se encontra ligado à cintura do paciente, no qual são guardadas e posteriormente usadas para visualização, por intermédio de um computador, a partir de um software adequado, ver Figura 4.

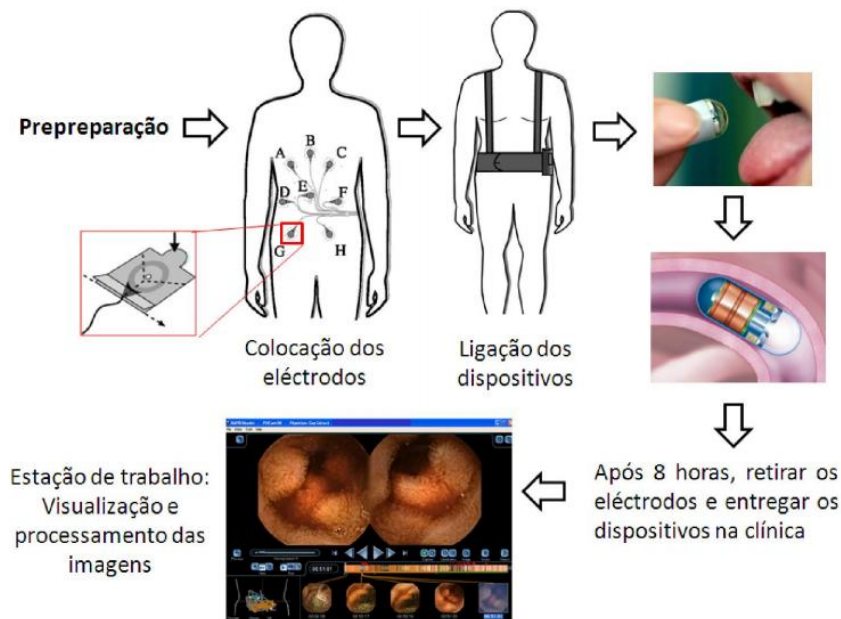


Figura 4. Esquema do processo de utilização da cápsula endoscópica intestinal (35).

A comunicação entre a cápsula endoscópica e o dispositivo externo é feita por radiofrequência, onde um sistema de sensores constituídos por eléctrodos dispostos no abdómen do paciente recebem a informação e a guardam no gravador deste dispositivo, para posterior utilização (35).

O aparecimento das cápsulas endoscópicas trouxe muitos benefícios, nomeadamente no despiste de patologias mascaradas que se tornaram difíceis de diagnosticar. Além disso, permitiu a diminuição do desconforto e medo sentidos pelos pacientes (o pavor da perfuração e o risco de morte), aquando da introdução do endoscópio flexível.

De acordo com o local do tubo gastrointestinal que se pretende visualizar, existem três tipos de cápsulas: as intestinais, as esofágicas e as colónicas. Apenas uma empresa, a *Given Imaging* (Yoqneam, Israel) produz estes três tipos. Existe ainda uma outra cápsula com características reabsorvíveis, a *Agile*, patenteada e distinguida das restantes, pelas suas propriedades (35).

De seguida serão descritas as características referentes a estes três tipos de cápsulas endoscópicas, bem como da cápsula reabsorvível *Agile*.

2.3.1. Cápsulas Intestinais

As cápsulas intestinais apresentam, de uma forma geral, pequenas dimensões e são constituídas por materiais biocompatíveis e resistentes a fluídos do tubo gastrointestinal.

Estruturalmente, estas cápsulas possuem LEDs brancos numa das extremidades e para focar a imagem possuem uma lente anesférica focal ou uma câmara CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), ou ainda um dispositivo CCD. Estas cápsulas conseguem obter resoluções na ordem dos 0,1mm e a sua autonomia é de oito horas, assegurada por duas baterias de óxido de prata. Possuem além disso, uma antena que permite a transferência de informação da cápsula para os sensores dos eléctrodos do abdómen, capturando duas imagens por segundo.

Na parte posterior da cápsula encontra-se alojado um transmissor ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) que facilita a transferência da informação, enviando um sinal de radiofrequência para o gravador de dados, que se encontra na cintura do paciente. A figura abaixo apresenta a estrutura geral de uma cápsula intestinal (35).

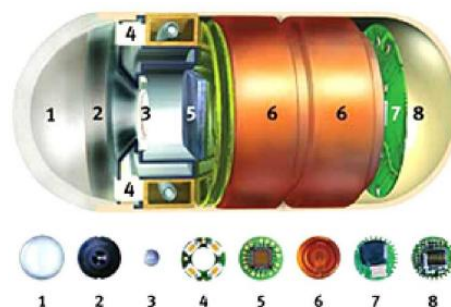






Figura 5. Cápsula endoscópica intestinal (35): 1- extremidade óptica; 2- suporte da lente; 3- lente óptica, 4- LEDs, 5- câmara CMOS, 6- baterias, 7- transmissor ASIC e 8- antena.

A tabela que se segue explica de uma forma clara e concisa, as características das quatro cápsulas intestinais existentes no mercado. É possível observar que estas se distinguem essencialmente pela resolução da imagem, pelas suas dimensões e pelo número de imagens captadas por segundo.

Tabela 5. Caracterização das várias cápsulas intestinais (35).

Cápsulas intestinais	Características
<p>PillCam SB2</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão: 11 mm x 26 mm; • Autonomia: 8 horas; • Câmara CMOS - 2 imagens por segundo; • Sistema de iluminação: ALC (Advanced Automatic Light Control) com 6 <i>LEDs</i> brancos; • 3 lentes; • Resolução: 65,536 pixels; • Comercializada desde 2001.
<p>Olympus Endocapsule</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão: 11 mm x 26 mm; • Autonomia: 8 horas; • Câmara CCD - 2 imagens por segundo; • Sistema iluminação: controlada e com 6 <i>LEDs</i> brancos; • Comercialização em 2007.
<p>MiroCam</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão: 11 mm x 24 mm; • Autonomia: 11 horas; • Peso: 3,4 gramas; • Resolução: 102,000 pixels; • Câmara obtém imagens por segundo; • Sistema de iluminação: 6 <i>LEDs</i>.
<p>OMOM</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensão: 13 mm x 27.9 mm; • Peso: < 6 gramas; • Resolução: 0.1 mm; • Câmara que obtém 2 imagens por segundo; • Autonomia: 6 a 8 horas; • Custo: ½ preço da cápsula <i>PillCam SB2</i>.

É importante salientar que, durante a utilização deste dispositivo, o paciente não deve executar exercícios físicos violentos, que possam provocar a saída dos oito eléctrodos, bem como, a aproximação de aparelhos que interfiram na sua comunicação.

A FDA (Food and Drug Administration) aprovou a utilização da cápsula endoscópica intestinal para a observação do intestino delgado em adultos e crianças com idade superior a dez anos (35).

2.3.2. Cápsula Esofágica

Para visualizar o esófago existe a cápsula esofágica (ver Figura 6) que apresenta dimensões semelhantes à cápsula intestinal e com duas extremidades luminosas que permitem obter quatorze imagens por segundo (sete de cada lado).



Figura 6. Cápsula Esofágica *PillCam Eso* (35).

Como a visualização do esófago não é muito morosa, esta apresenta uma autonomia de vinte minutos e não contém baterias de longa duração, contrariamente às anteriores cápsulas (35).

2.3.3. Cápsula Colónica

A cápsula colónica permite visualizar o cólon intestinal e apresenta dimensões (11 x 31 mm) que superam a cápsula intestinal. A Figura 7 mostra a aparência de uma cápsula colónica da *PillCam Colon*.



Figura 7. Cápsula esofágica colónica *PillCam Colon* (35).

Esta cápsula possui duas extremidades ópticas que capturam quatro imagens por segundo. Para otimizar o processo de autonomia da cápsula colónica, após a ingestão, esta preserva o seu tempo de vida, desligando-se cinco minutos, depois da entrada no corpo, durante duas horas (tempo de percorrer o intestino delgado). Desta forma consegue aumentar a autonomia para dez horas, uma vez que das oito horas previstas, existe um ganho de duas horas (35).

2.3.4. Cápsula de Patência – Agile

A cápsula de patência apresenta as dimensões padrão de uma cápsula endoscópica (11.4 mm x 26.4 mm) e consegue manter a sua estrutura intacta durante oitenta horas.

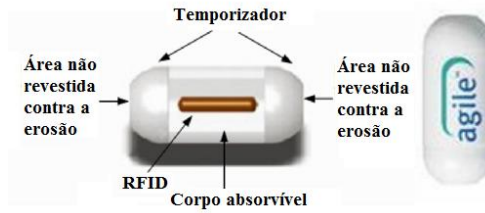


Figura 8. Cápsula de Patência Agile (35).

A sua estrutura é envolvida por um material absorvível com uma pequena quantidade de bário sendo posteriormente revestida por uma capa exterior. Após as oitenta horas, toda a cápsula é absorvida, com a excepção do sistema de identificação por radiofrequência RFID (Radio Frequency Identification). O que não foi absorvido pelo organismo pode ser detectado através de um exame radiológico ou por um detector externo de radiofrequência. Devido à sua pequena dimensão (3 mm x 13mm), este consegue atravessar as estenoses (estreitamento dos vasos sanguíneos devido à deposição de materiais) (35).

2.3.5. Limitações das cápsulas endoscópicas

Apesar da cápsula endoscópica demonstrar grandes qualidades e capacidades para o diagnóstico de inúmeras patologias, bem como, a diminuição dos riscos incutidos pelo endoscópio flexível, esta apresenta algumas limitações, tais como (35):

- A incapacidade de se deslocar através de estenoses ou fístulas (comunicação anómala);
- A possível interferência com o *pacemaker* cardíaco e outros dispositivos médicos;
- Os distúrbios de leitura de dados que podem ser causados entre a cápsula e os dispositivos implantados, como o desfibrilador cardíaco;
- A dificuldade de deglutição, como sendo uma patologia, pode dificultar o deslocamento da cápsula;
- A gravidez como prevenção, uma vez que são desconhecidos factores que afectam o indivíduo;
- Os problemas relativos aos divertículos de *Zenker* (divertículo faringoesofágico), à pseudo-obstrução intestinal e aos distúrbios de motilidade (distúrbios do funcionamento do intestino).

Apesar de ainda não existirem registos de casos de interferência com *pacemakers* ou desfibriladores cardíacos implantáveis, a sua utilização deve ser salvaguardada, como forma de prevenção. Durante a utilização da cápsula endoscópica não se devem realizar exames de

ressonância magnética. Quando ocorre algum problema durante a sua utilização é realizada uma radiografia, e em último caso, uma cirurgia.

2.4. Métodos Robotizados de Diagnóstico Endoscópico

A inovação da cápsula endoscópica como sistema robotizado poderá trazer grandes vantagens a um dos exames mais temidos e mais difíceis de executar, devido à natureza do tubo digestivo.

Os sistemas robotizados de diagnóstico endoscópico existentes no mercado, começam actualmente, a ser utilizados como instrumentos cirúrgicos pelos profissionais de saúde. Estes sistemas conseguem, de uma forma eficaz, realizar exames de laparoscopia com o mínimo de trauma para o paciente e ainda diminuir o risco de cansaço do médico.

Nas secções seguintes serão descritos os sistemas robotizados mais utilizados em medicina, bem como alguns protótipos em fase de desenvolvimento.

2.4.1 Da Vinci, AESOP e Zeus

O sistema robótico Da Vinci é um sistema utilizado na cirurgia robótica que combina a cirurgia minimamente invasiva com a utilização de um dispositivo robotizado. Este permite ao cirurgião trabalhar numa consola onde manipula os braços robóticos do sistema e visualiza imagens em alta definição e a três dimensões (3D) do campo operatório, com uma ampliação até 600 vezes, obtida por intermédio do endoscópio. Estas funcionalidades são praticamente impossíveis com a prática da cirurgia minimamente invasiva tradicional, em que o cirurgião possui uma perda significativa da noção de profundidade, da sensibilidade aos movimentos, assim como vê limitado o seu número de movimentos.

O hospital da Luz foi pioneiro na utilização deste sistema robotizado em Portugal, sendo actualmente utilizado como plataforma para cirurgias robóticas minimamente invasivas mais avançadas do mundo (36).



Figura 9. Robô Da Vinci (37).

Este sistema robotizado possui quatro componentes principais:

1. Uma torre de comando;
2. Um sistema de imagem em alta definição a três dimensões;
3. Um corpo com braços robóticos;
4. Uma consola cirúrgica na qual é realizada a intervenção através da manipulação dos controlos que dirigem os braços robóticos.

É de realçar que depois de colocados no campo operatório, os braços encontram-se sincronizados em tempo real com os controlos do cirurgião. Desta forma, o sistema robotizado realiza os movimentos do cirurgião eliminando o tremor manual, tornando-os mais precisos do que os realizados com a mão do cirurgião.

O sistema de imagem em alta definição a três dimensões utiliza um endoscópio com uma câmara 3D de 12 mm, e uma ponta direita ou angulada. O endoscópio neste sistema é denominado de braço endoscópico, pois encontra-se inserido num braço robótico. Estes braços são articulados, interactivos e hápticos. Um sistema robotizado háptico é um sistema sensível ao tacto, cuja funcionalidade é realizar a interface com o utilizador através do uso de forças, vibrações e deslocamentos.

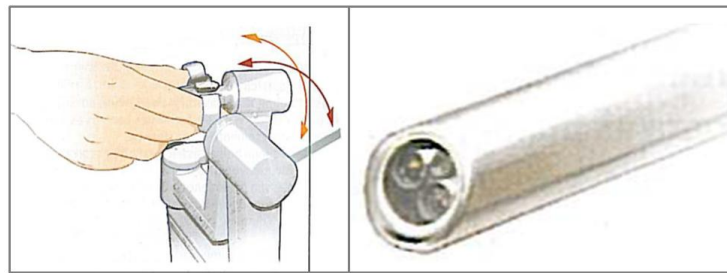


Figura 10. Controlador ergonómico à esquerda e o endoscópio de alta definição à direita (36).

Este sistema de imagem permite ampliar e focar as imagens de forma a visualizar estruturas com ângulos próximos dos 90°, o que com a cirurgia convencional seria impossível.

Este sistema robotizado possui inúmeras vantagens, quer para o paciente quer para a entidade (hospital) no que concerne à cirurgia convencional.

Do ponto de vista do paciente, o tempo de recuperação é mais rápido, uma vez que ao reduzir a área de corte dos tecidos, os riscos de infecção e as perdas de sangue diminuídas, implicam um menor trauma pós-cirúrgico. Adicionalmente, é esteticamente mais apazível, pois as cicatrizes são pouco visíveis devido ao reduzido tamanho e número de cortes, e à maior precisão e segurança das suturas realizadas.

Do ponto de vista do hospital, resultará uma diminuição da ocupação dos leitos nos hospitais, menor fadiga do cirurgião, e uma maior facilidade e melhoria da definição durante a

dissecção dos tecidos e do reconhecimento dos planos anatómicos naturais. Os custos económicos são a principal desvantagem deste sistema robotizado, uma vez que acarreta elevados custos, quer para a preparação da sala onde se encontrará o sistema robotizado quer para a compra e manutenção do mesmo (36).

O robô cirúrgico **AESOP** (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning) é um sistema robotizado constituído por um braço mecânico utilizado para manobrar o endoscópio dentro do paciente, através de pedais ou activado por controlo de voz. Este controlo será dado pelo cirurgião, posicionando a câmara durante a cirurgia, o que lhe permitirá uma maior destreza manual durante a cirurgia. A sua primeira versão auxiliava os cirurgiões durante as operações convencionais (38).

O **Zeus** é um sistema robotizado que possui as mesmas características que o Da Vinci, mas é accionado por um comando de voz conferido pelo sistema robótico AESOP, que lhe concede o suporte óptico. Este apresenta uma estação de trabalho computadorizada, um monitor e controlos manuais usados para mover os instrumentos cirúrgicos instalados na mesa. As suas aplicações resumem-se a testes clínicos e a algumas cirurgias mais complexas como é o caso da cardíaca (38).



Figura 11. À esquerda o sistema ASEOP e à direita o sistema ZEUS (39).

Na figura anterior, é possível observar os dois últimos robôs referidos ao longo deste texto. É notória a diferença entre o sistema robotizado Zeus e o AESOP, devido à forma como os profissionais especializados os utilizam.

2.4.2. Cápsula robótica

Recentemente, o desenvolvimento de cápsulas endoscópicas robotizadas capazes de percorrer o intestino através do controlo externo dos médicos especialistas, tornou-se aliciante para muitos investigadores. Este objectivo, tem em vista, desenvolver um dispositivo

resistente às forças dos movimentos peristálticos e com capacidade para se fixar às suas paredes, usando para tal: pernas, ganchos, adesivos, garras ou até campos magnéticos. Uma vez agarrados às paredes do tubo digestivo, devem ser capazes de recolher tecido para biópsia e também visualizar de forma mais pormenorizada a área em estudo (40).

O sistema robotizado em desenvolvimento pelo grupo liderado por Paul Glass apresenta um mecanismo de fixação, baseado em três pernas alinhadas com as zonas onde se encontra o adesivo biomimético. Esta combinação foi realizada com o intuito de superar os inconvenientes dos métodos tradicionais e usar as vantagens da cápsula endoscópica sem fios e do endoscópio tradicional. Para comprovar a eficácia sob acção dos movimentos peristálticos e até mesmo melhorar todo este mecanismo, foi realizado um estudo matemático, em simultâneo com a sua avaliação experimental num esófago de um suíno. Este robô ainda não considera sistemas de geração de imagem, nem de recolha de material para biópsia por ainda se encontrar em fase de desenvolvimento.

A cápsula robótica, como se pode observar através da imagem seguinte, é um protótipo de 15 mm de diâmetro e 32 mm de comprimento (é de realçar que o diâmetro desta cápsula é maior que o da cápsula comercializável de 11 mm) (40).



Figura 12. Cápsula endoscópica de *Paul Glass et al* (40).

Este sistema robotizado, apresenta três actuadores de poliuretano que realizam pressão sobre as paredes esofágicas para se fixar, juntamente com o adesivo micro-padrão de origem polimérica que contém características biomiméticas. O mecanismo de fixação através dos três actuadores é conseguido devido à existência de um micromotor. A simulação do comportamento atrítico dos adesivos do robô, bem como o processo de fixação através das suas pernas quando este atravessa o esófago dos suínos, foram factores a serem considerados no modelo matemático e na avaliação experimental (40). A figura seguinte ilustra o funcionamento deste dispositivo robótico.

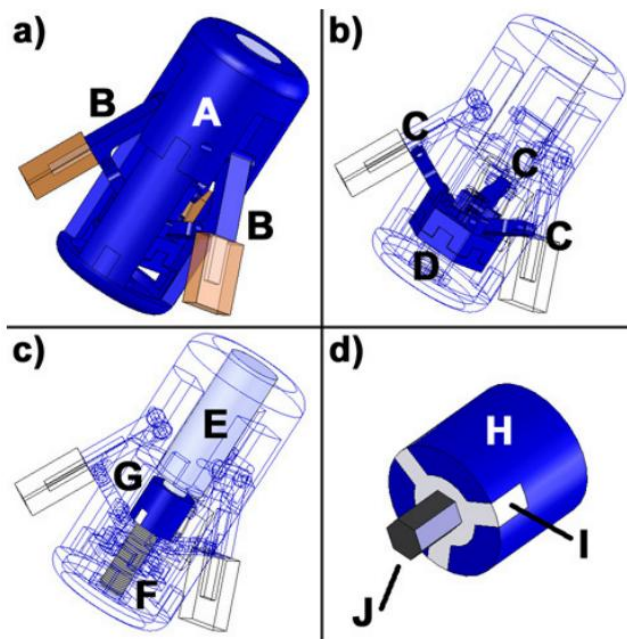


Figura 13. Cápsula endoscópica de *Paul Glass et al* (40): A- cavidade cilíndrica oca, B- perna, C- ligações das pernas, D- cavidade de encaixe, E- micromotor, F- encaixe principal, G- adaptador, H- revestimento de acrílico, I- *laser-cut Delrin*, J- pino de aço.

De forma sucinta, a cavidade cilíndrica representada na figura anterior com a letra A, contém um actuador, e numa fase futura, o restante espaço será ocupado pelas imagens e *hardware* de biópsia. Este dispositivo circula, no tubo digestivo, sempre com as pernas encolhidas na cavidade D para evitar adesão involuntária à superfície do esófago e causar danos aos tecidos. As arestas cortantes durante a construção deste robô foram tidas em conta. Quando o micromotor é accionado faz girar o parafuso de avanço existente em D, provocando o deslocamento das pernas para fora da cápsula. Accionando o micromotor no sentido contrário, ocorre a sua contracção (40).

2.4.3. Robô endoscópico de pernas ciliares

O robô endoscópico desenvolvido pelo *Yang Feng et al.*, apresenta 35 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro. As suas estruturas ciliadas também apresentam dimensões reduzidas, nomeadamente 15mm de comprimento, 5.2 mm de largura e 4.5 mm de altura. As seis pernas ciliadas são as unidades responsáveis pelos avanços e recuos ao longo do tracto gastrointestinal. Incorporadas na superfície do robô estas estruturas são impulsionadas por acção de um actuador *Shape Memory Alloy* (SMA), que permite aumentar a fiabilidade do robô. O seu corpo é revestido por alumínio, para se tornar leve, e o seu interior no futuro, servirá como local de integração do sistema de vídeo, de controlo e de

comunicação do robô (41). A figura abaixo retrata o robô endoscópico movido por pernas ciliares.

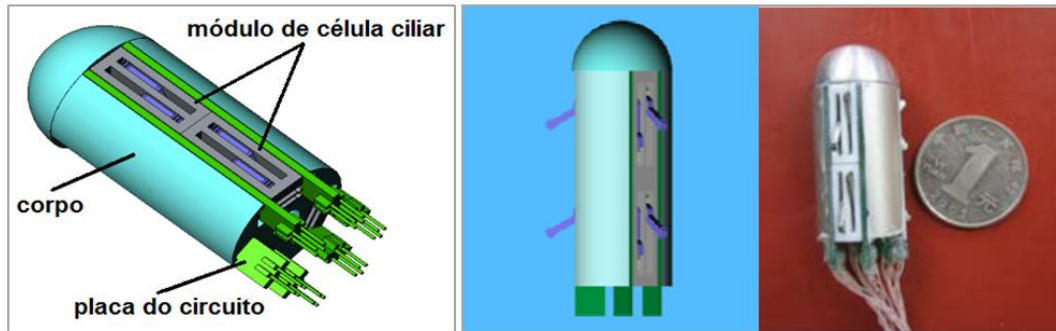


Figura 14. Robô endoscópico de pernas ciliares (41).

Em cada módulo existem cílios dispostos em direcções opostas de modo a garantir a eficácia do dispositivo quando este pretender parar. Os cílios podem abrir e fechar devido ao controlo executado pelo actuador SMA através do fornecimento ou não de energia. O único problema encontrado neste mecanismo tem a ver com ângulo de abertura dos cílios quando pressionados contra a parede do tracto gastrointestinal, de uma forma um pouco descontrolada. Por isso, foi definido um limite para o valor do ângulo por eles formados, fixado em 60° (41).

É de salientar que este robô é apenas um protótipo, que num futuro próximo poderá tornar-se num dispositivo alternativo para realizar o exame de endoscopia.

3. Robô Endoscópico Hiper-redundante

Os sistemas robotizados endoscópicos apresentados no capítulo anterior são exemplos de dispositivos que ainda apresentam falhas durante a locomoção sobre a superfície intestinal. A enorme dificuldade em executar os movimentos correctos e de obter dispositivos com reduzidas dimensões, são algumas das características mais estudadas pelos investigadores no desenvolvimento de robôs capazes de substituir o endoscópio convencional e a cápsula endoscópica. Contudo, tem-se verificado grandes problemas na criação destes dispositivos robóticos devido à natureza irregular, curvilínea e escorregadia do intestino humano, bem como de todo o tubo digestivo. Somente um dispositivo leve e de reduzidas dimensões é capaz de se movimentar através da superfície intestinal, com a destreza suficiente para executar movimentos angulares, ou seja, assegurar uma elevada redundância. Desta forma, a tendência actual incide no estudo de robôs endoscópicos hiper-redundantes.

Neste capítulo será realizada uma breve introdução aos robôs hiper-redundantes e serão apresentadas as características técnicas e morfológicas do robô em estudo, terminando com uma descrição detalhada do seu funcionamento.

3.1. Breve Introdução

Os robôs industriais tradicionais apresentam uma estrutura antropomórfica para executar as diversas tarefas para o qual foram desenvolvidos. Apesar da sua enorme importância no mundo industrial, apresentam limitações nos seus movimentos mesmo quando se encontram em locais sem obstáculos. De modo a ultrapassar as limitações presentes desenvolveu-se um sistema robotizado capaz de reproduzir características de seres invertebrados encontrados na natureza.

Deste modo, iniciou-se o estudo e desenvolvimento de robôs bio-inspirados, ou seja, robôs móveis baseados na imitação ou cópia do aspecto visual e comportamental de diversos animais vertebrados e invertebrados. Existem alguns exemplos bastante conhecidos como é o caso do cão robótico *Aibo* da Sony, o robô escorpião, a cobra robô, a salamandra robótica, a *Public Anemone* do MIT (Massachusetts Institute of Technology), entre muitos outros insectos e animais (42; 43)



Figura 15. Robô *Public Anemone* do MIT (44).

A *Public Anemone* do MIT, inspirada nos primeiros seres a habitar a terra, é uma criatura robótica com aparência orgânica que executa movimentos de forma natural. Este dispositivo interage com o público-alvo a partir de um sistema de visão que quando sente a sua aproximação, recua tal como uma cobra.

Para além deste tipo de seres bio-inspirados existe ainda uma classe desprovida de acessórios de locomoção (como patas, rodas e outros membros), designada de ápodos. Estes apresentam características que lhes permitem mover em superfícies íngremes, escalar, entrar em buracos e espaços confinados, devido às suas reduzidas dimensões e à capacidade de adoptar múltiplas formas. Apresentam estruturas uniformes e com aspecto semelhante a animais ou insectos desprovidos de membros, como é o caso das serpentes e dos vermes. Os mais conhecidos são a “*snake-robot*”, a “*serpentine-robot*”, a “*High-tech Anakonda*”, o “*OmniTread*” e a “*elephant trunk*” (43).



Figura 16. “*Snake robot*” do Politécnico de Nanyang em Singapura (43).

Estes robôs possuem inúmeros graus de liberdade¹ redundantes, o que lhes permite ultrapassar as limitações dos manipuladores convencionais em ambientes confinados e com obstáculos. Um robô é redundante se o número de graus de liberdade for superior ao valor mínimo para o seu funcionamento. Por exemplo, para posicionar a extremidade da ferramenta de um manipulador são necessários 6 graus de liberdade (3 graus para a posição e 3 para a

¹ Ver o anexo A para mais detalhes sobre este tópico.

orientação), quando o robô excede este número mínimo de graus de liberdade para a execução de uma tarefa, torna-se redundante.

A aplicação de características modulares e comportamentais da natureza possibilita um aumento considerável do número de graus de liberdade, tornando redundante cada componente estrutural e por isso, o seu todo designa-se de **hiper-redundante**.

Os primeiros robôs hiper-redundantes apareceram na década de 60 e até então, vários trabalhos têm sido desenvolvidos, sempre com um objectivo próprio e uma tendência para o comportamento animal. A hiper-redundância permitiu que estes sistemas robotizados se tornassem mais articulados e operassem em ambientes mais restritos. Alguns dos trabalhos desenvolvidos foram (45): “*highly articulated*”, “*tentacle*”, “*snake-like*”, “*tensor-arm*”, “*elephant trunk*”, “*swan’s neck*” e “*spine*”. Estas abordagens seguem duas orientações distintas:

- A primeira preocupa-se com a realização de tarefas no plano e em terrenos irregulares, onde as cobras eram base de alguns desses trabalhos.
- A segunda segue as características da tromba e dos tentáculos para aplicações industriais, uma vez que os robôs apresentam bases fixas ou móveis para trabalhar em qualquer ambiente.

Estruturalmente, os robôs hiper-redundantes podem apresentar uma estrutura contínua flexível, ou uma estrutura constituída por módulos/vértebras. No caso da estrutura contínua flexível o movimento da curvatura ocorre em qualquer ponto, uma vez que o espaço das articulações neste robô é infinito. Normalmente, estes robôs são constituídos por um tubo elástico e por secções independentes em forma de disco onde são fixados tendões que accionam o robô. Ao contrário dos robôs modulares, cuja curvatura ocorre em vários pontos distintos, suportando um grande número de articulações, unidas por ligamentos rígidos e pequenos. Alguns exemplos são o robô serpente, o robô tromba de elefante, e muitos outros robôs do tipo cobra (46; 45).

Para que os robôs hiper-redundantes executem movimentos que os permitam locomover, apresentam na sua constituição actuadores de baixa capacidade de carga, que apesar do seu elevado número são económicos, conferindo a competência necessária ao dispositivo robotizado. O uso de actuadores de alta potência optimizaria a capacidade de carga de um robô deste tipo, contudo, o seu grande número conduz a um elevado custo, o que é desvantajoso para um dispositivo com aplicações à medicina (46). Por esta razão, o modo de actuação destes sistemas robotizados pode ser realizado de duas formas: por actuação remota ou por actuação local de cada grau de liberdade.

A actuação local torna o sistema robotizado muito pesado e volumoso, devido ao uso de motores pesados como os actuadores lineares hidráulicos. A solução, neste tipo de problemas, é utilizar músculos artificiais em sistemas que não usem cargas elevadas, por conter baixa relação força-volume (46; 45). Porém, a actuação remota de robôs hiper-redundantes utiliza motores eléctricos accionados por cabos (tendões) que transmitem força para a estrutura, garantindo um mecanismo robotizado leve, pouco volumoso e sem actuadores fixos. A sua complexidade aumenta com o aumento de número de graus de liberdade (46; 45).

Uma forma de diminuir a limitação de carga dos robôs hiper-redundantes é utilizar actuadores binários simples, de baixo custo e com grande capacidade de carga. Este tipo de actuação é adequada para robôs que apresentam muitos graus de liberdade, isto é actuadores, reduzindo, deste modo, o seu custo (46).

Sob o ponto de vista cinemático, os robôs hiper-redundantes introduzem uma grande versatilidade já que permitem a resolução de tarefas ao reduzir esforços, evitando ocasionais obstáculos e eliminando singularidades indesejáveis. O controlo destes sistemas robotizados envolve complicados modelos matemáticos, sendo esta complexidade, directamente proporcional ao número de graus de liberdade (47).

3.2. Descrição Técnica e Morfológica dos Componentes Modulares

O robô endoscópico descrito neste trabalho, foi projectado para circular ao longo de um tubo comprido, cheios de curvas, e com uma superfície escorregadia e acidentada, como é o caso do intestino humano. Percorrer a superfície do lúmen intestinal é uma tarefa bastante difícil, tendo em conta que esta produz continuamente muco para se manter permeável, e contém vilosidades que se desdobram em microvilosidades tornando-a muito acidentada. Para garantir a sua eficácia, este robô tem de apresentar um elevado número de graus de liberdade, uma elevada autonomia, reduzidas dimensões e um baixo custo.

Na indústria, o robô convencional imita comportamentos antropomórficos para executar as tarefas, apesar das suas limitações em termos de mobilidade. Contudo, a ciência encontrou uma forma de contornar este problema na natureza, desenvolvendo robôs bio-inspirados com e sem estruturas de apoio à locomoção, como patas, rodas e pernas.

O robô endoscópico deste trabalho, foi inspirado na locomoção e na estrutura morfológica de um verme sem estruturas de apoio à locomoção (classificado como ápodo). Para além disso, a sua estrutura foi pensada para apresentar um reduzido tamanho e um elevado número

de graus de liberdade como garantia de deslocação entre espaços apertados e irregulares (característica redundante).

O ser invertebrado que mais se assemelha com todas estas características é a minhoca terrestre (Figura 17), uma vez que apresenta um corpo cilíndrico segmentado, que se move através da contracção sequencial de todos os segmentos na direcção da cabeça e encontra uma nova posição, através da sua descontração.



Figura 17. Minhoca.

Estes movimentos são conseguidos devido à disposição do tecido muscular em cada segmento que permite de forma extraordinária a sua comunicação. O robô para poder realizar movimentos numa estrutura labiríntica, como o intestino humano, tem de apresentar um corpo modular semelhante à minhoca terrestre, onde cada segmento apresenta características redundantes que permitem que se torne numa estrutura hiper-redundante (8).

O robô endoscópico utilizado neste trabalho, projectado na tese de doutoramento do Dr. David de la Fuente Diez, teve em consideração estas características, possuindo uma forma cilíndrica de diâmetro inferior à maioria dos dispositivos, de aproximadamente 2 cm. Uma vez que o diâmetro do intestino humano varia entre 2,5 a 4 cm o robô poderá diminuir de forma significativa o trauma dos pacientes e permitir uma utilização eficaz em bebés e crianças (8).

Este robô endoscópico tem a capacidade de avançar e recuar, sem provocar lesões nas paredes do intestino, assumindo posições que possibilitam a inspecção nas paredes do lúmen intestinal assim como a inserção de instrumentos para a recolha de tecido intestinal duvidoso (biópsia). A sua forma assemelha-se a um verme, apresenta duas extremidades iguais que o permitem locomover nas duas direcções, sem obstruções. Esta característica é vantajosa, uma vez que ajuda a evitar lesões ao permitir retrocesso e a superar eventuais problemas, como estenoses e estreitamento de vasos sanguíneos, devido à deposição de gorduras e outras substâncias.

O movimento deste robô é autónomo, porque não faz uso de fontes de alimentação nem propulsão externas. O seu funcionamento é supervisionado e controlado por um profissional

qualificado, uma vez que o ambiente de trabalho é o intestino humano. Numa primeira fase de desenvolvimento do robô, o controlo não será totalmente automático, pois a decisão final recairá sempre sobre o especialista. O especialista tem a possibilidade de interferir sobre o sistema de controlo e navegação, limitando o esforço e pressão, com o objectivo de evitar perfurações e/ou lesões nos tecidos do lúmen, assim como a capacidade de mostrar erros e sugerir possíveis soluções para o problema.

A sua flexibilidade é conferida pela estrutura anatómica, que permite uma maior precisão durante a locomoção e possibilita a capacidade de análise, detecção e inspecção exigidas pelo sistema de posicionamento. Este terá de ser capaz de medir distâncias em tempo real e de forma precisa, com o intuito de analisar regiões de interesse e construir um mapa personalizado do intestino do paciente. Paralelamente, terá ainda que apresentar um bom sistema de optimização de energia e um sistema de esterilização de baixo custo, para a realização da auto-limpeza em tempos mortos.

Um factor promissor no desenvolvimento deste robô relativamente a outros dispositivos de endoscopia, como a cápsula endoscópica, é a relação tempo/gasto energético. A maior preocupação destes dispositivos, será sempre obter um elevado grau de autonomia e um sistema de remoção do dispositivo eficaz, caso ocorra a sua retenção no interior do organismo e se esgotem as reservas energéticas. Como tal, também será essencial desenvolver um mecanismo que realmente o dispositivo e que não danifique o tecido humano como acontece no exame de raio X ou TC, durante a localização da cápsula endoscópica.

Após a descrição técnica do robô endoscópico estudado neste trabalho, procede-se à caracterização da sua estrutura morfológica.

Este dispositivo robótico é constituído por um conjunto de módulos iguais ligados entre si recorrendo a energia electromagnética (adicionalmente existe um conjunto de fios que circula pelo centro de cada módulo funcionando como a espinha dorsal do robô). Nas suas extremidades encontram-se duas cabeças dirigíveis onde se aloja a fonte de alimentação e outros componentes essenciais ao seu funcionamento. O(s) módulo(s) e as cabeças podem apresentar capacidade de insuflar como forma de fixação do robô; normalmente os módulos que insuflam são os módulos do centro de cada conjunto de segmentos do robô.

Como ilustrado na Figura 18, cada módulo possui uma estrutura de suporte (representado pela letra C) com a forma de um cilindro achatado e quatro estruturas de natureza ferromagnética que são accionadas por um campo magnético. Estas estruturas são actuadores binários magnéticos, e estes encontram-se representados na figura abaixo pela letra B. A

estrutura A é aquela por onde passam os fios que permitem a magnetização e desmagnetização dos actuadores binários.

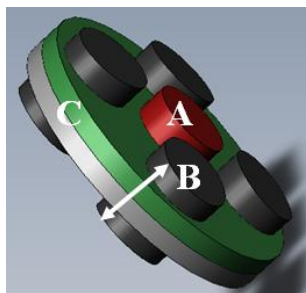


Figura 18. Módulo do robô.

Os módulos que apresentam a capacidade de insuflar contêm na superfície do suporte um revestimento com características elásticas. O conteúdo de ar insuflado será controlado pelo especialista para evitar ruptura/ lesão da parede intestinal.

A cabeça do robô (representado pela letra D na Figura 19) apresenta uma estrutura com a forma de metade de um ovo onde se encontra a fonte de alimentação e outros componentes essenciais deste dispositivo robótico, como por exemplo, o sistema de iluminação, de vídeo, os instrumentos cirúrgicos e a bateria.

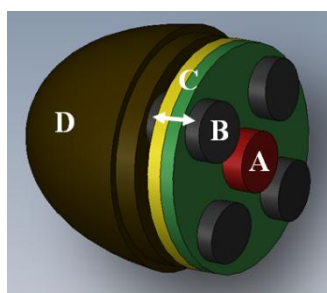


Figura 19. Cabeça dirigível do robô.

A cabeça contém quatro actuadores binários (B) de natureza ferromagnética, fixos por uma estrutura de suporte (C) igual à dos módulos, que possibilita a interacção entre a cabeça e os módulos do robô. A estrutura que sai da cabeça e circula em todos os módulos, através da comunicação deste à fonte de alimentação por fios eléctricos, designa-se de espinha dorsal, e está representada pela letra A. Esta estrutura permite a alimentação de todos os módulos devido à sua comunicação com as cabeças dirigíveis. Na Figura 20 é ilustrada a estrutura completa do robô endoscópico hiper-redundante que se pretende conseguir a longo prazo, depois do seu total desenvolvimento.

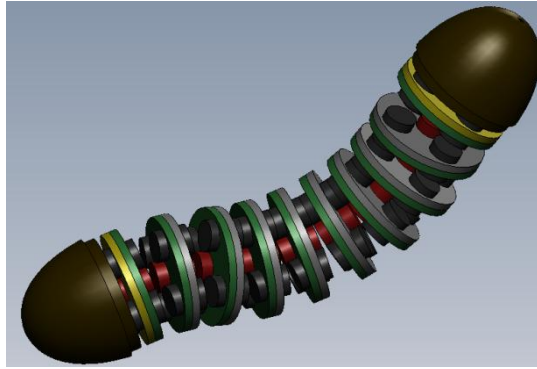


Figura 20. Estrutura completa do robô endoscópico hiper-redundante.

Todas as estruturas que fazem parte deste robô, movimentam-se no espaço e adquirem posições e orientações diferentes devido à natureza ferromagnética dos actuadores binários. Estes tornam possível o retrocesso e o avanço deste sistema robotizado a partir das interações existentes entre módulos e entre módulo-cabeça.

Durante o estudo cinemático deste robô endoscópico considerou-se um dos extremos fixo e o outro, aquele que executa as novas posições e orientações no espaço por ele alcançado.

3.3. Descrição do Funcionamento do Robô

De acordo com o que foi descrito atrás, o robô em estudo apresenta características hiper-redundantes (conjunto de elementos modulares redundantes), é ápodo (por não possuir acessórios de locomoção) e é considerado binário por apresentar quatro actuadores electromagnéticos em cada módulo. Estes actuadores binários exercem influência nos actuadores adjacentes e por isso, o robô é classificado de fortemente acoplado.

Vários estudos têm comprovado que o uso de robôs hiper-redundantes permite obter um número mais abrangente de configurações possíveis para uma determinada área de trabalho. A presença de actuadores binários como componente-chave para a locomoção garante o aumento da redundância de um sistema robotizado (47; 8). O facto dos robôs hiper-redundantes apresentarem modularização implica o uso de actuadores discretos, e por isso, somente estes, competem com os robôs de actuadores contínuos no mesmo pé de igualdade. Um robô discretamente accionado tem um número finito de estados, mas se apresentar um elevado número de actuadores binários (accionamento discreto), as suas capacidades podem ser comparadas às conseguidas em actuadores contínuos. Desta forma, o número de configurações possíveis de um robô binário cresce exponencialmente com o número de actuadores.

Através da descrição técnica e morfológica dos componentes-base referidos anteriormente, é possível perceber que os quatro actuadores binários são a base essencial para a aquisição das características hiper-redundantes.

Como já foi referido, cada actuador binário apresenta um material ferromagnético na sua constituição, e portanto, são denominados de electroímans. Estes electroímans são alimentados por corrente eléctrica e controlados a partir do maior/menor fornecimento de energia e da inversão do seu sentido para conseguir obter dois estados magnéticos possíveis em cada um deles (magnetização e desmagnetização). Em suma, o funcionamento do robô não passa de um “jogo” de interacção entre actuadores electromagnéticos que são alimentados e controlados a partir dos componentes existentes nas cabeças dirigíveis.

Os electroímans são condutores enrolados em forma de espira (solenóide) que contêm no seu interior um núcleo de ferro. Segundo a lei de *Biot-Savart*, as propriedades ferromagnéticas do núcleo de ferro induzem a formação de um campo magnético quando no fio enrolado circula corrente eléctrica. A intensidade do campo magnético e a distância que ele atinge a partir do electroímán, dependem da intensidade de corrente aplicada e do número de voltas da espira.

Para simplificar os estados de magnetização nos vários módulos definiu-se que quando a corrente circula no sentido Sul-Norte para a esquerda, toma o valor 0; quando circula para a direita nesse mesmo sentido, toma o valor 1. Na figura que se segue é possível entender o estado de magnetização e desmagnetização dos actuadores binários segundo o sentido de circulação da corrente.

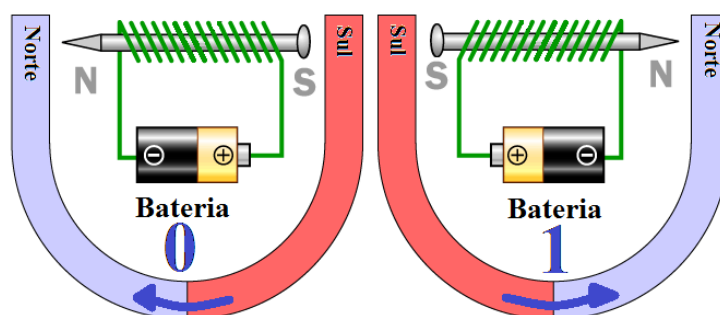


Figura 21. Estados de magnetização de um electroímán (adaptado (48)).

A magnetização e desmagnetização dependem, essencialmente, do tipo de estado 0 ou 1 do actuador adjacente. Ou seja, quando dois actuadores de módulos distintos se encontram com o mesmo tipo de estado, ocorre desmagnetização (repulsão), mas se forem diferentes ocorre magnetização (atração).

Cada módulo apresenta quatro actuadores electromagnéticos (electroímans). Cada um deles apresenta dois estados discretos, 0 e 1, o que significa que cada módulo apresenta 16 configurações possíveis (${}^4A_2=16$).

Estes actuadores confrontam-se com outros quatro actuadores de cada lado deste, e por isso, são todos influenciados uns pelos outros, tal como é ilustrado na Figura 22.

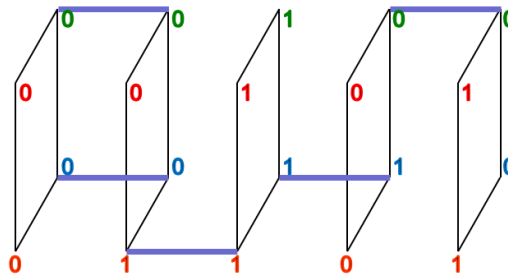


Figura 22. Estados de magnetização e desmagnetização dos módulos do robô endoscópico.

A partir da imagem acima, definiu-se o primeiro e o último plano, como sendo as cabeças dirigíveis e os restantes planos os módulos, ou seja, representam cada componente do robô de forma muito simplificada. Os vértices são os actuadores electromagnéticos, e por isso, apresentam os estados de magnetização 0 e 1. As linhas que unem os planos, exibidas na Figura 22 com a cor roxa, representam a magnetização entre electroímans e a sua ausência, a desmagnetização.

Mediante a análise cinemática de um módulo pode-se deduzir que este apresenta três graus de liberdade, sendo dois deles de rotação e o restante de translação (ver figura abaixo).

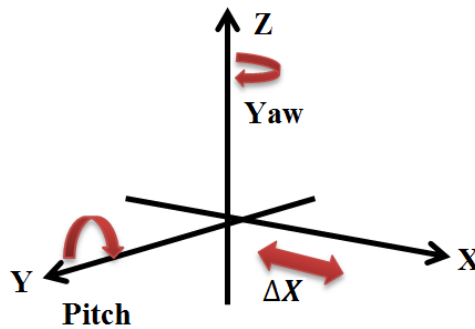


Figura 23. Sistema de referência dos componentes do robô.

Neste sistema de referência é possível visualizar dois estados de rotação em torno de Z (“Yaw”) e de Y (“Pitch”), bem como um estado de translação em X (Δx).

Generalizando, se tivermos um robô com N módulos, este possuirá um número total de graus de liberdade (g.l.) segundo a seguinte equação:

$$g.l. = N \times 3$$

Apoiado pela representação de estados binários para cada electroíman foi utilizada uma notação matemática para representar cada módulo com o intuito de simplificar o seu uso e compreensão. Para além desta notação dividiu-se o robô de N módulos em duas partes ($N=F+M$): a primeira parte (F) engloba o conjunto de módulos entre o módulo que insufla e a cabeça do lado esquerdo do robô e a segunda parte (M) os restantes módulos. Dependendo da sua aplicação o robô pode apresentar mais partes; contudo, como se trata de uma demonstração matemática apenas se consideram duas partes.

Definiu-se então S_{1i}^a , como a representação geral de um elemento matricial, cujo número binário se refere à posição i do módulo e à posição a do electroíman de módulo i , relativa à primeira parte robô. Por consequência, obtém-se uma submatriz onde cada linha representa o conjunto de quatro números binários, referentes aos quatro electroímans de cada módulo do robô. A representação geral da submatriz resultante da primeira parte do robô é dada por:

$$\begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{11}^2 & S_{11}^3 & S_{11}^4 \\ S_{12}^1 & S_{12}^2 & S_{12}^3 & S_{12}^4 \\ S_{13}^1 & S_{13}^2 & S_{13}^3 & S_{13}^4 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{1F}^1 & S_{1F}^2 & S_{1F}^3 & S_{1F}^4 \end{bmatrix}, \text{ sendo } a = 1, 2, 3 \text{ e } 4 \text{ e } i = 1, 2, \dots, F$$

uma vez que F representa o número de módulos da primeira parte do robô endoscópico.

A notação da segunda parte foi definida por S_{2j}^a , onde a continua a ser a posição do electroíman para cada módulo de posição j do robô. A representação da segunda parte do conjunto de módulos do robô é definida pela seguinte submatriz:

$$\begin{bmatrix} S_{21}^1 & S_{21}^2 & S_{21}^3 & S_{21}^4 \\ S_{22}^1 & S_{22}^2 & S_{22}^3 & S_{22}^4 \\ S_{23}^1 & S_{23}^2 & S_{23}^3 & S_{23}^4 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{2M}^1 & S_{2M}^2 & S_{2M}^3 & S_{2M}^4 \end{bmatrix}, \text{ sendo } a = 1, 2, 3 \text{ e } 4 \text{ e } j = 1, 2, \dots, M$$

sendo que M corresponde ao número total de módulos da segunda parte do robô endoscópico.

A última submatriz representa os componentes que insuflam, segundo a seguinte ordem: o primeiro é a cabeça da esquerda, o último a cabeça da direita e no meio os restantes módulos que insuflam (neste caso só temos um módulo). A sua notação foi estabelecida pelo vector B_k , em que k apenas pode assumir os valores de 1 até ao número de elementos que insuflam. Neste caso, k assume o valor de 1 até 3.

Para caracterizar de forma genérica o estado do robô usou-se uma matriz diagonal de dimensão $(F + M + 1) \times 11$ definida por três submatrizes, onde a primeira corresponde à primeira parte do robô, a segunda à segunda parte e a terceira aos três elementos deste robô que têm a capacidade de insuflar (os extremos e o módulo). A matriz diagonal que se segue corresponde à matriz que representa o estado deste robô endoscópico.

$$\left(\begin{array}{c} \begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{11}^2 & S_{11}^3 & S_{11}^4 \\ S_{12}^1 & S_{12}^2 & S_{12}^3 & S_{12}^4 \\ S_{13}^1 & S_{13}^2 & S_{13}^3 & S_{13}^4 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{1N}^1 & S_{1N}^2 & S_{1N}^3 & S_{1N}^4 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} S_{21}^1 & S_{21}^2 & S_{21}^3 & S_{21}^4 \\ S_{22}^1 & S_{22}^2 & S_{22}^3 & S_{22}^4 \\ S_{23}^1 & S_{23}^2 & S_{23}^3 & S_{23}^4 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{2M}^1 & S_{2M}^2 & S_{2M}^3 & S_{2M}^4 \end{bmatrix} \\ [B_1 \quad B_2 \quad B_3] \end{array} \right)$$

A dimensão da matriz genérica contém 11 colunas e $F+M+1$ linhas. Dependendo do número de módulos e dos componentes que insuflam (balões), podemos ter uma dimensão $(F + M + 1) \times K$; em que k é o número de componentes que insuflam, F o número de módulos da primeira parte e M o número de módulos da segunda parte. Somando uma linha para contabilizar a matriz dos componentes que insuflam, obtém-se a referida dimensão. Os elementos de cada matriz são substituídos pelo valor 0 e 1 conforme a posição do electroímã. No caso dos balões, é utilizada a mesma notação, correspondendo 1 a insuflar e 0 a não insuflar. A figura que se segue, representa o comportamento do robô quando lhe enviamos uma matriz diagonal como ordem. Para executar um avanço, o robô insufla primeiro as cabeças e depois encolhe por magnetização a segunda parte dos módulos. Posteriormente, desinsufla a cabeça da esquerda e insufla o módulo para que a primeira metade de módulos se desloque na direcção pretendida. As estruturas A a vermelho sofreram aumento de volume e as estruturas B azuis, não tiveram quaisquer alterações.

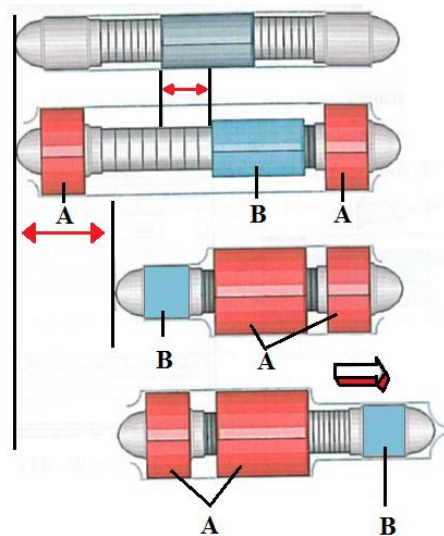


Figura 24. Simulação do controle do posicionamento do robô endoscópico com avanços e recuos (adaptado (8)).

Referiu-se anteriormente, que cada módulo continha 16 estados de configurações possíveis. No entanto, algumas delas foram excluídas durante o estudo cinemático deste robô por razões práticas. A primeira exclusão (representada na Tabela 6 com um traço) refere-se a duas configurações impossíveis de executar devido à natureza dos actuadores binários correspondentes à situação em que os dois electroímans das diagonais de cada módulo se magnetizam. Esta operação é impossível devido a um jogo de forças repulsivas e atractivas entre electroímans, que não a tornam de todo praticável.

A segunda exclusão (representada na Tabela 6 com uma cruz) foi decidida ao longo do estudo cinemático² com a finalidade de diminuir o custo energético e os movimentos pouco suaves. Esta consiste na magnetização de três electroímans de cada módulo que provocam uma luta incessante entre três forças atractivas e uma repulsiva (formando quatro configurações). Embora exista uma posição no espaço para que esta configuração permaneça estável, o custo energético da força repulsiva seria demasiado elevado, comparado com as restantes configurações possíveis. Por esta razão, e pelo facto da execução deste movimento ser demasiado brusco, decidiu-se não utilizar esta possibilidade. Assim, no final apenas foram consideradas dez configurações aceitáveis para cada módulo, representadas na tabela seguinte por um visto.

² O estudo cinemático baseia-se na obtenção de movimentos suaves e de baixo custo energético, com o intuito de minimizar danos nos tecidos humanos e de aumentar a autonomia do dispositivo robótico. Estes factores serão estudados no capítulo 6 deste trabalho.

Tabela 6. Configurações existentes para cada módulo e respectivos binários.

Configuração	Electroímán 1	Electroímán 2	Electroímán 3	Electroímán 4	Observações
0	0	0	0	0	✓
1	0	0	0	1	✓
2	0	0	1	0	✓
3	0	0	1	1	✓
4	0	1	0	0	✓
5	0	1	0	1	—
6	0	1	1	0	✓
7	0	1	1	1	✗
8	1	0	0	0	✓
9	1	0	0	1	✓
10	1	0	1	0	—
11	1	0	1	1	✗
12	1	0	1	0	✓
13	1	1	0	1	✗
14	1	1	1	0	✗
15	1	1	1	1	✓

Das decisões referidas anteriormente, resultam quatro modos diferentes para a disposição espacial entre módulos, que podem ser observados na figura abaixo: a magnetização de um electroímán (D), a magnetização de dois electroímans (C), a inexistência de magnetização (B) e a magnetização de todos os electroímans (A). De acordo com a figura abaixo fica claro que quando magnetizamos apenas um electroímán temos 4 possibilidades distintas para o fazer, o mesmo acontece com a magnetização de dois electroímans. Adicionando estas 8 configurações distintas com as restantes 2, obtém-se as 10 configurações aceitáveis.

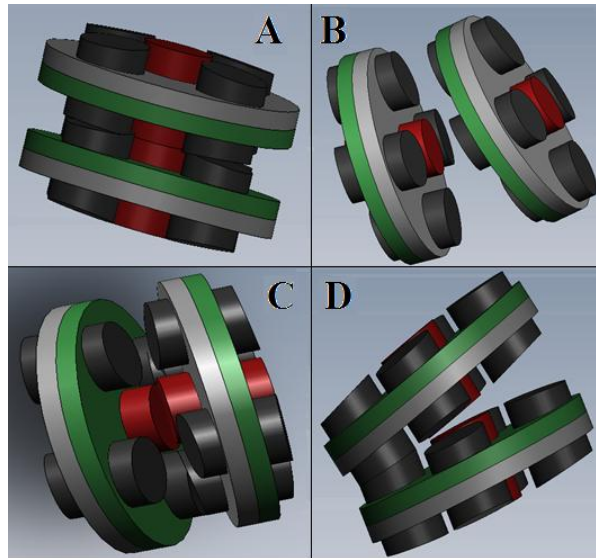


Figura 25. Posições espaciais possíveis entre dois módulos.

Estes módulos em forma de disco contêm configurações que conseguem descrever círculos quase perfeitos em torno de um eixo imaginário, o que implica grande capacidade para executar ângulos que facilitam a passagem do robô em curvaturas ou zonas mais estreitas. Toda esta habilidade é conferida pelos quatro actuadores binários existentes em cada módulo, que o tornam numa estrutura redundante e modular.

As diferentes posições conseguidas através da interacção dos electroímans possibilitou uma maior aproximação do robô às características reais da minhoca terrestre, e com isto, uma melhor adaptação à sua aplicação endoscópica. A hiper-redundância deste robô endoscópico é a chave da sua grande capacidade de locomoção, em locais muito escorregadios, irregulares e labirínticos, como é o caso do tubo digestivo humano.

4. Planificação de movimentos

A presença de estruturas redundantes num sistema robotizado torna a sua análise cinemática mais complexa. A cinemática é a ciência dedicada ao estudo do modo como se comportam os corpos no espaço ao longo do tempo, estabelecendo relações entre posição e orientação, através das matrizes de transformação homogénea³.

Neste capítulo é descrita a planificação de movimentos do robô endoscópico hiper-redundante, assente no controlo cinemático dos seus módulos. O objectivo deste estudo é controlar espacialmente todas as estruturas do robô de modo eficaz, para que este se mova através da superfície do tubo digestivo, considerando um dos extremos fixo. Os movimentos do robô endoscópico devem ser suaves, por forma a evitar danos nos tecidos, e facilitar a sua passagem sobre as estruturas do tubo digestivo, que são irregulares, curvilíneas e escorregadias. A figura seguinte representa a estrutura da planificação de movimentos cinemáticos para o robô hiper-redundante.

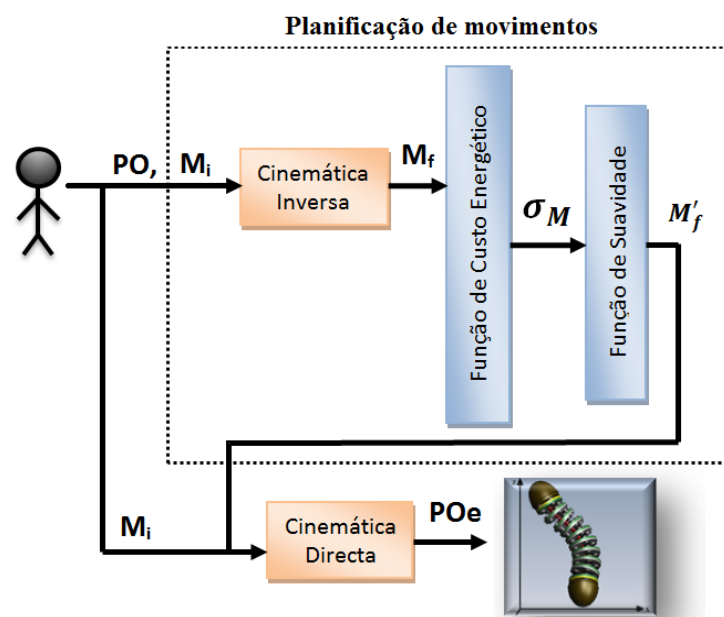


Figura 26. Estrutura da planificação de movimentos.

Nesta estrutura, o componente externo do sistema fornece os dados essenciais para dar início a todo o processo cinemático. Este processo funciona como uma espécie de máquina de produção, onde o bloco da cinemática inversa é responsável pela criação de sequências, que numa fase posterior são avaliadas pelos blocos do custo energético e da suavidade. Como resultado desta avaliação obtém-se uma nova sequência de configurações. Numa fase

³ Ver anexo A para mais detalhes.

seguinte, esta sequência é lançada no bloco da cinemática directa, que avalia a posição e a orientação de cada módulo, representando-os graficamente. Por outro lado, se o componente externo fornecer os dados ao bloco da cinemática directa, conhecer-se-ão os valores de posição e orientação de cada módulo do robô, incluindo o do seu extremo, bem como a sua representação gráfica.

Supondo que se pretende mover o robô hiper-redundante até um determinado ponto objectivo, o primeiro passo executado diz respeito ao bloco da cinemática inversa, que deverá prever o número de passos que o robô necessita efectuar até ao ponto desejado, bem como todo o percurso que deve assumir em cada passo, com o seu corpo. Desta forma, o bloco da **cinemática inversa** recebe como entradas todas as posições e orientações dos módulos do robô da sequência \mathbf{M}_i , e ainda a posição e a orientação pretendidas \mathbf{PO} , cujo objectivo é gerar uma sequência de configurações \mathbf{M}_f , que se aproxime da posição e orientação pretendidas. A cinemática inversa utiliza três funções que a auxiliam na concretização deste objectivo. A função *CRCcininv*, juntamente com a função *Calculo_PO*, constrói uma trajectória para o corpo do robô, recorrendo ao método da bissecção com o objectivo de cometer o menor erro na aproximação ao ponto destino. Posteriormente, a função *cininv* estabelece uma relação entre a trajectória e as melhores configurações que a descrevem, obtendo no final a sequência de configurações \mathbf{M}_f . Este bloco da cinemática inversa funciona como uma espécie de avaliação, do modo como o robô se deve comportar ao longo do espaço que lhe é reservado, para chegar a um ponto desejado, conhecendo o ponto de partida. Para além disso, assegura a monitorização e o controlo espacial do sistema robotizado, por solucionar uma sequência de configurações com uma trajectória aproximada ao ponto desejado. É de salientar que todos estes passos terão de passar pelos blocos da suavidade e do custo energético, para que os seus movimentos sejam suaves e a baixo custo.

A avaliação do custo baseia-se nas trocas de energia mínima estabelecidas entre os quatro electroímans de cada módulo, por forma a adquirir a configuração pretendida. Assim, o bloco da função do **custo energético** recebe a sequência de configurações final \mathbf{M}_f e inicial \mathbf{M}_i , obtendo todas as matrizes referentes à mudança de posição de cada módulo, com o menor custo possível (σ_M). Esta minimização energética, conferida pelo bloco da função de custos, possibilita um aumento da autonomia do dispositivo robotizado endoscópico, embora possa estar limitada, devido ao modo de actuação e ao tipo de actuadores utilizados. Outras considerações, como as perdas por histerese e por correntes de *Foucault*, pela presença de ferro, não foram tidas em conta, devido à ausência do protótipo durante a realização deste trabalho.

No bloco da função **suavidade** de movimentos é realizada a selecção das configurações intermédias para cada módulo, de acordo com os critérios estabelecidos. O seu *output* é o vector com a sequência de configurações finais, M'_f , cuja ordem de saída, foi estabelecida de acordo com a sua aproximação ao ponto desejado, no bloco da cinemática inversa. Este bloco é extremamente importante porque possibilita a obtenção de comportamentos suaves do robô, evitando eventuais danos, como sendo as perfurações, a destruição de alguns tecidos e os hematomas.

Para terminar o ciclo que representa a planificação de movimentos para o estudo cinemático, utilizou-se o bloco da cinemática directa. Este bloco permite a visualização gráfica da sequência de configurações de saída do bloco da cinemática inversa, passando pelas funções de menor custo energético e de suavidade. Deste modo, o bloco da **cinemática directa** recebe o vector M'_f e com o auxílio de três funções principais (*modulo*, *rodar* e *quadrado*) faz a sua representação gráfica. A função *módulo* recebe as configurações uma a uma e converte-as em valores angulares, para a rotação do eixo dos XX e dos ZZ. De seguida a função *rodar* utiliza o valor dos ângulos e determina a matriz de orientação e posição do respectivo módulo. A fase seguinte baseia-se na representação gráfica do módulo do robô usando os valores da matriz de posição e orientação, através da função *quadrado*. O resultado final deste bloco é o conhecimento do valor de posição e orientação do último módulo do robô, bem como de toda a sua visualização gráfica.

Para além deste caminho, o utilizador ainda pode optar por seguir apenas o bloco da **cinemática directa** fornecendo o vector da sequência de configurações M_i , para descobrir a localização espacial do seu extremo, **POe**. Este processo cinemático directo possibilita a descoberta da localização do robô endoscópico quando este é colocado pela primeira vez no tubo digestivo.

A estrutura da planificação de movimentos estudada, garante a eficácia do robô hiper-redundante durante a sua locomoção sobre superfícies acidentadas, como é o caso do intestino humano. Contudo, este estudo cinemático ainda necessita de atingir níveis mais elevados no seu desenvolvimento, que apenas serão possíveis por intermédio de simulações num protótipo.

5. Análise Cinemática

A planificação de movimentos assenta na análise e controlo cinemáticos da estrutura do robô endoscópico hiper-redundante, como foi referido no capítulo anterior.

A cinemática é a ciência que estuda a descrição analítica do movimento de corpos no espaço, ao longo do tempo. Para isso, estabelece uma relação entre coordenadas articulares (posições angulares e comprimento dos segmentos) e localização espacial do extremo do robô (posição e orientação). Para resolver este problema, existem dois estudos cinemáticos essenciais: a cinemática directa e a cinemática inversa. Seguidamente serão explicados em pormenor os dois problemas da análise cinemática, relativos ao robô endoscópico hiper-redundante.

5.1. Análise da Cinemática Directa de um módulo do robô

A análise cinemática directa de um robô endoscópico hiper-redundante é a parte do estudo cinemático que se preocupa com a determinação da posição e da orientação de um extremo, partindo das posições angulares e das dimensões dos segmentos. Nesta secção faz-se uma revisão dos métodos comuns utilizados para a resolução da cinemática directa de um robô, referindo o motivo do método utilizado para a resolução deste problema.

A explicação detalhada do algoritmo considerado para a resolução deste problema da cinemática directa, também é parte integrante desta secção.

5.1.1. O problema da Cinemática Directa

O problema da cinemática directa consiste em determinar a localização de um extremo do robô a partir dos valores das articulações (comprimento segmentos) e dos seus parâmetros geométricos (ângulos dos segmentos), como demonstra o diagrama seguinte.



Figura 27. Diagrama da cinemática directa.

$$\Leftrightarrow T((x, \alpha), p) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & -1 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & -1 & 16 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ então } \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \\ 16 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Este método baseia-se na multiplicação de matrizes T , correspondentes a uma sequência de alterações, neste caso a matriz T de rotação em torno do eixo OX com a matriz T de translação (49). Este método pode ser representado matematicamente por:

$$T = \prod_{i=1}^k A_i^{i-1}$$

onde k é o número de segmentos do robô e A a matriz T homogênea para cada segmento.

O método de **D-H** baseia-se na utilização de matrizes de transformação homogênea para estipular um conjunto de operações de rotação e translação no sistema de referência de cada segmento, a fim de determinar uma nova posição. Para tal, existem quatro transformações básicas que permitem relacionar o sistema de referência de um elemento i , com o sistema do elemento $i-1$. Estas transformações são:

1. A rotação θ em torno do eixo Z_0 que permite obter a transformação $\text{Rot}(\theta, Z_0)$. A ilustração A da Figura 29 descreve este passo.
2. Em seguida, uma translação do sistema $X_1 Y_1 Z_1$ de d unidades ao longo de Z_1 , que se pode observar através da imagem B da Figura 29. Esta operação é representada pela transformação $\text{Trans}(0, 0, d)$.
3. O terceiro passo (ilustração C da Figura 29) é transladar o sistema $X_1 Y_1 Z_1$ de a unidades ao longo do eixo X_1 , obtendo-se a transformação $\text{Trans}(a, 0, 0)$.
4. O último passo consiste na rotação α do sistema $X_1 Y_1 Z_1$, em torno do eixo X_1 , transformando-se na matriz $\text{Rot}(\alpha, X_1)$, que pode ser vista na representação D da Figura 29 (49; 50).

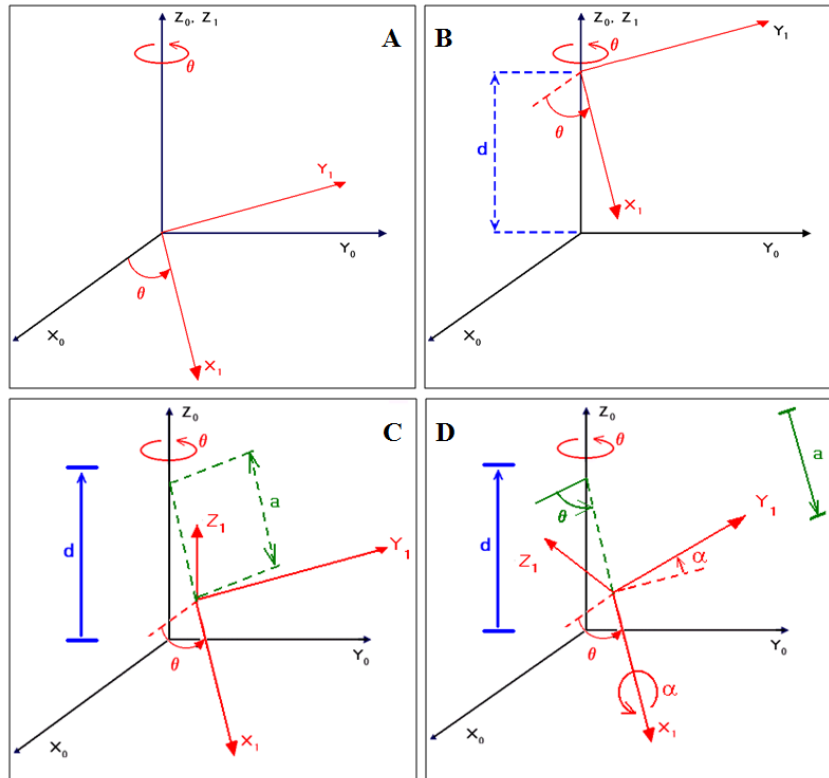


Figura 29. Vários passos de rotação e translação do método de Denavit-Hartenberg para a cinemática inversa (50).

Os seguintes passos, descritos pelas quatro gravuras da Figura 29 podem ser representadas pela transformação T abaixo:

$$T = Rot(\theta, z_0) Trans(0,0,d) Trans(a,0,0) Rot(\alpha, x_1) \leftrightarrow$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\cos \alpha \sin \theta & \sin \alpha \sin \theta & a \cos \theta \\ \sin \theta & \cos \alpha \cos \theta & -\sin \alpha \cos \theta & a \sin \theta \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Outro método usado, para a resolução do problema da cinemática directa é o **quatérnios**, cuja intenção é determinar a posição e a orientação do sistema de referência associado ao extremo do robô (robô com quatro segmentos). Tendo em conta que o sistema $\{S_0\}$ diz respeito à base, o que se pretende é relacionar os comprimentos dos segmentos (l_1, l_2, l_3 e l_4) do robô, com os ângulos por ele formados (q_1, q_2, q_3 e q_4), de modo a calcular a localização do seu extremo. Por conseguinte, estabelece-se um conjunto de relações entre todos os segmentos, desde a base até ao extremo. Para tornar este método mais explícito, consideram-se as seguintes transformações para um determinado robô manipulador:

$$\begin{aligned} S_0 \rightarrow S_1 &: T(z, l_1) \text{ Rot}(z, q_1) & S_1 \rightarrow S_2 &: T(x, l_2) \text{ Rot}(x, q_2) \\ S_2 \rightarrow S_3 &: T(x, l_3) \text{ Rot}(z, 0) & S_3 \rightarrow S_4 &: T(z, -q_3) \text{ Rot}(z, q_4) \end{aligned}$$

Na passagem de um sistema para outro é classificada a transformação sofrida pela junta correspondente aos respectivos segmentos. A representação de um deslocamento é descrita pelo vector p_i , como tal para cada segmento tem-se o respectivo vector:

$$p_1 = (0,0,1) \quad p_2 = (l_2, 0,0) \quad p_3 = (l_3, 0,0) \quad p_4 = (0,0, -q_3)$$

Entre cada junta podem ocorrer rotações que são representadas neste método pela expressão Q_i , onde:

$$Q_1 = (\hat{C}_1, 0, 0, \hat{S}_1), Q_2 = (\hat{C}_2, 0, 0, \hat{S}_2), Q_3 = (1, 0, 0, 0) \text{ e } Q_4 = (\hat{C}_4, 0, 0, \hat{S}_4).$$

$$\text{sabendo que } \hat{C}_i = \cos\left(\frac{q_i}{2}\right) \text{ e } \hat{S}_i = \sin\left(\frac{q_i}{2}\right).$$

As equações dos quatérnio têm por objectivo calcular a localização do objecto de um sistema $\{S_i\}$, localizado pelo vector de posição a_i e pelo seu quatérnio de rotação R_i . Para tal, calcula-se através do sistema de referência $\{S_{i-1}\}$, o respectivo vector de posição a_{i-1} e o quatérnio de rotação R_{i-1} , representados da seguinte forma:

$$(\mathbf{0}, a_{i-1}) = Q_i(\mathbf{0}, a_i)Q_i^* + (\mathbf{0}, p_i) \quad \text{(Equação 1)}$$

$$R_{i-1} = Q_i R_i$$

onde p_i representa o deslocamento e Q_i a rotação que permitem converter o sistema $\{S_{i-1}\}$ em $\{S_i\}$. Substituindo a Equação 2 para os sistemas de referência $\{S_0\}, \{S_1\}, \{S_2\}, \{S_3\}$ e $\{S_4\}$, onde Q_1^* corresponde ao conjugado de Q_1 tem-se que:

$$\begin{aligned} (\mathbf{0}, a_0) &= Q_1(\mathbf{0}, a_1)Q_1^* + (\mathbf{0}, p_1) & R_0 &= Q_1 R_1 \\ (\mathbf{0}, a_1) &= Q_2(\mathbf{0}, a_2)Q_2^* + (\mathbf{0}, p_2) & R_1 &= Q_2 R_2 \\ (\mathbf{0}, a_2) &= Q_3(\mathbf{0}, a_3)Q_3^* + (\mathbf{0}, p_3) & R_2 &= Q_3 R_3 \\ (\mathbf{0}, a_3) &= Q_4(\mathbf{0}, a_4)Q_4^* + (\mathbf{0}, p_4) & R_3 &= Q_4 R_4 \end{aligned}$$

Simplificando todas estas equações, obtém-se:

$$\begin{aligned} (\mathbf{0}, a_0) &= Q_{1234}(\mathbf{0}, a_4)Q_{1234}^* + Q_{123}(\mathbf{0}, p_4)Q_{123}^* + Q_{12}(\mathbf{0}, p_3)Q_{12}^* + Q_1(\mathbf{0}, p_2)Q_1^* + (\mathbf{0}, p_1) \leftrightarrow \\ \leftrightarrow (\mathbf{0}, a_0) &= \begin{pmatrix} 0, a_{4x}\hat{C}_{112244} - a_{4y}\hat{S}_{112244} + l_3\hat{C}_{1122} + l_2\hat{C}_{11}, \\ a_{4y}\hat{C}_{112244} - a_{4x}\hat{S}_{112244} + l_3\hat{S}_{1122} + l_2\hat{S}_{11}, a_{4z} - q_3 + l_1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

A partir desta expressão consegue-se determinar a posição do sistema $\{S_0\}$, sabendo a orientação do extremo do robô, através da seguinte equação:

$$R_0 = Q_1 Q_2 Q_3 Q_4 R_4 = Q_{1234} R_4 = (\hat{C}_{124}, 0, 0, \hat{S}_{124})$$

Donde se retira que as coordenadas do extremo do robô, relativamente ao sistema de referência da base $\{S_0\}$ são dadas por:

$$x = a_{0x} = l_3 \cos(q_1 + q_2) + l_2 \cos(q_1)$$

$$y = a_{0y} = l_3 \sin(q_1 + q_2) + l_2 \sin(q_1)$$

$$z = a_{0z} = l_1 - q_3$$

e que o seu extremo, se encontra rodado com um ângulo $(q_1 + q_2 + q_4)$ em torno de zz segundo a seguinte transformação de rotação $Rot(z, q_1 + q_2 + q_4)$.

Este método permite determinar a posição e a orientação de sistemas de referência relativos à base e ao extremo do robô, conhecendo para isso os quatro componentes que representam as coordenadas do quatérnio da base $Q(e, i, j, k)$ (49).

De entre os métodos descritos, o método de transformação homogénea é aquele cujo algoritmo é computacionalmente pesado, uma vez que para representar um robô com 6 graus de liberdade, necessita de doze componentes (49). Em contrapartida, o método quatérnios é computacionalmente mais eficiente e pesado. No fundo, este último método é um modo abreviado de utilizar as matrizes de transformação homogénea (49).

A adaptação da noção de cinemática directa de um robô manipulador para um robô hiper-redundante, gera algumas diferenças ao nível da sua implementação, embora a sua representação esquemática seja semelhante. A figura seguinte mostra as semelhanças entre os dois tipos de robôs, onde o objectivo é o mesmo, determinar o extremo do robô. O robô hiper-redundante apresenta dois extremos e como tal, fixa um, tornando-o ponto de partida para chegar a um dos lados. Se este possuir estruturas intermédias que insuflam, também se podem tornar em pontos de partida.

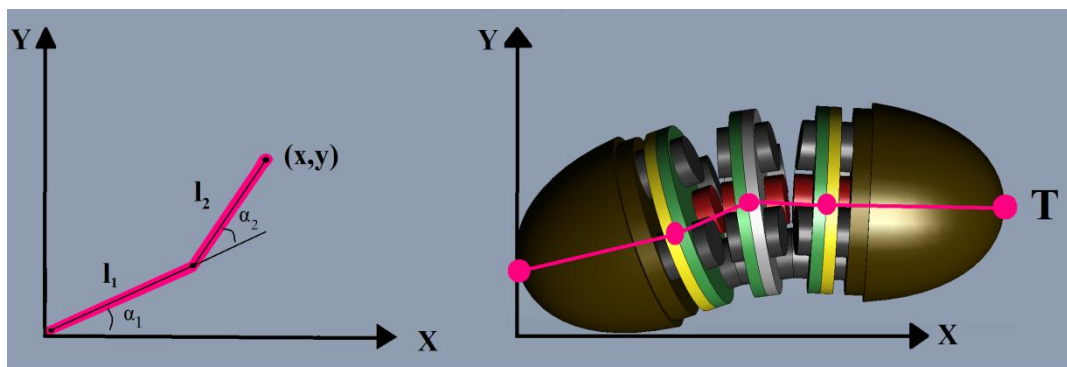


Figura 30. Comparação da cinemática directa entre o robô hiper-redundante (à direita) e o robô manipulador (à esquerda).

Assumindo que a ilustração do lado esquerdo da figura anterior representa um robô manipulador simples, o seu extremo pode ser representado geometricamente pelas seguintes equações:

$$(x, y) \rightarrow \begin{cases} x = l_1 \cos \alpha_1 + l_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \\ y = l_1 \sin \alpha_1 + l_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \end{cases}$$

No caso da imagem do lado direito, o processo é mais complexo, uma vez que se trata de um robô hiper-redundante. A solução para o problema de cinemática directa deste trabalho foi desenvolvida utilizando um método heurístico. O objectivo deste problema é determinar um dos extremos do robô, assumindo que um deles se encontra fixo. Para isso, utilizou-se a matriz de transformação homogénea T para representar a posição e a orientação, uma vez que cada componente do robô apresenta redundância (mais de 6 graus de liberdade). Esta matriz T é apresentada do seguinte modo:

$$T = \begin{bmatrix} \text{Rotação} & \text{Translação} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz T é usada para caracterizar o extremo de um segmento do robô quando o número de graus de liberdade é superior a 2.

O método heurístico usado consiste na sucessão de reconstruções da matriz T para cada componente, de acordo com os movimentos aceitáveis como configurações para este robô. A matriz resultante como produto final representará a matriz posição-orientação do referido extremo do robô.

A utilização do método D-H não se adequa, por se tornar num método rígido no que diz respeito às regras utilizadas para a sua execução. Esta rigidez mostrou-se incompatível com o este problema cinemático directo. Em contrapartida, o método quatérnios e o método das matrizes de transformação homogénea são duas possibilidades bastante viáveis porque permitem obter o mesmo resultado. Estes são vistos como métodos iguais no que diz respeito à representação cinemática espacial do extremo do robô, embora a sua forma de implementação seja diferente (49).

5.1.2. Algoritmo da Cinemática Directa

O estudo da análise cinemática directa do robô hiper-redundante foi realizado no software de computação numérica MATLAB[®], sem recorrer a nenhuma *toolbox* em específico. Apenas foram utilizadas funções de origem vectorial e de representação gráfica.

Na secção anterior referiu-se que o método utilizado para a análise cinemática directa do robô foi um método heurístico, (51; 47), por permitir maior coerência na execução deste propósito. O método heurístico criado para a localização espacial do extremo do robô baseia-se em três funções principais: a função *módulo*, a função *rodar* e a função *quadrado*. A função *modulo* converte as configurações em valores angulares, que são úteis à função *rodar*. Esta segunda função, por sua vez, estabelece uma sequência de rotações e translações para

obter a posição e orientação adequadas a cada módulo do robô. A última função estabelece as distâncias necessárias para o ponto central de cada módulo, desenhando um quadrado, que representa os quatro electroímans. A figura seguinte descreve o algoritmo da cinemática directa.

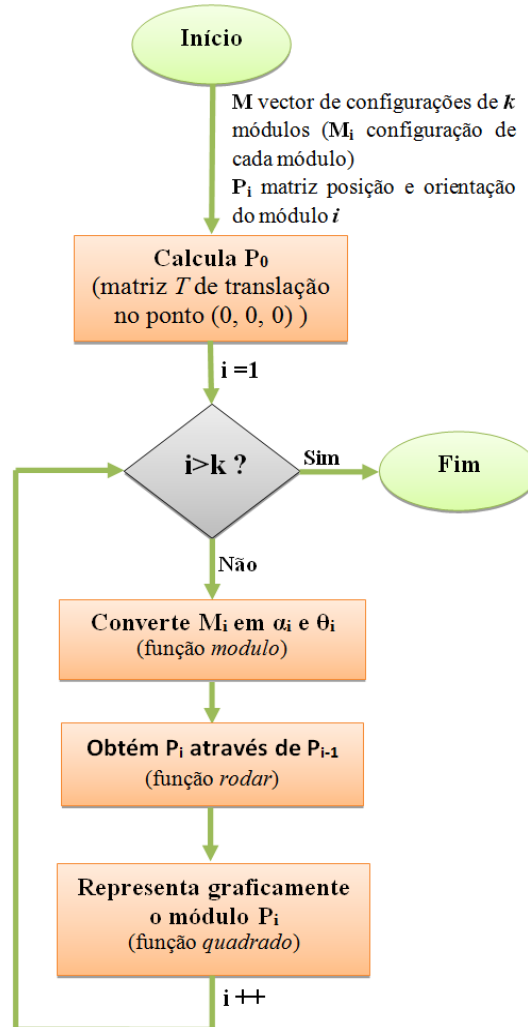


Figura 31. Algoritmo da cinemática directa.

Por uma questão de coerência, todos os cálculos efectuados para a localização espacial do robô endoscópico tiveram como ponto de referência o seu centro. Foi definida uma matriz de transformação homogénea de translação com a posição no ponto (0,0,0), que funciona como posição e orientação iniciais de referência. Além disso, também se encontra definido o vector referente à construção gráfica dos quadrados, que representam cada componente do robô.

Na cinemática directa recebem-se os valores referentes aos deslocamentos angulares, e obtém-se como produto final, a posição e a orientação do extremo do robô. Por isso, define-se um vector linha, cujo comprimento é igual ao número de componentes do robô.

Todo o processo seguinte passa por um comportamento cíclico englobando as três funções referidas. Este termina com a leitura do último valor do vector linha, que contém as configurações de cada componente. Este processo inicia, com a atribuição de um valor de rotação ao eixo dos XX e dos ZZ, na função *módulo*. Posteriormente na função *rodar*, ocorre a reconstrução da matriz T , no ponto (0,0,0), originando uma nova matriz T , que representa a nova posição e orientação obtidas pelos valores de rotação de XX e de ZZ. Este comportamento é cíclico e realiza-se para cada módulo do robô, em que a matriz posição e orientação do módulo anterior assume a posição inicial do módulo seguinte, para que se possa calcular a nova matriz de transformação T do módulo em questão. A última configuração trará o valor da posição e orientação do extremo do robô que é o objectivo deste estudo da cinemática directa.

Seguidamente serão descritas em pormenor as três funções responsáveis pela cinemática directa deste robô, representadas acima na Figura 31.

Função *módulo*

A função *módulo* fornece os valores dos ângulos de rotação em torno de XX e de ZZ solicitados pela função *rodar*. O corpo da função é constituído por uma estrutura de decisão múltipla, que expõe as dez configurações possíveis, onde as instruções em cada escolha correspondem à variação dos valores dos ângulos θ e α .

Numa fase inicial definiu-se θ como o ângulo derivado da rotação do eixo do ZZ e α o ângulo formado pela rotação do eixo do XX. O ângulo θ parte do valor zero e vai sofrendo alterações conforme o tipo de configuração. Ao contrário do ângulo α que é definido pela expressão:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{h}{L}\right)$$

onde h é a distância mínima imposta entre os pontos centrais de cada componente e L o comprimento do quadrado da representação gráfica, que se pode deduzir a partir da imagem abaixo.

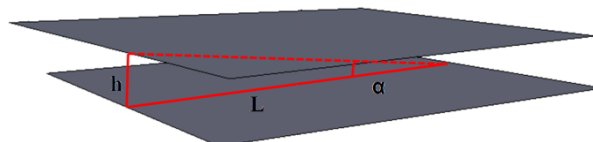


Figura 32. Representação da equação de α .

Assume-se então um valor de α e θ para cada uma das dez configurações caracterizadas a seguir:

- Para a configuração **0**, todos os electroímans se encontram magnetizados, o que significa que não ocorre rotação em XX e em ZZ; o valor de α e de θ são nulos.
- Na configuração **15**, todos os electroímans se encontram desmagnetizados, o que significa que não ocorre rotação em XX ($\alpha = 0$) e também não ocorre rotação em ZZ ($\theta = 0$). Para se manter todos os electroímans afastados, o valor da sua translação mínima, corresponderá a um novo valor de h , dado por:

$$h = h + tt \leftrightarrow h = h + L \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

que corresponde ao acréscimo de distância mínima entre electroímans estipulada como metade da distância mínima normal (Figura 33). Este valor estipulado não tem qualquer significado lógico, apenas foi usado para permitir uma melhor percepção da representação gráfica.

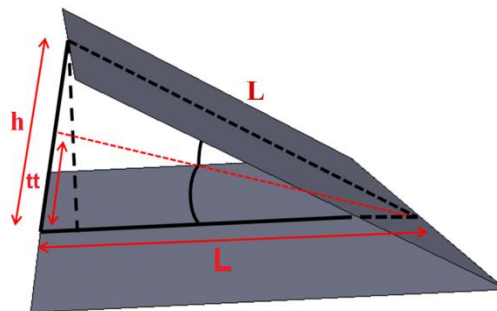


Figura 33. Representação da dedução da equação de h .

- Nas configurações 1, 2, 4, 8, 3, 6, 9 e 12 apenas varia o valor de rotação em torno de ZZ (θ varia conforme a configuração), logo $\alpha = 0$. A imagem abaixo representa a estrutura modular estudada para todas as configurações possíveis, onde ocorre rotação em torno do eixo do ZZ (θ).

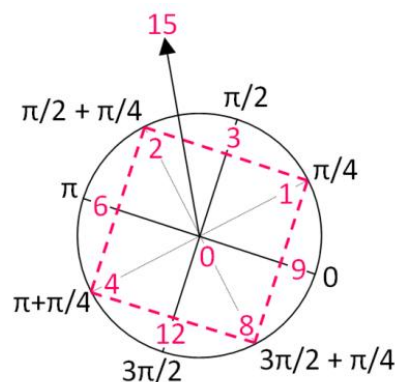


Figura 34. Valores do ângulo θ para todas as configurações possíveis.

A função *modulo* apenas auxilia a função *rodar*, que funciona como uma espécie de conversor entre binários e parâmetros geométricos (ângulos) que são de extrema importância para este modelo de cinemática directa.

Função *rodar*

Baseada na ideia da sequência de movimentos de rotação e translação, da teoria de Denavit-Hartenberg, a função *rodar* apresenta uma série de movimentos espaciais específicos. De acordo com esta ideia, estabeleceu-se que a matriz T de translação (P_o), no ponto (0,0,0) seria a matriz base para iniciar este modelo de cinemática directa, sempre que fosse invocada.

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \leftrightarrow P_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Os vectores ortonormais \vec{n} , \vec{o} e \vec{a} , representados nesta matriz T , são responsáveis pela orientação, enquanto que o vector p é responsável pela posição constituindo as características essenciais para localizar um corpo rígido no espaço. Os vectores ortonormais representados são vetores unitários que indicam a orientação de um determinado ponto no espaço. O vector unitário \vec{a} representa a orientação em ZZ, o vector \vec{o} define a orientação em yy e o \vec{n} a orientação em XX. Cada um deles define um eixo coordenado, como se observa na imagem abaixo.

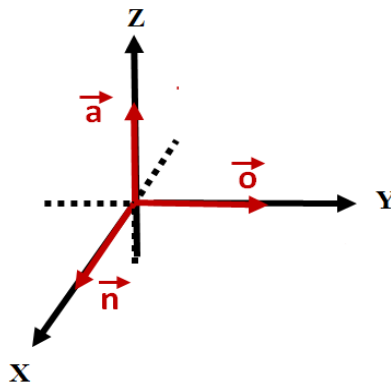


Figura 35. Representação dos vectores ortonormais \vec{n} , \vec{o} e \vec{a} .

Esta função, que recebe da função *modulo* os valores dos ângulos α e θ que são responsáveis pela posição e orientação finais, bem como o valor da distância mínima h entre módulos, está dividida em seis passos distintos.

Inicialmente é executado um movimento de rotação em torno de ZZ com o valor do ângulo θ . Ao rodarmos o eixo do ZZ, ocorre uma mudança de orientação em x e em y , relativamente ao sistema de referência inicial (ver figura abaixo).

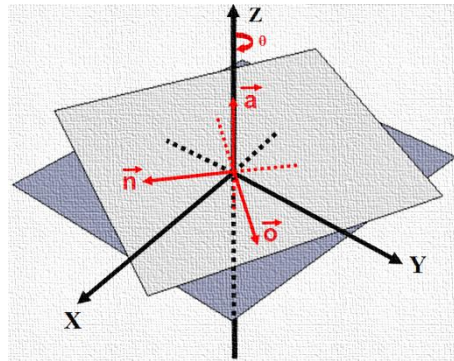


Figura 36. Rotação do módulo em torno do eixo ZZ.

Para se calcularem os novos valores de orientação de \vec{n} e \vec{o} é necessário utilizar a função *rot_vect* criada no MATLAB® para o devido efeito, que permite determinar o novo vector resultante da rotação angular de um vector em relação a outro. Esta função permite calcular o novo valor de n_1 e o_1 , sendo que os restantes valores permanecem iguais, uma vez que se trata de uma rotação em torno de zz . A equação seguinte descreve todo este processo.

$$\begin{cases} a_1 = a_0 \\ n_1 = \text{rot_vect}(a_0, \theta, n_0) \\ o_1 = \text{rot_vect}(a_0, \theta, o_0) \\ p_1 = p_0 \end{cases}$$

Reconstruindo a nova matriz T obtém-se uma nova matriz P_1 que funcionará como ponto de partida para o seguinte passo.

$$P_1 = \begin{bmatrix} n_1 & o_1 & a_1 & p_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O próximo passo é executar uma translação h sobre o eixo dos ZZ a fim de garantir a distância mínima entre os pontos centrais de cada módulo, como se encontra representado na figura seguinte.

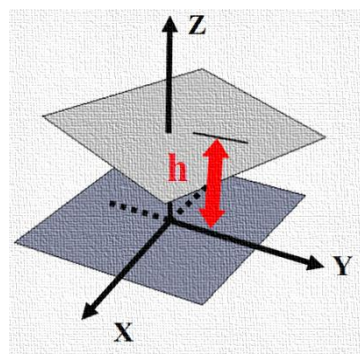


Figura 37. Translação h em torno do eixo dos ZZ.

Quando ocorre o deslocamento h ao longo do eixo dos ZZ, apenas o vector posição sofre alterações. O novo vector posição p_2 será a soma entre o seu vector anterior e a distância h relativamente à orientação do vector ortonormal \vec{a} anterior, conforme a equação seguinte:

$$\begin{cases} n_2 = n_1 \\ o_2 = o_1 \\ a_2 = a_1 \\ p_2 = p_1 + h \times a_1 \end{cases}$$

Com todas estas alterações consegue-se construir uma nova matriz de posição e orientação, a matriz P_2 , dada por:

$$P_2 = \begin{bmatrix} n_2 & o_2 & a_2 & p_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O terceiro passo consiste na rotação de $\frac{\alpha}{2}$ em torno do eixo dos XX (ver figura abaixo), para garantir a possibilidade de efectuar as configurações que apresentam apenas 1 ou 2 electroímans magnetizados. Devido ao enorme desvio que esta inclinação provoca, executa-se a rotação em torno de XX em dois passos distintos.

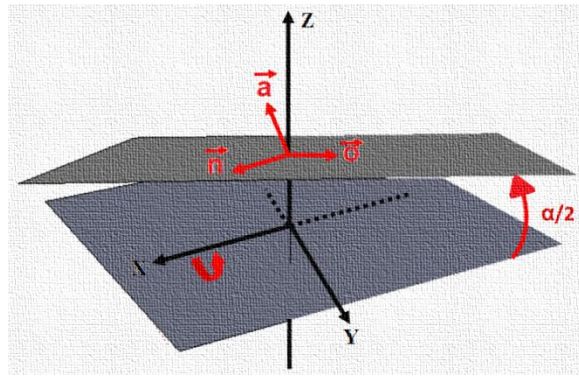


Figura 38. Rotação de $\frac{\alpha}{2}$ em torno de XX.

Como foi referido, rodar em torno de um eixo, provoca deslocamento do seu sistema de referência e conseqüentemente dos seus vectores unitários. Rodar em torno de XX provoca alteração das coordenadas dos vectores unitários \vec{o} e \vec{a} , que são corrigidas pela função *rot_vect*, tal como em matrizes anteriores, definidas por:

$$\begin{cases} n_3 = n_2 \\ o_3 = rot_vect\left(n_2, \frac{\alpha}{2}, o_2\right) \\ a_3 = rot_vect\left(n_2, \frac{\alpha}{2}, a_2\right) \\ p_3 = p_2 \end{cases}$$

Preenchendo novamente com os valores dos vectores ortonormais, obtém-se uma nova matriz T , designada por P_3 .

$$P_3 = \begin{bmatrix} n_3 & o_3 & a_3 & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O quarto passo é relativo ao ajuste do passo anterior, ou seja, à reposição do posicionamento correcto a partir do vector posição. Como é possível ver pela figura seguinte, a posição foi deslocada a uma distância tt .

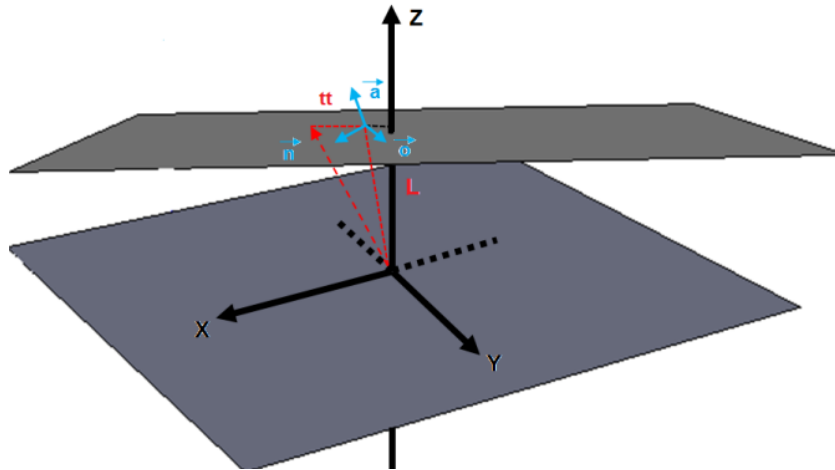


Figura 39. Deslocamento do centro do componente do robô.

A equação abaixo, demonstra que para corrigir o desvio somou-se à posição p_3 a distância tt sob a forma de vector unitário \vec{a}_3 .

$$\begin{cases} n_4 = n_3 \\ o_4 = o_3 \\ a_4 = a_3 \\ p_4 = p_3 + tt \times a_3 \end{cases}$$

A equação resultante do valor de tt baseia-se em:

$$tt = L \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Este valor apenas resulta numa espécie de segurança entre módulos, para que se mantenha a distância necessária entre electroímans, uma vez que com a inclinação de α alguns deles poderiam colidir ou até mesmo sofrer acção das forças atractivas/repulsivas.

A matriz T final resultante deste passo é dada por:

$$P_4 = \begin{bmatrix} n_4 & o_4 & a_4 & p_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O passo número cinco baseia-se na rotação do eixo dos XX com o restante valor de $\frac{\alpha}{2}$ para perfazer o referido ângulo α dado pela função módulo, como se pode observar na figura abaixo.

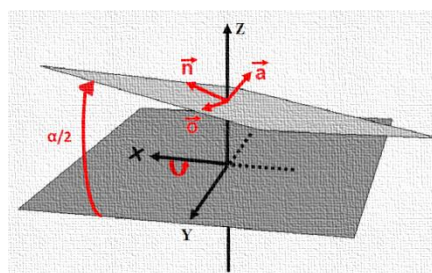


Figura 40. Rotação de $\frac{\alpha}{2}$ em torno de XX.

Para realizar novamente esta tarefa, basta utilizar a função *rot_vect* que possibilita a rotação angular referida entre dois vectores unitários, de acordo com as seguintes equações:

$$\begin{cases} n_5 = n_4 \\ o_5 = rot_vect\left(n_4, \frac{\alpha}{2}, o_4\right) \\ a_5 = rot_vect\left(n_4, \frac{\alpha}{2}, a_4\right) \\ p_5 = p_4 \end{cases}$$

Mais uma vez se verifica que quando se roda o eixo do XX apenas variam os vectores directores \vec{o} (OY) e \vec{a} (OZ). Depois das alterações fica-se com uma matriz T definida por P_5 .

$$P_5 = \begin{bmatrix} n_5 & o_5 & a_5 & p_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O último processo de transformação matricial permite repor a posição inicial do referido componente através da rotação de $-\theta$ relativamente ao eixo dos ZZ, como ilustrado na figura seguinte.

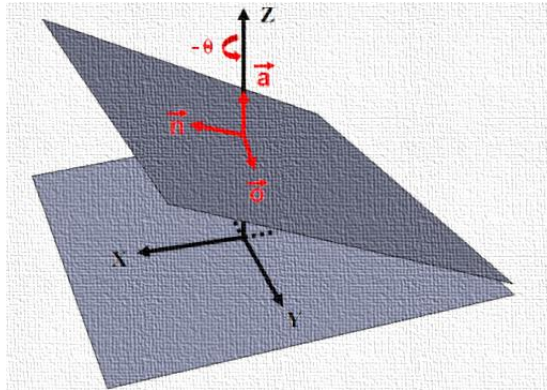


Figura 41. Rotação de $-\theta$ em torno dos ZZ.

Uma vez que a rotação em torno do eixo dos ZZ altera os valores das coordenadas dos vectores unitários \vec{o} e \vec{n} é necessário usar a função *rot_vect*, tal como é descrito pelas equações abaixo.

$$\begin{cases} a_6 = a_5 \\ n_6 = rot_vect(a_6, -\theta, n_5) \\ o_6 = rot_vect(a_6, -\theta, o_5) \\ p_6 = p_5 \end{cases}$$

Reordenando todos estes valores numa matriz T obtém-se uma nova matriz P_6 , dada por:

$$P_6 = \begin{bmatrix} n_6 & o_6 & a_6 & p_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A matriz P_6 é a matriz resultante deste processo de transformação para a obtenção da matriz de configuração com a posição e orientação correspondentes, e que será utilizada pela função *quadrado* para a representação gráfica, e posteriormente como matriz base para o cálculo da matriz de posição e orientação para o módulo seguinte.

Função *quadrado*

Esta função tem por objectivo representar graficamente os quadrados relativos aos vários módulos e cabeças do robô. Para auxiliar a construção do quadrado como representação gráfica de um componente do robô, onde cada vértice representa um electroímã é necessário obter a posição e orientação de cada vértice. Para calcular a distância entre o ponto central e o seu vértice estabelece-se uma equação baseada no teorema de Pitágoras, definida por:

$$x^2 = \left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 \leftrightarrow x = L \times \frac{\sqrt{2}}{2}$$

A equação anterior pode ser representada pela figura abaixo que exemplifica o nosso problema.

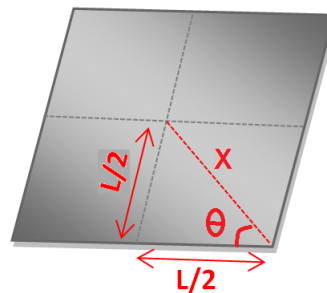


Figura 42. Esquema auxiliar para o cálculo da distância do centro até ao vértice.

Utilizando a orientação da matriz e a distância x do vértice ao centro é possível saber a posição espacial dos quatro vértices do quadrado do respectivo módulo. Para tal, é necessário calcular em cada vértice a soma entre o ponto central (p_6) e um novo ponto calculado. Esse novo ponto é o resultado de um vector por um escalar. Este vector resulta da rotação entre vectores unitários, cujo valor do ângulo depende da posição do vértice, usando para isso a função *rot_vect* e o escalar representa o valor de x calculado anteriormente. O resultado final desta operação é um vector que descreve o caminho do vértice da seguinte forma:

$$on = uni_vect(n + o)$$

$$P_1 = p_6 + rot_vect\left(a, \frac{pi}{2}, on\right) \times x$$

$$P_2 = p_6 + rot_vect(a, 0, on) \times x$$

$$P_3 = p_6 + rot_vect\left(a, \frac{-pi}{2}, on\right) \times x$$

$$P_4 = p_6 + rot_vect(a, pi, on) \times x$$

A função auxiliar *uni_vect* criada no MATLAB[®], calcula o vector unitário resultante da soma do vector \vec{n} por \vec{o} . Ao multiplicar o vector unitário por um escalar, adicionando o valor da posição p_6 , obtém-se o ponto do vértice pretendido. Fez-se o mesmo para os quatro pontos,

e representou-se o módulo graficamente. De seguida usou-se a função *line* do Matlab para unir os pontos que desenham o quadrado, e representou-se também os seus vectores ortonormais. A função *quadrado* apenas é utilizada como representação gráfica para uma melhor percepção do comportamento de cada módulo no robô. A figura abaixo é um exemplo da utilização do algoritmo da cinemática directa para a sequência $M = [2\ 4\ 4\ 4\ 5\ 6\ 6\ 12]$.

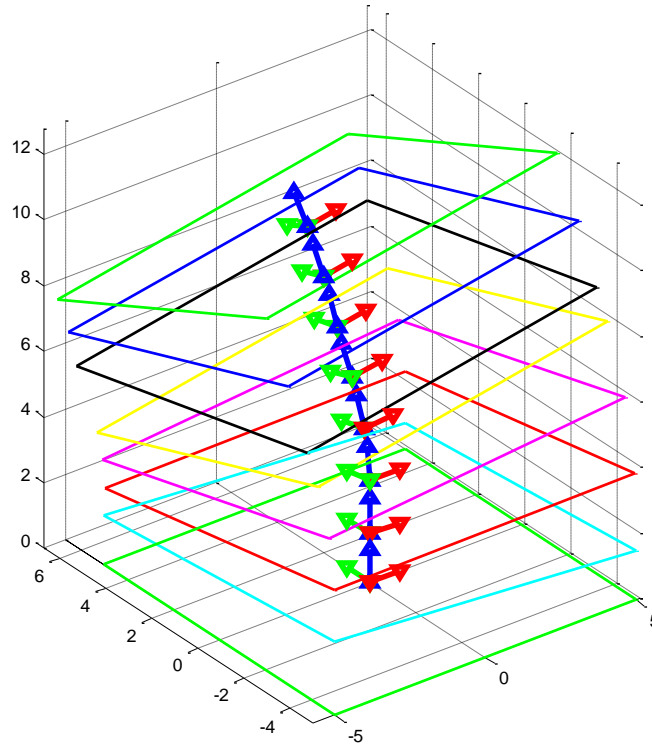


Figura 43. Representação gráfica da sequência $M=[2\ 4\ 4\ 4\ 5\ 6\ 6\ 12]$ da cinemática directa.

A análise da figura permite verificar que este método apresenta um ponto fixo no ponto $(0,0,0)$ e que cada módulo está representado com cores distintas através de um quadrado e dos seus vectores de orientação. Os vectores orientadores descrevem o seguimento da espinha dorsal do robô, onde é notória a inclinação apresentada por cada módulo relativa à natureza da configuração.

5.2. Análise cinemática Inversa de um Módulo do robô

A análise cinemática inversa de um robô endoscópico hiper-redundante é a outra parte do estudo cinemático que foca o comportamento angular de cada componente do robô, tendo em conta uma posição objectivo e conhecendo, à partida, todas as posições e orientações iniciais. Nesta segunda secção do estudo da cinemática inversa referem-se os métodos comuns usados para a sua resolução, bem como as razões para a escolha do método utilizado neste problema

cinemático. Para completar o estudo da análise cinemática inversa descreve-se o algoritmo para a resolução deste problema, aplicado ao robô endoscópico hiper-redundante.

5.2.1. O Problema da Cinemática Inversa

O problema da cinemática inversa baseia-se na obtenção das configurações dos elementos estruturais do robô, conhecendo o ponto para o qual pretendemos alterar a sua posição e orientação. A figura seguinte descreve todo o processo da cinemática inversa, onde a partir de um ponto conhecido, com posição e orientação, se pretende adquirir os valores das articulações (comprimento dos segmentos) e dos parâmetros geométricos (as posições angulares).

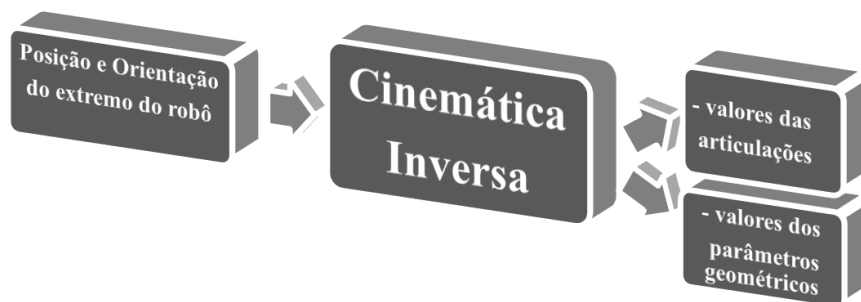


Figura 44. Diagrama da cinemática inversa.

Geralmente, a resolução do problema cinemático inverso passa por seguir uma determinada trajectória para se obterem as configurações mais aproximadas. Possuir uma solução do tipo iterativo não garante a eficácia do método e, portanto, a sua resolução depende das características do robô e do seu número de graus de liberdade.

Tal como acontece na cinemática directa, existem muitas configurações possíveis para atingir o mesmo objectivo, por isso o melhor será impor determinadas regras e restrições de modo a minimizar as possibilidades. O cálculo da cinemática inversa é mais fácil em robôs cujo número de graus de liberdade é reduzido, porque se conhece mais rapidamente o modelo cinemático directo, desenvolvendo-se deste modo, um novo modelo. O aumento de graus de liberdade aumenta a complexidade do robô e conseqüentemente o modo como a cinemática inversa pode ser resolvida. Seguidamente serão retratados dois dos métodos mais usados para resolver o problema de cinemática inversa em robôs convencionais.

O **Método Geométrico** (49) é um dos métodos utilizado na resolução deste problema cinemático. Normalmente é aplicado em robôs com poucos graus de liberdade ou naqueles cuja posição do extremo final se caracteriza pelos primeiros graus de liberdade. Este procedimento, tem como finalidade encontrar um número suficiente de relações geométricas,

onde intervenham as coordenadas do extremo, as coordenadas articulares e as dimensões físicas dos seus elementos. Como o modelo do robô hiper-redundante em estudo apresenta um número elevado de graus de liberdade, este modelo não será explicado em pormenor (49).

O outro método utilizado, na resolução deste problema, é o método das **Matrizes de Transformação Homogénea** (49) que se baseia no conhecimento das matrizes do processo de cinemática directa. Por exemplo, no caso de o robô possuir apenas 3 graus de liberdade, o seu problema cinemático directo é o resultado da matriz T , dada pela expressão $T = A_1^0 A_2^1 A_3^2$. Note-se que a transformada inversa de T é dada por:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & -n^T p \\ n_y & o_y & a_y & -o^T p \\ n_z & o_z & a_z & -a^T p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tendo em conta a equação T anterior, o modelo cinemático inverso é expresso segundo estas duas equações:

$$(A_1^0)^{-1} T = A_2^1 A_3^2$$

$$(A_1^0)^{-1} (A_2^1)^{-1} T = A_3^2$$

Do lado esquerdo destas duas expressões encontram-se as funções das variáveis articulares e do lado direito as variáveis articulares, tendo em conta que a matriz T é conhecida. A partir da primeira equação, consegue-se calcular $(A_1^0)^{-1}$ porque se encontra isolada das restantes. Efectuando os restantes cálculos obtém-se os valores das restantes variáveis articulares (ângulos) (49).

Nenhum destes métodos foi utilizado para a construção do algoritmo de cinemática inversa, devido à impossibilidade deste em realizar os cálculos das novas configurações do robô para a nova posição destino. O simples facto de o sistema robotizado apresentar um número elevado de graus de liberdade impede a utilização dos métodos supra referidos. Por esta razão foi necessário desenvolver um novo algoritmo para o estudo da cinemática inversa do robô hiper-redundante, que será explicado na secção seguinte.

5.2.2. Algoritmo da Cinemática Inversa

Para o estudo da análise cinemática inversa do robô hiper-redundante foi utilizado o software de computação numérica MATLAB[®], usando apenas funções de origem vectorial e de representação gráfica, não sendo necessária a utilização de nenhuma *toolbox* em específico.

Como foi possível comprovar na secção anterior, nenhum dos métodos referidos foi utilizado para a análise do estudo da cinemática inversa, uma vez que estes não estão adequados a robôs com um elevado número de graus de liberdade. Desta forma, desenvolveu-se um método heurístico baseado na construção de uma trajectória para a espinha dorsal do robô (representado na Figura 45 pela função *CRCcininv*). Com o objectivo de conduzir o robô a comportamentos capazes de atingir a posição do espaço pretendida, e com a sequência modular adequada (função *cininv* da Figura 45). A figura seguinte ilustra o algoritmo definido para o problema da cinemática inversa.

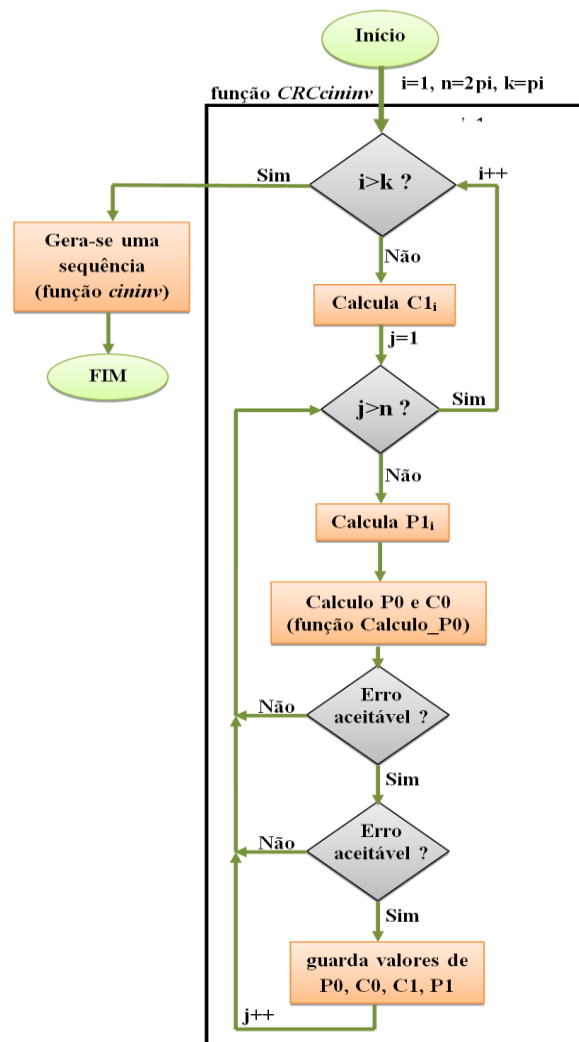


Figura 45. Algoritmo da cinemática inversa.

Em seguida serão descritas pormenorizadamente as funções *CRCcininv* e *cininv* relativas ao algoritmo da cinemática inversa.

A função *CRCcininv* calcula o comportamento que o robô deverá apresentar para percorrer com o seu corpo uma trajectória, que lhe permita aproximar de um modo eficiente ao ponto pretendido, **P** representado pela Figura 46. Para traçar a trajectória do corpo do robô,

é calculado o valor do centro da circunferência C_1 tangente ao ponto P usando os seus vectores de orientação. De seguida, é calculado um suposto ponto P_1 através da variação do ângulo. Este ponto será útil para o cálculo do ponto P_0 tangente à circunferência de centro C_0 , de forma a obter o segmento de recta $\overline{P_0P_1}$, segundo a função *Calculo_P0*. Depois de obtidos os valores de P_0 , P_1 , C_0 e C_1 , é calculado o erro cometido pela aproximação do segmento de recta $\overline{P_0P_1}$, e os seus valores são guardados caso sejam aceitáveis. O próximo passo é calcular um novo valor para P_1 e usar novamente a função *Cálculo_P0* para obter o valor ideal para P_0 e C_0 relativos aos novos valores de P_1 e C_1 , até que o ciclo termine. Quando este termina posiciona-se um novo centro C_1 e volta-se a calcular P_0 e C_0 para os vários pontos de P_1 respectivos ao novo centro, até que a busca pelo centro termine. Durante todo este processo é sempre calculado o erro cometido na aproximação do segmento de recta $\overline{P_0P_1}$ e os valores de P_0 , P_1 , C_0 e C_1 substituídos sempre que o erro decresce. A figura seguinte retrata o processo para a construção da trajectória para o corpo do robô.

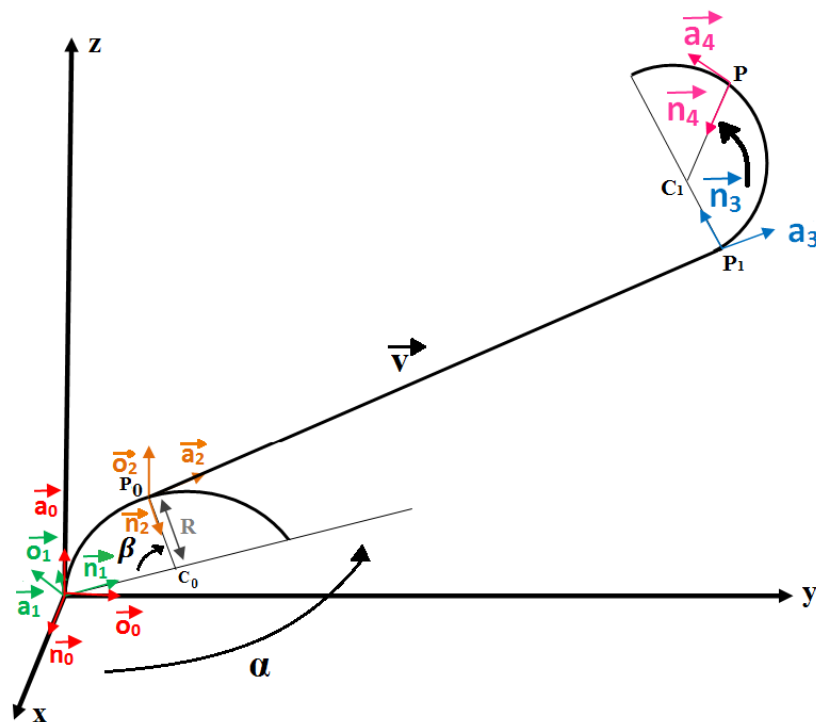


Figura 46. Trajectória do comportamento pretendido para a espinha dorsal do robô hiper-redundante.

A função *Calculo_P0* faz a busca na circunferência de centro C_0 e raio r , de modo a encontrar o ponto P_0 da circunferência que se aproxime mais do ponto P_1 e que descreva um segmento de recta $\overline{P_0P_1}$ com o menor erro de aproximação possível. Para tal, numa fase inicial posiciona o centro C_0 de acordo com o ângulo α que P_1 faz com a origem dos eixos coordenados (ver Figura 46). Se a cota de P_1 for menor que o raio r da circunferência C_0 , a

procura pelo valor de \mathbf{P}_0 ideal, ocorrerá na metade oposta à representada pela Figura 46 no intervalo de $\left[\frac{\pi}{2}, \pi\right]$. Depois de descoberto o lado da semicircunferência no qual se realiza a procura pelo ponto \mathbf{P}_0 , usou-se o método da bissecção (Figura 47) para descobrir o ponto tangente à semicircunferência que mais se aproxima de \mathbf{P}_1 com o menor erro possível e que assumirá o valor de \mathbf{P}_0 . O critério de paragem utilizado pelo método da bissecção consiste na comparação entre os vectores de orientação do ponto \mathbf{P}_0 (representado pela letra \mathbf{B}) pré-estabelecido e o ponto \mathbf{P}_1 , até que as orientações de ambos se igualem. Quando tal acontece, a procura pelo ponto \mathbf{P}_0 termina.

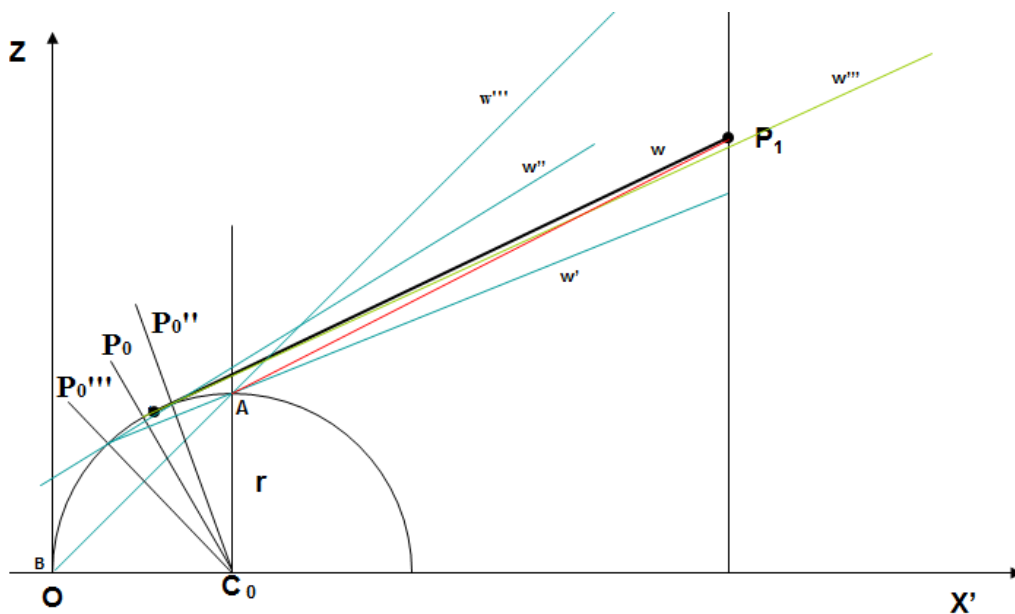


Figura 47. Representação do método da bissecção para o cálculo de \mathbf{P}_0 .

Depois de concluído todo o processo para a construção do percurso que o corpo do robô deve descrever, utiliza-se a função *cininv* que descobre a sequência indicada de acordo com as características de cada configuração. Ou seja, para a primeira e segunda curvas descritas pelas semicircunferências utilizam-se as configurações onde ocorre a magnetização de dois electroímans, de acordo com a sua orientação. Se a curva possuir inclinação para a direita usam-se as configurações cuja orientação lhes permite que inclinem nessa direcção. No segmento de recta usou-se o mesmo procedimento. Além da escolha da configuração que mais se adequa, também se calcula o número de módulos para cada curva e para o segmento de recta.

No final, a respectiva função devolve uma sequência de configurações para cada módulo do robô, como se pode observar pela figura abaixo.

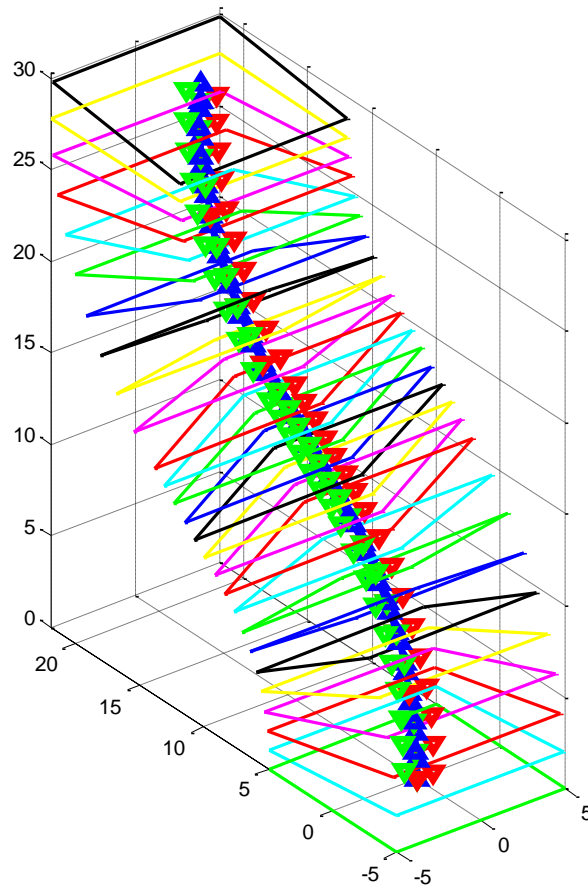


Figura 48. Exemplo de uma trajetória do corpo do robô endoscópico.

De modo a tornar todo este processo mais claro, na figura abaixo existem dois exemplos de uma simulação do modelo cinemático inverso para chegar ao ponto desejado B. Nele existe um conjunto de configurações finais pretendidas para chegar ao ponto desejado. Ao lado, com a letra D, encontra-se o conjunto das configurações com que se iniciou o processo cinemático inverso. Na ilustração da direita, encontra-se a solução para a descoberta do ponto pretendido, através de um conjunto de configurações assinaladas pela letra F.

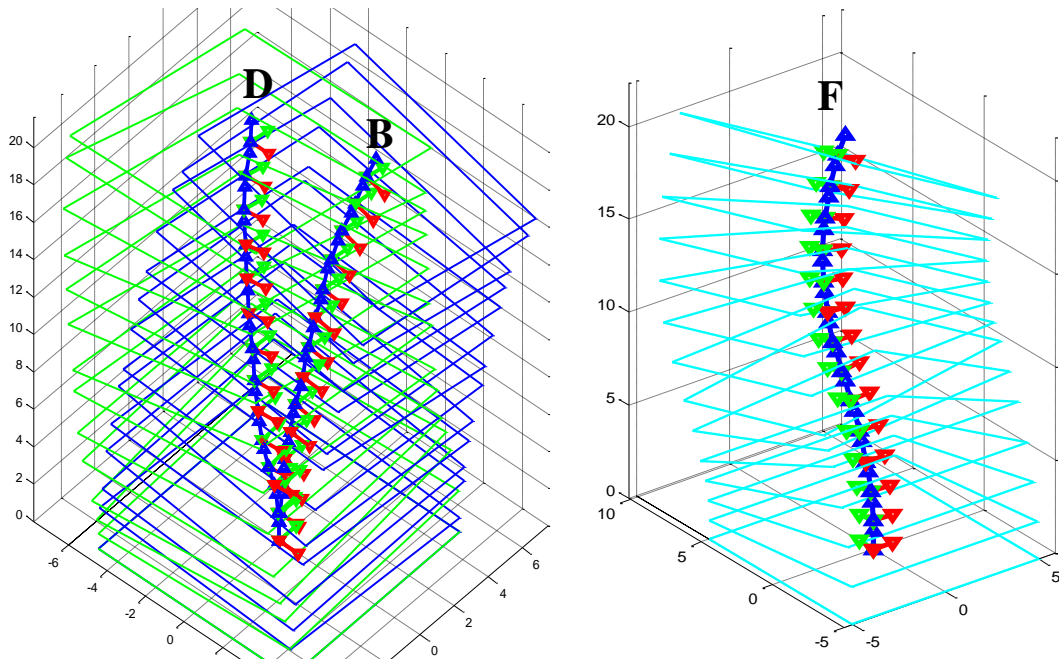


Figura 49. Representação da simulação do modelo cinemático inverso para resolver a aproximação ao ponto destino.

Para uma melhor percepção de todo este processo cinemático inverso, a figura seguinte apresenta as três espinhas dorsais que representam a sequência de módulos inicial (D), final (B) e a solucionaria do referido problema (F).

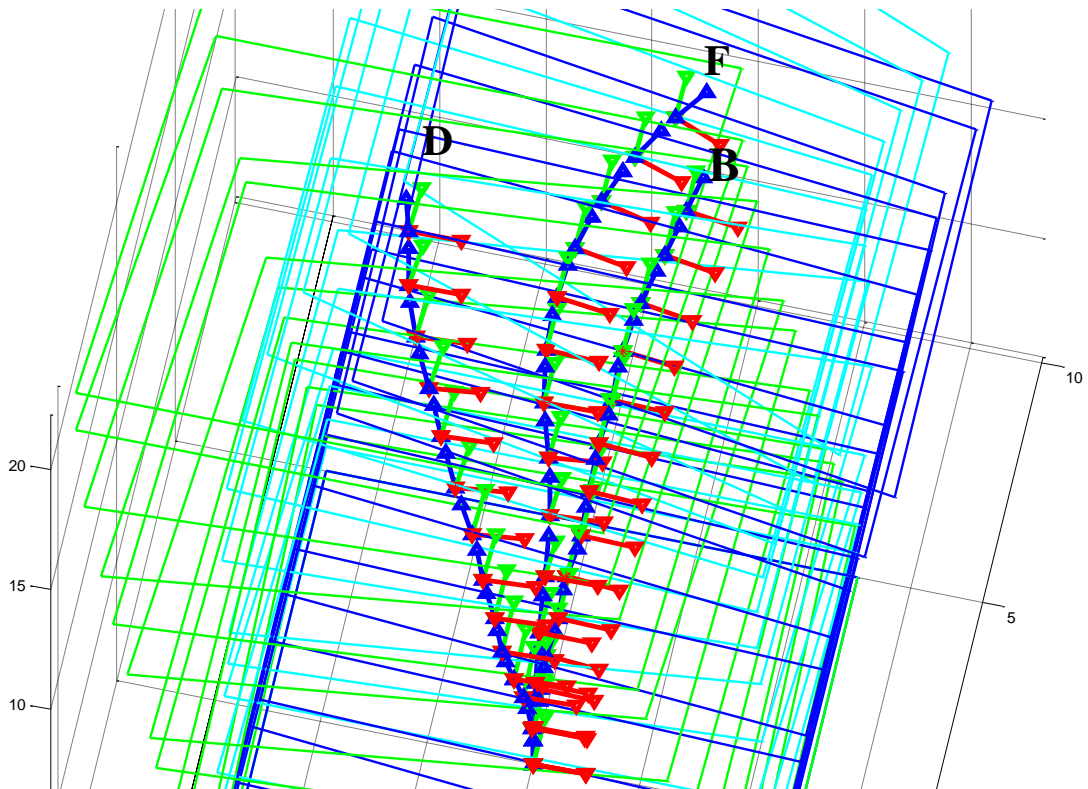


Figura 50. Representação das três espinhas dorsais (inicial, final e solução) referentes ao modelo da cinemática inversa.

Pela observação da imagem acima pode-se deduzir que o conjunto de configurações de F é relativamente aceitável, embora ocorra uma movimentação um pouco brusca devido à distância significativa entre a espinha dorsal inicial D e a F. Como tal, os passos que se seguem retratam o processo pelo qual a sequência solução deste problema deverá passar para obter movimentos suaves. Factores como o custo energético e a suavidade de movimentos são tidos em conta para o próximo passo.

6. Optimização para a planificação de movimentos

Neste capítulo é abordado o problema da optimização dos movimentos, após calculados pelo módulo da cinemática inversa, tendo em conta a suavidade do movimento e o custo energético. Como existem várias configurações possíveis para percorrer o mesmo trajecto, é necessário seleccionar aquela que melhor resume os critérios estabelecidos.

6.1 Estratégias para um Menor Custo Energético

Durante o desenvolvimento de qualquer dispositivo, robotizado ou não, existe a preocupação com a minimização dos custos energéticos. Quanto menor a energia consumida por um dispositivo, maior a duração da sua bateria. A autonomia de um sistema robotizado é um factor muito importante no universo da robótica, por facilitar todo o processo industrial para o qual se encontra qualificado. No mundo onde estes têm como principal aplicação a medicina, a poupança energética é de extrema importância. Toda a energia é bem-vinda para tornar um dispositivo mais eficiente.

O presente trabalho apresenta um robô endoscópico com componentes de natureza ferromagnética, que permitem reduzir significativamente as suas dimensões, e ainda possibilitam a diminuição das limitações no seu desempenho. Por todas estas razões, a presente abordagem tem em conta os gastos energéticos relativos ao sistema de actuação dos componentes do robô endoscópico.

Os actuadores binários utilizados no robô endoscópico são de natureza ferromagnética, como tal, as suas perdas ocorrem devido (52): a fenómenos como a histerese, às correntes de Foucault pela presença de ferro e ainda às mudanças de configuração relativas aos componentes do robô.

Segundo o processo de magnetização, a densidade de fluxo magnético num ponto de um campo, por acção da circulação de corrente através de um condutor, depende da intensidade da corrente, do comprimento do condutor, da posição deste em relação ao ponto e do factor de proporcionalidade μ (permeabilidade magnética do meio), representado pela seguinte equação:

$$B = \mu \cdot H$$

A intensidade do campo magnético H , actua sobre o material como força magnetizante, fenómeno de indução magnética. À medida que um material ferromagnético é sujeito a uma força magnética cada vez maior, a densidade do fluxo B , aumenta até que o material fique

saturado (segmento de recta \overline{ab} da Figura 51). Se a força magnética for reduzida a zero, a magnetização não retorna ao zero, atrasa em relação à força magnética, segmento recta \overline{bc} . Este atraso da magnetização em consequência da força magnética referida é conhecido como histerese. Quanto maior for o atraso, maior será o magnetismo residual conservado pelo material, representado pelo segmento de recta \overline{Oc} .

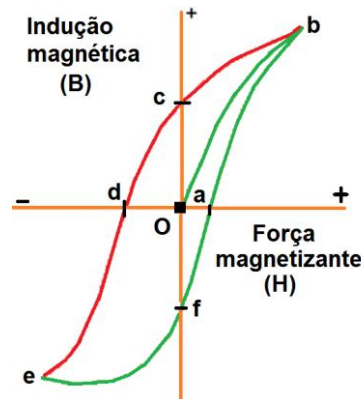


Figura 51. Ciclo de Histerese (adaptado (53)).

A densidade do fluxo, e portanto, a magnetização, só pode ser reduzida a zero invertendo o campo magnético e aumentando a força magnetizante no sentido oposto, descrito pelo segmento de recta \overline{cd} . A força magnética inversa, quando aumentada o suficiente, faz com que o material torne a atingir a saturação, mas com os seus pólos invertidos, representados pelo segmento de recta \overline{de} . Reduzindo a força magnética a zero e elevando-a no sentido original, completa-se o ciclo com a curva efb . Se repetirmos este processo, a magnetização do material acompanha o arco fechado $bcdefb$, denominado de **ciclo de histerese**.

As perdas por histerese podem ser determinadas pela seguinte equação:

$$P_h = K_h \cdot B_{max}^n \cdot f$$

A equação anterior deriva da expressão introduzida por *Steinmetz*, da *General Eléctric* (área do ciclo $B - H = K \cdot B_{max}^n$, B_{max} é a máxima indução magnética), que estabelece uma relação para determinar a área do ciclo de histerese onde se usa o valor de n a variar entre 1.5 e 2.5 e o valor de K como constante. Na equação anterior, K_h representa a constante que depende da natureza do material ferromagnético e do volume do ferro.

Outros factores provocam o aumento de perdas por histerese, nomeadamente o tratamento a frio do ferro e a existência de imperfeições ou impurezas dos materiais. Os materiais ferromagnéticos também podem apresentar perdas através das correntes parasitas de *Foucault*. A figura que se segue representa um material magnético a ser atravessado por linhas de força de fluxo estabelecidas no material.

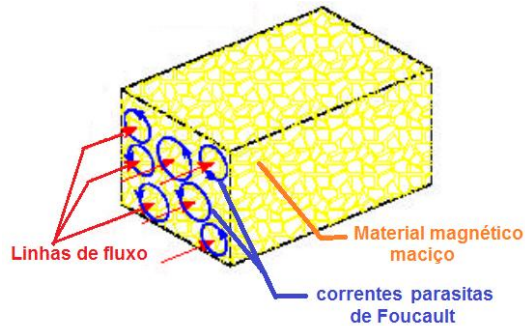


Figura 52. Correntes de *Foucault* num material magnético (54).

O ferro como material ferromagnético está sempre sujeito a uma rápida variação da densidade fluxo magnético, B . Desta forma, de acordo com as leis de *Faraday-Lens*, a indução de uma força electromotriz sobre o ferro, permite formar correntes de *Foucault*. Esta acção traduz-se num aquecimento do material, devido à resistência oferecida à passagem da corrente que se designa de potência. Como esta potência induz perdas de energia sob a forma de calor, a potência é denominada de potência de perdas e é dada por:

$$P_e = K_e \cdot B_{max}^2 \cdot f^2$$

onde f é a frequência da corrente eléctrica e K_e a constante cujo valor depende do tipo de material, e da espessura da lâmina.

Esta libertação de calor é indesejável e por isso existem algumas formas de a minimizar, tais como: a utilização de ferro de elevada resistividade (com 4% de silício) e a separação do ferro em lâminas finas, devidamente isoladas com a mesma direcção do fluxo.

Tanto a perda por histerese, como a perda por correntes de *Foucault* devem ser usadas numa fase posterior, durante a simulação do modelo cinemático do sistema robotizado. Neste trabalho, tal não foi possível devido ao atraso da chegada do protótipo do sistema robotizado. Consequentemente, somente os factores de custo energético que têm uma influência directa podem ser retratados ao longo deste trabalho.

Assim, começou-se por excluir as configurações onde ocorre a magnetização de apenas três electroímans, devido ao elevado custo energético que acarreta, e também por se tratar de uma configuração um pouco instável para manter apenas um electroíman desmagnetizado. Cada electroíman é alimentado por corrente eléctrica de modo a possibilitar a magnetização (1) e a desmagnetização (0) que só é possível devido à sua inversão ou não, conforme o caso. Por este motivo foi realizada uma tabela para contar o número de trocas necessárias para mudar de uma configuração para outra, representada pela tabela seguinte.

Tabela 7. Matriz de custo energético relativa à troca de configurações.

	1	2	3	4	6	8	9	12	15	0
1	0	2	1	2	3	2	1	3	1	3
2	2	0	1	2	1	2	3	3	1	3
3	1	1	0	3	2	3	2	4	2	2
4	2	2	3	0	1	2	3	1	1	3
6	3	1	2	1	0	3	4	2	2	2
8	2	2	3	2	3	0	1	1	1	3
9	1	3	2	3	4	1	0	2	2	2
12	3	3	4	1	2	1	2	0	2	2
15	1	1	2	1	2	1	2	2	0	4
0	3	3	2	3	2	3	2	2	4	0

Por exemplo, quando se pretende trocar da configuração 1, que em binário corresponde a 0001 para a configuração 12 que em binário corresponde a 1100, ocorre a troca de energia em três electroímans.

Embora pareça que tudo fica resolvido, ainda é necessário considerar mais um factor antes de terminar este processo de minimização do custo energético. Este factor coloca-se porque cada componente do robô, com a excepção das cabeças dirigíveis apresenta apenas quatro electroímans, cujos seus extremos comunicam com um dos lados dos extremos do módulo seguinte. Ou seja, considerando como sequência inicial [0124] e como sequência final [6124], a figura que se segue retrata cada componente do robô para cada configuração incluindo apenas uma das cabeças do robô, onde cada vértice representa um electroímman.

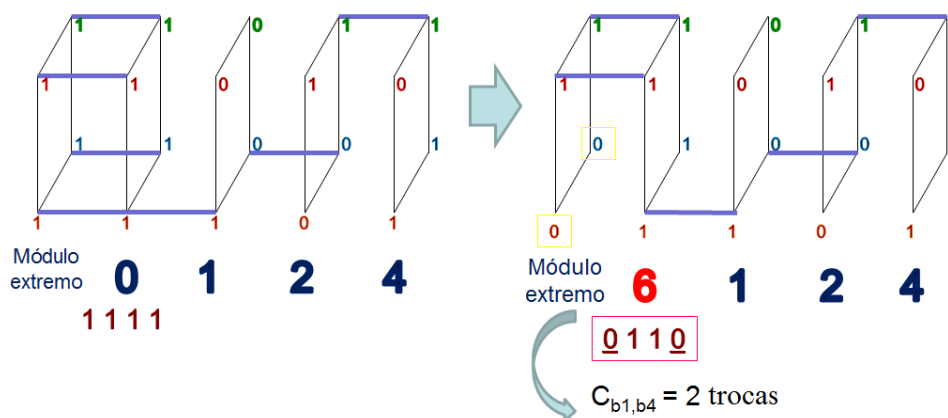


Figura 53. Custo energético de 2 trocas para a mudança da sequência de [0124] para [6124].

A análise da figura anterior permite concluir que apenas se executam duas trocas para se obter a configuração desejada. Não obstante, mudando a configuração do módulo que sofre a mudança, o número de trocas consecutivas pelos módulos seguintes, a fim de manter as suas configurações aumenta. A figura que se segue retrata a mudança de configuração no módulo que sofre a alteração.

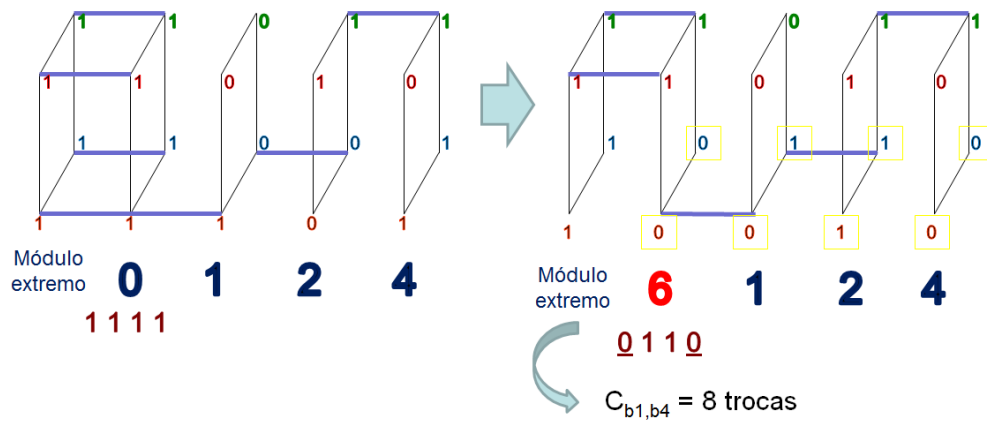


Figura 54. Custo energético de 8 trocas para a mudança da sequência de [0124] para [6124].

Conclui-se que, ao mudar-se a configuração de 0 para 6 as configurações binárias dos módulos 1, 2 e 4 alteram-se, como podemos observar pela sequência inicial [0124]. Portanto, quando mudamos a configuração de um componente, devemos ter atenção ao número de componentes do robô, que ficam antes e depois. O lado que apresentar menor número de módulos será aquele onde ocorrerá menor número de trocas energéticas. Quando o número de componentes é igual escolhe-se aleatoriamente um dos lados.

Uma vez que todos os módulos mantêm a mesma distância, estabeleceu-se uma matriz, onde para cada elemento foi colocado um conjunto de configurações para a mesma conversão, com o mesmo custo, onde o custo mínimo é instituído pela sua conversão. Por exemplo, quando se converte um módulo de 8 para 2, existe um custo binário de 2 como se observa na figura abaixo. Uma vez que se passa da configuração binária 1000 para 0010, o que origina um custo de 2 e por isso todas as configurações possíveis para chegar de 8 para 2 com o mesmo custo, assumem a posição da matriz a_{82} (linha 8 coluna 2).

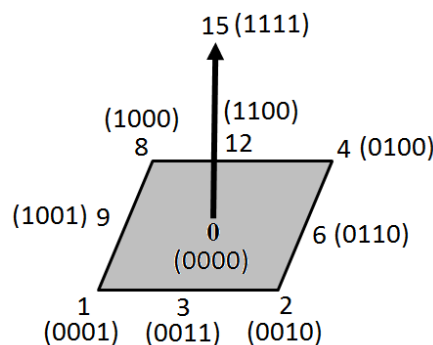


Figura 55. Configurações binárias de um componente do robô.

A partir da matriz de trocas e da Figura 55 que nos fornece uma visão das várias possibilidades foi possível construir uma tabela com as várias oportunidades de mudança de

configuração, onde cada posição da matriz contém as sequências com igual custo energético. Esta tabela será usada numa fase posterior como auxílio à suavidade de movimentos.

6.2. Suavidade de Movimentos

O enorme receio sentido pelos pacientes na utilização de dispositivos endoscópicos, associados a traumas e desconforto, tornou-se num factor preponderante para o estudo da análise cinemática do robô. Por este motivo, a sequência de configurações adoptada pelo robô fixo num dos extremos deve apresentar os movimentos mais suaves. Este estudo é muito subjectivo, uma vez que com a ausência de um protótipo torna-se difícil decidir com discernimento o método mais eficaz para o fazer. A imagem da Figura 56 mostra os vários caminhos possíveis pelos quais o robô endoscópico pode seguir para chegar ao ponto desejado, A, através da cinemática inversa.

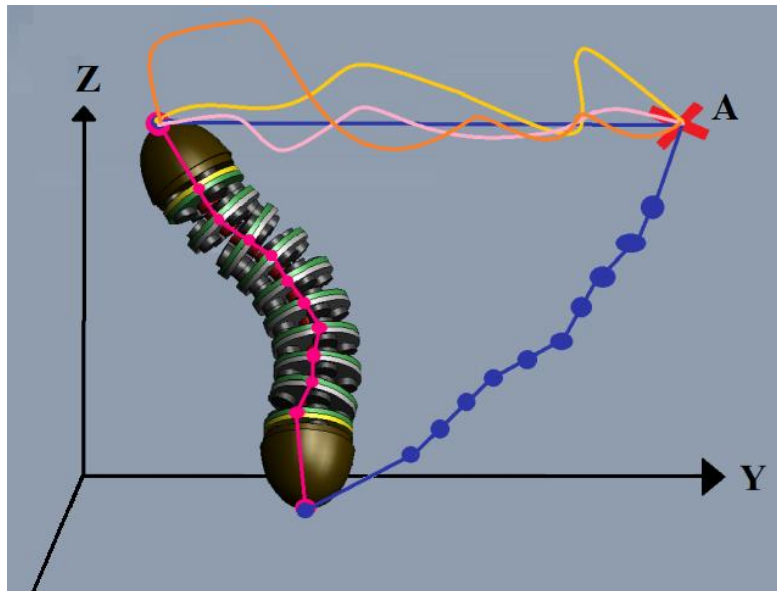


Figura 56. Exemplos de caminhos possíveis do robô endoscópico hiper-redundante.

Encontrar o caminho menos brusco para chegar ao ponto A é o objectivo do estudo da suavidade de movimentos para o robô endoscópico, por isso alguns estudos debruçaram-se sobre este assunto, associados sempre aos valores de menor custo energético.

Uma possibilidade aparentemente eficaz para a realização do estudo da suavidade de movimentos na cinemática é a decisão pela sequência de configurações que permita que o robô se afaste da configuração inicial o menos possível. Para isso poderá ser possível adoptar critérios de selecção baseados no comportamento descrito pelo corpo do robô ou então através da comparação da posição e dos ângulos descritos para um mesmo módulo.

Este trabalho baseia-se na comparação modular das curvas descritas pelo corpo do robô para cada sequência possível, utilizando critérios fundamentados nas relações de proximidade estabelecida entre módulos, tais como: a distância entre pontos (ΔP), a soma das distâncias (Sum P), a média das distâncias (Média P), a variação angular (ΔA), a soma da variação angular (Sum A) e a média da variação angular (Média A). Estes critérios avaliam o comportamento descrito pela espinha dorsal do robô através da posição entre pontos modulares e de orientações \vec{a} entre módulos, relativas ao comprimento do robô (ver Figura 57).

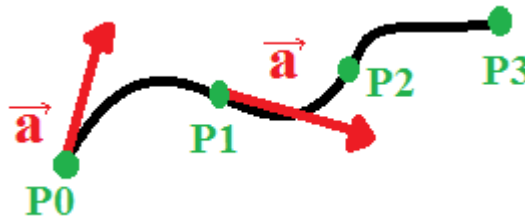


Figura 57. Avaliação dos critérios relativa à posição e orientação dos módulos do robô.

Na selecção das configurações candidatas, prevalecem os seguintes critérios pela ordem Sum P, ΔP e Sum A. O critério Média P não foi considerado válido para esta apreciação, uma vez que pode gerar conclusões erróneas, causadas pela existência de valores díspares relativos a mudanças bruscas descritas pela sequência da espinha dorsal do robô; ou até mesmo conduzir a erros provocados pela natureza dos valores dos pontos e das orientações.

Os restantes critérios relativos à orientação dos módulos da espinha dorsal foram considerados pouco influentes na escolha da sequência mais suave e por isso, desprezados. Este facto deve-se à natureza do algoritmo da cinemática directa que impede que os módulos se distanciem no alinhamento dos seus vértices implicando deste modo, a baixa variação angular.

Para iniciar o processo de avaliação da suavidade entre uma sequência inicial e final utilizaram-se as matrizes resultantes do estudo do menor custo energético para cada módulo, a fim de gerar as sequências possíveis através da função *allcomb* (55). Após geradas as configurações possíveis ocorre a sua conversão em matrizes (cinemática directa), seguida da sua avaliação através dos valores mínimos de Sum P, ΔP e Sum A, pela respectiva ordem. Quando existe apenas um valor mínimo para Sum P a selecção termina, mas se existirem mais, escolhe-se um valor comum a ΔP . Caso exista mais que um valor comum, a preferência recai num valor comum a Sum A, se não existir nenhum valor comum incide no menor valor de ΔP das sequências comuns de Sum P. Existindo mais do que um valor de Sum A comum a ΔP elege-se o primeiro valor de Sum A.

Para clarificar todo este processo segue-se um exemplo ilustrativo, onde a sequência inicial toma os valores de $M_i = [2\ 2\ 9\ 3\ 8]$ e a final os valores de $M_f = [9\ 8\ 1\ 12\ 1]$. Após ter sido gerada a sequência de configurações possíveis por intermédio da função *allcomb* (55), cuja informação se deve ao estudo do menor custo energético, obteve-se uma matriz de resultados referente ao cálculo de cada um dos critérios mencionados sem excepção.

Para simplificar, no exemplo apenas são mostrados os valores adjacentes ao valor da sequência seleccionada, como se pode ver pela Tabela 8. De acordo com os resultados obtidos, existem 468 sequências possíveis e apenas a quarta foi eleita pelos critérios descritos acima.

Tabela 8. Tabela dos critérios usados para a selecção da sequência mais suave.

Sequência	ΔP	ΔA	Sum P	Média P	Sum A	Média A
...
3	26.7397	0.2415	50.2872	8.3812	0.7423	0.1237
4	23.4852	0.3137	43.7075	7.2846	0.7143	0.1191
5	20.1914	0.2616	43.7389	7.2898	0.7624	0.1271
...

A sequência número 4 contém toda a informação referente às configurações intermédias existentes para cada módulo na passagem da sequência inicial para a final, representado pela figura abaixo.

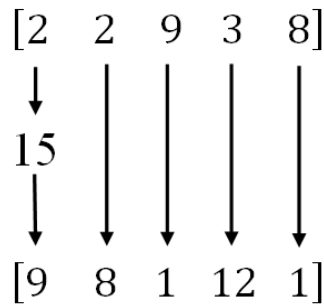


Figura 58. Configurações intermédias existentes entre a configuração inicial e a final seleccionadas pela suavidade.

Outro factor a ter em conta na realização de movimentos suaves é a escolha do módulo que se pretende alterar a configuração. O modo como se alteram as configurações dos módulos influencia o processo de melhoria/fracasso da aproximação à sequência inicial, aumentando/diminuindo a suavidade dos movimentos. Por uma questão lógica, pensa-se que o robô deverá mudar de configurações começando pelo módulo do extremo (aquele que

pretendemos que se aproxime do ponto objectivo) seguindo de forma sucessiva até ao módulo da base, como se pode observar pela figura seguinte.

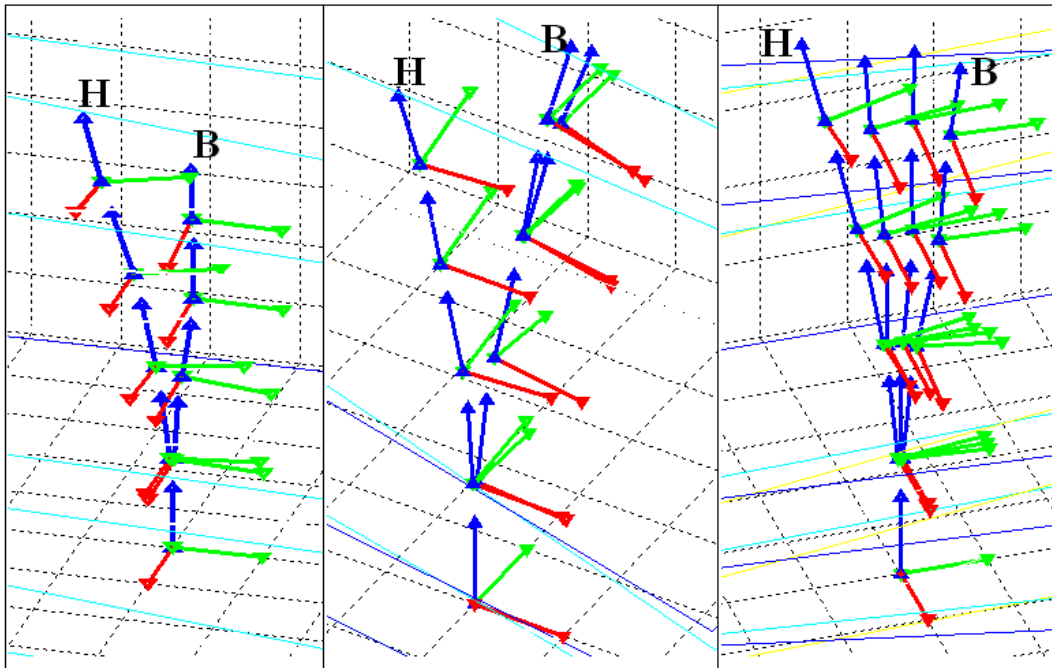


Figura 59. A ilustração da esquerda representa a mudança de configuração do extremo, a ilustração do meio a configuração do meio e a da direita a mudança da configuração da base. B- sequência inicial (M_i), H- sequência final (M_f).

Na ilustração da esquerda da Figura 59 é visível apenas as sequências inicial (B) e final (H), porque a sequência intermédia [2 2 9 3 1] está sobreposta à sequência inicial, o que significa que tem uma boa aproximação e os seus movimentos são de extrema suavidade. O mesmo não acontece quando mudamos o módulo do meio da sequência ([2 2 1 3 8]). Embora próximo da sequência M_i , o seu afastamento de M_f é maior que no caso anterior. Esta aproximação não é a melhor. Observando a ilustração do lado direito correspondente à mudança de configuração do módulo da base (fixo), é de realçar que existe um grande afastamento das sequências intermédias para chegar à sequência final. Este afastamento das sequências intermédias torna os seus movimentos pouco suaves. Estas ilustrações provam que o deslocamento das sequências intermédias é inversamente proporcional à suavidade.

Desta forma, estipulou-se que a melhor maneira de resolver este problema de suavidade, seria mudar a configuração referente a cada módulo de uma sequência, do extremo até à base sequencialmente. Outro modo de resolver o mesmo problema seria através da comparação de distâncias e orientações descritas entre módulos de duas espinhas dorsais referentes à sequência inicial e intermédia. Neste trabalho, optou-se por usar o primeiro dos métodos descrito por parecer mais funcional.

A existência de um protótipo tornaria o seu estudo mais facilitado, uma vez que seria possível ter mais noções acerca do modo como o robô se comporta, das suas limitações, bem como da forma de tornar os movimentos mais suaves. No entanto, a ausência de protótipo limitou o estudo da suavidade a uma análise conceptual.

7. Conclusões e Trabalho Futuro

O presente documento reporta o trabalho desenvolvido durante o estágio realizado no Centro Tecnológico CARTIF, cujo objectivo assenta na realização do estudo da análise cinemática, e planificação de movimentos de um robô endoscópico hiper-redundante accionado electromagneticamente, assumindo que um dos seus extremos se encontra fixo. Este estudo cinemático preocupa-se com a localização espacial do robô endoscópico hiper-redundante, ao longo do tempo, mediante o uso de informações relativas à posição e orientação dos seus constituintes. Por sua vez, a planificação de movimentos reúne as características essenciais à sua elaboração.

Durante este trabalho foi estudada a aplicação de sistemas robotizados para a realização de tarefas de endoscopia, assim como, foi analisada a questão da planificação de movimentos do robô, em particular, do comportamento modular da cinemática directa, inversa e selecção de trajectórias, de acordo com os critérios estabelecidos para a suavidade e o custo energético.

A cinemática directa possibilita o conhecimento da localização espacial (posição e orientação) de todos os elementos que constituem o robô endoscópico, incluindo o seu extremo. Na sua elaboração, utilizou-se um método heurístico que calcula a posição e a orientação referentes a cada módulo do robô, por intermédio dos movimentos de rotação e translação em torno dos eixos XX e ZZ .

Em contrapartida, a cinemática inversa tem por objectivo descobrir o modo como o robô se deve comportar perante uma mudança da sua posição no espaço. Neste estudo cinemático inverso desenvolveu-se um método heurístico que cria uma trajectória adequada para o corpo do robô e ainda determina a sequência de configurações que mais se adapta. Esta trajectória permite que o robô assuma comportamentos suaves, de modo a alcançar uma posição no espaço, aproximada ao ponto pretendido.

Para suavizar os movimentos realizados pelo corpo do robô e minimizar o seu custo energético, seleccionam-se as configurações intermédias para cada módulo com o menor custo, e posteriormente escolhe-se a sequência mais suave, conforme os critérios estabelecidos para a suavidade. No estudo do custo energético, somente os factores relativos às trocas entre configurações para um mesmo módulo foram considerados, de modo a adquirir as configurações intermédias. Os restantes factores, como as perdas por histerese e por correntes de *Foucault* pela presença de ferro, não tiveram relevância neste estudo, devido à ausência de protótipo.

Para além da selecção da sequência com configurações intermédias mais suaves, estabeleceu-se uma ordem para a mudança de configuração de cada um dos módulos com o intuito de chegar suavemente à posição destino. Da análise efectuada, verificou-se que quando a mudança de configuração relativa a cada módulo do robô inicia do extremo para a base, este apresenta uma maior suavidade de movimentos, uma vez que se aproxima mais da posição inicial.

De modo a visualizar o comportamento do robô endoscópico fez-se a representação gráfica de cada componente, para o modelo de cinemática directa e inversa, através de um quadrado onde os seus vértices simbolizam os electroímans.

Os objectivos iniciais foram cumpridos com sucesso, embora a inexistência do protótipo tenha limitado a elaboração do estudo da suavidade de movimentos, do custo energético e consequentemente de todo o processo para a elaboração do modelo cinemático inverso.

Como trabalho futuro, é possível apontar alguns pontos que permitirão melhorar o sistema robotizado endoscópico ao nível da cinemática inversa, suavidade, custo energético, controlo dinâmico e autonomia.

No bloco da cinemática inversa poderão ser testados novos métodos que analisem o comportamento do robô endoscópico face às alterações de posição. O método criado a partir de algoritmos genéticos ou através do algoritmo de optimização do salto da rã (*Frog Optimization algorithm*) são algumas das possibilidades aparentemente viáveis na busca da melhor posição espacial para cada componente do robô. Este último trata-se de um algoritmo de optimização discreta que realiza a procura da melhor posição espacial, por intermédio de saltos inspirados no comportamento cooperativo de animais que assumem novas posições numa determinada área de trabalho. Este poderá tornar-se muito proveitoso para a resolução deste problema cinemático. Em oposição, o algoritmo genético é probabilístico e fornece um mecanismo de busca paralela e adaptativa baseada no princípio de sobrevivência dos mais aptos e na reprodução, a fim de desvendar o ponto do espaço de trabalho que mais se adequa para cada módulo.

O estudo da suavidade também pode ser melhorado através da utilização de novos mecanismos, que constituam critérios mais adequados ao protótipo utilizado.

De uma forma similar, o estudo do custo energético pode ser melhorado através de uma avaliação mais aprofundada das perdas por histerese e por correntes de Foucault devido à presença de ferro, usando o protótipo.

O estudo do controlo dinâmico do robô endoscópico para gerir a precisão e a velocidade de movimentos, bem como o sistema de transmissão dos actuadores e dos seus componentes

electrónicos, deve ser aprofundado de forma a melhorar toda a planificação de movimentos e análise cinemática.

Por último seria interessante desenvolver um sistema de realimentação magnética externo e um sistema de localização que permitam a remoção automática do robô, evitando assim o uso da cirurgia, do raio X ou da tomografia computadorizada, como métodos essenciais para a sua remoção.

Bibliografia

1. **Roosevelt.** Grupo Roosevelt - Endoscopia Industrial. [Online] Grupo Roosevelt - powered by DR Serviços e Empreendimentos, 2011. [Citação: 1 de Agosto de 2011.] <http://www.gruporoosevelt.com.br/industrial/ensaios-endoscopia-industrial/>.
2. **Richard B. Ford, Elisa M. Mazzaferro.** *Manual de Procedimentos Veterinários e tratamento: Emergencial segundo KIRK e BISTNER.* São Paulo - Brasil : Editora Roca, 2007. 857241679X, 9788572416795.
3. **Ber thold Block, M.D., Guido Schachschal, M.D. e Har tmüt Schmidt, M.D.** *Endoscopy of the Upper GI Tract: a training manual.* New york : Thieme, 2004. 1588902390, 9781588902399.
4. **Razek.** Endoscópio Rígido da Razek. *Revistas Hospitais Brasil.* [Online] 12 de Fevereiro de 2010. [Citação: 4 de Agosto de 2011.] http://www.revistahospitaisbrasil.com.br/informativos.asp?id_informativo=37&id_nota=489.
5. **Co, Fortune Pacific (Taian) Trading.** Industrial Fiber Endoscope. *Medical-industry.* [Online] 2010. [Citação: 12 de Dezembro de 2010.] http://www.industry-medical.com/mymedical/fortune/prodetail1174/Industrial_Fiber_Endoscope.html.
6. **Costa, Ana.** Endoscópios- Equipamentos de endoscopia. *1800endoscope.* [Online] [Citação: 4 de Abril de 2011.] <http://www.1800endoscope.com/shows/sobed.htm>.
7. *Utilização de endopróteses auto-expansíveis em tumores concomitantes de esôfago e região pré-pilórica: relato de caso.* **Pimentel, Carolina Frade Magalhães Girardin, et al.** endoscopia, Juiz de fora, Minas Gerais-Brasil : Serviço de Gastroenterologia e Endoscopia Digestiva do Hospital Monte Sinai, Juiz de Fora, 2007, Vol. 33.
8. **Diez, D. David de la Fuente.** *Robot Endoscópico Bio-Inspirado, Ápodo, Modular e Hiper-Redundante, Accionado Electromagnéticamente y de Movimiento Autónomo y Supervisado.* Valladolid-Espanha : Universidad de Valladolid - Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 2008.
9. **Ricostruttiva, Chirurgia Toracica Plastica.** Iperidrosi Palmare ed Ascellare. *Chirurgia Toracica Plastica e Ricostruttiva.* [Online] 2009. [Citação: 5 de Abril de 2011.] <http://www.chirurgiatoracicaricostruttiva.com/ip.html>.
10. **Saxena, Amulya K. e Höllwarth, Michael E.** *Essentials of Pediatric Endoscopic Surgery.* Austria : Springer, 2008. 978-3-540-78386-2.

-
11. **Dugdale, David C., Hadjiliadis, Denis e Zieve, David.** Broncoscopio. *MedlinePlus: Información de salud para usted.* [Online] ADAM, 6 de Outubro de 2011. [Citação: 5 de Abril de 2011.]
http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/esp_imagepages/9986.htm.
 12. **Arone, Evanisa Maria e Philippi, Maria Lúcia dos Santos.** *Enfermagem médico-cirúrgica aplicada ao sistema respiratório.* São Paulo-Brasil : Senac, 1995. 978-85-7359-636-6.
 13. **Bento, Ricardo Ferreira, et al.** *Otorrinolaringologia Baseada em Sinais e Sintomas.* São Paulo-Brasil : Fundação Otorrinolaringologia, 2011. 8560956026, 9788560956029.
 14. **Dugdale, David C. e Zieve, David.** Laringoscopia. *MedlinePlus información de salud para usted.* [Online] ADAM, 10 de Janeiro de 2009. [Citação: 5 de Abril de 2011.]
http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/esp_imagepages/9503.htm.
 15. **Cottrell, James E. e Smith, David S.** *Anestesia y neurocirugía.* España : Elsevier, 2002. 8481746339, 9788481746334.
 16. **Kauffman, Paul, Helito, Alfredo Salim De e Kauffman, Paul.** *Saúde-Entendendo as doenças, A enciclopédia médica da família.* São Paulo-Brasil : Nobel, 2007. 8521313667, 9788521313663.
 17. **Services, Reid Hospital & Health Care.** Mediastinoscopy with biopsy. *Reid Hospital & Health Care Services.* [Online] ADAM, 17 de Maio de 2010. [Citação: 5 de Abril de 2011.]
<http://reidhosp.adam.com/content.aspx?productId=39&pid=1&gid=003864>.
 18. **Albert, Richard K.** *Tratado de Neumologia.* España : Elsevier, 2001. 8481745278, 9788481745276.
 19. **Feliccita.** Laparoscopia. *Feliccita-Centro Médico da Mulher.* [Online] [Citação: 5 de Abril de 2011.] <http://www.feliccita.com.br/Cirurgias.htm>.
 20. **Philippi, Maria Lucia dos Santos e Arone, Evanisa Maria.** *Enfermagem médico-cirúrgica aplicada ao sistema gastrointestinal-Volume 12 de Apontamentos Saude.* São Paulo-Brasil : Senac, 1999. 8585578165, 9788585578169.
 21. **Colonoscopia. Pluta, Ryszard M., Cassio Lynn, MA e Robert M. Golub, MD.** 11, s.l. : JAMA, 2011, JAMA - La Revista de la American Medical Association, Vol. 305, p. 732.
 22. **Goiás, Associação Medica de.** *Revista Goiana de medicina.* Texas : Associação Medica de Goiás, 1995. 0034-9585.
 23. **Hajar, Nemer.** Endoscopia Digestiva Alta ou Esofagogastroduodenoscopia. *Gastroenterologia e Cirurgia do Aparelho Digestivo.* [Online] 31 de Dezembro de 2010.

[Citação: 5 de Abril de 2011.] <http://gastroecirurgia.blogspot.com/2010/12/endoscopia-digestiva-alta-ou.html>.

24. **Floch, Martin H.** *Netter. Gastroenterología*. Espanha : Elsevier , 2006. 8445815679, 9788445815670.

25. **Saúde, Conhecer.** Sigmoidoscopia. *Conhecer Saúde*. [Online] 31 de Maio de 2009. [Citação: 5 de Abril de 2011.] <http://www.conhecersaude.com/exames-medicos/s/3130-Sigmoidoscopia.html>.

26. **Lichtenstein, Gary R. e Wu, Gary.** *Los requisitos en Gastroenterologia: Intestino Delgado y grueso*. Espanha : Elsevier, 2005. 8481748218, 9788481748215.

27. **Dugdale, David C., Longstreth, George F. e Zieve, David.** Enteroscopia. *MedlinePlus Información de salud para usted*. [Online] 20 de Janeiro de 2010. [Citação: 5 de Abril de 2011.] http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/esp_imagepages/8927.htm.

28. **Ginsberg, Gregory G. e M.D., Michael L. Kochman.** *Los Requisitos En Gastroenterologia: Endoscopia Y Radiologia Gastrointestinal*. Espanha : Elsevier, 2005. 8481748196, 9788481748192.

29. **Organization, World Health.** *Control integral del cáncer cervicouterino*. Suíça : World Health Organization, 2007. 9243547003, 9789243547008.

30. Preguntas Frecuentes. *Centro ginecológico displasias y mama puerta de hierro*. [Online] [Citação: 5 de Abril de 2011.] <http://www.unidaddecolposcopialaser.com/preguntas.htm>.

31. **Bittencourt, Dra Irene Sommer.** Histeroscopia. *Clínica Bittencourt*. [Online] [Citação: 5 de Abril de 2011.] <http://clinicabittencourt.com.br/medicina/histeroscopia.html>.

32. *IFMBE Proceedings, International Federation for Medical and Biological Engineering.* **Müller-Karger, Carmen.** Margarita Island, Venezuela : Springer, 2007. 3540744703, 9783540744702.

33. **Vorvick, Linda J., Miller, Scott e Zieve, David.** Cistoscopia. *MedlinePlus: Información de salud para usted*. [Online] ADAM, 20 de Março de 2011. [Citação: 5 de Abril de 2011.] http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/esp_imagepages/1089.htm.

34. **ColumbiaDoctors.** Citoscopia: Descripción general del procedimiento. *ColumbiaDoctors-The Physicians and Surgeons of Columbia University*. [Online] [Citação: 5 de Abril de 2011.] <http://columbiadoctors.photobooks.com/Health/content.asp?pageid=P09285>.

35. **Alves, Ana Priscila Vieira.** *Projecto de uma sala de diagnóstico por cápsula endoscópica*. Porto : FEUP, 2011.

36. *sistema cirúrgico robótico Da Vinci.* **Saúde, Espírito Santo.** 6, 2011, iess pro, pp. 3-12.

-
37. **Bozovic, Vanja.** *Medical robotics.* Viena-Austria : I-Tech , 2008. 978-3-902613-18-9.
38. **Daré, Patricia de Castro Bahia.** *Especialização de Arquitectura em Sistemas de Saúde .* Salvador-Bahia : Universidade Federal da Bahia Faculdade de Arquitetura, 2008.
39. **Barea, Rafael.** *Robótica Médica.* Alcalá de Henares. Madrid (Spain) : Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá.
40. *A Motorized Anchoring Mechanism for a Tethered Capsule Robot Using Fibrillar Adhesives for Interventions in the Esophagus.* **Paul Glass, Eugene Cheung , Hanyan Wang , Ragunath Appasamy , and Metin Sitti.** USA : International conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2008. pp. 758-764.
41. *Structure Optimization of the Endoscopic Robot Ciliary Leg Based on Dimensional Analysis. Analysis, Leg Based on Dimensional.* Sanya-China : International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007. pp. 109-114.
42. **BioRob, Biorobotics Laboratory.** Amphibious Robotics. *Biorobotics Laboratory BioRob.* [Online] 2011. [Citação: 5 de Setembro de 2011.] [http://biorob.epfl.ch/research/amphibious.](http://biorob.epfl.ch/research/amphibious)
43. **Gómez, Juan González.** *Robótica Modular y Locomoción: Aplicación a Robots Ápodos.* Madrid : Universidad Autónoma de Madrid- Escuela Politécnica Superior, 2008.
44. **MIT.** Public Anemone. *Personal Robots Group.* [Online] [Citação: 2011 de Setembro de 5.] [http://robotic.media.mit.edu/projects/robots/anemone/overview/overview.html.](http://robotic.media.mit.edu/projects/robots/anemone/overview/overview.html)
45. **Guedes, Julio Quadrio de Moura.** *Projeto, Simulação e Desenvolvimento de um Manipulador Robótico Acionado por Tendões.* Rio de Janeiro : Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.
46. **Salabarría, Miguel Herrera.** *Robô Hiper-redundante com Módulos de Arquitectura Paralela.* São Paulo : Escola Politécnica de São Paulo, 2007.
47. *Binary Manipulator Motion Planning.* **Chernonozhkin, Vasily.** Petersburg : Course 5: Mechatronics- Foundations and Applications, 2006.
48. **Brain, Marshall.** How Electric Motors Work: Electromagnets and Motors. *HowStuffWorks.* [Online] 2001. [Citação: 2 de Setembro de 2011.] [http://electronics.howstuffworks.com/motor4.htm.](http://electronics.howstuffworks.com/motor4.htm)
49. **Barrientos, Antonio, et al.** *Fundamentos de Robótica.* Madrid : McGraw-Hill, 1997. 84-481-0815-9.
50. **Hermini, Helder Anibal.** *Robótica: Sistemas de Referência e Transformação de Coordenadas.* Campinas, São Paulo Brasil : Universidade Estadual de Campinas- Faculdade de Engenharia Mecânica.
-

-
51. *Motion Planning for Planar Binary Robots in a Reduced Workspace*. **R., Clysdale e Q., Sun.** Niagara Falls, Canada : International Conference on Mechatronics & Automation , 2005. pp. 388- 393.
52. **Mussoi, Fernando Luiz Rosa.** *Fundamentos de Electromagnetismo*. Florianópolis : Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina Departamento Acadêmico de Eletrônica, 2007.
53. **Coey, J. M. D.** *Magnetism and Magnetic Materials*. New York : Cambridge University Press, 2009. 13 978-0-511-67743-4, 13 978-0-521-81614-4.
54. **Filardo, J. V.** *Perdas Magnéticas*. Paraná : Universidade Federal do Paraná, 2003.
55. Allcomb. *MATLAB CENTRAL*. [Online] 20 de Fevereiro de 2006. [Citação: 11 de Fevereiro de 2011.] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10064-allcomb>.
56. **Bajd, Tadej, et al.** *Robotics*. London New York : Springer, 2010.

Anexo A- Graus de Liberdade e Transformadas

Definir graus de liberdade de um objecto é extremamente complicado. Por esta razão, considera-se o deslocamento de uma partícula infinitesimal de massa, ao invés de um corpo rígido. Neste caso, o número de graus de liberdade é definido pelo número de coordenadas independentes (excluindo o tempo), que são necessárias para uma descrição completa da posição da partícula de massa. A figura seguinte representa dois sistemas com um grau de liberdade, uma vez que uma das partículas se move ao longo de uma linha e a outra se encontra presa a um fio (pêndulo) movendo-se devido ao seu balanço. No primeiro caso a posição é descrita pela distância e no segundo caso pelo ângulo de rotação.

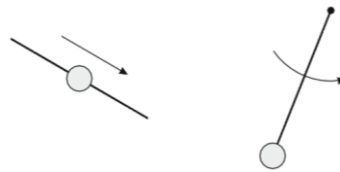


Figura 60. Sistemas com um grau de liberdade (adaptado de (56)).

Se o número de graus de liberdade aumentar para dois, é possível encontrar uma partícula em movimento num plano onde a sua posição é caracterizada por duas coordenadas cartesianas x , e y . Seguindo o raciocínio anterior do pêndulo, se existir dois segmentos rígidos a suportar um corpo de massa infinitesimal, a sua posição depende dos dois ângulos por ele formados (56).

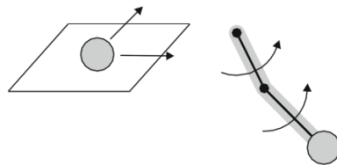


Figura 61. Sistemas com 2 graus de liberdade (adaptado de (56)).

Para que a mesma partícula de massa possua três graus de liberdade, basta retirar-lhe o plano e a sua posição passa a ser classificada por coordenadas rectangulares x , y e z . No caso do pêndulo é necessário colocar-lhe uma mola elástica e um segmento rígido, para que a sua posição seja representada através dois ângulos e uma distância (conforme ilustrado na figura que se segue) (56).

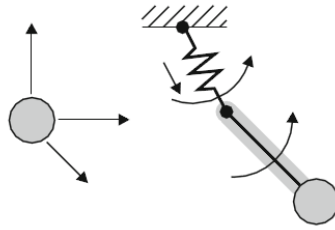


Figura 62. Sistemas com 3 graus de liberdade (adaptado de (56)).

Como a robótica apenas se preocupa com corpos rígidos, será introduzida uma breve noção de graus de liberdade, usando um corpo rígido simples constituído por três partículas de massa (Figura 63).

Como já foi referido anteriormente, cada partícula de massa tem três graus de liberdade descritos por deslocamentos rectangulares (x, y, z), isto é, as três translações. No caso de duas partículas de massa dispostas a uma distância uniforme, onde a segunda apenas executa movimentos circulares sobre a outra, este movimento é designado de rotação. Neste caso, a segunda esfera tem liberdade para executar rotação em dois eixos distintos.

Com três partículas de massa dispostas à mesma distância, a terceira partícula executa movimentos circulares em torno do eixo determinado pelas outras duas, ou seja, apenas executa uma rotação (56).

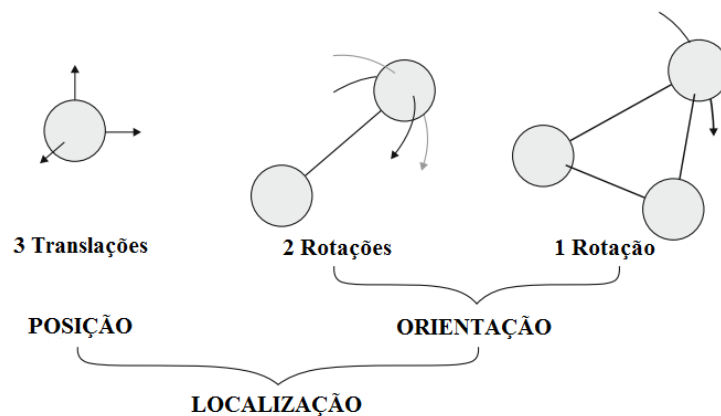


Figura 63. Graus de liberdade de um corpo rígido (56).

Observando o esquema da Figura 63, é possível verificar que para localizar o corpo rígido simples são necessárias três translações e três rotações, que implicam 6 graus de liberdade. Os três graus de liberdade que descrevem as translações fornecem informação sobre a posição do corpo rígido, enquanto que os restantes graus de liberdade, que descrevem as rotações, indicam a sua orientação (56).

Para se representar a localização de um corpo rígido com mais de dois graus de liberdade é necessária a utilização de matrizes de transformação homogénea, T . O termo matriz de

transformação homogénea T representa tanto a posição quanto a orientação de um corpo n -dimensional que é dado por:

$$T = \begin{bmatrix} \text{Rotação} & \text{Translação} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Através desta matriz, conseguimos obter informações acerca da posição e orientação espacial de um corpo rígido com n dimensões. A rotação é representada por três vectores (n , o , a) que a definem em x , y e z . Estes vectores (n , o , a) representam as coordenadas dos vectores unitários dos eixos OX , OY , e OZ de acordo com as rotações das mudanças de posição. A perspectiva é considerada nula e o escalado global unitário.

Seguidamente, serão apresentadas as matrizes de transformação homogénea referentes aos movimentos de rotação e translação, estabelecidas como matrizes base para a determinação de um ponto de um corpo rígido no espaço. Estas representações são as matrizes básicas referentes aos movimentos simples de um corpo rígido.

Quando são executados movimentos de rotação de um ângulo α em torno do eixo dos XX , a matriz de transformação T é definida por:

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

Mas, se pelo contrário, houver rotação do eixo dos YY com um ângulo Φ , obtém-se a seguinte matriz de transformação:

$$T(y, \Phi) = \begin{bmatrix} \cos \Phi & 0 & \sin \Phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \Phi & 0 & \cos \Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ocorrendo uma rotação θ em torno do eixo dos ZZ a matriz de transformação T apresenta a seguinte estrutura:

$$T(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A última representação do movimento é a translação p de um corpo rígido que é apresentada através da seguinte matriz T :

$$T(p) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Quando um corpo executa mais do que um destes movimentos, é necessário estabelecer uma ordem e proceder à multiplicação ordenada de cada uma das matrizes T , referentes a comportamentos distintos, de modo a determinar a matriz de posição e orientação do corpo rígido.

O uso de matrizes de transformação homogénea é a única forma de localizar corpos sólidos no espaço dimensional n (49).