

Sistemas Robóticos de Locomoção Quadrúpede e Hexápode

Perspectiva Histórica e Aspectos Gerais de Funcionamento

1. Introdução

Nas sociedades modernas existe um número crescente de trabalhos perigosos que requerem fortes medidas de segurança e ocorrem em locais onde os seres humanos não podem aceder directamente. Como exemplo, podem referir-se as operações executadas em centrais nucleares com grandes níveis de radiação, as tarefas em plataformas de exploração de petróleo sob grande pressão de água ou operações de salvação em áreas de desastre. De modo a lidar com estas situações, que colocam em risco a vida dos operários, é preciso desenvolver sistemas robóticos capazes de levarem a cabo as operações com uma intervenção humana limitada.

O grande impulso na direcção de sistemas robóticos autónomos deu origem a uma distinção entre os domínios da robótica móvel e da robótica de manipulação. São exemplos dos primeiros as plataformas móveis ou ainda os robôs com "pernas" desenvolvidos na CMU, no MIT e noutros laboratórios. O segundo caso consiste, essencialmente, em braços articulados que se encontram actualmente

Na actualidade os veículos com rodas apresentam-se como a forma dominante de locomoção mecânica. Uma das razões prende-se com o facto de estes dispositivos proporcionarem um movimento suave em superfícies preparadas (*i.e.*, planas e sólidas). Mais recentemente, tem-se verificado uma motivação crescente pela investigação da locomoção "próxima" da biológica. De facto, os sistemas que usam múltiplos membros para locomoção tendem a proporcionar uma maior mobilidade em terrenos naturais sem requerer uma superfície de suporte contínua. Nos animais que se deslocam através de pernas, a existência de um controlo de posição/força e de sensores especializados permite evitar os choques e as acelerações inerentes à locomoção por pernas. Assim, um objectivo importante é a construção de robôs que preservem as vantagens das pernas e que, simultaneamente, andem de uma forma suave e coordenada.

Estas questões motivaram a comunidade científica para a construção e a compreensão de "máquinas andantes" dando origem ao aparecimento de um conjunto de estudos nesta área. Nesta perspectiva, está em curso investi-

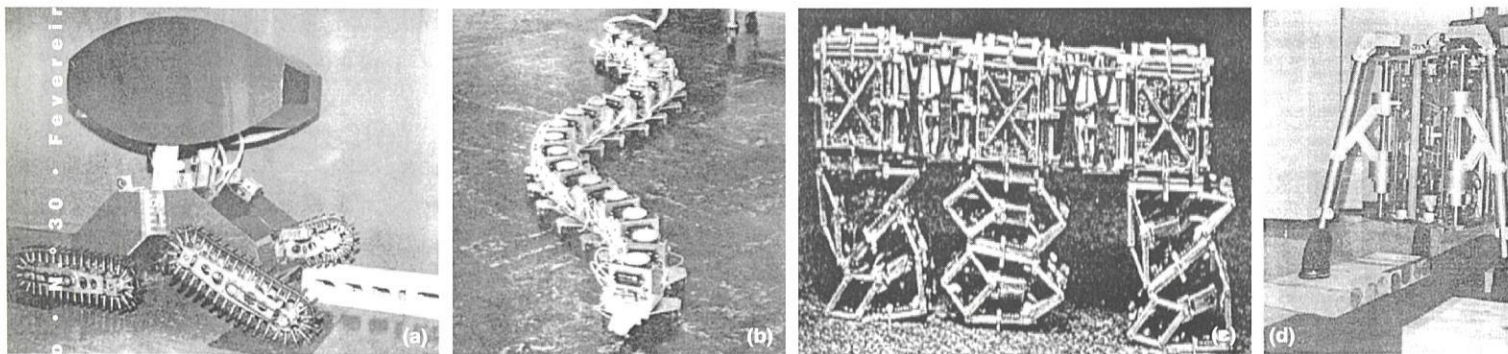


Figura 1 – Sistemas de locomoção: (a) veículo com rodas HELIOS 2; (b) robô articulado PV2; (c) estrutura múltipla com três pés; (d) hexápode TITAN VI

muito divulgados a nível industrial.

No projecto de robôs móveis a forma de locomoção utilizada deve ser cuidadosamente seleccionada considerando vários aspectos do problema tais como o objectivo da tarefa, as limitações do terreno, a fonte de alimentação e a autonomia energética. Em geral, são apontadas três configurações básicas em robótica móvel, sendo os robôs projectados usando uma ou várias destas configurações (figura 1):

- Dispositivos artificiais de rotação, tais como rodas e lagartas.
- Corpos articulados, similares aos de uma cobra.
- Pernas, similares às existentes nos animais.

gação para tentar reproduzir o movimento locomotor, quer de maneira artificial em robôs mecânicos, quer pela estimulação dos músculos dos membros inferiores do ser humano, com o objectivo de restabelecer a actividade locomotora.

2. Locomoção com Pernas

Nos anos mais recentes tem sido realizada uma investigação considerável na área da locomoção com uma, duas, quatro, seis e oito pernas. Os esforços estão principalmente direccionados para o desenvolvimento de sistemas de locomoção quadrúpede e hexápode para uso em ambientes hostis, tais como em centrais nucleares, em

áreas de desastre e nos oceanos. Por outro lado, a investigação em locomoção bípede tem feito progressos mais lentos devido às dificuldades em estabelecer um controlo estável da locomoção quando comparada com a locomoção multi-pernas.

2.1. Razões para o desenvolvimento de sistemas robóticos com pernas

Para além da pura emoção em criar máquinas que andem ou corram, existem duas razões importantes para explorar o uso de pernas para locomoção: a mobilidade e o mecanismo de suspensão. As rodas são excelentes em superfícies pavimentadas, mas as pernas proporcionam melhor mobilidade em terrenos irregulares já que podem usar apoios isolados para cada pé. A outra vantagem das pernas deve-se a estas proporcionarem uma suspensão activa que separa a trajectória do corpo do caminho percorrido pelos pés. O equipamento transportado pode viajar suavemente apesar de eventuais variações do terreno. Em princípio, o desempenho de veículos de pernas pode, em grande parte, ser independente das irregularidades do solo. Assim, embora os veículos com pernas sejam mais difíceis de construir e de controlar que os veículos com rodas, apresentam um certo número de vantagens pois podem:

- Passar sobre obstáculos, subir e descer escadas ou planos inclinados.
- Atravessar valas e andar em solos com falhas.
- Andar suavemente sobre terrenos irregulares, variando configuração das suas pernas para se adaptar às irregularidades da superfície.

2.2. Classificação de robôs com pernas

Andar, quer em animais quer em robôs, depende do movimento controlado de pernas que estão ligadas a um corpo principal. Visto que o centro de gravidade se encontra, tipicamente, acima do solo, o movimento muda a estabilidade dinâmica do sistema. Assim, os sistemas de pernas são agrupados em duas classes: sistemas estaticamente estáveis e dinamicamente estáveis. Estabilidade estática requer que, pelo menos, três pernas suportem o corpo em todos os instantes e que, quando visto na vertical, o centro de gravidade caia dentro da região poligonal formada pelos pontos em que os pés tocam o solo. Se menos de três pernas suportam o corpo, então a região poligonal reduz-se a uma recta ou a um ponto. Nestas situações, o sistema diz-se dinamicamente estável se mantiver o equilíbrio.

Têm sido desenvolvidas, com algum sucesso, várias máquinas de locomoção experimentais com quatro ou seis pernas. Contudo, devido à necessidade de manter uma estabilidade absoluta em todos os instantes, a locomoção estaticamente estável está severamente limitada em termos de velocidade e de capacidade de manobra. Por outro lado, a estabilidade dinâmica é essencial para sistemas com menos de três pernas e, apesar de não essencial, é útil para veículos com mais pernas. Contudo, esta estratégia introduz um problema muito mais complexo pois exige um controlo permanente do movimento das pernas e do corpo, de modo a manter a estabilidade. Como o peso do corpo é suportado alternadamente por diferentes grupos de pernas, o centro de gravidade pode desviar-se do centro de suporte proporcionado por estas. De facto, é possível que apenas uma perna, ou mesmo nenhuma, esteja em contacto com o solo em qualquer instante.

A compreensão deste problema é ainda limitada não existindo uma solução de engenharia que possa ser aplicada em todos os robôs de pernas. Algumas questões pertinentes que parecem ainda não ter resposta são:

- Como é que os animais mantêm a estabilidade?
- Como calcular os sinais de controlo para os actuadores das pernas que permitam ao robô manter uma postura fixa, andar ou correr arbitrariamente?
- Qual o princípio de coordenação dos movimentos durante a locomoção?

3. História dos Sistemas de Pernas

O estudo científico da locomoção com pernas teve a sua origem no trabalho de Muybridge que procurava demonstrar que num cavalo em trote o número de pontos de apoio desapareciam no decurso de certas fases do ciclo locomotor. Os resultados deste estudo seriam publicados na *Scientific American* em 1878 com base num conjunto de fotografias.

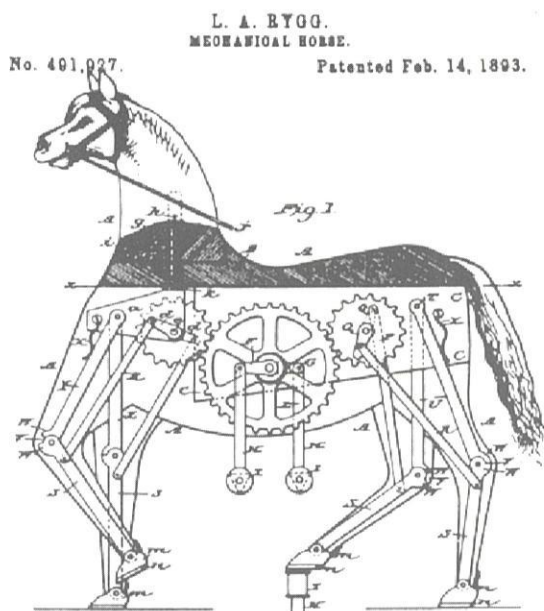


Figura 2 – Cavalo mecânico patenteado por Rygg em 1893

Ao mesmo tempo, surgiam os primeiros trabalhos de modelização e construção de máquinas. Inicialmente, o problema da construção de sistemas de locomoção com pernas foi visto como a tarefa de projectar a estrutura cinemática que resultaria em movimentos eficientes quando actuada por uma fonte de energia. A figura 2 apresenta o projecto de um cavalo mecânico patenteado por Rygg em 1893 que, aparentemente, nunca foi construído.

Em 1960, foi levado a cabo por Shigley um estudo sobre os mecanismos para locomoção com pernas. Neste trabalho são propostos vários mecanismos que podem ser usados em "máquinas andantes". Entre eles incluem-se sistemas de quatro barras, mecanismos pantográficos, e outros. Os sistemas da primeira geração apresentavam a desvantagem de não adaptarem o movimento das pernas ao solo. Por outro lado, a informação do estado da máquina e do ambiente não era usado no controlo.

No desenvolvimento de robôs da geração seguinte estes e outros aspectos foram tomados em consideração. No início de 1960, a companhia *Space General Corporation* desenvolveu duas máquinas, de seis e oito pernas, de modo a explorar o conceito de locomoção com pernas para um veículo lunar. Estes veículos eram eficientes dentro dos objectivos de projecto traçados, contudo apresentavam uma fraca adaptabilidade ao tipo de terreno em virtude da falta dos graus de liberdade necessários.

Em 1966, foi construído por Frank e McGhee na Universidade da Califórnia o robô quadrúpede "Phony Pony". Este foi o primeiro veículo de pernas a andar autonomamente sob o controlo completo de um computador. Cada perna possuía dois graus de liberdade sendo as juntas actuadas por motores eléctricos. O robô era alimentado externamente, através de um cabo, e andava somente em linha recta.

Em simultâneo decorriam vários estudos em que o conceito de controlo era baseado no modelo mestre/escravo. O operador humano gerava os movimentos desejados a serem reproduzidos pela máquina. Algumas destas máquinas usavam a realimentação de medidas de força nas pernas para ajudar no controlo manual. Um dos exemplos mais representativos foi o veículo de quatro pernas construído pela *General Electric Corporation* em 1968 que requeria o controlo através de um operador humano. O operador controlava as quatro pernas, cada uma com três graus de liberdade, usando para o efeito as mãos e os pés através de um sistema hidráulico de reflexão de força.

Ainda que o quadrúpede demonstrasse uma excelente capacidade para ultrapassar obstáculos e uma boa mobilidade em terrenos difíceis, tornou-se clara a necessidade de um sistema de controlo por computador para veículos com vários graus de liberdade.

Em 1969, um veículo chamado "Big Muskie", com 15000 toneladas e quatro pernas actuadas hidraulicamente, foi usado para escavar em minas de carvão. Quando em movimento, as quatro pernas elevavam o corpo, e moviam-no para diante ou para trás deslocando-se um passo antes de baixar de novo o corpo até ao solo. Com o corpo apoiado directamente no solo, as pernas moviam-se para a posição seguinte.

Desde 1972 a Universidade de Waseda tem desenvolvido uma série de sistemas bípedes controlados por computador. A maior limitação inicial destas máquinas era a sua baixa velocidade, sendo necessários 90 segundos para completar um passo. Avanços mais recentes, têm permitido alcançar velocidades próximas da atingida pelo ser humano.

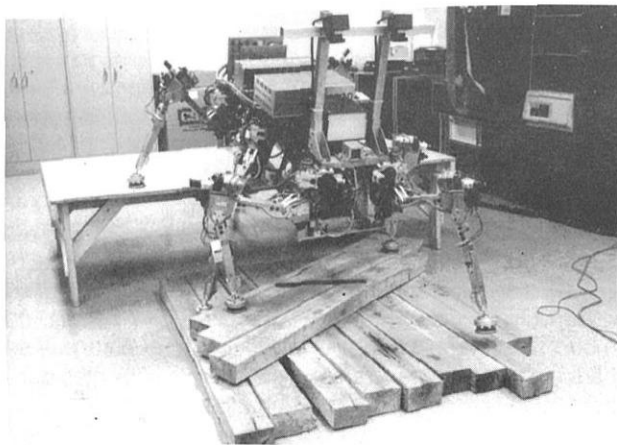


Figura 4 - Movimento do OSU Hexapod sobre obstáculos.

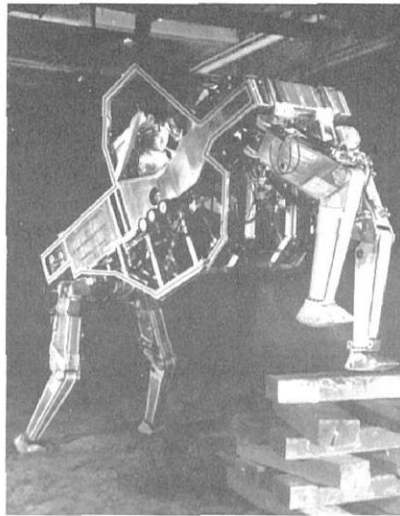


Figura 3 - Sistema desenvolvido por Mosher em 1968

Em 1977, uma máquina andante de seis pernas, denominada "OSU Hexapod", foi construída por McGhee na Universidade de Ohio com o objectivo de estudar algoritmos de controlo. Cada perna apresentava três graus de liberdade e era controlada por computador. Desde então, este veículo tem sido continuamente melhorado adicionando-se sensores de força, giroscópios, sensores de proximidade e um sistema de visão. A figura 4 mostra o robô a ultrapassar um conjunto de obstáculo.

Em 1980, o sistema quadrúpede PV II era construído por Hirose e Umetani na Universidade de Tóquio. Este robô, pesando apenas 10 kg, andava com uma velocidade média de 0,02 m/s com um consumo de 10 watts.

Ainda que o baixo consumo seja devido à sua leveza e à baixa velocidade, o sofisticado projecto da estrutura da perna contribuiu para uma elevada eficiência. A geometria da perna era baseada num mecanismo pantográfico tridimensional. A versão posterior, chamada TITAN III, e as suas evoluções mais recentes apresentam uma mobilidade e uma eficiência energética superior.

Em 1983, um veículo de seis pernas foi construído por Sutherland. Este foi o primeiro robô controlado por micro-computador instalado a bordo do próprio veículo. A fonte de energia era constituída por um motor a gasolina que alimentava um conjunto de bombas hidráulicas.

Em 1983 a companhia Odetics construiu um veículo experimental de seis pernas, alimentado por baterias e controlado por computadores que recebiam comandos via rádio. Cada perna, com três graus de liberdade, usava um mecanismo pantográfico planar modificado, ligado ao corpo por uma junta vertical. Este robô (ODEX I)

demonstrou a capacidade de andar sobre obstáculos, de mudar a sua geometria e de levantar cargas de 5 a 6 vezes o seu próprio peso, enquanto parado, e de 2 a 3 vezes o seu peso, quando em movimento. Uma segunda geração de hexápodes com geometria similar foi construída para realizar operações de manutenção em centrais nucleares.

Estas máquinas mencionadas acima apresentam a limitação de se moverem de um modo estaticamente estável. Um dos primeiros a estudar sistemas de locomoção dinâmica foi Raibert. Em 1983, construiu na CMU uma máquina "de salto". Este sistema, constituído por uma única perna precisava de saltar continuamente de modo a manter o equilíbrio. Mais recentemente, Raibert e os seus colegas construíram um sistema bípede e um sistema quadrúpede com base nos mesmos algoritmos de controlo (figuras 5 e 6).

Nos princípios de 1984, a companhia Francesa de construção de barcos de Chantiers du Nord et de la Méditerranée testou com sucesso um robô móvel marinho RM3. Este sistema móvel anfíbio era constituído por três pernas e um braço e foi usado tanto na limpeza dos lados e da parte inferior de grandes navios como, pela Renault, para pintar as paredes de um grande reservatório de gás.

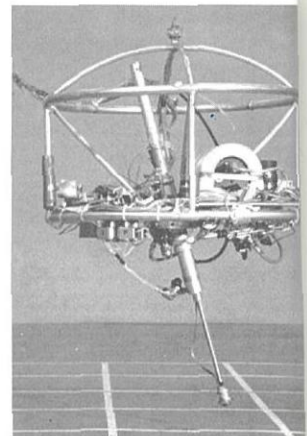


Figura 5 - Sistema de salto usado por Raibert para estudar algoritmos de controlo.

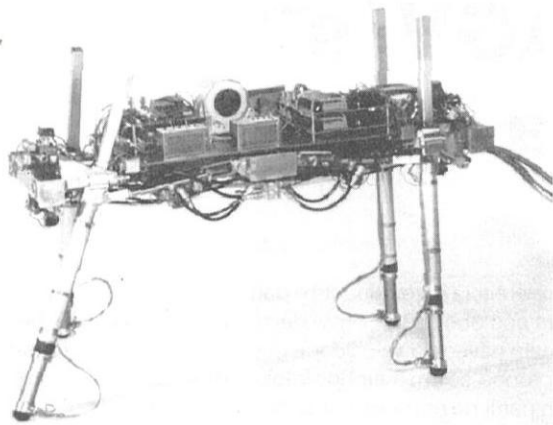


Figura 6 - Sistema quadrúpede controlado com algoritmos de "uma-perna".

Mais recentemente, uma equipa de investigação da Universidade de Ohio, conjuntamente com um grupo da Universidade de Wisconsin e outro do *Environmental Research Institute of Michigan* (ERIM), construiu um veículo hexápode de suspensão adaptativa (ASV - *Adaptive Suspension Vehicle*). Esta máquina, apresentada na figura 7, necessita de um operador humano, mede 5,6 m de comprimento, pesa 2720 kg e transporta uma carga líquida de 225 kg, demonstrando em terrenos difíceis uma mobilidade superior à dos veículos convencionais com rodas e lagartas.

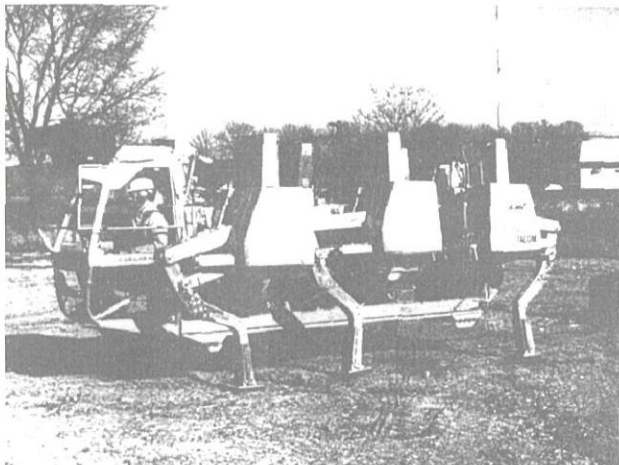


Figura 7 - O veículo ASV em operação.

Os robôs da nova geração são caracterizados pela optimização dos sistemas existentes: melhores sistemas de actuação, sistemas sensoriais mais complexos e computadores mais poderosos. O impulso verificado nos últimos anos deu origem ao aparecimento de sistemas integrados: o robô Plustech usado em florestas, o quadrúpede TITAN VII para locomoção em terrenos naturais, o hexápode Dante II visando a exploração planetária, o robô AQUAROBOT para exploração subaquática e outros. Ao mesmo tempo, vários robôs escaladores têm sido desenvolvidos para inspecção de tanques, prédios ou paredes de diferentes materiais.

4. Conclusões

A construção de veículos de pernas está dependente do progresso em várias áreas da engenharia. A maioria das tarefas envolvidas na locomoção de pernas não são

ainda bem compreendidas. Contudo, a investigação está em franco progresso e levará ao desenvolvimento de veículos de pernas que viajem eficiente e rapidamente em terrenos em que a suavidade, o declive ou os obstáculos tornam os veículos "clássicos" pouco eficientes.

O desenvolvimento desta área científica requer o estudo aprofundado dos padrões de locomoção dos seres vivos e da sua evolução para vários tipos de terrenos e velocidades. Por outro lado, aquando da síntese de estruturas mecânicas de locomoção é importante desenvolver novos actuadores e sensores, bem como modelos matemáticos para um controlo adequado a fim de se atingirem níveis de eficiência semelhantes aos dos sistemas biológicos.

5. Referências

- [1] K. Arikawa, S. Hirose, "Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII", *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, IROS96, pg. 208-214, 1996.
- [2] A. Balluchi, A. Bicchi, G. Casalino, D. Praticchio, "Reflex Control of Locomotion for a Four-Legged Vehicle with Leg Redundancy", *13th. World Congress of IFAC International Federation of Automatic Control*, pg. 193-198, 1996.
- [3] K. Berns, S. Cordes, W. Ilg, "Adaptive, Neural Control Architecture for the Walking Machine LAURON", *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, IROS94, pg. 1172-1177, 1994.
- [4] A.P. Bessonov, N.V. Umnov, "The Stabilisation of the Position of the Body of Walking Machines", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 18, n. 4, pg. 261-265, 1983.
- [5] J.S. Byrd, K.R. DeVries, "A Six-Legged Telerobot for Nuclear Applications Development", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, n. 2, 1990.
- [6] H. Chiel *et al.*, "Robustness of a Distributed Neural Network Controller for Locomotion in a Hexapod Robot", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, n. 3, pg. 293-303, 1992.
- [7] P.S. Freeman, D.E. Orin, "Efficient Dynamic Simulation of a Quadruped Using a Decoupled Tree-Structure Approach", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 10, n. 6, pg. 619-627, 1991.
- [8] E. Krotkov *et al.*, "Ambler: A Six-Legged Planetary Rover", *Proc. IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics*, ICAR91, pg. 717-722., 1991.
- [9] M.H. Raibert, *Legged Robots that Balance*, The MIT Press, 1986.
- [10] S. Song, V. Vohnout, K. Waldron, G. Kinzel, "Computer-Aided Design of a Leg for a Energy Efficient Walking Machine", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 19, n. 1, pg. 17-24, 1984.
- [11] S-M. Song, K.J. Waldron, *Machines that Walk: The Adaptive Walking Vehicle*, The MIT Press, 1989.
- [12] D. Wettergreen, C. Thorpe, "Developing Planning and Reactive Control for a Hexapod Robot", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pg. 2718-2723, 1996.
- [13] K. Yoneda, H. Iyama, S. Hirose, "Sky-Hook Suspension Control of a Quadruped Walking Vehicle", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pg. 999-1004, 1994.

* Faculdade Engenharia Universidade do Porto

** Universidade Moderna - Porto, Bolseiro da Fundação para Ciência e Tecnologia (Praxis XXI/BD/9541/96)