

Estado da Arte da Robótica Móvel em Portugal

Autor:

Rui Paulo Rocha*

Assistente do Departamento de Engenharia Electrotécnica
da FCTUC e Investigador do ISR Coimbra.

Contacto:

Instituto de Sistemas e Robótica
Departamento de Engenharia Electrotécnica
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra
Pólo II - Pinhal de Marrocos
3030 Coimbra - Portugal

Telef.: 239-796256

E-mail: rprocha@isr.uc.pt

Fax: 239-796247

URL: <http://www.dee.uc.pt/~rprocha>

* Foi colaborador da Empresa EFACEC Automação e Robótica, S.A., entre Out. 1996 e Fev. 2000.

Resumo

Com o desenvolvimento de tecnologias de navegação para veículos autónomos e o aumento da capacidade de processamento dos computadores, apareceram os primeiros robôs móveis industriais, embora o seu âmbito de aplicação seja muito mais alargado. Um robô móvel procura conjugar num só dispositivo de automação a mobilidade de um veículo autónomo e a capacidade de manuseamento e manipulação dos robôs. Neste domínio, o AGV (Automatic Guided Vehicle) e o AS/RS (Automatic Storage / Retrieval System) são os dispositivos com maior aplicação em empresas industriais ou de distribuição. Em Portugal, a empresa Efacec Automação e Robótica é pioneira na área da robótica móvel e é autora de inúmeros projectos com aplicação a nível nacional e internacional. Este artigo faz uma caracterização dos robôs móveis já projectados e instalados com know-how nacional, procurando fazer o estado da arte em Portugal neste domínio. A análise concentra-se nos projectos realizados na área de AGV's e AS/RS's, sendo feita uma classificação desses sistemas e apontados os aspectos mais relevantes no seu projecto, desenvolvimento e controlo. É feita uma apresentação de dados e indicadores estatísticos desses projectos, classificando-os quanto à localização, tipo de sistema, dimensão, área de aplicação e recursos tecnológicos utilizados. O artigo termina com as conclusões obtidas e algumas perspectivas de evolução futura da robótica móvel.

Abstract

With the development of navigation systems for autonomous vehicles and the improvement of computers performance, the first industrial mobile robots appeared. However, their current application scope is broader. A mobile robot conjugates in a single automatic device the mobility of an autonomous vehicle and manipulation skills of a conventional robot. In this domain, the AGV (Automatic Guided Vehicle) and the AS/RS (Automatic Storage / Retrieval System) are the most important devices for manufacturing and distribution enterprises. In Portugal, the enterprise Efacec Robotics and Automation is a pioneer in the mobile robots domain. This paper characterizes the mobile robots already designed and installed with Portuguese know-how, making the state of the art in Portugal in this domain. The analysis is focused in AGV and AS/RS projects, making a classification of these systems and pointing-out the most relevant design, implementation and control aspects. Some statistical data about those projects is presented, classifying them through localization, type of system, dimension, application area and technological resources. At the end of the paper, some conclusions and future evolution perspectives about the mobile robots domain are presented.

1. Introdução

Um sistema flexível de fabrico consiste num conjunto de máquinas e num sistema de transporte e manuseamento de materiais, ligados e controlados através de uma rede de computadores. Antes do aparecimento da robótica móvel, o transporte e manuseamento de materiais era realizado com uma forte intervenção humana (ex. veículos guiados manualmente). Com o desenvolvimento de tecnologias de navegação para veículos autónomos e o aumento da capacidade de processamento dos computadores, apareceram os primeiros robôs móveis industriais, com o objectivo de reduzir a intervenção humana nos sistemas flexíveis de fabrico (década de 80) [1].

A utilização de robôs móveis permite:

- aumentar o grau de automação e flexibilidade, facilitando a integração total e o controlo optimizado do sistema, através de uma rede de computadores;
- optimizar o fluxo de materiais, através de um correcto escalonamento das tarefas, contribuindo para uma melhoria significativa da produtividade global do sistema;
- eliminar a presença humana em ambientes potencialmente agressivos e perigosos para a saúde (ex. indústria pesada, química, nuclear, etc.).

Um robô móvel procura conjugar num só dispositivo a mobilidade de um veículo autónomo e a capacidade de manuseamento e manipulação dos robôs convencionais (ex. braços de robôs, garfos telescópicos, etc.).

O aparecimento de robôs móveis trouxe consigo reconhecidas vantagens, mas também inúmeros desafios tecnológicos, como sejam:

- a concepção de veículos autónomos, alimentados a partir de baterias de tracção recarregáveis com a maior autonomia possível;
- o desenvolvimento de sistemas de navegação automáticos, que permitam a sua mobilidade automática de forma eficiente, flexível, tolerante a falhas e segura;
- e o controlo eficiente de frotas constituídas por vários robôs móveis, resolvendo problemas como o escalonamento optimizado, o encaminhamento e a gestão de tráfego [2].

Assim, o desenvolvimento de robôs móveis é uma tarefa fortemente inter-disciplinar, envolvendo áreas tecnológicas tão diversas como: sensores e actuadores, electrónica de potência, energia, projecto mecânico, cinemática, dinâmica, teoria do controlo, escalonamento em tempo-real, investigação operacional, sistemas de informação, telecomunicações, etc..

A nível internacional, o âmbito de aplicação dos robôs móveis não se tem confinado à indústria, abrangendo também as áreas de logística (distribuição e armazenagem), exploração subaquática e oceanográfica, exploração planetária, bem como aplicações militares [3].

Em Portugal, os projectos industriais de robótica móvel já realizados tiveram aplicação principalmente na Indústria (fábricas e células flexíveis de fabrico), na Logística de cadeias de distribuição e armazenagem e nos Serviços. Neste tipo de aplicações destacam-se dois tipos de dispositivos: o AGV (*Automatic Guided Vehicle*) e o AS/RS (*Automatic Storage / Retrieval System*), vulgarmente designado por Armazém Automático.

Os primeiros projectos de AS/RS's realizados em Portugal tiveram lugar na década de 80 (1984). Os primeiros projectos de AGV's tiveram lugar no início da década de 90 (1991). Em ambos os casos, a empresa EFACEC Automação e Robótica, S.A. (Grupo EFACEC) foi pioneira em Portugal na área da robótica móvel. Ao longo de quase duas décadas tem realizado inúmeros projectos nessa área, com aplicações em Portugal e no estrangeiro.

Neste artigo descreve-se o estado da arte da robótica móvel em Portugal. O capítulo 2 faz uma

caracterização de um AGV e de um AS/RS, em virtude da sua preponderância no domínio da robótica móvel nacional (bem como internacional). O capítulo 3 faz uma classificação e análise estatística da maior parte dos projectos de robótica móvel realizados em Portugal pela Efacec. No capítulo 4 são apresentadas algumas conclusões e apontadas algumas perspectivas de evolução neste domínio.

2. Caracterização de Robôs Móveis

A utilização de robótica móvel em áreas como a Indústria, a Logística e os Serviços é dominada por dois tipos de dispositivos: o AGV (*Automatic Guided Vehicle*) e o AS/RS (*Automatic Storage / Retrieval System*).

2.1 AGV

O AGV (Figura 1) é um robô móvel utilizado para o transporte e manuseamento automático de materiais (ex. em curso de fabrico, matéria-prima, produto acabado, etc.). Nos sistemas de fabrico estabelecem o fluxo de materiais existente entre as várias máquinas, postos de trabalho e armazéns (eventualmente automáticos). Em logística são utilizados para assegurar o fluxo de materiais entre os armazéns e os cais de recepção ou de expedição [2].



Figura 1 – AGV's na fábrica de transformadores de distribuição da Efacec, Máquinas Eléctricas, S.A..

As suas principais características funcionais são:

- poder movimentar-se de forma autónoma ao longo de um *layout* de trabalho, sem qualquer intervenção humana;
- poder responder a uma tarefa de movimentação entre dois pontos, seleccionando uma trajectória ou caminho, percorrendo esse caminho de forma autónoma, parando com precisão na posição final, onde procede de forma automática a uma operação de carga ou de descarga de uma carga a transportar.

O AGV é considerado o sistema de movimentação e manuseamento de materiais mais flexível (em inglês, *material handling system*). Pode ser tão pequeno quanto um distribuidor de correio ou de documentos em papel, ou tão grande quanto um transportador de peças de 125 toneladas [4]. Para desempenhar a sua tarefa de forma eficiente e segura, é habitualmente equipado com várias funcionalidades, tais como: sistema de navegação e de encaminhamento autónomo, sistema de transferência de carga automático, sistema de gestão de tráfego, detectores de proximidade de obstáculos, etc..

2.1.1 Sistemas de Navegação

Existem diversos métodos de navegação que permitem a um AGV seguir um caminho fixo ou um caminho dinâmico. A determinação de caminhos fixos ou dinâmicos depende dos custos

de instalação, dos requisitos de flexibilidade e da necessidade ou não da futura expansão do sistema. Os sistemas com caminhos fixos são menos dispendiosos, todavia inviabilizam a possibilidade de reagir a alterações no *layout* de trabalho sem interromper o seu normal funcionamento, acarretando por isso custos adicionais.

O sistema filoguiado (Figura 2) é um exemplo de um método de caminhos fixos, que é usado em grande escala, devido à sua robustez e simplicidade [2]. Baseia-se no seguimento do campo magnético criado por condutores implantados no solo e percorridos por uma corrente eléctrica sinusoidal. O campo magnético é detectado por antenas, que seguem a frequência correspondente ao caminho a seguir. Este sistema tem sido largamente utilizado devido à sua simplicidade e robustez, mas tem a desvantagem de não permitir a reconfiguração do *layout*, o que o torna muito pouco flexível e inadequado a indústrias do tipo *job shop*, onde existe a necessidade de reconfigurar frequentemente o *layout* da fábrica.

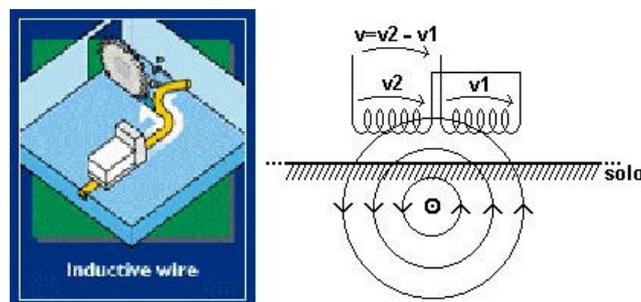


Figura 2 – Sistema de navegação filoguiado.

Os sistemas de caminhos dinâmicos são mais flexíveis perante modificações no *layout* e nos requisitos de capacidades, mas são mais complexos e dispendiosos. Navegação por visão artificial, por *laser* e por GPS (só em aplicações *outdoor*), são exemplos de sistemas de caminhos dinâmicos.

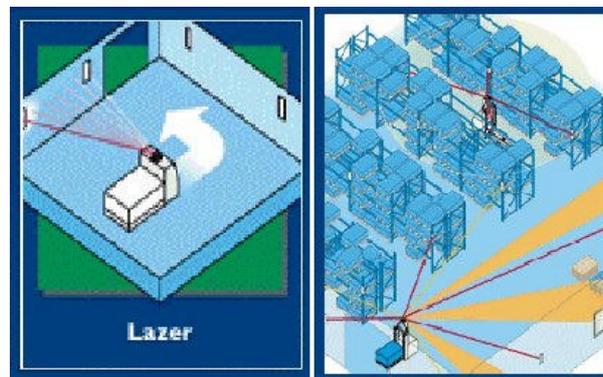


Figura 3 – Sistema de navegação *laser*.

Dentre estes, o sistema de navegação *laser* (Figura 3) é o que tem tido mais implantação no mercado, estando a substituir rapidamente o sistema filoguiado, com as vantagens já apontadas. Neste tipo de sistema, o AGV é equipado com um *laser scanner*, que realiza constantemente um varrimento rotativo, detectando a posição de painéis reflectores colocados ao longo do *layout*. A posição do AGV é determinada com base na triangulação dos feixes de luz reflectidos. Este sistema permite reconfigurar facilmente o *layout*, bastando para isso alterar a colocação dos painéis reflectores e reprogramar a configuração do AGV.

2.1.2 Configurações mais usuais

A configuração mecânica de um AGV pode ser classificada em [5]:

- Unidireccional – 1 roda dianteira de tracção/direcção, que roda sobre si mesma, e 1 eixo traseiro fixo (canto superior esquerdo da Figura 4);
- Bidireccional – 2 rodas de tracção/direcção e 2 rodas loucas, que permite ao AGV deslocar-se com a mesma eficiência em ambos os sentidos (cantos superior e inferior direito da Figura 4); ou uma configuração de movimento diferencial (canto inferior esquerdo da Figura 4).

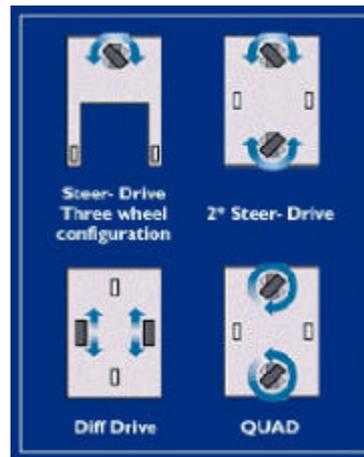


Figura 4 – Sistemas de tracção/direcção.

Os motores de tracção e de direcção (Figura 5) são habitualmente motores de corrente contínua de imanes permanentes, alimentados por *choppers* de 4 quadrantes [5]. Para além dos motores, o bloco de tracção/direcção possui um freio comandado por um electroímã, que quando é alimentado determina a destravagem do AGV.



Figura 5 – Bloco de tracção/direcção de um AGV.

O AGV é alimentado por baterias de tracção recarregáveis, com tensões que variam entre 12V e 48V. Os tipos de baterias mais utilizados são: baterias de chumbo ácidas (com e sem manutenção) e baterias de níquel-cádmio. Estas últimas são utilizadas em aplicações onde o tempo de carga das baterias é um factor crítico, porque permitem ser carregadas com correntes muito acima da corrente nominal e, portanto, em muito menos tempo do que as baterias de chumbo. A operação de carga das baterias pode ser manual, automática ou baseada na troca automática de baterias.

Para salvaguardar a integridade do AGV e do meio que o rodeia (pessoas e máquinas), o AGV possui dispositivos de segurança activos e passivos, tais como:

- pára-choques e botões de pressão de emergência (estrategicamente colocados), que quando actuados determinam a frenagem e a paragem brusca e imediata do AGV;
- detectores de proximidade frontais e laterais (ex. sonares), que determinam o abrandamento ou a interrupção da marcha do AGV, quando este se aproxima de um obstáculo fixo ou móvel;
- sinalização luminosa e acústica, para avisar as pessoas da proximidade do AGV.

Quando um AGV se posiciona num ponto de carga ou de descarga, a transferência de carga automática é assegurada através de sistemas como: transportadores por tapetes ou rolos, dispositivos de elevação, garfos telescópicos, etc.. A escolha do sistema de transferência de carga depende das características dos materiais a serem manuseados.

A Figura 6 mostra um AGV equipado com um transportador por tapete. Este tipo de AGV é habitualmente utilizados para cargas até algumas centenas de Kg..



Figura 6 – AGV's equipados com um transportador por tapete (Bank of China, Hong-Kong Branch).

A Figura 7 mostra à esquerda um pequeno AGV (cargas até 200 Kg), equipado com 2 transportadores por rolos. Contudo, este tipo de AGV pode ser utilizado para cargas de peso superior (Figura 7 à direita), até algumas toneladas (3500 Kg).

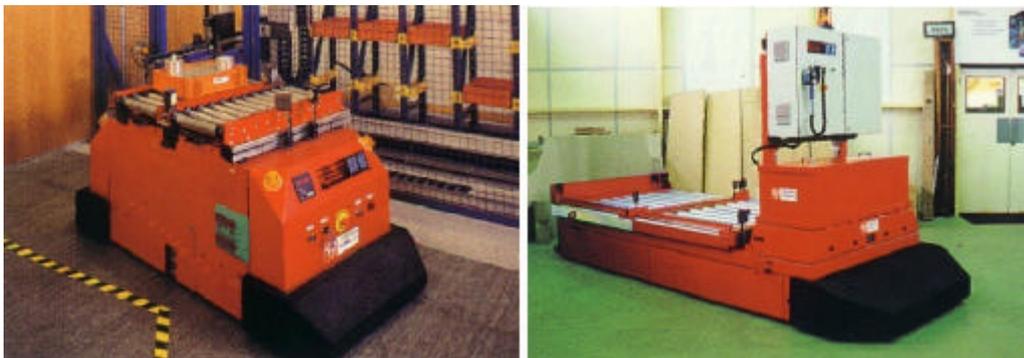


Figura 7 – AGV's equipados com 2 transportadores de rolos: à esquerda, AGV do CCP – Centro de CIM do Porto, carga máxima 200 Kg; à direita, AGV da YPF, S.A., Argentina, carga máxima 1250 Kg.

A Figura 8 mostra AGV's equipados com garfos elevatórios, funcionando como uma espécie de empilhadores automáticos para transportar paletes ou rolos de papel. Este tipo de AGV pode ser utilizado para transportar cargas até várias toneladas.



Figura 8 – AGV's equipados com garfos elevatórios (Soporcel, Soc. Portuguesa de Papel, S.A.).

O AGV da Figura 1 possui um sistema designado por navete, que consiste numa plataforma que tem a capacidade de se deslocar para fora do veículo, lateralmente a este, para ir carregar ou descarregar uma carga colocada sobre um suporte metálico (mesa de transferência). Simultaneamente possui um sistema de elevação, que permite levantar a carga do suporte ou colocá-la aí.

A Figura 9 mostra um AGV unidireccional designado por AGV do tipo *stacker-crane*, que possui uma plataforma elevatória com garfos telescópicos. Este tipo de AGV é utilizado para realizar de forma mais barata um armazém automático (até 6 m de altura), em que é o próprio AGV que se encarrega de colocar ou retirar o contentor ou palete de um compartimento do armazém (solução híbrida, que combina o conceito de AGV com o conceito de AS/RS).



Figura 9 – AGV do tipo *stacker-crane* (Fiorima, Fábrica de Peúgas, Lda, Braga).

2.1.3 Aspectos de controlo e variáveis de projecto de uma frota de AGV's

Quando opera num ambiente de fabrico, o AGV requer controlo a bordo ou centralizado para coordenar os movimentos em relação a outros dispositivos de manuseamento de materiais ou outros AGV's.

Os sistemas de AGV's centralizados são os mais comuns [2]. Neste caso, há um computador central que coordena a operação de toda a frota de AGV's, numa arquitectura do tipo *master-slave*. Este controlador central tem de resolver em tempo-real problemas complexos, como sejam:

- Escalonamento – atribuição otimizada das tarefas de movimentação aos vários AGV's

(recursos), de forma a otimizar um determinado critério de desempenho (ex. tempo em fila de espera de uma tarefa) [6];

- Encaminhamento - execução de um algoritmo, que aplica um determinado critério de otimização para determinar o melhor trajecto para um AGV, quando este tem de se deslocar desde a sua posição inicial até ao ponto de carga de uma nova tarefa, ou quando este se desloca desde o ponto de carga até ao ponto de descarga [7];
- Gestão de Tráfego – gestão do *layout* dos AGV's, de forma a impedir a existência de colisões entre AGV's, ou de AGV's com outros equipamentos, tendo a capacidade de detectar e resolver a eventual ocorrência de *deadlocks*, decorrentes da reserva de determinadas zonas do *layout* por um grupo de AGV's em conflito [2,8];
- Controlo e Monitorização dos veículos – monitorização e reacção a eventos relacionados com o funcionamento dos AGV's, tais como: bateria descarregada, falhas no equipamento, actuação de um botão de emergência, etc. [2];
- Interface com a camada de controlo superior (ex. *shop floor control*) – interligação do controlador do sistema de AGV's com o controlador externo, realizando a recepção de novas tarefas de movimentação; o cancelamento ou alteração dos parâmetros de tarefas de movimentação em curso; a notificação acerca do estado das tarefas pendentes em fila de espera ou em execução; e a sincronização dos AGV's, durante operações de carga e de descarga, com dispositivos externos de manuseamento e de transferência de carga (ex. braço de um robô, tapete de rolos, etc.) [2].

Para além da programação deste controlador, o projecto e configuração de uma frota de AGV's compreende também factores como o número de veículos necessários e a configuração do *layout* [1,9].

Os indicadores de desempenho mais usuais para medir caracterizar um sistema de AGV's são [2]:

- Cadência – número médio de tarefas de movimentação que o sistema realiza por unidade de tempo (normalmente a unidade de tempo utilizada é a hora);
- Tempo médio de atendimento de uma tarefa – tempo que em média uma tarefa permanece em fila de espera até ser atendida;
- Taxa de utilização dos AGV's – percentagem do tempo de sistema em que o AGV se encontra a realizar tarefas de movimentação.

2.2 AS/RS

O AS/RS (*Automatic Storage / Retrieval System*), vulgarmente designado por Armazém Automático é um sistema fundamental de suporte ao manuseamento e armazenagem automáticos de materiais em sistemas de fabrico automatizados e em cadeias de distribuição de produtos automatizadas.

A sua utilização tem como principais vantagens [10]:

- a possibilidade de automatizar as operações de armazenagem e de integrar o controlo automático dessas operações no controlo global do sistema;
- a redução dos custos e o aumento da produtividade em operações de armazenagem;
- a automatização total do controlo de inventários;
- o aumento da capacidade de armazenagem, resultante de uma melhor utilização do espaço disponível;
- redução dos danos (físicos e materiais) resultantes de acidentes ou situações anómalas nas operações de armazenagem.

Fisicamente, um AS/RS é uma estrutura metálica dividida em alas (Figura 10 à esquerda). Em

cada ala há alvéolos (compartimentos de armazenagem) de um lado e do outro, dispostos em linhas e colunas (longitudinalmente e em altura). No centro de cada ala existe um carril, onde circula uma máquina de *storage/retrieval* automático, designada por *stacker-crane*, que para além de se poder deslocar ao longo do carril (translação), possui também capacidade de elevação e garfos telescópicos, para poder carregar e descarregar automaticamente uma carga num alvéolo. Para além deste equipamento, um AS/RS possui também módulos de armazenagem normalizados (paletes, contentores, etc.); estações de carga/descarga de *interface* com o exterior; e um computador, que integra o AS/RS no sistema global onde se encontra a funcionar.

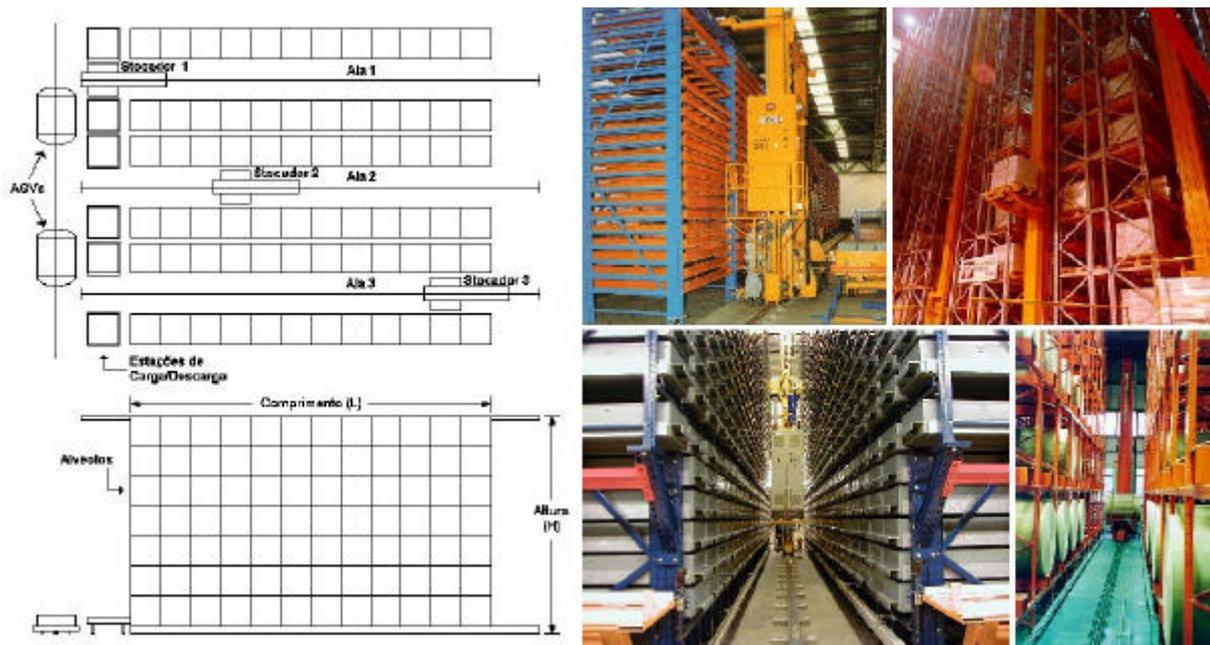


Figura 10 – À esquerda: planta de um AS/RS com 3 alas; À direita: imagens de *stacker-cranes* diversos.

O número de *stacker-cranes* pode ser inferior ao número de alas, havendo nesse caso um sistema – um *transfer car* – que permite a transferência de um *stacker-crane* entre duas alas (Figura 11 à esquerda). Por vezes, os carris das alas são ligados por curvas (Figura 11 à direita), que permitem aos *stacker-cranes* mudar de ala, sendo dispensável o *transfer car*. Em qualquer dos casos, a economia obtida com a redução do número de *stacker-cranes*, implica sempre uma perda de desempenho do sistema, em termos da cadência de armazenagem e de retirada (número de operações por unidade de tempo).



Figura 11 – *Stacker-crane*s com mudança de ala: à esquerda, através de um *transfer car*; à direita, através de alas ligadas por curva.

Ao número de paletes ou contentores, que cada alvéolo comporta, chama-se profundidade de armazenagem. Um aumento da profundidade conduz a um melhor aproveitamento do espaço disponível, mas também a uma diminuição da cadência do sistema.

Existem AS/RS's para aplicações muito diversas. Os materiais manuseados podem pesar desde alguns gramas até algumas toneladas. A altura de armazenagem pode atingir 45 m e o comprimento das alas várias dezenas de metros [4,5].

Os principais tipos de AS/RS's são:

- *Unit Load* – concebido para cargas armazenadas em paletes ou noutros recipientes normalizados; cada alvéolo comporta uma paleta ou contentor, eventualmente constituída por vários objectos, mas tratada como um todo;
- *Mini Load* – destinado a pequenas cargas armazenadas em contentores ou caixas, contendo mais do que uma unidade; numa transacção a caixa é transportada até à estação de carga/descarga, regressando depois ao alvéolo de origem.

As questões principais envolvidas no controlo em tempo-real de um AS/RS são:

- Identificação e monitorização dos alvéolos – cada alvéolo é identificado pelo número de localização, que indica a ala, a posição horizontal e a posição vertical; as unidades armazenadas são registadas numa base de dados, que guarda a sua localização, para além de outros atributos;
- Controlo de posição e de velocidade do *stacker-crane* – dado um determinado alvéolo destino, o *stacker-crane* é controlado para se movimentar até esse ponto; este tipo de controlo é normalmente realizado por um autómato programável, que comunica com o computador de gestão do sistema;
- Posicionamento preciso numa transferência de carga – para depositar ou retirar uma carga, o *stacker-crane* é posicionado com precisão no alvéolo em causa, com uma tolerância aceitável.

Os tipos de ciclos de operação possíveis num AS/RS são os ciclos *Storage*, *Retrieval* e Combinado *Storage/Retrieval*. A operação de um AS/RS ao longo de um determinado intervalo de tempo pode ser sempre decomposta numa sequência de ciclos destes tipos.

As acções efectuadas em cada ciclo são:

- *Storage* – deslocar o *stacker-crane* até à estação de carga, pegar na carga, deslocar o *stacker-crane* até ao alvéolo e descarregar aí a carga;
- *Retrieval* – deslocar o *stacker-crane* até ao alvéolo, pegar na carga, deslocar o *stacker-*

crane até à estação de descarga e depositar aí a carga;

- Combinado *Storage/Retrieval* – deslocar o *stacker-crane* até à estação de carga, pegar numa carga, deslocar o *stacker-crane* até um alvéolo, descarregar aí a carga, deslocar o *stacker-crane* até outro alvéolo, pegar noutra carga, deslocar o *stacker-crane* até à estação de descarga e depositar aí a carga.

São muitos os parâmetros que afectam o desempenho do AS/RS. Apesar de alguns deles estarem inter-relacionados, é possível dividi-los em 3 grupos: padrão dos pedidos de movimentos, configuração física e políticas de operação [11].

O padrão dos pedidos de movimentos, ao condicionar a sequência dos ciclos de operação do sistema, afecta o seu desempenho, já que a cadência do sistema depende do tipos de ciclo (o ciclo combinado é o que permite maior cadência).

A configuração física depende de factores como o comprimento, a altura, o número de alas, o número de alvéolos por ala, o número de unidades por alvéolo (profundidade de armazenagem), etc.. Dado um determinado espaço disponível para armazenagem, a configuração destas variáveis de projecto depende de um compromisso entre a utilização efectiva do espaço disponível e a optimização da acessibilidade a uma unidade armazenada.

As políticas de operação podem ser do tipo sequencial ou do tipo *batch*. Por um lado, o objectivo a atingir é procurar distribuir as cargas a armazenar pelos alvéolos disponíveis, de forma a optimizar a eficiência da retirada. Por outro lado, procura-se sequenciar devidamente as operações, de forma a optimizar a cadência do sistema, quer na armazenagem, quer na retirada.

3. Projectos de Robótica Móvel já realizados em Portugal

A empresa Efacec, Automação e Robótica, S.A. ocupa uma posição de destaque em Portugal na área da robótica móvel. Neste capítulo serão apresentados alguns dados estatísticos sobre os projectos já realizados por essa empresa, concentrando a análise em instalações de AGV's e de AS/RS's. A Figura 12 mostra a distribuição geográfica das instalações correspondentes.



Figura 12 – Distribuição geográfica das instalações correspondentes aos projectos de robótica móvel já realizados em Portugal pela Efacec.

A informação apresentada em seguida baseia-se num relatório das instalações implementadas em Portugal e no estrangeiro pela Efacec, até Dezembro de 2000 [12].

3.1 Projectos de AGV's

Até à data a que se reporta o relatório [12], foram realizados em Portugal um total de 14 projectos de instalações de AGV's, correspondendo a um total de 54 AGV's. A Tabela 1 mostra a distribuição desses projectos, em termos da sua distribuição geográfica (Portugal e estrangeiro) e do âmbito de aplicação a que se destinam.

Verifica-se que a maior fatia de instalações em Portugal se destina ao transporte e manuseamento de produto intermédio (em curso de fabrico) dos sistemas de fabrico. São exemplos dessas empresas a Efacec (Porto), a Renova (Torres Novas), a Vista Alegre (Ílhavo) e a Subercentro Cortiças (Ponte de Sôr). A maior instalação de AGV's em Portugal foi efectuada na Soporcel (Figueira da Foz), onde foram instalados no ano 2000 um total de 21 AGV's *laser*, equipados com garfos elevatórios (Figura 8), para transporte de paletes e bobinas de papel, com pesos máximos de 750 Kg e 3450 Kg, respectivamente.

As instalações efectuadas no estrangeiro destinam-se principalmente ao transporte e manuseamento de produto acabado em sistemas de fabrico e em cadeias de distribuição de produto acabado. São exemplos dessas empresas a Katoen Natie (Bélgica) e a refinaria YPF (La Plata, Argentina). Na primeira foram instalados 2 AGV's bidireccionais, equipados com transportadores por tapetes, para paletes de granulados plásticos até 1500 Kg. Na segunda foram instalados 5 AGV's unidireccionais, equipados com transportadores por rolos, para paletes de lubrificantes até 1250 Kg (Figura 7 à direita). A maior instalação de AGV's no estrangeiro foi efectuada no Banco da China (Hong-Kong), onde foram instalados em 1997 um total de 7 AGV's unidireccionais, equipados com transportadores por tapete, para transporte de contentores de moeda e notas de papel, com um peso máximo de 200 Kg (Figura 6).

Aplicação	Portugal				Estrangeiro				Totais			
	Núm. / Percentag.				Núm. / Percentag.				Núm. / Percentag.			
	Instal.		AGV's		Instal.		AGV's		Instal.		AGV's	
fabrico, matéria-prima	1	11%	1	3%	-	-	-	-	1	7%	1	2%
fabrico, em curso de fabrico	4	44%	9	25%	1	20%	2	11%	5	36%	11	20%
fabrico, produto acabado	2	22%	4	11%	-	-	-	-	2	14%	4	7%
fabrico, em curso fabr. e prod. acab.	2	22%	22	61%	-	-	-	-	2	14%	22	41%
distribuição, matéria-prima	-	-	-	-	1	20%	2	11%	1	7%	2	4%
distribuição, produto acabado	-	-	-	-	3	60%	14	78%	3	21%	14	26%
Totais	9	64%	36	67%	5	36%	18	33%	14		54	

Tabela 1 – Distribuição por áreas de aplicação dos projectos de AGV's da Efacec.

A Tabela 2 mostra a distribuição dos projectos pelos sistemas de navegação filoguiado e *laser*, bem como o ano da primeira instalação de cada tipo, em Portugal e no estrangeiro. A Figura 1 refere-se à primeira instalação de AGV's (filoguiados) em Portugal (1991). A Figura 8 refere-se à primeira instalação de AGV's *laser* em Portugal (2000).

Verifica-se que o sistema *laser* está a tomar a dianteira, pois só com um ano de aplicação já detém cerca de 41% dos AGV's instalados.

		Número / Percentagem				1. ^a
		Instalações		AGV's		Instal.
Portugal	Filoguiado	7	78%	14	39%	1991
	<i>Laser</i>	2	22%	22	61%	2000
	<i>Sub-Total</i>	9		36		
Estrangeiro	Filoguiado	5	100%	18	100%	1995
	<i>Laser</i>	-	-	-	-	-
	<i>Sub-Total</i>	5		18		
<i>Totais</i>	Filoguiado	12	86%	32	59%	1991
	<i>Laser</i>	2	14%	22	41%	2000
	<i>Sub-Total</i>	14		54		

Tabela 2 – Distribuição dos projectos de AGV's da Efacec segundo o sistema de navegação.

A Tabela 3 mostra a distribuição dos projectos pelos sistemas de tracção/direcção unidireccional e bidireccional. Verifica-se que em número de instalações há um equilíbrio quase perfeito entre os dois sistemas. Mas em número de AGV's verifica-se uma predominância dos AGV's unidireccionais porque, apesar de serem veículos com menos mobilidade, são mais baratos.

		Número / Percentagem			
		Instalações		AGV's	
Portugal	Unidireccional	5	56%	27	75%
	Bidireccional	4	44%	9	25%
	<i>Sub-Total</i>	9		36	
Estrangeiro	Unidireccional	2	40%	12	67%
	Bidireccional	3	60%	6	33%
	<i>Sub-Total</i>	5		18	
<i>Totais</i>	Unidireccional	7	50%	39	72%
	Bidireccional	7	50%	15	28%
	<i>Sub-Total</i>	14		54	

Tabela 3 – Distribuição dos projectos de AGV's da Efacec segundo o sistema de tracção/direcção.

Finalmente, a Tabela 4 mostra a distribuição dos projectos de AGV's, segundo o tipo de sistema de transferência de carga instalado nos veículos. São também indicados os limites de capacidade de carga dos AGV's de cada tipo já instalados. Os AGV's com transportadores por tapete e por rolos ou garfos elevatórios dominam os projectos já efectuados, embora o AGV do tipo *stacker-crane* tenha alguma representatividade em Portugal, por ser uma solução barata e atractiva para as pequenas e médias indústrias.

Sistema de Transferência de Carga	Capac. Carga (Kg)	Portugal				Estrangeiro				Totais			
		Núm. / Percentag.		Núm. / Percentag.		Núm. / Percentag.		Núm. / Percentag.					
		Instal.	AGV's	Instal.	AGV's	Instal.	AGV's	Instal.	AGV's				
transportador por tapete	400	1	11%	1	3%	3	60%	11	61%	4	29%	12	22%
transportador por rolos	200 - 3500	2	22%	4	11%	2	40%	7	39%	4	29%	11	20%
garfos elevatórios	750 - 3450	1	11%	21	58%	-	-	-	-	1	7%	21	39%
navete	1700	1	11%	4	11%	-	-	-	-	1	7%	4	7%
plataforma elevatória com garfos telescópicos (<i>stacker-crane</i>)	20 - 500	4	44%	6	17%	-	-	-	-	4	29%	6	11%
Totais		9	64%	36	67%	5	36%	18	33%	14		54	

Tabela 4 – Distribuição dos projectos de AGV's da Efacec segundo o tipo de sistema de transferência de carga.

3.2 Projectos de AS/RS's

Até à data a que se reporta o relatório [12], foram realizados em Portugal um total de 58 projectos de instalações de AS/RS's, correspondendo a um total de 136 *stacker-cranes*. A Tabela 5 mostra a distribuição desses projectos, em termos da sua distribuição geográfica (Portugal e estrangeiro) e do âmbito de aplicação a que se destinam.

Aplicação	Portugal				Estrangeiro				Totais			
	Núm. / Percentag.		Núm. / Percentag.		Núm. / Percentag.		Núm. / Percentag.					
	Instal.	Stocad.	Instal.	Stocad.	Instal.	Stocad.	Instal.	Stocad.				
fabrico, matéria-prima	4	10%	4	6%	3	17%	7	10%	7	12%	11	8%
fabrico, em curso de fabrico	16	40%	21	32%	1	6%	1	1%	17	29%	22	16%
fabrico, mat.-prima e em curso fabr.	2	5%	2	3%	-	-	-	-	2	3%	2	1%
fabrico, em curso fabr. e prod. acab.	3	8%	6	9%	3	17%	10	14%	6	10%	16	12%
fabrico, produto acabado	7	18%	16	24%	1	6%	2	3%	8	14%	18	13%
distribuição, produto acabado	6	15%	12	18%	7	39%	39	56%	13	22%	51	38%
instalação, manutenç., peç. Reserva	2	5%	5	8%	3	17%	11	16%	5	9%	16	12%
Totais	40	69%	66	49%	18	31%	70	51%	58		136	

Tabela 5 – Distribuição por áreas de aplicação dos projectos de AS/RS's da Efacec.

Verifica-se mais uma vez que a maior fatia de instalações em Portugal se destina ao transporte e manuseamento de produto intermédio (em curso de fabrico) dos sistemas de fabrico. São exemplos dessas empresas a Tabaqueira (Sintra), a Inapa (Setúbal) e a Nova Penteação e Fiação da Covilhã (Covilhã). Também há uma fatia importante de instalações na área da cadeia de distribuição de produto acabado (33%). São exemplos dessas empresas a Papelaria Fernandes (Lisboa), a Ambar (Lisboa) e a Bastos Viegas (Penafiel).

Nas instalações realizadas no estrangeiro, a área da logística de grandes centros de distribuição de produto acabado é dominante (39%). São exemplos disso a Seagate (Singapura), a Camp Benckiser Espanha (Espanha) e a ITC (Índia), que distribuem componentes electrónicos, produtos químicos e papel, respectivamente. Logo a seguir, há uma fatia importante de instalações em sistemas de fabrico, na área de produto intermédio e acabado, de que são exemplos as empresas de montagem de automóveis Volkswagen Argentina e MTU Friedrichshafen (Grupo Daimler-Benz, Singapura).

A primeira instalação de um AS/RS em Portugal ocorreu em 1984 na fábrica de motores

eléctricos da Rabor (Ovar). A primeira instalação no estrangeiro ocorreu em 1991 na Selcom Aragon (Zaragoza, Espanha); destina-se à armazenagem de chapas de aço numa fábrica de portas para elevadores.

O AS/RS de maior capacidade foi instalado na Miralanza Benckiser Italia S.p.A. (Mira, Itália), com um comprimento de 165 m, uma largura de 83 m e uma altura de 14.2 m. Trata-se de um AS/RS do tipo *Unit Load* de dupla profundidade, com 11 alas e 11 *stacker-cranes*, que armazena paletes de produtos químicos de volume até 2 m³ e peso até 1050 Kg, com a capacidade de 37488 alvéolos e uma cadência máxima de 500 paletes/hora.

A Tabela 6 classifica os projectos de AS/RS's segundo a configuração dos mesmos. Verifica-se que a configuração *Unit Load* de profundidade 1 é de facto dominante (86%).

Tipo de AS/RS	Prof.	Portugal				Estrangeiro				Totais			
		Núm. / Percentag.				Núm. / Percentag.				Núm. / Percentag.			
		Instal.		Stocad.		Instal.		Stocad.		Instal.		Stocad.	
<i>Unit Load</i>	1	36	90%	56	86%	14	78%	42	59%	50	86%	98	72%
	2	1	3%	2	3%	3	17%	25	35%	4	7%	27	20%
<i>Mini-Load</i>	1	3	8%	7	11%	1	6%	4	6%	4	7%	11	8%
Totais		40	69%	65	48%	18	31%	71	52%	58		136	

Tabela 6 – Distribuição dos projectos de AS/RS's da Efacec segundo o tipo de sistema.

As Tabelas 7, 8 e 9 fazem uma classificação dos projectos realizados, segundo as dimensões da estrutura de armazenagem, a sua capacidade e o volume e peso das cargas armazenadas. Para cada grandeza característica são indicados 3 valores: da esquerda para a direita, o mínimo, a média e o máximo. A altura máxima atingida pela estrutura de um AS/RS foi de 29 m.

Tipo de AS/RS	Prof.	Estrutura de Armazenagem											
		C (m)			L (m)			A (m)			Vol. (m ³)		
<i>Unit Load</i>	1	10	51	125	2	12	39	4	12	29	148	12 061	73 500
	2	81	125	165	15	50	83	14	17	24	25 943	106 392	194 469
<i>Mini-Load</i>	1	28	40	59	6	8	12	3	6	10	673	2 512	6 774

Tabela 7 – Características dos projectos de AS/RS's da Efacec relativas ao tamanho da estrutura de armazenagem.

A densidade referida na Tabela 8 refere-se ao quociente entre o volume realmente aproveitado para armazenagem (produto do número de alvéolos pelo volume máximo da carga num alvéolo) e o volume total ocupado pela estrutura de armazenagem. Este valor é sempre inferior a 100%, devido ao espaçamento entre alvéolos e ao volume ocupado pelas alas.

Tipo de AS/RS	Prof.	Capacidade de Armazenagem								
		# alvéolos: N			Volume (m ³)			Densidade (%)		
<i>Unit Load</i>	1	36	3 417	20 000	14	5 169	31 638	7	35	74
	2	3 040	18 921	37 488	6 110	42 101	73 776	24	36	44
<i>Mini-Load</i>	1	1 372	9 874	21 576	107	533	1 282	16	22	31

Tabela 8 – Características dos projectos de AS/RS's da Efacec relativas à capacidade de armazenagem.

Pela Tabela 9 verifica-se que o AS/RS do tipo *Mini Load* é tipicamente utilizado para cargas de peso relativamente baixo (até 100 Kg no máximo).

Tipo de AS/RS	Prof.	Carga					
		Vol (m ³)			Peso (Kg)		
Unit Load	1	0.07	1.75	14.6	25	856	3 500
	2	1.97	2.31	2.79	1 000	1 100	1 250
Mini-Load	1	0.05	0.06	0.08	50	75	100

Tabela 9 – Características dos projectos de AS/RS's da Efacec relativas ao volume e ao peso das cargas armazenadas em cada alvéolo.

As Tabelas 10 e 11 fazem uma classificação dos projectos realizados, segundo o número de recursos utilizados (*stacker-cranes* e *transfer cars*) e o desempenho alcançado. Mais uma vez, para cada grandeza característica são indicados 3 valores: da esquerda para a direita, o mínimo, a média e o máximo.

A Tabela 10 permite concluir que os AS/RS's do tipo *Unit Load* utilizam mais alas e *stacker-cranes* do que os *Mini Load*, porque também são os de maior capacidade. Para se atingir o mesmo nível de desempenho em termos da cadência, tem de se melhorar a acessibilidade a cada alvéolo, à custa do aumento do número de alas.

Tipo de AS/RS	Prof.	Número de ...								
		Alas: Al			Stoc.: S			Transfer car.		
Unit Load	1	1	2.9	9	1	2.0	6	1	1.2	2
	2	2	6.8	11	2	6.8	11	0	0.0	0
Mini-Load	1	2	2.8	4	2	2.8	4	0	0.0	0

Tabela 10 – Características dos projectos de AS/RS's da Efacec relativas ao número de alas, *stacker-cranes* e *transfer cars* utilizados.

Na Tabela 11 a cadência indica o número máximo de unidades que o AS/RS consegue armazenar/retirar por cada hora de operação.

A média do quociente entre o número de *stacker-cranes* (S) e o número de alas (Al), ao longo de todos os projectos, dá uma ideia do número médio de *stacker-cranes* em cada ala.

O quociente entre o número de alvéolos (Al) e a cadência (C) é o tempo mínimo (em horas) necessário para encher ou esvaziar completamente o AS/RS. Esta medida dá uma ideia da dimensão do AS/RS e da acessibilidade a cada alvéolo.

O quociente entre a cadência (C) e o número de *stacker-cranes* (S) dá uma ideia do desempenho médio individual de cada *stacker-crane*, em termos da sua cadência individual.

Tipo de AS/RS	Prof.	Desempenho											
		Cadência (h ⁻¹): C			S/Al			N/C (h)			C/S (h ⁻¹)		
Unit Load	1	20	95	300	0.2	0.8	1	1	34	200	20	51	162
	2	76	311	500	1.0	1.0	1	37	52	75	38	46	56
Mini-Load	1	96	171	240	1.0	1.0	1	6	58	93	45	65	103

Tabela 11 – Características dos projectos de AS/RS's da Efacec relativas ao desempenho alcançado.

4. Conclusões

Este artigo começou por contextualizar a área de investigação da robótica móvel, confrontando as vantagens da sua utilização com os inúmeros novos desafios por ela suscitados. De seguida, apresentou-se o contexto nacional da robótica móvel, referindo o importante contributo da empresa Efacec, Automação e Robótica, que tem sido pioneira nesta área, há quase cerca de 2 décadas.

Foi feita uma caracterização do AGV e do AS/RS, enquanto dispositivos de automação, tomando como base o universo de aplicações projectadas em Portugal.

Em relação ao AGV, referiram-se as suas características funcionais e técnicas, dando particular incidência aos sistemas de navegação habitualmente utilizados e às configurações mais habituais. Neste âmbito, deu-se especial atenção à sua configuração electromecânica e às configurações possíveis para o sistema de transferência de carga automática. Foram também referidos aspectos de controlo, parâmetros de projecto e indicadores de desempenho de um sistema de AGV's, com especial incidência nos sistemas centralizados, que ainda dominam o universo de aplicações conhecidas.

Em relação ao AS/RS, referiram-se as suas vantagens face aos sistemas não automáticos, bem como as suas características funcionais e técnicas. Descreveram-se as variáveis de projecto que caracterizam um AS/RS, nomeadamente as dimensões e configuração da estrutura de armazenagem e os recursos utilizados para realizar automaticamente as operações de armazenagem e retirada (*stacker-cranes* e *transfer cars*). Referiram-se também as configurações mais habituais, bem como os aspectos mais críticos do projecto e controlo de um AS/RS.

Na parte final do artigo completou-se o estado da arte da robótica móvel em Portugal, apresentando dados e indicadores estatísticos sobre os projectos de AGV's e AS/RS's já realizados, que caracterizam a utilização a nível nacional das tecnologias da robótica móvel. Já foram realizados em Portugal um total de 14 projectos de AGV's (54 AGV's) e 58 projectos de AS/RS's (136 *stacker-cranes*), correspondentes a instalações dispersas por 14 países, da Europa, Ásia e Américas.

Em relação aos projectos de AGV's, foram dissecados aspectos significativos como sejam: o primeiro projecto ocorreu em 1991; a maior fatia dos projectos (36%) tiveram aplicação no transporte e manuseamento de produto intermédio em sistemas de fabrico, verificando-se esta tendência apenas em Portugal (44%), porque a maior aplicação no estrangeiro ocorreu em empresas de distribuição de produto acabado (60%); a segunda maior aplicação a nível global (21%) ocorreu neste tipo de empresas; o sistema de navegação filoguiado ainda representa a maior fatia (59%), embora o sistema *laser* vá tomar a dianteira rapidamente, porque já detém 41% do número total de AGV's, com apenas um ano de aplicação (desde 2000); há um equilíbrio em número de instalações entre os sistemas de tracção/direcção unidireccional e bidireccional, embora o primeiro seja dominante em termos do número de AGV's instalados (72%), devido ao seu custo inferior; os AGV's com sistema de transferência de carga de transportadores por rolos ou tapete são os mais utilizados (58%), embora o AGV do tipo *stacker-crane* detenha em Portugal 44% das instalações e 17% dos AGV's, por permitir realizar armazéns automáticos de mais baixo custo em pequenas e médias empresas (quando comparados com um AS/RS convencional); o peso das cargas varia entre 20 Kg e 3500 Kg.

As conclusões que ressaltam da análise dos projectos de AS/RS's são: o primeiro projecto ocorreu em 1984; a maior fatia dos projectos (29%) tiveram aplicação no transporte e manuseamento de produto intermédio em sistemas de fabrico, verificando-se esta tendência apenas em Portugal (40%), porque a maior aplicação no estrangeiro ocorreu em empresas de

distribuição de produto acabado (39%); a segunda maior aplicação a nível global (22%) ocorreu neste tipo de empresas, onde também foi instalado o maior número de *stacker-cranes* (38%); o AS/RS do tipo *Unit Load* de profundidade 1 domina com 86% das instalações, enquanto que o AS/RS do tipo *Mini Load* detém apenas 7%; o AS/RS de maior capacidade e dimensão é do tipo *Unit Load* de dupla profundidade e tem 165 m de comprimento, 83 m de largura e 14.2 m de altura, 11 alas, 11 *stacker-cranes*, capacidade para 37488 paletes de produtos químicos (com, no máximo, 2m³ de volume e 1050Kg de peso) e cadência máxima de 500 paletes/hora; a altura máxima atingida pela estrutura de armazenagem foi de 29 m; as cargas armazenadas em cada alvéolo variam em volume e em peso entre 0.07 m³ e 14.6 m³ e entre 25 Kg e 3500 Kg, respectivamente.

Tratando-se de uma área fortemente inter-disciplinar, a robótica móvel está sujeita a uma grande evolução, relacionada com os desenvolvimentos obtidos em áreas específicas como: sistemas de navegação; teoria do controlo em tempo-real; análise, concepção e modelização de sistemas de manufactura (sistemas dinâmicos de eventos discretos); e ainda teoria do escalonamento. O ISR possui diversos grupos de investigação a trabalhar nestes assuntos [13]. Ao nível dos sistemas de navegação, perspectiva-se uma franca evolução, especialmente em aplicações fora do âmbito industrial, como sejam aplicações militares e de pesquisa subaquática e oceanográfica [14]. Ao nível da teoria do escalonamento, procura-se migrar dos sistemas de controlo habitualmente centralizados para sistemas de controlo distribuídos mais robustos e eficientes, que assentam na exploração de mecanismos de cooperação e coordenação entre os vários robôs móveis da mesma frota, reforçando assim a autonomia e o nível de inteligência do controlador residente em cada robô [15,16].

Agradecimentos

Agradece-se a colaboração prestada pelo Departamento de Marketing da empresa Efacec, Automação e Robótica, S.A., pela disponibilização de informação técnica e estatística sobre os projectos já realizados, em especial aos Engenheiros Rui Gardete, Fernando Aires e Domenico Casella.

Referências

- [1] B. Mahadevan, T. T. Narendran, *Design of an Automated Guided Vehicle Based Material Handling System for a Flexible Manufacturing System*, International Journal of Production Research, Vol. 28, N.º 9, 1990, pp. 1611-1622.
- [2] R. P. Rocha, *Desenvolvimento de um Sistema de Gestão de AGVs*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Set. 1998.
<http://www.dee.uc-pt/~rprocha>
- [3] F. G. Pin, J. C. Culiodi, D. B. Reister, *Using Minimax Approaches to Plan Optimal Task Commutation Configurations for Combined Mobile Platform-Manipulator Systems*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 10, N.º 1, Feb. 1994.
- [4] J. M. A. Tanchoco, *Material Handling and Industrial Logistics*, Purdue AGVS Research Group, School of Industrial Engineering, Purdue University, E.U.A..
URL: <http://gilbreth.ecn.purdue.edu/~tanchoco/mh.index.html>
- [5] Departamento de Marketing da Efacec, Automação e Robótica, S.A., *Automated Vehicles for Material Handling*, documento de promoção sobre AGV's, Jan. 2001.

- [6] P. J. Eglebu, J. M. A. Tanchoco, *Characterization of Automated Guided Vehicle Dispatching Rules*, International Journal of Production Research, Vol. 22, N.º 3, 1984, pp. 359-374.
- [7] R. Narasimhan, R. Batta, M. H. Karwan, *Routing Automated Guided Vehicles in the Presence of Interruptions*, International Journal of Production Research, Vol. 37, N.º 7, 1999, pp. 653-681.
- [8] C. W. Kim, J. M. A. Tanchoco, P. H. Koo, *Deadlock Prevention in Manufacturing Systems with AGV Systems: Banker's Algorithm Approach*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, 1997, pp. 849-854.
- [9] S. Rajotia, K. Shanker, J. L. Batra, *Determination of Optimal AGV Fleet Size for an FMS*, International Journal of Production Research, Vol. 36, N.º 5, 1998, pp. 1177-1198.
- [10] S. Hsieh, J. S. Hwang, H. C. Chou, *A Petri-Net Based Structure for AS/RS Operation Modelling*, International Journal of Production Research, Vol. 36, N.º 12, 1998, pp. 3323-3346.
- [11] E. A. Elsayed, O. I. Unal, *Order Batching Algorithms and Travel-Time Estimation for AS/RS's*, International Journal of Production Research, Vol. 27, N.º 7, 1989, pp. 1097-1114.
- [12] Departamento de Marketing da Efacec, Automação e Robótica, S.A., *Lista de Referências*, relatório das instalações realizadas até Dez. de 2000.
- [13] I.S.R. – Instituto de Sistemas e Robótica, Pólo de Coimbra
URL: <http://www.isr.uc.pt>
- [14] J. B. Sousa, F. L. Pereira, *A General Control Architecture for Multiple Vehicles*, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, Abr. 1996, pp. 692-697.
- [15] J. Kosecka, R. Bajcsy, *Discrete Event Systems for Autonomous Mobile Agents*, GRASP Laboratory, Department of Computer and Information Science, University of Pennsylvania, Out. 1993.
- [16] O. Khatib, K. Yokoi, O. Brock, K. Chang, A. Casal, *Robots in Human Environments: Basic Autonomous Capabilities*, International Journal of Robotics Research, Vol. 18, N.º 7, Jul. 1999, pp. 684-696.