



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA

Gestão de Frotas de AGVs (Veículos Autonomamente Guiados)

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica
Especialização em Automação e Comunicações em Sistemas de Energia

Autor

Leonardo Filipe Belchior Ribeiro

Orientador

Professor Doutor Nuno Miguel Fonseca Ferreira

Coimbra, dezembro 2025

AGRADECIMENTOS

Um especial agradecimento ao Professor Doutor Nuno Ferreira, pela sua orientação, paciência e por ter partilhado o seu conhecimento que foi essencial para o desenvolvimento desta tese.

À Alice, por todo o apoio incondicional, paciência e motivação constante ao longo do meu percurso académico.

Aos meus pais, por me terem proporcionado todas as oportunidades, pela educação e por acreditarem sempre em mim.

A todos, o meu sincero muito obrigado.

RESUMO

A evolução para a Indústria 4.0 e o aparecimento da Indústria 5.0 impulsionaram uma transformação profunda na logística, exigindo sistemas de transporte interno cada vez mais flexíveis, eficientes e autónomos. O presente projeto aborda o tema da gestão de frotas de veículos industriais, focando-se na análise comparativa e na transição tecnológica entre os tradicionais AGVs e os mais recentes AMRs.

O trabalho investiga as tecnologias de navegação e localização e as estratégias de gestão de tráfego e energia. A componente prática do projeto centra-se num estudo de caso aplicado a uma unidade fabril, onde foi desenvolvido um modelo de dimensionamento analítico.

Os resultados obtidos no cenário normalizado demonstraram que uma frota de 4 veículos garante o cumprimento dos objetivos de produção. Contudo, a análise de sensibilidade revelou que a introdução de variáveis realistas, como a gestão de energia, eleva a ocupação evidenciando a vulnerabilidade de frotas estritamente dimensionadas a imprevistos operacionais.

Conclui-se que embora os AGVs mantenham a viabilidade económica em fluxos estáveis e lineares, a tecnologia AMR apresenta-se como a solução superior em termos de resiliência operacional, permitindo a navegação dinâmica e a mitigação de congestionamentos em ambientes industriais complexos e partilhados.

Palavras-chave: AGV, AMR, Gestão de Frotas, Logística, Dimensionamento de Frotas, Indústria 4.0.

ABSTRACT

The evolution towards Industry 4.0 and the emergence of Industry 5.0 have driven a profound transformation in logistics, demanding increasingly flexible, efficient, and autonomous internal transport systems. This project addresses the topic of industrial vehicle fleet management, focusing on the comparative analysis and technological transition between traditional AGVs and the more recent AMRs.

The work investigates navigation and localization technologies, as well as traffic and energy management strategies. The practical component focuses on a case study applied to a manufacturing unit, where an analytical fleet dimensioning model was developed.

The results obtained in the normalized scenario demonstrated that a fleet of 4 vehicles ensures the fulfillment of production goals. However, the sensitivity analysis revealed that introducing realistic variables, such as energy management, increases the occupancy rate, highlighting the vulnerability of strictly dimensioned fleets to operational contingencies.

It is concluded that, although AGVs remain economically viable in stable and linear flows, AMR technology stands out as the superior solution in terms of operational resilience, enabling dynamic navigation and congestion mitigation in complex and shared industrial environments.

Keywords: AGV, AMR, Fleet Management, Logistics, Fleet Dimensioning, Industry 4.0.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| AGRADECIMENTOS..... | 6 |
| RESUMO..... | 7 |
| ÍNDICE..... | 9 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 12 |
| SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS..... | 14 |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 1.1 Contextualização..... | 15 |
| 1.2 Problema e Justificação..... | 15 |
| 1.3 Objetivos..... | 15 |
| 1.4 Metodologia..... | 16 |
| 1.5 Estrutura do Documento..... | 16 |
| 1.6 Considerações finais da introdução..... | 17 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 17 |
| 2.1 Evolução da indústria atual..... | 17 |
| 2.1.1 Conceito e Principais Tecnologias..... | 18 |
| 2.1.2 Impacto na logística e automação industrial..... | 19 |
| 2.2 Robótica Móvel..... | 20 |
| 2.3 História e Evolução dos AGVs..... | 20 |
| 2.3.1 Primeiras Gerações..... | 21 |
| 2.3.2 Integração de Sistemas..... | 22 |
| 2.3.3 Os robôs móveis - AMRs..... | 22 |
| 2.4 Arquitetura de controlo..... | 23 |
| 2.4.1 Comparação entre AGVs e AMRs..... | 24 |
| 2.4.2 Estrutura Física e Funcional..... | 25 |
| 2.5 Tipologia..... | 28 |
| 2.6 Vantagens e Desvantagens..... | 32 |
| 2.7 Aplicações de AGVs..... | 33 |
| 2.7.1 Indústria..... | 34 |
| 2.7.2 Setor Automóvel: Desafios e Oportunidades..... | 34 |
| 2.8 Estado da Arte dos AGVs..... | 37 |
| 3 Sistemas de Localização, Movimentação e Autonomia Energética..... | 37 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Movimentação | 37 |
| 3.2 | Tecnologias de Localização | 37 |
| 3.2.1 | RFID | 38 |
| 3.2.2 | Laser | 38 |
| 3.2.3 | GPS | 39 |
| 3.2.4 | SLAM..... | 40 |
| 3.2.5 | Filoguiado..... | 40 |
| 3.2.6 | Fita magnética..... | 41 |
| 3.3 | Comparação das Tecnologias de Localização..... | 41 |
| 3.4 | Rotas dos AGVs..... | 42 |
| 3.5 | Soluções de Carregamento e Gestão de Energia (antes da programação) 43 | |
| 3.5.1 | Substituição Manual | 44 |
| 3.5.2 | Substituição Automática | 44 |
| 3.5.3 | Carregamento de Oportunidade..... | 44 |
| 3.5.4 | Carregamento Automático..... | 44 |
| 3.5.5 | Carregamento Rápido..... | 45 |
| 3.5.6 | Carregamento Indutivo | 45 |
| 3.6 | Programação dos AGVs (SIGAT) | 45 |
| 4 | Estudo de caso: Dimensionamento e simulação de um sistema agvs e amrs .. | 51 |
| 4.1 | Contextualização e Formulação do Problema..... | 51 |
| 4.1.1 | Descrição do Sistema e Objetivos | 51 |
| 4.1.2 | Regras Operacionais..... | 52 |
| 4.1.3 | Estratégia de Carregamento e Gestão de Energia..... | 53 |
| 4.2 | Formulação do problema | 53 |
| 4.2.1 | Definições e Notação | 54 |
| 4.2.2 | Tempo de Missão e Transporte com Carga..... | 54 |
| 4.2.3 | Fluxo Líquido e Reequilíbrio..... | 55 |
| 4.2.4 | Tempo Total de Atividade e Dimensionamento..... | 56 |
| 4.3 | Caracterização do <i>Layout</i> | 57 |
| 4.3.1 | Fluxos de Materiais e Lógica de Movimentação | 59 |
| 4.4 | Cenários Operacionais e Matrizes de Fluxo | 60 |
| 4.4.1 | Tipologia de Cargas e Fluxos | 60 |
| 4.4.2 | Matriz de fluxos | 61 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.4.3 | Matriz de Distâncias e Tempos de missão | 61 |
| 4.5 | Resultados do Dimensionamento Analítico | 62 |
| 4.5.1 | Cálculo do Tempo de Transporte Cheio (HO) | 62 |
| 4.5.2 | Cálculo de Viagens em Vazio e Reequilíbrio (ΔH)..... | 63 |
| 4.5.3 | Dimensionamento da Frota (Y) | 64 |
| 4.5.4 | Taxa de Ocupação da Frota (ρ) | 64 |
| 4.5.5 | Validação Computacional e Ferramenta de Simulação | 64 |
| 4.5.6 | Análise dos Resultados | 66 |
| 4.6 | Análise de Sensibilidade e Discussão..... | 66 |
| 4.6.1 | Cenário A: Aumento da Capacidade Produtiva (+20%)..... | 66 |
| 4.6.2 | Cenário B: Impacto da Disponibilidade e Carregamentos | 68 |
| 4.6.3 | Análise de Resiliência: Comportamento AGV vs. AMR sob Constrangimentos | 70 |
| 4.7 | Conclusão do Estudo de Caso | 70 |
| 5 | CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS..... | 72 |
| | BIBLIOGRAFIA | 73 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Demonstração da integração de tecnologias digitais avançadas como IoT, inteligência artificial e automação robótica [6]..... | 19 |
| Figura 2 - Diferença de trajeto de AGV e de um AMR | 24 |
| Figura 3 - Placas de cobre para carregamento de AGV's..... | 25 |
| Figura 4 - Dimensões [mm] críticas do AGV ASTI – EasyBot..... | 27 |
| Figura 5 - AGV ASTI - EasyBot..... | 28 |
| Figura 6 - AMR Reboque | 29 |
| Figura 7 - AMR floor-to-floor | 30 |
| Figura 8 - AMR para operações de grande altura..... | 30 |
| Figura 9 - AGV AMR respetivamente de carga leve..... | 30 |
| Figura 10 – Robo Móvel do tipo “Garfo” | 31 |
| Figura 11 – AMR Flat bed..... | 31 |
| Figura 12 – Percentagem referente ao local de aplicação dos AGVs [20]..... | 33 |
| Figura 13 – Tags RFID..... | 38 |
| Figura 14 – Robô móvel com tecnologia de localização a laser | 39 |
| Figura 15 – Robô móvel com tecnologia de localização GPS..... | 39 |
| Figura 16 – AMR com tecnologia de localização SLAM..... | 40 |
| Figura 17 – Fita-magnética | 41 |
| Figura 18- Página inicial SIGAT..... | 46 |
| Figura 19- Ler, guardar, abrir e gravar programas com o Consola SIGAT Slam.... | 46 |
| Figura 20- Programa real em SIGAT..... | 47 |
| Figura 21 – Definição de parâmetros do AGV na plataforma SIGAT..... | 48 |
| Figura 22 – Janela de parametrização de um segmento do circuito..... | 49 |
| Figura 23 - Configuração de condições lógicas de movimento..... | 50 |
| Figura 24 - controlo de atuadores, carregamento e ativação de saídas digitais..... | 50 |
| Figura 25 - <i>Layout</i> tridimensional proposto para a fábrica | 51 |
| Figura 26 – Definição das variáveis de fluxo e tempo entre estações | 54 |
| Figura 27- Layout da Fábrica 2D..... | 58 |
| Figura 28 – Script Automático em MATLAB análise normalizada | 65 |
| Figura 29 – Script Automático em MATLAB +20% produtividade..... | 67 |

Figura 30 - Script Automático em MATLAB, impacto disponibilidade e gestão de energia..... 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparação AGVs e AMRs 24

Tabela 2- Características gerais AGV ASTI – Easybot 27

Tabela 3: Comparação das Tecnologias de Localização de AGV 41

Tabela 4 – Matriz de Fluxos..... 61

Tabela 5 – Matriz de Distâncias e Tempos de missão 62

Tabela 6 - Cálculo do Tempo de Transporte com carga..... 63

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

AGV – Automated Guided Vehicle (Veículo Guiado Automaticamente)

AMR – Autonomous Mobile Robot (Robô Móvel Autônomo)

IA – Inteligência Artificial

IoT – Internet of Things (Internet das Coisas)

LiDAR – Light Detection and Ranging

SLAM – Simultaneous Localization and Mapping (Localização e Mapeamento Simultâneos)

RFID – Radio Frequency Identification (Identificação por Rádio Frequência)

GPS – Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)

M2M – Machine-to-Machine (Comunicação Máquina a Máquina)

ERP – Enterprise Resource Planning (Planeamento de Recursos Empresariais)

MES – Manufaturing Execution System (Sistema de Execução da Produção)

WMS – Warehouse Management System (Sistema de Gestão de Armazém)

ISO – International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização)

DC – Direct Current (Corrente Contínua)

GNSS - Global Navigation Satellite System (Sistema de navegação por satélite)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A crescente globalização e competitividade dos mercados têm conduzido as empresas a repensar todos os seus processos produtivos e logísticos.

A necessidade de eficiência operacional, redução de custos e maior flexibilidade nas cadeias de abastecimento são fatores que estão a impulsionar a adoção de sistemas automatizados de transporte interno, com destaque para a robótica móvel de destacar os AGVs (*Automated Guided Vehicle*) e AMRs (*Autonomous Mobile Robot*).

Estes sistemas constituem ferramentas tecnológicas avançadas que materializam a transformação digital da Indústria 4.0, integrando comunicação em rede, inteligência artificial e sensores sofisticados, e antecipam os novos paradigmas da Indústria 5.0, onde a colaboração humano-máquina, a sustentabilidade e a personalização são fatores cruciais.

1.2 Problema e Justificação

Apesar dos avanços, a gestão de frotas de robôs móveis continua a ser o desafio central para o setor industrial. A coordenação simultânea de múltiplos veículos em ambientes dinâmicos pode originar congestionamentos, colisões, ineficiências energéticas e perdas de produtividade.

Este trabalho justifica-se pela necessidade de analisar criticamente as soluções de gestão de frotas, comparar abordagens tradicionais com emergentes e refletir sobre o impacto destas tecnologias na competitividade industrial, com foco na coordenação inteligente e eficiente destes sistemas.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é analisar e comparar soluções de gestão de frotas para robôs móveis do tipo AGVs e AMRs, com foco nos sistemas de localização, navegação e controlo de tráfego.

Objetivos específicos:

- Estudar a evolução histórica da robótica móvel aplicada à indústria;
- Identificar as principais tecnologias de localização e navegação;
- Analisar metodologias de gestão logística e controlo de tráfego;
- Avaliar a relevância de novos paradigmas digitais (IoT, cloud, IA) na gestão de frotas;
- Propor um enquadramento crítico que relacione tecnologia, eficiência e sustentabilidade.

1.4 Metodologia

A metodologia desta dissertação assenta na revisão bibliográfica, na análise e num caso de estudo:

- Revisão bibliográfica de artigos científicos, normas técnicas e relatórios industriais (2020–2025).
- Análise comparativa entre diferentes tecnologias de localização, navegação, gestão e segurança.
- Estudo de implementação, através da representação de um ambiente industrial real, para aplicação e discussão crítica das soluções identificadas.

1.5 Estrutura do Documento

Este trabalho de projeto está organizada em seis capítulos.

O trabalho inicia-se com o Capítulo 1, que apresenta uma introdução, os objetivos e a metodologia adotada neste trabalho.

A fundamentação teórica é apresentada no Capítulo 2, através de uma revisão bibliográfica sobre os diferentes tipos de robôs móveis e aprofundada nos Capítulos 3 e 4, que analisam, respetivamente, as tecnologias de localização e navegação, bem como os modelos para a gestão logística, controlo de tráfego e segurança.

A aplicação prática destes conceitos é demonstrada no Capítulo 5 através de um caso de estudo.

Por último, o Capítulo 6 é reservado à discussão, conclusões e apresentação de propostas para melhorias futuras.

1.6 Considerações finais da introdução

A análise da evolução da robótica móvel revela não apenas um avanço tecnológico, mas uma mudança estrutural na concepção dos sistemas logísticos modernos. A introdução da autonomia, da inteligência artificial e da integração em ecossistemas digitais redefine a logística interna, tornando-a mais adaptável, sustentável e colaborativa.

Assim, o presente trabalho de projeto procura contribuir para uma melhor compreensão dos desafios e oportunidades da gestão de frotas de diferentes tecnologias dos robôs móveis, nomeadamente os AGVs e os AMRs, propondo um enquadramento crítico que apoie a adoção estratégica em ambientes industriais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Evolução da indústria atual

A Indústria 4.0, também designada de quarta revolução industrial, caracteriza-se pela integração intensiva de tecnologias digitais avançadas nos processos produtivos, destacando-se a automação, análise de grandes volumes de dados e interligação máquina-máquina. Esta revolução evolui a partir da Indústria 3.0, centrada na computação e na internet, e distingue-se por conectar máquinas, sistemas e pessoas em redes inteligentes, o que possibilita uma produção mais ágil, flexível e personalizada.

As tecnologias centrais da Indústria 4.0 incluem a Inteligência Artificial, (IoT), computação em nuvem, o *Big Data*, a Robótica e a Realidade Aumentada. Em conjunto, estas tecnologias permitem não apenas a automação de tarefas, mas também a tomada de decisões inteligentes e preditivas, para além de melhorar a eficiência operacional e a produtividade industrial [1].

Por sua vez, a Indústria 5.0 surge como uma evolução que volta a colocar o ser humano no centro do processo produtivo, enfatizando a colaboração próxima entre pessoas e sistemas inteligentes, bem como a sustentabilidade e a resiliência dos processos industriais. Conforme a Comissão Europeia destaca, esta abordagem transcende a eficiência e produtividade para priorizar o bem-estar do trabalhador e assegurar a produção dentro dos limites ambientais do planeta.

Na Indústria 5.0, procura-se a cooperação entre humanos e robôs, combinando a criatividade e capacidade decisória humana com a automação inteligente e precisa dos sistemas. Além disso, a sustentabilidade ganha protagonismo, com ênfase na utilização de fontes renováveis e na redução da pegada de carbono. Técnicas como realidade aumentada, exoesqueletos e sistemas avançados de IA proporcionam uma interação mais eficaz e segura em ambientes colaborativos.

Apesar de ambas as revoluções partilharem o uso de tecnologias avançadas e o foco na digitalização, a diferença fundamental reside no papel do ser humano e na perspectiva estratégica: enquanto a Indústria 4.0 prioriza a automação completa e a eficiência operacional, a Indústria 5.0 destaca a colaboração e o valor humano, junto à produção personalizada e sustentável.

Este novo paradigma também se manifesta na descentralização da produção, aproximando a fabricação dos consumidores e reduzindo tanto o impacto logístico quanto o ambiental. Dessa forma, a transição entre os dois modelos industriais ocorre de maneira gradual, permitindo que as organizações adotem progressivamente características de ambos, fortalecendo simultaneamente a sua competitividade e o seu compromisso com a responsabilidade social e ambiental. [2].

A Figura 1 apresenta a evolução das revoluções industriais desde a indústria 1.0 até que conhecemos hoje indústria 5.0.

2.1.1 Conceito e Principais Tecnologias

Entre as principais tecnologias da Indústria 4.0, destacam-se o IoT, que permite a ligação e comunicação entre equipamentos e sensores; os sistemas ciber-físicos, que integram os mundos físico e virtual; o *Big Data & Analytics*, para processamento massivo e análise em tempo real de dados industriais; a Inteligência Artificial e o Machine Learning, que automatizam a tomada de decisão; a impressão 3D; e a automação robótica avançada. Estes dispositivos e máquinas cooperam autonomamente, criando redes inteligentes que otimizam a cadeia de valor. E na Indústria 5.0 a fábrica é centrada no ser humano, onde a criatividade humana se alia à automação inteligente para criar valor social e económico e ambiental, representando uma transição gradual para sistemas produtivos colaborativos e sustentáveis [3] [4] [5].

Demonstra-se na figura 2 a integração de tecnologias digitais avançadas como IoT, inteligência artificial e automação robótica, um dos marcos da evolução na indústria.



Figura 1 – Demonstração da integração de tecnologias digitais avançadas como IoT, inteligência artificial e automação robótica [6]

2.1.2 Impacto na logística e automação industrial

A introdução dos princípios da Indústria 4.0 teve um impacto profundo na logística e na automação industrial, ao promover cadeias de abastecimento interligadas, flexíveis e altamente automatizadas. Na logística interna de fábricas e armazéns, a combinação do IoT com sistemas ciberfísicos possibilita o rastreamento em tempo real de materiais, além da otimização dinâmica de rotas e gestão de stock [6].

Os robôs móveis comunicam de forma integrada através de redes, proporcionando uma visibilidade total do fluxo de materiais e adaptando-se rapidamente a variações na produção. Processos tradicionalmente isolados tornam-se coordenados e sincronizados: as máquinas indicam automaticamente a necessidade de abastecimento e os veículos móveis asseguram entregas *just-in-time*, evitando paragens de linha e excesso de inventário.

Esta automação avançada permite a implementação de novos modelos logísticos mais eficientes. Por exemplo, frotas de robôs móveis podem ser ativadas conforme a necessidade, ao transportar apenas o necessário no momento exato e minimizando desperdícios na cadeia de abastecimento.

Um exemplo prático da aplicação desses conceitos é a utilização de frotas de AMRs em linhas de montagem, onde a rapidez, flexibilidade e fiabilidade das entregas são cruciais [7].

2.2 Robótica Móvel

A robótica móvel refere-se à capacidade de se movimentar autonomamente num ambiente para efetuar tarefas de transporte e manipulação de materiais. Com o aumento da diversidade de produtos e a crescente pressão por eficiência, as indústrias têm recorrido a estas tecnologias para otimizar os fluxos internos e reduzir os custos operacionais.

Os robôs móveis utilizados na indústria são normalmente classificados em dois grupos principais: os AGVs e os AMRs substituindo métodos tradicionais como empilhadores manuais ou transportadores fixos [8].

A adoção da robótica móvel permite aumentar a produção e a eficiência ao garantir entregas rápidas e precisas dos materiais nos locais necessários, minimizando tempos de espera nas linhas de montagem e otimizando a utilização da mão de obra.

Por definição, um AGV (Veículo Autonomamente Guiado) este segue percursos predefinidos para realizar o transporte interno de materiais. Estes percursos são geralmente definidos por guias físicas ou sinais dedicados, como faixas magnéticas, trilhos ou refletores laser, e tem uma programação fixa para seguir rotas.

Por outro lado, um AMR (Veículo Móvel Autónomo) consegue efetuar a navegação de forma autónoma sem caminhos fixos, é capaz de tomar decisões de rota em tempo real.

2.3 História e Evolução dos AGVs

Nesta seção, apresenta-se a evolução desta tecnologia, desde a primeira geração (décadas de 1950–2000), até aos mais recentes.

2.3.1 Primeiras Gerações

A história dos AGVs começa em 1950, graças ao trabalho da empresa Barret Electronics, em Northbrook, Illinois. O sistema que desenvolveram consistia simplesmente num reboque que seguia um fio como caminho, em vez de um carril. Posteriormente, foram criados outros tipos de AGVs mais revolucionários, capazes de seguir marcações UV no chão. Este sistema foi implementado pela primeira vez na Willis Tower em Chicago, Illinois, como forma de entregar o correio em todos os seus escritórios.

Um marco significativo ocorreu em 1975 com o lançamento do primeiro AGV de carga unitária totalmente integrado a um sistema computacional central com tecnologia distinta dos reboques anteriores, este veículo podia receber instruções diretamente de um computador de supervisão, ampliando suas capacidades: tornou-se capaz de executar múltiplas tarefas e seguir rotas diversas conforme os comandos recebidos, algo totalmente inovador para a época.

Na prática, isso permitiu instalar frotas de AGVs coordenados por um controlo central, abrindo caminho para sistemas flexíveis de transporte em fábrica.

Ao longo das décadas de 1970 e 1980, a tecnologia de guiamento dos AGVs foi refinada. Em 1979, introduziu-se o uso de fita magnética no piso como guia para os AGVs, substituindo os fios elétricos. A fita magnética facilitava a instalação e manutenção das rotas (bastava colar/repintar a fita no chão para alterar os caminhos) e melhorou a precisão de navegação. No entanto, ainda limitava a flexibilidade, qualquer alteração de *layout* requeria remapear fisicamente a fita, e os AGVs continuavam presos a rotas fixas.

No final de 1980, surgiu uma inovação crucial: os AGVs guiados por laser. Em 1989, pela primeira vez, um AGV pôde navegar sem fios ou faixas físicas, usando um sistema de navegação laser e refletores posicionados no ambiente. O veículo emitia sinais laser, detetava a reflexão em prismas instalados em paredes/pilares e triangulava a sua própria posição, seguindo rotas definidas virtualmente no *software*. Esta técnica aumentou bastante a flexibilidade e precisão, uma vez que alterar a rota passou a ser uma questão de reprogramação, ao invés de uma intervenção física, embora a instalação de refletores ainda exigisse algum esforço. De todo modo, a tecnologia laser consolidou-se na década de 1990 e permitiu que AGVs passassem a atuar em ambientes mais complexos (com múltiplas rotas convergentes, por exemplo) mantendo erros de posicionamento na ordem de milímetros.

Nos dias de hoje os AGVs são guiados por laser, denominados por LGV (Laser Guided Vehicle). Estes são integrados num processo automatizado e são programados para comunicarem com outros robôs, bem como outros componentes da instalação, por forma a que o produto seja transferido através do armazém.

Atualmente, um AGV desempenha um papel muito importante na conceção de novas fábricas e armazéns, ao transportar mercadorias de forma rápida e segura para o seu destino [14].

2.3.2 Integração de Sistemas

A partir dos anos 2000, os AGVs passaram a integrar controladores computadorizados e sistemas de comunicação entre máquinas. Tal integração tornou possível que os AGVs comunicassem em tempo real com sistemas de gestão industrial, como ERP e MES, recebendo instruções de transporte, otimizando rotas e ciclos de carga, e permitindo uma operação mais eficiente em fábricas inteligentes [12].

Relativamente à sensorização, os AGVs começaram a incorporar *scanners* de laser para segurança, sensores ultrassónicos, câmaras e outros dispositivos de proximidade. Esta combinação sensorial permite detetar diferentes obstáculos, proporcionando uma perceção de 360° e garantindo operações seguras em espaços partilhados entre robôs e trabalhadores. Surgiram também sistemas híbridos de navegação que utilizam laser, odometria, giroscópios e marcadores QR, bem como soluções de localização *indoor*, como RFID para aumentar a precisão de posicionamento e facilitar a gestão de tráfego.

A capacidade de carga dos AGVs tornou-se cada vez mais diversificada, incluindo modelos para cargas pesadas, como chassis automóveis e bobinas de aço, e veículos híbridos que podem funcionar de forma autónoma ou manual, conforme a necessidade operacional [15].

2.3.3 Os robôs móveis - AMRs

A necessidade crescente da automação flexível, surgiu uma nova geração de robôs móveis industriais, com diferentes tecnologias quando comparados com robôs móveis tradicionais, estes utilizam diferentes sensores que permitem efetuar a localização e o mapeamento em simultâneo em tempo real, sem necessidade de guias ou infraestruturas físicas fixas para a navegação, além disso os sensores utilizados tais como os LiDAR 3D, câmaras 2D ou 3D, permitem que estes se adaptem

automaticamente as alterações do ambiente, reajustando as rotas sempre que seja necessário, por exemplo em situações de obstáculos ou congestionamento.

Um marco relevante foi o lançamento do Proteus pela Amazon em 2022, o primeiro AMR totalmente autónomo capaz de funcionar 24 horas em ambientes partilhados com pessoas [16].

Outro passo importante tem sido a integração de inteligência artificial e aprendizagem profunda na gestão e distribuição de tarefas em frotas de AMRs, usando algoritmos que permitem otimizar o planeamento e evitar congestionamentos em tempo real.

Em síntese, os AMRs representam neste momento o auge da evolução da robótica móvel industrial, aliando segurança, integração fácil e elevada adaptabilidade. Hoje, assumem um papel central na Intra logística moderna, sendo cada vez mais adotados em armazéns e fábricas focados em automação flexível e inteligente [17].

2.4 Arquitetura de controlo

A arquitetura de controlo é composta pelo conjunto estruturado de hardware e software que permite aos veículos perceberem o ambiente e executarem tarefas. A principal distinção entre este sistema reside na distribuição da inteligência e na capacidade de processamento a bordo.

No caso dos AGVs a arquitetura é centralizada, a "inteligência" reside maioritariamente num servidor externo. O veículo possui controladores a bordo (frequentemente PLCs) focados na execução de ordens diretas: seguir um sinal analógico (fio, fita magnética) e atuar sobre os motores. A tomada de decisão sobre rotas e gestão de tráfego é processada externamente pelo sistema central, tornando o veículo num agente reativo com dependência crítica da comunicação constante.

Na tecnologia mais recente AMR a arquitetura é descentralizada com processamento a bordo, os sistemas estão equipados com unidades de processamento de alto desempenho estes robôs correm localmente algoritmos complexos de navegação (como SLAM) e inteligência artificial. O AMR não recebe comandos de movimento, mas sim "missões". O cálculo da trajetória, o desvio de obstáculos e a interpretação sensorial são processados pelo próprio robô em tempo real [18].

A Figura 2 ilustra o impacto prático destas duas arquiteturas. Enquanto o AGV está confinado à infraestrutura física devido ao seu controlo reativo linear, o AMR utiliza a sua autonomia de processamento para criar rotas alternativas dinâmicas, contornando obstáculos sem necessitar de reprogramação ou intervenção do sistema central.

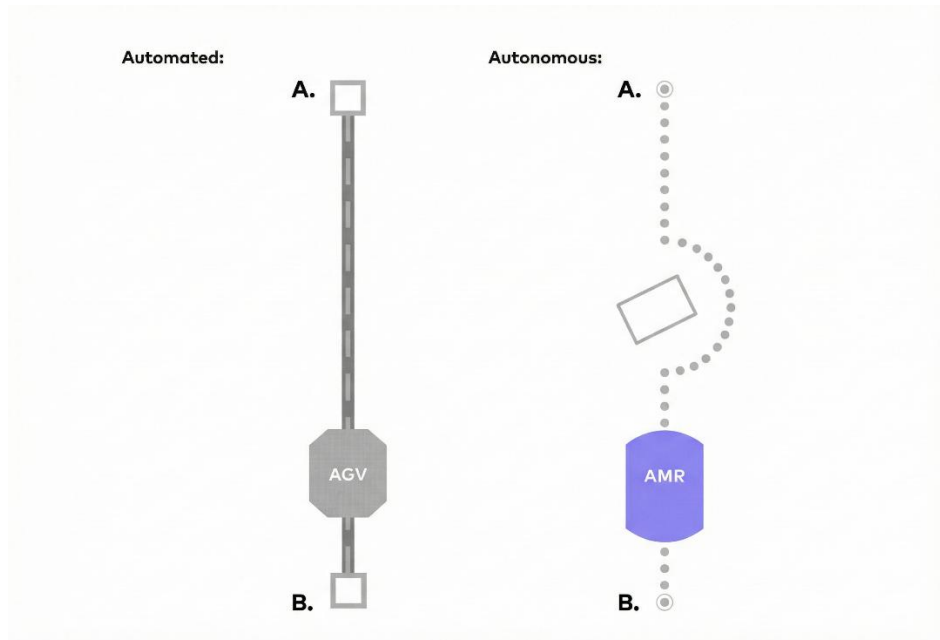


Figura 2 - Diferença de trajeto de AGV e de um AMR

2.4.1 Comparação entre AGVs e AMRs

Na tabela 1 apresenta uma comparação entre as diferentes tecnologias destacando o nível da navegação, flexibilidade e custo inicial.

Tabela 1- Comparação AGVs e AMRs

| Característica | AGV | AMR |
|-----------------------|---|--------------------------------------|
| Navegação | Segue caminhos fixos (fita, fio, QR) | Navegação inteligente e dinâmica |
| Flexibilidade | Baixa; mudanças de layout exigem reconfiguração | Alta; adapta-se a mudanças de layout |
| Custo inicial | Geralmente menor | Maior devido a sensores e software |

| | | |
|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Capacidade de evitar obstáculos | Limitada | Alta; deteta e contorna obstáculos |
| Ideal para | Rotas fixas, produção repetitiva | Ambientes dinâmicos, mutáveis |

2.4.2 Estrutura Física e Funcional

A carcaça é a estrutura principal do veículo, normalmente construída em aço ou alumínio, proporcionando resistência e rigidez. Serve de base para todos os outros elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos do AGV, além de garantir estabilidade e proteção dos componentes internos, tais como as baterias que alimentam o sistema. Geralmente são baterias industriais de 24 ou 48 volts em corrente contínua (DC), podendo ser de chumbo-ácido, lítio ou outros tipos. O seu posicionamento na estrutura é desenhado para baixar o centro de gravidade e equilibrar o veículo. A unidade de carregamento é responsável por recarregar as baterias quando necessário, como podemos visualizar na figura 3. O processo de recarga pode ser manual (ligação do AGV às estações de carga) ou automático, através do acoplamento a pontos de carga sem fios ou sistemas de troca rápida de baterias.



Figura 3 - Placas de cobre para carregamento de AGV's

A unidade de acionamento elétrico é constituída por motores, atuadores e sistemas de transmissão. Controla as rodas motrizes e permite o movimento e a realização de manobras, podendo ainda integrar redutores para adaptação do binário. **O sistema de direção poderá ter** três configurações distintas: o controlo

diferencial, com duas rodas motrizes que se deslocam a diferentes velocidades para direcionar o veículo.

Sistema de direção: Onde a tração e a direção são asseguradas por uma única roda frontal, enquanto as rodas traseiras fixas garantem a estabilidade.

Sistemas Omnidirecionais: Unidades de tração independentes em eixos diagonais que conferem ao veículo três graus de liberdade. Isto permite movimentos laterais, diagonais e rotações sobre o próprio eixo.

Sistema de Travões: O sistema combina a travagem de serviço (controlada por software para posicionamento preciso nas estações) com a travagem de emergência (acionada automaticamente pelos sistemas de segurança). Utiliza-se travões eletromagnéticos que conseguem travar na ausência de energia.

Controlador de Bordo: Este microprocessador ou PLC industrial processa os algoritmos de navegação, gere as entradas/saídas (I/O) dos sensores e atua sobre os motores.

Unidade de Comunicação: Facilita o envio e recepção de comandos para o controlador central, permitindo tanto a execução de tarefas automáticas como a integração em sistemas de gestão e a comunicação entre múltiplos AGVs numa mesma instalação.

Sistema de Segurança: A segurança dos AGVs é primordial para a otimização de processos em ambientes industriais, garantindo a eficiência operacional e a proteção no local de trabalho. Através da incorporação de tecnologias avançadas, os AGVs conseguem operar de forma segura e eficaz, reduzindo os riscos associados à sua movimentação em espaços partilhados com trabalhadores e outras máquinas.[19].

Exemplo do tipo de especificações de um AGV ASTI-Easybot

O AGV do tipo reboque, com sistema de atraque automático através de um pistão cilíndrico com dimensões 1681x273x600 mm visível na figura 4.

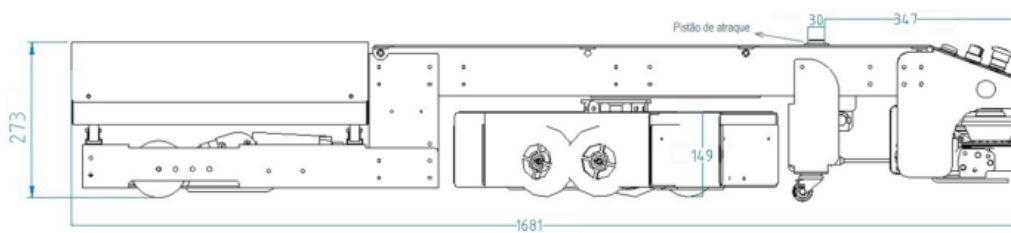


Figura 4 - Dimensões [mm] críticas do AGV ASTI – EasyBot

Tabela 2- Características gerais AGV ASTI – Easybot

| Características gerais |
|--|
| Tracção pura de 350 N; |
| Raio de curvatura de 700 mm; |
| Velocidade de 0,1 m/s a 0,83 m/s (aproximadamente 6 m/min a 50 m/min); |
| Movimento unidirecional automático ou bidirecional manual; |
| Sistema de controlo com arquitetura PLC. |



Figura 5 - AGV ASTI - EasyBot

2.5 Tipologia

Os AGVs e os AMRs podem ser categorizados de acordo com o seu princípio de funcionamento, nomeadamente:

Reboque: A estrutura não permite o transporte direto de cargas, mas que podem funcionar como reboques, rebocando atrelados carregados com componentes/produtos. Tipicamente, são utilizados quando é necessário mover cargas de elevada massa. Na figura 6 apresenta-se um exemplo em ambiente industrial.



Figura 6 - AMR Reboque

Porta Paletes: Este tipo de AGV é utilizado para transportar carga em paletes ao nível do solo. Quando o veículo é automaticamente carregado, este sai da guia e acopla-se à paleta.

No modo manual, um operador é responsável por guiar o veículo até à paleta e fazer a acoplagem. Depois terá de libertar o veículo que seguirá viagem. A principal razão pela qual o modo manual de descarregamento e carregamento continua a ser o mais utilizado é porque o carregamento automático exige maior complexidade do equipamento, devido à precisão necessária para realizar a manobra de acoplagem às paletes. Além disso, no modo manual é possível retirar os veículos para qualquer área fora das guias, o que dá ao colaborador a flexibilidade de alocar as cargas em qualquer parte do armazém.

A Figura 7 ilustra AMR porta-paletes do tipo *floor-to-floor*, adequado ao transporte ao nível do solo, enquanto a Figura 8 apresenta um modelo elevatório, capaz de elevar paletes para diferentes alturas.



Figura 7 - AMR floor-to-floor



Figura 8 - AMR para operações de grande altura

Veículos de carga leve e veículos de transporte modular: veículos direcionados para o transporte de uma vasta gama de cargas mais leves, ou seja, veículos de pequenas dimensões, baixo custo e alta manobrabilidade. Já os veículos de transporte modular, consistem em veículos de reboque de pequenas proporções, aos quais são atrelados *trolleys*, cestos, bandejas e outras cargas.

Como ilustrado na Figura 9, um exemplo típico de AGV e um AMR respetivamente de carga leve que apresenta pequenas dimensões e elevada agilidade.



Figura 9 - AGV AMR respetivamente de carga leve

Veículos “garfo”: semelhantes aos tradicionais empilhadores, sendo estes veículos indicados para situações em que os pontos de carga e descarga apresentam alturas variáveis.

Na Figura 10 apresenta-se um exemplo de um robô com “garfo”, demonstra a sua capacidade de elevação e posicionamento de cargas em diferentes níveis de armazenamento.



Figura 10 – Robo Móvel do tipo “Garfo”

Flat bed Veículo: Estes são os tipos de AGVs que são mais encontrados na indústria, devido à sua capacidade de transportar grandes cargas.

A superfície destes veículos pode ser customizada como *conveyors* elétricos, elevadores e mecanismos vaivém de acordo com as necessidades do transporte a efetuar, daí ser facilmente aceite na indústria.

Na Figura 11 apresenta-se um AMR de plataforma plana em ambiente industrial, com design versátil e soluções de transporte automatizado para cargas de grandes dimensões.



Figura 11 – AMR Flat bed

2.6 Vantagens e Desvantagens

Na indústria, os AGVs são atualmente equipamentos imprescindíveis em aplicações que compreendem a movimentação, manipulação e carregamento de material. O uso de AGVs na indústria apresenta, entre outras, as seguintes vantagens:

Redução de custos operacionais: Os AGVs permitem a movimentação automatizada de materiais sem necessidade de operadores permanentes, diminuindo custos de mão de obra e aumentando a disponibilidade operacional.

Operação contínua (24/7): Como sistemas não tripulados, podem funcionar de forma ininterrupta, com paragens apenas para manutenção ou carregamento. Isto assegura um fluxo constante de materiais e reduz os tempos de inatividade.

Maior segurança: Graças à utilização de sensores, câmaras e *scanners* laser, os AGVs conseguem detetar obstáculos e pessoas, ao conseguir parar automaticamente para evitar colisões. Esta característica diminui significativamente acidentes e danos causados pelo transporte manual.

Precisão e rastreabilidade: O posicionamento controlado eletronicamente permite alta precisão nas entregas e recolhas, além de fornecer registos completos dos movimentos realizados, facilitando a rastreabilidade e o controlo dos processos.

Flexibilidade e integração: A instalação de AGVs requer poucas modificações nas infraestruturas existentes, sendo relativamente simples adaptá-los a diferentes *layouts* de fábrica ou integrar com sistemas de gestão[20], [21].

Estabilidade de produção: Ao reduzir erros humanos e garantir o fluxo constante de materiais, contribuem para a previsibilidade e estabilidade das linhas de produção.

No entanto, podem apresentar as seguintes desvantagens:

Investimento inicial elevado: A aquisição e implementação de um sistema AGV exige custos consideráveis, principalmente se forem necessárias adaptações ao *layout* ou integração com *softwares* existentes.

Manutenção e suporte contínuo: Os AGVs necessitam de manutenção regular e atualizações de *software* para garantir fiabilidade e compatibilidade com novos equipamentos.

Menor versatilidade face a operadores humanos: São ideais para tarefas repetitivas e rotas fixas, mas menos eficientes em situações imprevistas que exigem julgamento humano ou flexibilidade.

Limitações ambientais: O desempenho pode ser menos eficiente em ambientes exteriores ou irregulares, onde o piso, a iluminação ou as condições meteorológicas interferem nos sensores.

Dependência tecnológica: Falhas de comunicação, desgaste de sensores ou erros de *software* podem interromper toda a operação, exigindo intervenção especializada[22].

2.7 Aplicações de AGVs

Os AGVs têm uma ampla gama de aplicações em diversos setores industriais e não industriais. A implementação destes veículos traz significativas melhorias em termos de eficiência, segurança e custos operacionais. Este tópico explorará as principais áreas onde os AGVs são utilizados, destacando as suas contribuições e benefícios específicos [20].

Conforme demonstrado na Figura 12, os AGVs encontram-se de forma mais predominante em ambientes industriais, agrícolas, áreas portuárias. O gráfico circular evidencia a distribuição percentual dos principais locais de utilização destes sistemas, facilitando a compreensão do impacto transversal da tecnologia.



Figura 12 – Percentagem referente ao local de aplicação dos AGVs [20]

2.7.1 Indústria

A indústria é um dos setores líderes na adoção dos AGVs e AMRs, devido à necessidade crescente de automatização e eficiência nos processos produtivos.

Transporte de materiais: Este transporte automatizado reduz o esforço físico, o risco de acidentes e aumenta a eficiência de todo o fluxo de trabalho.

Automatização de linhas de produção: Em fábricas altamente automatizadas, os AGVs são integrados nas linhas produtivas para fornecer componentes em tempo real, sincronizando o abastecimento com o ritmo de produção. Esta sincronização é crítica em setores como o automóvel, onde a precisão e pontualidade são essenciais para evitar paragens de linha.

Armazenamento e logística interna: Em armazéns automatizados, os robôs moveis são utilizados para armazenar, recuperar e transportar artigos. Operam eficazmente em corredores estreitos, maximizam o aproveitamento do espaço e simplificam a gestão de inventários, melhora os processos de armazenamento e expedição.

Setor alimentar e de bebidas: Nestes setores, os robôs moveis transportam produtos sensíveis ou perecíveis, garantindo rapidez, redução da manipulação humana e menor risco de contaminação, o que favorece a higiene e a qualidade do produto final[23].

2.7.2 Setor Automóvel: Desafios e Oportunidades

O setor automóvel é caracterizado por elevada exigência tecnológica, rigor nos processos produtivos e forte pressão sobre custos. A adoção de AGVs e AMRs representa uma aposta estratégica para otimizar operações logísticas, aumentar a eficiência e responder à necessidade de automação. No entanto, esta implementação traz desafios específicos e abre novas oportunidades.

2.7.2.1 Desafios no Setor Automóvel

Complexidade da Produção: A produção automóvel envolve uma grande quantidade de componentes que devem ser coordenados para garantir a montagem eficiente dos veículos. Esta complexidade requer um planeamento rigoroso e uma integração eficaz dos robôs moveis com os sistemas de produção já existentes, como as linhas de montagem e os robôs industriais.

Sincronização e Integração: A sincronização dos robôs moveis com os sistemas da fábrica (como ERP e gestão de inventário) é essencial para evitar interrupções na linha de produção. Quanto maior a dimensão da fábrica e o número de robôs moveis em funcionamento, maior a necessidade de coordenação.

Desafio Técnico: A integração com sistemas *just-in-time*, onde as peças devem chegar à estação de montagem no momento exato, exige elevada precisão. Qualquer atraso ou falha na movimentação de um AGV pode provocar paragens na produção, com custos elevados.

Custo Inicial de Implementação: A instalação de AGVs implica um investimento inicial elevado, incluindo a compra dos veículos, a criação de rotas, sistemas de carregamento e controlo centralizado. Embora os benefícios sejam evidentes a longo prazo, o custo inicial pode ser um obstáculo em fábricas que operam com margens de lucro mais reduzidas.

2.7.2.2 Oportunidades no Setor Automóvel

Automação de Tarefas Repetitivas: Os AGVs automatizam tarefas repetitivas, como o transporte de peças e materiais entre as secções da fábrica. Isto liberta os trabalhadores para tarefas mais qualificadas e melhora as condições ergonómicas, reduzindo o risco de lesões.

Aumento da Eficiência Operacional: Os AGVs operam de forma contínua, sem necessidade de pausas, o que permite que a produção decorra ininterruptamente. Este fator é particularmente importante em fábricas com produção contínua ou em vários turnos.

Melhoria de Processos: A utilização de AGVs permite melhorar o fluxo logístico interno, garantindo a entrega de peças no momento certo, aumentando a velocidade da montagem e reduzindo os tempos de espera.

Flexibilidade: Ao contrário de sistemas fixos de transporte (como tapetes rolantes), os AGVs oferecem uma maior flexibilidade. Podem ser reprogramados para seguir novas rotas ou realizar diferentes tarefas conforme necessário. Esta flexibilidade é essencial num setor como o automóvel, onde a produção pode ser ajustada rapidamente em resposta às necessidades do mercado[24].

2.7.2.3 Papel dos AGVs nas Cadeias de Produção

Os AGVs asseguram o abastecimento contínuo das linhas de montagem, transportando peças entre armazéns, estações intermédias e zonas produtivas, seguindo rotas programadas. Encontram-se em comunicação permanente com os sistemas de gestão da produção, garantindo entregas pontuais e evitando paragens desnecessárias[24].

2.7.2.4 Benefícios Operacionais

Otimização do Fluxo de Materiais: A integração de AGVs permite otimizar o fluxo de materiais dentro da fábrica. Com a sua gestão centralizada, os AGVs movimentam os componentes de forma coordenada, minimizando tempos de inatividade e garantindo um abastecimento contínuo das linhas de montagem.

Redução de Custos Operacionais: Ao diminuir a dependência de operadores humanos para o transporte de materiais, os AGVs reduzem os custos associados à movimentação interna. A sua precisão também reduz o risco de danos nos componentes, minimizando os custos de retrabalho e de desperdício.

Custo-Benefício: Embora o investimento inicial em AGVs seja elevado, os ganhos em produtividade e a redução de erros tornam-se vantajosos ao longo do tempo[24].

2.7.2.5 Desafios na Integração de AGVs

Infraestrutura e Espaço: É necessário criar rotas e estações de carregamento, adaptar o layout da fábrica e garantir suficiente espaço para circulação sem interferências.

Coordenação com outros sistemas: A integração com outros equipamentos, como robôs industriais, exige comunicação fluida, prevenindo colisões e otimizando as operações através de sistemas de controlo centralizado.

2.8 Estado da Arte dos AGVs

O estado da arte dos AGVs abrange as tecnologias mais avançadas e as tendências emergentes que estão a moldar o futuro da automação industrial e logística. Este tópico explora as inovações recentes e as direções futuras para os AGVs, destacando as tecnologias emergentes e as tendências do momento.

3 SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO, MOVIMENTAÇÃO E AUTONOMIA ENERGÉTICA

3.1 Movimentação

Para diferentes tipos de aplicação há diferentes tipos de movimentação possíveis, tais como:

- **Unidirecional** – uma roda dianteira de tração/direção que roda sobre si mesma e um eixo traseiro fixo.
- **Bidirecional** – duas rodas de tração/direção e duas rodas livres que permitem ao AGV deslocar-se em ambos os sentidos.
- **Omnidirecional** – permite a movimentação em todas as direções, graças a um conjunto de rodas que giram de forma independente umas das outras.

A escolha do tipo de movimentação depende de fatores como o raio de viragem necessário, o tipo de carga a transportar, as dimensões do percurso e o espaço disponível. De forma geral sistemas omnidirecionais e multidirecionais oferecem maior flexibilidade operacional, enquanto soluções unidirecionais e bidirecionais tendem a ser mais económicas e de manutenção mais simples.

3.2 Tecnologias de Localização

A localização de robôs móveis é um tema já extensamente explorado e com uma base de conhecimento já alargada. Desta forma, é normal que existam inúmeras soluções que diferem principalmente na área da tecnologia e da aplicabilidade.

A escolha da aplicação a instalar deve ter em conta a precisão da localização, as condições do local da instalação, os custos finais e a flexibilidade requerida pelo problema.

Existem diversos métodos de localização que permitem seguir um caminho fixo ou dinâmico.

Cada AGV pode utilizar diferentes sistemas de localização que, por sua vez, apresentam características distintas. Estes sistemas podem incluir tecnologias como tags RFID, Laser, GPS e SLAM.

3.2.1 RFID

Localização por tags RFID: é uma tecnologia que utiliza tags RFID para determinar a posição do AGV. Estas tags são colocadas em pontos estratégicos no chão ou nas paredes e emitem sinais de radiofrequência que são captados pelo AGV, permitindo que este determine a sua posição exata[28].

A Figura 13 demonstra o aspeto físico dos tags RFID.



Figura 13 – Tags RFID

3.2.2 Laser

Localização por Laser: é caracterizada pelo uso de um *scanner* laser que, ao longo do trajeto, procura alvos refletores posicionados estrategicamente, conforme se representa na Figura 14.

Obtidas e processadas as distâncias e ângulos relativos aos alvos, o AGV consegue triangular a sua posição. Contudo, esta tecnologia não é caracterizada pela sua precisão, necessitando de um sistema auxiliar para dupla validação [28].



Figura 14 – Robô móvel com tecnologia de localização a laser

3.2.3 GPS

Os sistemas de localização por GPS recorrem a sinais de satélite para determinar, de forma contínua, a posição e a velocidade do veículo no espaço. Através da triangulação de dados provenientes de, pelo menos, quatro satélites, é possível calcular as coordenadas tridimensionais (latitude, longitude e altitude) do AGV, conforme representado na Figura 15.

Esta tecnologia apresenta-se como uma alternativa viável e flexível para aplicações em que as rotas são dinâmicas ou o ambiente operacional é extenso, como em terminais logísticos, portos ou áreas exteriores de armazéns. No entanto, a sua utilização em interiores é limitada, dado que as estruturas físicas dos edifícios tendem a atenuar ou bloquear o sinal de satélite, provocando perdas de precisão e interrupções na navegação. Por este motivo, em ambientes fechados, o GPS é frequentemente complementado por outros sistemas de posicionamento, como sensores inerciais, marcadores visuais ou tecnologia laser.

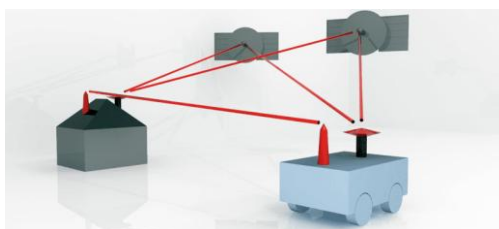


Figura 15 – Robô móvel com tecnologia de localização GPS

3.2.4 SLAM

Localização por SLAM: representado na Figura 16, é uma técnica que permite ao AGV criar um mapa do meio envolvente em simultâneo com a sua própria localização. Ou seja, enquanto o veículo se move pelo ambiente, usa sensores para fazer uma estimativa da própria posição e utiliza essa informação para construir um mapa do meio envolvente. Este processo é iterativo, e à medida que o veículo se move e recolhe mais informação, melhora a sua estimativa da posição e do mapa do ambiente.

O SLAM é geralmente utilizado em ambientes desconhecidos, onde o veículo não tem um mapa pré-existente para se orientar [28].

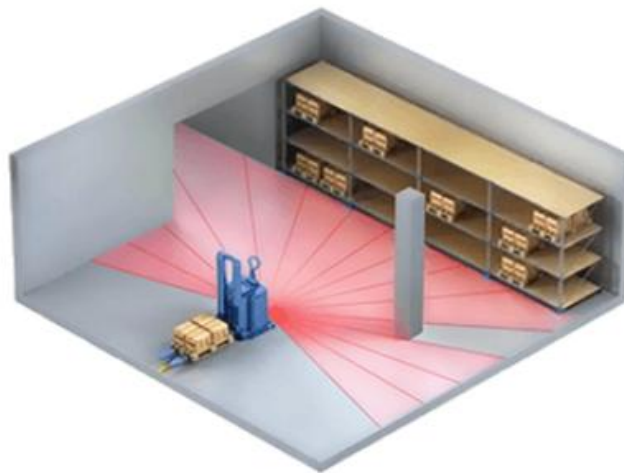


Figura 16 – AMR com tecnologia de localização SLAM

3.2.5 Filoguiado

Filoguiado é uma solução robusta, simples, mas com pouca flexibilidade.

Neste método, um fio elétrico embutido no pavimento gera um campo eletromagnético que é detetado pelos sensores do veículo, conforme representado na Figura 21, permitindo-lhe seguir trajetos predefinidos com elevada precisão e fiabilidade, ideal para linhas de produção com rotas fixas. É bastante utilizado pela simplicidade, precisão e robustez. No entanto, é muito pouco flexível, os trajetos que o AGV pode realizar estão restritos à introdução de fio elétrico. Mudanças de *layout* levariam a uma substituição do fio elétrico introduzido no solo[28].

3.2.6 Fita magnética

A navegação magnética baseia-se na deteção de um campo magnético gerado por uma fita magnética (representada na Figura 17) instalada sobre a superfície do pavimento. Esta fita contém material ferromagnético que é detetado por sensores localizados na parte inferior do AGV, permitindo ao sistema de controlo seguir com precisão o percurso definido.

Trata-se de uma solução mais flexível e económica do que os sistemas filoguiados, uma vez que tanto a instalação como a modificação dos percursos se limitam à colocação e remoção das fitas magnéticas. Este processo é consideravelmente mais rápido, simples e de menor custo quando comparado com a instalação de fios condutores embutidos no pavimento.

No entanto, como as fitas estão aplicadas à superfície, encontram-se mais expostas à degradação física provocada pela passagem de veículos, à sujidade e a variações ambientais. Estes fatores podem reduzir a intensidade do campo magnético e comprometer a deteção pelos sensores, tornando o sistema de localização menos fiável ao longo do tempo.

Apesar dessas limitações, a tecnologia de localização magnética continua a ser amplamente utilizada em ambientes industriais onde os percursos são estáveis, mas requerem alguma flexibilidade de reconfiguração [29].



Figura 17 – Fita-magnética

3.3 Comparação das Tecnologias de Localização

Tabela 3: Comparação das Tecnologias de Localização de AGV

| Tecnologia | Custo | Aplicabilidade | Facilidade de Integração | Circunstâncias Ideais |
|-----------------------|---|---|--|---|
| RFID | Baixo a médio. Tags com custo acessível, mas infraestrutura dispendiosa | Indoor: Excelente Outdoor: Limitada | Fácil de integrar com sistemas logísticos e de inventário. | Ambientes indoor controlados, como armazéns. |
| Laser | Alto. Elevado custo de aquisição e manutenção | Indoor: Excelente Outdoor: Limitada | Boa integração, mas requer cuidado para evitar falhas. | Ambientes indoor com alta precisão e complexidade. |
| GPS | Baixo. Custo acessível, especialmente para áreas grandes | Indoor: Limitada Outdoor: Excelente | Fácil integração com sistemas de mapeamento e monitorização. | Operações outdoor em áreas amplas e abertas. |
| SLAM | Alto. Requer hardware | Indoor: Excelente Outdoor: Funcional | Integração mais complexa | Ambientes dinâmicos e em constante mudança. |
| Filoguiado | Baixo. Instalação de fios é barata, mas limitada em flexibilidade. | Indoor: Excelente Outdoor: Ineficaz | Integração simples, mas a flexibilidade é restrita. | Ambientes industriais fixos e bem definidos. |
| Fita Magnética | Baixo. Instalação de fios é barata, mas limitada em flexibilidade. | Indoor: Excelente Outdoor: Ineficaz | Fácil de integrar, mas limitada a trajetos fixos. | Ambientes indoor com rotas fixas e layout bem definido. |

3.4 Rotas dos AGVs

Existem diferentes tipos de rotas que podem ser percorridas por um AGV, cuja definição depende das operações planeadas, das características do espaço físico e das necessidades de localização. A seleção do tipo de rota exerce influência direta na escolha do AGV mais indicado para a execução das tarefas a implementar. As configurações descritas de seguida correspondem às mais frequentemente encontradas em contexto industrial. Contudo, importa salientar que a flexibilidade é uma das principais vantagens associadas aos AGV, o que possibilita a adaptação ou a criação de novas configurações para responder a exigências específicas.

Linha única / Ida e volta: Esta configuração revela-se a mais elementar, uma vez que o deslocamento do AGV ocorre numa trajetória linear, permitindo movimentos para a frente e para trás. Dada a sua simplicidade, apenas um AGV pode operar por linha em simultâneo.

Circuito duplo: Consiste na disposição de duas linhas paralelas, o que possibilita a circulação de múltiplos AGV em ambos os sentidos de tráfego.

Múltiplos loops: Nesta configuração, o trajeto é composto por vários *loops* interligados, viabilizando bifurcações e a ligação a diversas estações. Tal complexidade requer sistemas de controlo de tráfego mais avançados, mas potencia significativamente a flexibilidade operacional e a otimização das rotas.

A gestão do tráfego apresenta um nível de simplicidade superior nos sistemas em que apenas um AGV percorre cada rota. No entanto, quando existe circulação de vários AGV, questões como interferências e colisões requerem estratégias adicionais para serem evitadas. Para tal, é comum a criação de zonas de exclusividade, destinadas a impedir colisões, bem como a implementação de ramais estratégicos no layout das instalações de forma a resolver eventuais conflitos de percurso.

3.5 Soluções de Carregamento e Gestão de Energia (antes da programação)

Gerir a energia e os ciclos de carregamento da frota de AGVs é fundamental para garantir a continuidade das operações e evitar paragens inesperadas por falta de bateria. Os sistemas de gestão monitorizam, em tempo real, o estado de carga das baterias de cada veículo e podem agendar carregamentos de forma inteligente, consoante as necessidades operacionais. Uma prática comum é o carregamento de oportunidade, em que os AGVs aproveitam períodos de paragem ou intervalos durante as operações para recarregar parcialmente as suas baterias. Por exemplo, se um AGV estiver à espera de uma nova tarefa ou parado num semáforo virtual, poderá posicionar-se numa estação de carregamento próxima e recuperar energia enquanto aguarda. Quando bem implementado, este carregamento intercalado não compromete o tempo operacional do veículo, tira partido de momentos

naturalmente inativos. Conseqüentemente, o número de veículos necessários na frota mantém-se praticamente inalterado, dado que os AGVs carregam sem afetar a produtividade. Para maximizar os benefícios do carregamento de oportunidade, muitas frotas recorrem a baterias de íões de lítio, que toleram bem cargas parciais frequentes, sem efeitos de memória ou degradação significativa[30].

3.5.1 Substituição Manual

Este método requer a intervenção de um operador para substituir a bateria descarregada por uma totalmente carregada, o que demora, em média, entre 5 a 10 minutos. A autonomia da bateria varia, mas normalmente situa-se em cerca de 10 horas, sendo por isso adequada para sistemas com até 3 AGVs e para operações que envolvem apenas um turno.

3.5.2 Substituição Automática

Este método envolve o uso de uma estação de troca automática de baterias. Embora o processo seja semelhante ao da substituição manual, o tempo de troca é, geralmente, inferior. Esta solução é ideal para sistemas mais complexos e é projetada para funcionar ininterruptamente, 24 horas por dia.

3.5.3 Carregamento de Oportunidade

Como o nome sugere, este método aproveita os períodos em que o AGV está inativo durante o ciclo de operação para recarregar a bateria. É particularmente eficaz em sistemas em que os AGVs realizam múltiplas paragens curtas e previsíveis. Em cada local de paragem, é necessária uma interface que permita a ligação entre o AGV e o carregador. A vantagem deste método é que não exige a adição de mais AGVs, uma vez que o tempo de carregamento coincide com os períodos de inatividade. Além disso, este método contribui para aumentar a longevidade das baterias, considerando-se que uma bateria é inadequada quando a capacidade de carga desce para menos de 80% da capacidade inicial.

3.5.4 Carregamento Automático

Este método baseia-se no princípio de que o AGV executa as suas funções até que a bateria atinja um nível de carga predeterminado. Quando este ponto é alcançado, o AGV dirige-se automaticamente para uma estação de carregamento, onde

permanece até que a bateria seja recarregada a níveis adequados para continuar a operação.

3.5.5 Carregamento Rápido

O carregamento rápido, também conhecido como *fast charging*, consiste no carregamento rápido e frequente das baterias, eliminando a necessidade de múltiplas baterias por veículo em sistemas com vários turnos. Este método é semelhante ao carregamento automático, mas a velocidade de carregamento é entre 3 a 4 vezes superior à do método convencional. No entanto, as baterias submetidas a este tipo de carregamento têm uma vida útil de aproximadamente 3 anos, comparada com os 5 anos das baterias carregadas de forma convencional.

3.5.6 Carregamento Indutivo

O carregamento indutivo ocorre entre dois circuitos, atingindo a sua maior eficiência quando ambos estão em ressonância, ou seja, quando a frequência de ressonância do receptor e do emissor coincide, permitindo a transferência de energia entre as bobinas. Contrariamente ao que se possa imaginar, o acoplamento indutivo em ressonância é mais eficiente do que os sistemas baseados em baterias, com uma eficiência de cerca de 96%, em comparação com os 80% típicos dos sistemas com baterias. Em 2013, investigadores conseguiram alcançar uma eficiência de 97,4% entre bobinas separadas por 13 cm, transmitindo até 22 kW de potência [31] [32].

3.6 Programação dos AGVs (SIGAT)

A configuração e programação dos AGV pode ser realizada através de interfaces HMI, adaptando o funcionamento do sistema à aplicação desejada. Como referência, a marca ABB disponibiliza a plataforma SIGAT, que permite a programação dos seus AGV mediante a definição de parâmetros que especificam as tarefas a executar pelo robô (conforme representado na Figura 18), proporcionando flexibilidade e ajustabilidade operacional de acordo com as necessidades do utilizador [30].

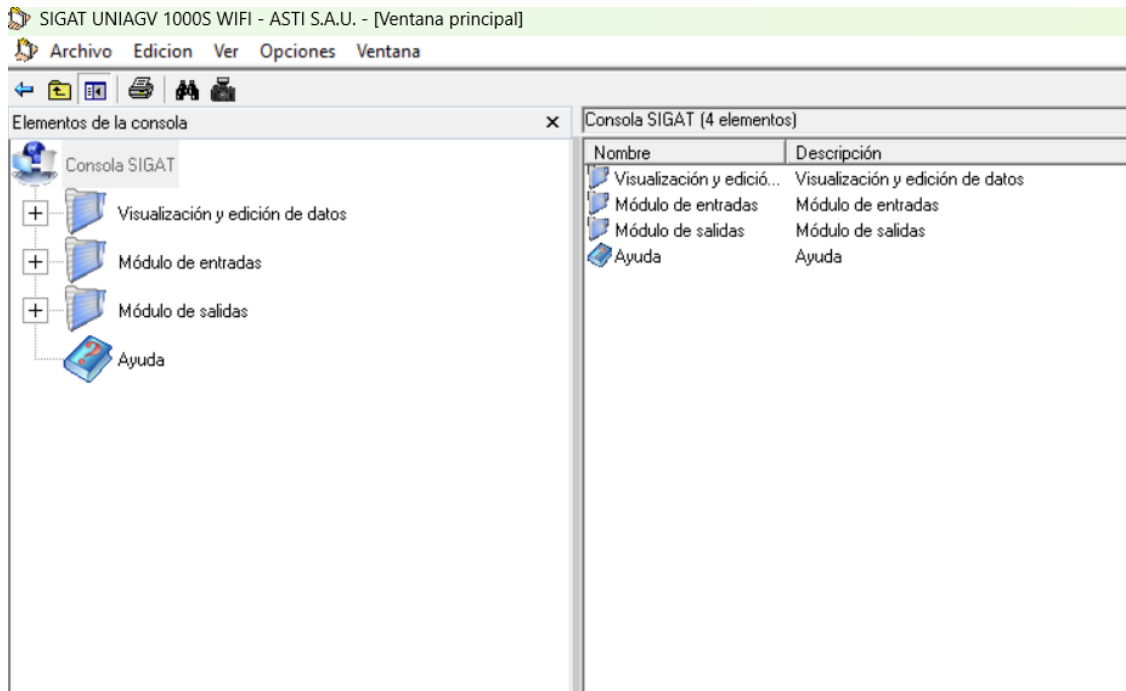


Figura 18- Página inicial SIGAT

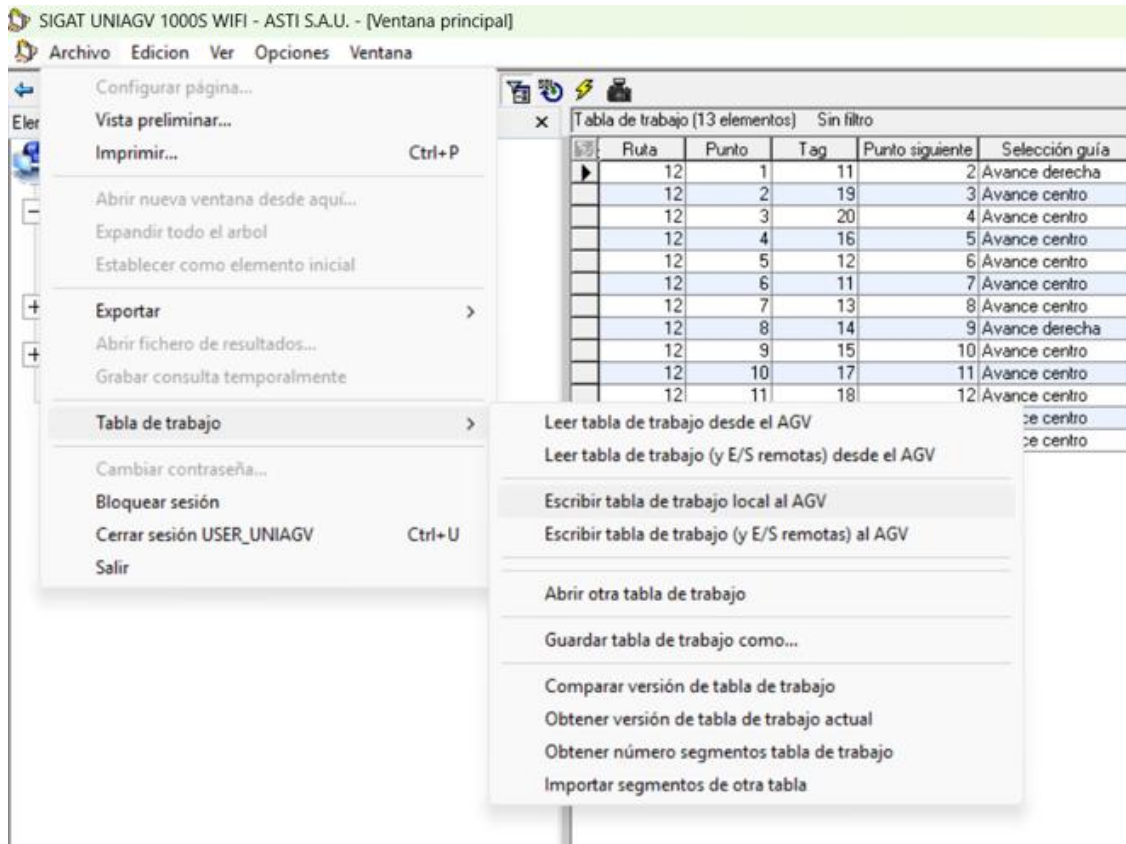


Figura 19- Ler, guardar, abrir e gravar programas com o Consola SIGAT Slam

O acesso às operações de leitura, gravação e transferência de dados realiza-se através da árvore “*Visualización y edición de datos*”. Ao clicar com o botão direito no ícone “*Tabla de trabajo*”, acede-se a um menu flutuante (ver Figura 19) que permite as seguintes operações:

- Leitura do AGV: Selecionar “*Leer tabla de trabajo desde el AGV*”. Esta ação carrega os dados atuais do veículo para a consola SIGAT, permitindo a sua visualização e edição.
- Guardar Programa: Para armazenar localmente o programa em edição, seleciona-se a opção “*Guardar tabla de trabajo como*”.
- Abrir Programa: Para carregar um ficheiro previamente guardado no computador, utiliza-se a opção “*Abrir otra tabla de trabajo*”.
- Escrever no AGV: Para transferir o programa da consola para o veículo, seleciona-se “*Escribir tabla de trabajo local al AGV*”. Será apresentada uma janela para confirmar o número de segmentos; caso o programa anterior possuísse mais segmentos, este parâmetro deve ser ajustado para igualar esse número, garantindo que as linhas excedentes assumem valor nulo.

| | Ruta | Punto | Tag | Punto siguiente | Selección guía | Velocidad | Zona A | Zona B | Seguridades perimetrales | COMENTARIO |
|--|------|-------|-----|-----------------|----------------|-----------|--------|--------|--------------------------|----------------|
| | 12 | 1 | 11 | 2 | Avance derecha | 300 | 0 | 0 | 0 | vira a direita |
| | 12 | 2 | 19 | 3 | Avance centro | 300 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 3 | 20 | 4 | Avance centro | 300 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 4 | 16 | 5 | Avance centro | 300 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 5 | 12 | 6 | Avance centro | 300 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 6 | 11 | 7 | Avance centro | 600 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 7 | 13 | 8 | Avance centro | 600 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 8 | 14 | 9 | Avance derecha | 300 | 0 | 0 | 0 | vira a direita |
| | 12 | 9 | 15 | 10 | Avance centro | 300 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 10 | 17 | 11 | Avance centro | 300 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 11 | 18 | 12 | Avance centro | 300 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 12 | 14 | 13 | Avance centro | 600 | 0 | 0 | 0 | |
| | 12 | 13 | 13 | 1 | Avance centro | 600 | 0 | 0 | 0 | |

Figura 20- Programa real em SIGAT

A seguir, pode-se observar o que cada linha do programa modelo irá executar durante o percurso.

Para que o programa seja executado da forma como foi idealizado, o AGV deve estar direcionado para a etiqueta, Tag 11, conforme se mostra na Figura 20.

Ao dar duplo clique na linha do primeiro segmento (apresentado na Figura 20) serão exibidos os parâmetros estabelecidos, apresentados na (Figura 21).

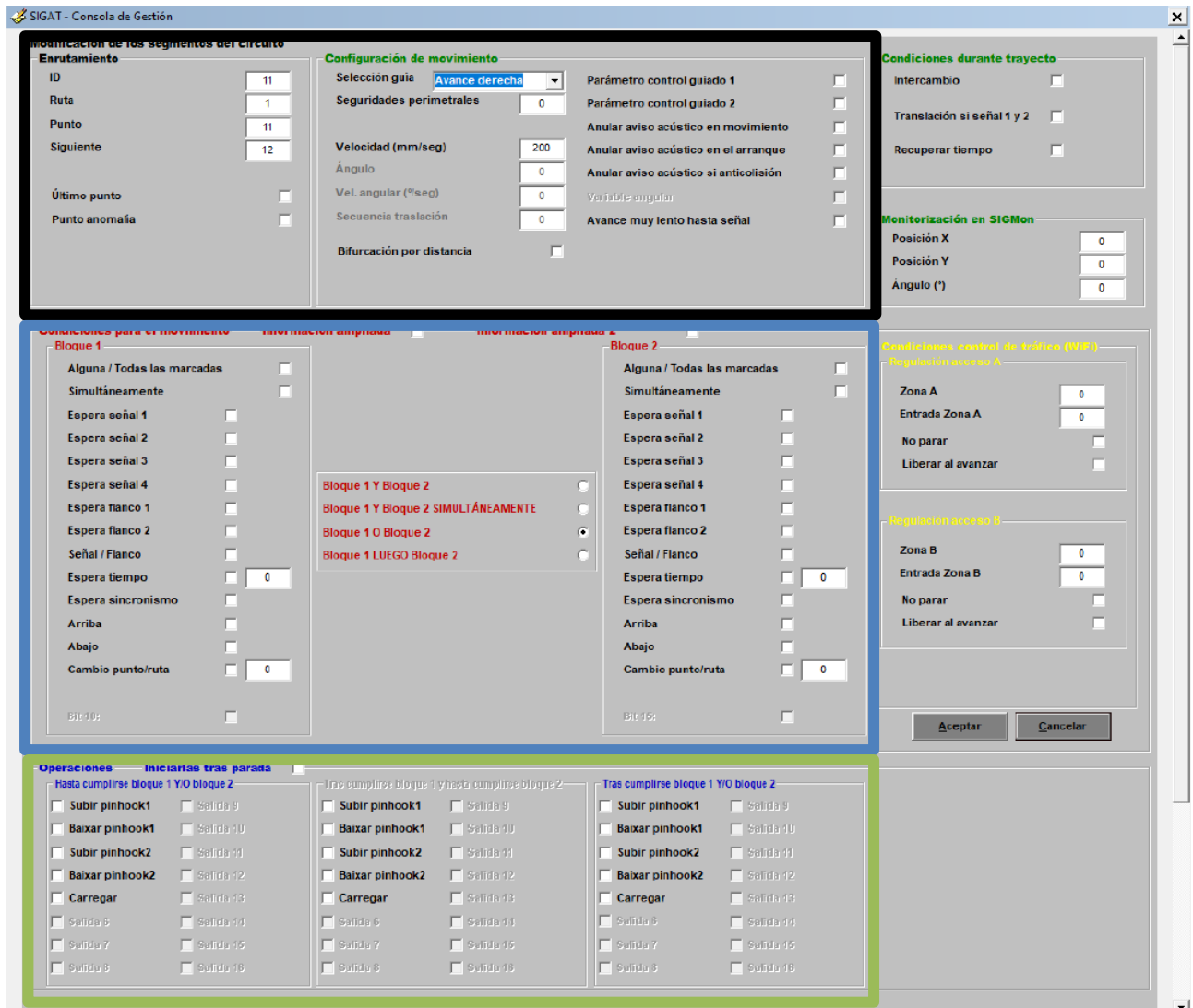


Figura 21 – Definição de parâmetros do AGV na plataforma SIGAT

Figura 22 – Janela de parametrização de um segmento do circuito

- ID – define o valor que a etiqueta deve ter para que o AGV possa iniciar o segmento.
- Punto – define qual o segmento que inicia com o valor da ID atribuído a etiqueta.
- Seguiete – define qual será o próximo segmento a ser procurado.
- Comentarios – caixa de texto onde se pode criar notas de consulta para o parâmetro.
- Selección guía – define a ação a ser executada pelo robô.
- Velocidad (mm/seg) – define a velocidade de deslocamento máxima para este segmento.
- Aceptar – se algum campo for alterado é necessário clicar no botão Aceptar.
- “Anular aviso acústico en movimiento” – se ativo, pára de emitir uma alerta sonora de indicação de movimentação do AGV, por questões de segurança esta função não pode ser executada em curvas.

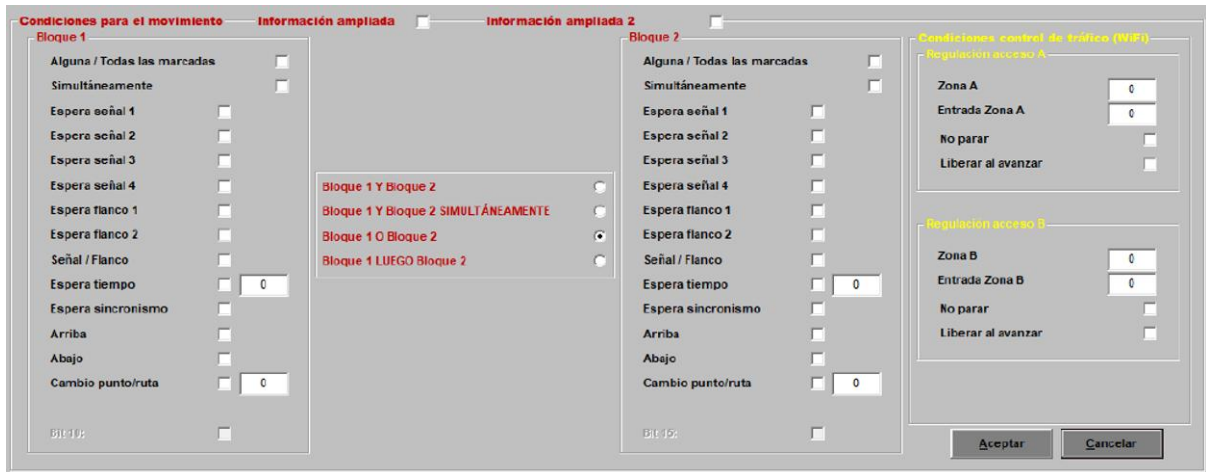


Figura 23 - Configuração de condições lógicas de movimento

- “Bloque 1 Y Bloque 2” – campo de seleção de “Condiciones para el movimiento”, com esta opção ativa, o bloco 1 (onde está a ordem para esperar 10 segundos) e o bloco 2 devem ser cumpridos para a movimentação ocorrer, como podemos observar na Figura 23.

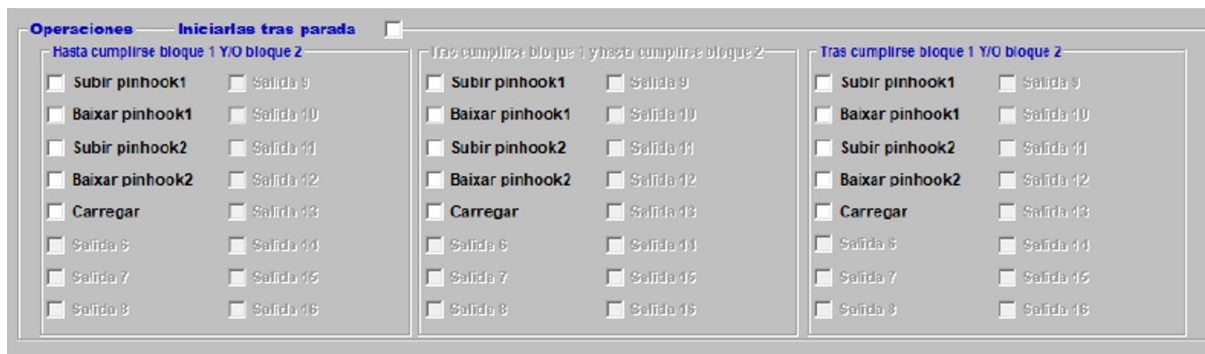


Figura 24 - controlo de atuadores, carregamento e ativação de saídas digitais.

- Listagem de ações AGV (ex.: Subir pinhook1, Bajar pinhook1, Carregar).
- Cada caixa executa um output físico (atuador) quando condições forem satisfeitas

4 ESTUDO DE CASO: DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA AGVS E AMRS

4.1 Contextualização e Formulação do Problema

4.1.1 Descrição do Sistema e Objetivos

O presente caso de estudo tem como objetivo avaliar e projetar a frota necessária de AGVs num ambiente industrial real, com base num *layout* existente de uma fábrica de produção e expedição de produtos. A abordagem combina modelação analítica e simulação, permitindo validar os requisitos operacionais em diferentes cenários de produção.

O sistema analisado envolve cinco pontos principais:

- Ponto 1: Produção de objetos maquinados;
- Ponto 2: Embalamento e paletização;
- Ponto 3: Armazenamento de paletes vazias;
- Ponto 4: Saída de paletes cheias;
- Ponto 5: Expedição.

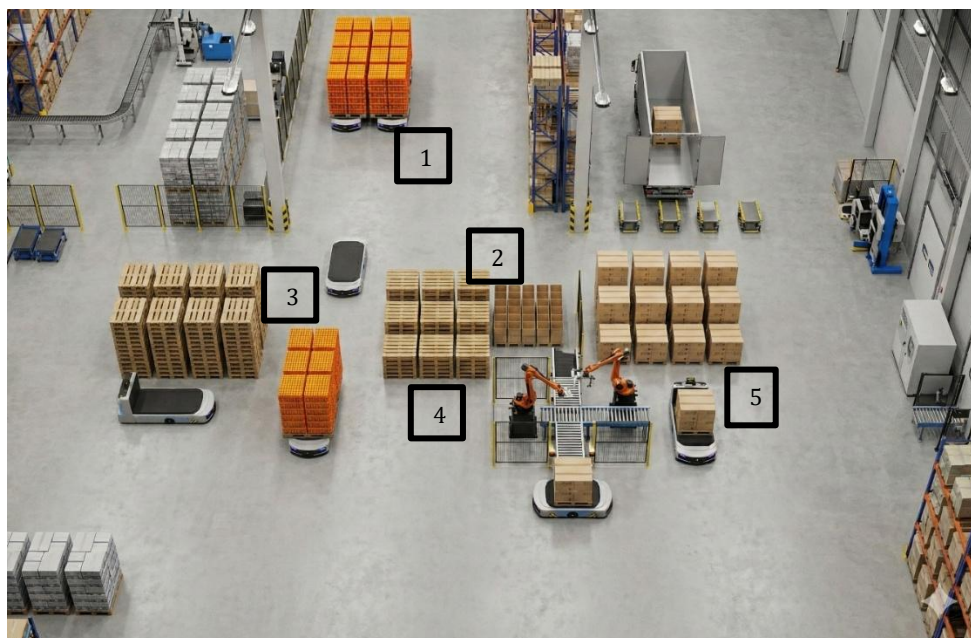


Figura 25 - *Layout* tridimensional proposto para a fábrica

Os AGVs fazem o transporte de paletes entre estes pontos de forma coordenada, garantindo que:

- Os objetos maquinados são entregues no ponto de embalagem/paletização;
- As paletes vazias são entregues no ponto de paletização;
- As paletes cheias são levadas até ao ponto de expedição; e
- As paletes devolvidas da expedição são recolocadas no *stock* de paletes vazias.

O problema consiste, portanto, em:

- Determinar o número mínimo de AGVs necessários para garantir um funcionamento sem ruturas nem atrasos;
- Avaliar o impacto de parâmetros como a velocidade de deslocamento, tempos de carga/descarga e variação na procura; e calcular a utilização média da frota. Para isso, são aplicadas as equações analíticas de tempo de missão (com e sem carga), matrizes de fluxo e técnicas de balanceamento com viagens em vazio.

4.1.2 Regras Operacionais

O modelo de dimensionamento considera as seguintes hipóteses operacionais para o funcionamento da frota durante o turno:

- **Movimentação Unidirecional:** Os veículos movem-se numa única direção por segmento de via para evitar bloqueios frontais.
- **Restrição de Ultrapassagem:** Não são permitidas ultrapassagens nos corredores principais; a velocidade da frota é condicionada pelo veículo mais lento ou paragens à frente.
- **Tempos Fixos:** Os tempos de carga e descarga são conhecidos para cada posto (30 segundos por operação).
- **Otimização de Rota:** Os veículos seguem sempre o caminho de menor distância/tempo entre dois postos.
- **Sincronização:** As estações não possuem *buffers* intermédios significativos, implicando uma sincronização rigorosa entre a chegada do veículo e a disponibilidade da carga.
- **Reequilíbrio de Frota:** Quando há desequilíbrios nos fluxos ocorrem viagens em vazio para reposicionar os veículos.
- **Carregamento:** Foi definido um ponto de carregamento dedicado. Os veículos realizam "carregamento de oportunidade" sempre que não têm

missões atribuídas ou quando a bateria um baixo nível de energia, garantindo a disponibilidade contínua.

É fundamental notar que as regras acima, especificamente a restrição de ultrapassagem e a movimentação unidirecional fixa, representam um cenário conservador típico de sistemas AGV.

Numa implementação com **AMRs**, estas restrições operacionais seriam flexíveis:

1. **Ultrapassagens:** Graças aos sensores lidar e navegação SLAM, um AMR conseguiria ultrapassar um veículo parado ou mais lento, desde que a largura do corredor o permitisse.
2. **Rotas Dinâmicas:** Ao contrário do AGV que segue o caminho de menor tempo, o AMR poderia recalcular uma rota alternativa em tempo real caso detetasse congestionamento no trajeto principal, aumentando a eficiência global do sistema face ao modelo aqui apresentado.

4.1.3 Estratégia de Carregamento e Gestão de Energia

Para garantir a autonomia da frota ao longo do turno de 8 horas, foi definida uma zona dedicada ao carregamento de baterias. O sistema adota uma estratégia de "carregamento de oportunidade".

- **Localização:** A estação de carregamento está situada numa zona adjacente ao Ponto 3, aproveitando uma área de menor tráfego.
- **Funcionamento:** Os veículos dirigem-se a esta estação sempre que o nível de bateria desce abaixo dos 30%. Esta abordagem minimiza a necessidade de retirar veículos da operação durante longos períodos, mantendo a disponibilidade da frota elevada.

4.2 Formulação do problema

A formulação do problema baseia-se numa abordagem determinística, onde os fluxos de transporte, tempos de operação e regras de circulação são conhecidos e definidos para um turno de trabalho.

4.2.1 Definições e Notação

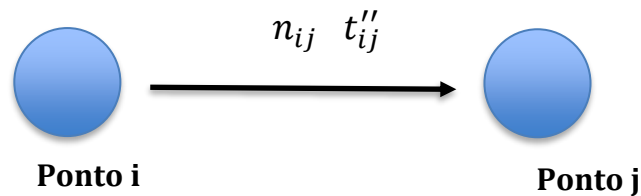


Figura 26 – Definição das variáveis de fluxo e tempo entre estações

Seja uma rede de postos de trabalho representada por um conjunto de nós $i, j \in \mathcal{N}$, conectados por trajetos onde circulam AGVs. A operação do sistema é descrita pelas seguintes grandezas:

- n_{ij} : número de transportes a efetuar do posto i para o posto j durante o turno;
- t_i : tempo de carregamento de uma unidade de carga no posto i ;
- u_j : tempo de descarga da unidade de carga no posto j ;
- t'_{ij} : tempo de deslocamento do AGV carregado do posto i para j .

4.2.2 Tempo de Missão e Transporte com Carga

O tempo total de uma missão de transporte com carga, denotado por t''_{ij} , engloba o carregamento no ponto de origem, o percurso com a carga e a descarga no ponto de destino. Este tempo é definido por:

- t''_{ij} : tempo total da missão de transporte com carga:

$$t''_{ij} = t_i + u_j + t'_{ij} \quad (1)$$

O tempo total de transporte produtivo (com carga) durante o turno H_0 é obtido pelo somatório de todas as missões realizadas

$$H_0 = \sum_i \sum_j n_{ij} \cdot t'_{ij} \quad (2)$$

4.2.3 Fluxo Líquido e Reequilíbrio

Para assegurar que todos os veículos terminam o turno em posições adequadas para o reinício do sistema calcula-se o fluxo líquido de veículos em cada posto:

$$NF(i) = \sum_j n_{ji} - \sum_j n_{ij} \quad (3)$$

- $NF(i) > 0$: o posto i recebe mais veículos do que envia — excedente;
- $NF(i) < 0$: o posto i envia mais veículos do que recebe — déficit.

Para restabelecer o equilíbrio, são introduzidas viagens em vazio representadas por:

- x_{ij} : número de viagens vazias do posto i para o posto j ;
- $t_{s,ij}$: tempo de deslocamento em vazio entre i e j (possivelmente diferente de t'_{ij}).

O tempo total gasto em viagens em vazio de reequilíbrio é dado por:

$$\Delta H = \sum_i \sum_j x_{ij} \cdot t_{s,ij} \quad (4)$$

Estas viagens devem satisfazer a seguinte restrição de fluxo:

$$NF(i) + \sum_j x_{ij} = 0 \forall i \quad (5)$$

O problema de determinar os valores ótimos de x_{ij} que minimizam ΔH constitui um problema de programação linear inteira, típico da modelação de sistemas logísticos de transporte.

4.2.4 Tempo Total de Atividade e Dimensionamento

O tempo total de trabalho da frota de AGVs por turno será então:

$$H = H_0 + \Delta H \quad (6)$$

onde:

- H_0 é o tempo total de transporte com carga;
- ΔH é o tempo necessário às viagens de reequilíbrio em vazio.

Com h a representar o tempo efetivamente disponível por veículo num turno (por exemplo, $h = 28.800$ s), o número mínimo de AGVs necessários será:

$$Y = \frac{H}{h} \quad (7)$$

Por fim, a taxa de utilização média da frota ρ é estimada por:

$$\rho = \frac{H}{h \cdot Y} \quad (8)$$

Valores de ρ próximos de 1 indicam que a operação está no limite da capacidade recomenda-se operar com $\rho \leq 0,80$ para garantir robustez e compensar variações ou pequenas interrupções.

4.3 Caracterização do *Layout*

A aplicação do modelo de dimensionamento foca-se numa instalação fabril cujo *layout* logístico se estrutura em torno de cinco nós principais. A disposição destes pontos define a rede de caminhos possíveis e as restrições de circulação para a frota de veículos guiados automaticamente.

O sistema é composto por cinco estações distintas, cada uma com uma função específica no processo produtivo e logístico:

Ponto 1 – Produção dos objetos maquinados: Localiza-se na zona de fabrico e constitui a fonte geradora dos produtos (objetos maquinados) que necessitam de transporte. Este ponto marca o início do fluxo produtivo principal.

Ponto 2 – Embalamento e paletização: Estação de processamento onde os objetos maquinados são rececionados, embalados e colocados sobre paletes. Este posto atua como um ponto de convergência de materiais, recebendo tanto os produtos para embalar como as paletes vazias necessárias para a constituição das unidades de carga.

Ponto 3 – Armazenamento de Paletes Vazias: Área dedicada ao stock de paletes vazias. Funciona como um *buffer* de aprovisionamento para o sistema, garantindo que o processo de paletização não é interrompido por falta de suporte de carga.

Ponto 4 – Saída de Paletes Cheias: É o local onde as paletes completas (já com os objetos embalados) são depositadas aguardando o transporte final para a zona de carga.

Ponto 5 – Expedição: Área final de interface com o exterior, para onde as paletes cheias são encaminhadas para saída da fábrica.

4.3.1 Fluxos de Materiais e Lógica de Movimentação

A operação do sistema de AGVs é regida por uma lógica de fluxos interdependentes, que garantem o abastecimento contínuo das linhas e a evacuação de produto acabado. A movimentação é estruturada em dois circuitos logísticos distintos, operados pela mesma frota de veículos.

1. Circuito de Abastecimento e Retorno de Produção (KLTs)

Este circuito conecta a zona de fabrico à zona de embalamento, caracterizando-se por um fluxo bidirecional de unidades de carga consolidadas (KLTs sobre bases móveis):

- **Fluxo de Alimentação (P1 → P2):** O AGV recolhe as unidades contendo os "Objetos maquinados" no Ponto 1 e transporta-as para a entrada da linha de embalamento.

- **Logística Inversa de Embalagens (P2 → P1):** Após o consumo dos objetos na estação de embalagem, as bases e caixas vazias não são acumuladas no local. O AGV realiza o transporte inverso, devolvendo as unidades vazias ao Ponto 1 para reintegração imediata no processo produtivo.

2. Circuito de Gestão de Paletes

Este circuito gere o ciclo de vida da paleta de madeira dentro da fábrica:

- **Alimentação de Vazios (P3 → P2):** O armazém de paletes (Ponto 3) expede paletes vazias para o Ponto 2, garantindo que a paletizadora dispõe sempre de suporte para novas cargas.
- **Expedição de Produto (P4 → P5):** Note-se que o movimento da máquina de paletizar (P2) para a zona de espera (P4) é realizado por transporte interno automático (tapete de rolos), não consumindo recursos da frota. O AGV intervém apenas na recolha da paleta completa no Ponto 4, transportando-a para o Cais de Expedição (Ponto 5).
- **Recuperação de Paletes (P5 → P3):** Para fechar o ciclo, as paletes vazias recebidas ou libertadas no Cais são transportadas de volta para o Armazém (Ponto 3).

Esta lógica de movimentação foi desenhada para minimizar trajetos em vazio improdutivo.

4.4 Cenários Operacionais e Matrizes de Fluxo

A correta definição dos cenários operacionais requer a distinção das unidades de carga movimentadas em cada segmento da rede. A natureza física da carga influencia diretamente a seleção do equipamento e os tempos de ciclo.

4.4.1 Tipologia de Cargas e Fluxos

A análise dos fluxos de materiais permite identificar dois tipos distintos de unidades de carga a serem movimentadas pela frota de AGVs:

- **Circuito de Produção (KLTs/Dollies)**

- **Paletes nos Restantes Fluxos**

Esta dualidade exige que a frota de AGVs selecionada possua capacidade de manuseamento híbrido ou utilize interfaces padronizadas, permitindo que o mesmo veículo opere tanto o transporte de *dollies* de KLT's como o de paletes convencionais.

4.4.2 Matriz de fluxos

A Tabela 3 apresenta a matriz de fluxos do sistema, onde se encontram representados os movimentos de materiais entre os cinco pontos operacionais do processo. Cada célula indica o número de unidades transportadas do ponto de origem para o ponto de destino.

Tabela 4 – Matriz de Fluxos

| Origem | Destino | | | | | Saídas |
|----------|---------|-----|-----|---|-----|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Ponto | | | | | | |
| 1 | | 160 | | | | 160 |
| 2 | 160 | | | 0 | | 160 |
| 3 | | 160 | | | | 160 |
| 4 | | | | | 160 | 160 |
| 5 | | | 160 | | | 160 |
| Entradas | 160 | 320 | 160 | 0 | 160 | TOTAL= 960 |

4.4.3 Matriz de Distâncias e Tempos de missão

Para a aplicação do modelo analítico, estabelecem-se os tempos de missão t''_{ij} com base nas distâncias do *layout* e numa velocidade média com carga de $v=1,0$ m/s e em vazio de 2,0 m/s considera-se um tempo fixo de manuseamento de carga/descarga de 30 segundos por operação ($t_{load} + t_{unload} = 60s$).

Tabela 5 – Matriz de Distâncias e Tempos de missão

| Rota (i →j) | Distância (m) | Tempo Viagem (s) | Tempo Manuseamento (s) | Tempo Total Missão (s) |
|-------------|---------------|------------------|------------------------|------------------------|
| P1→P2 | 45 | 45 | 60 | 105 |
| P2→P1 | 45 | 45 | 60 | 105 |
| P3→P2 | 30 | 30 | 60 | 90 |
| P2→P4 | 10 | 5 | 0 | 5 |
| P4→P5 | 60 | 60 | 60 | 120 |
| P5→P3 | 80 | 80 | 60 | 140 |

4.5 Resultados do Dimensionamento Analítico

Nesta secção, aplicam-se as expressões matemáticas do modelo de dimensionamento aos dados operacionais definidos. O objetivo é determinar a carga de trabalho total (H) e o número mínimo de veículos (Y) necessários para cumprir o plano de produção de 160 unidades por turno.

4.5.1 Cálculo do Tempo de Transporte Cheio (H_0)

O tempo produtivo corresponde ao somatório das missões de transporte de materiais (KLTs e Paletes) e de logística inversa (retorno de vazios). Com base na matriz de fluxos definida em 5.4, calculam-se as horas de trabalho necessárias para cada rota, como podemos visualizar na tabela 5.

Tabela 6 - Cálculo do Tempo de Transporte com carga

| Trajeto (i→j) | Descrição da missão (m) | n_{ij} (missões) | t''_{ij} (s/missão) | Tempo Total (s) |
|---------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| P1→P2 | Entrega Componentes (KLT) | 160 | 105 | 16800 |
| P2→P1 | Retorno KLT's Vazias | 160 | 105 | 16800 |
| P3→P2 | Abast. Paletes Vazias | 160 | 90 | 14400 |
| P4→P5 | Expedição Paletes Cheias | 160 | 120 | 19200 |
| P5→P3 | Retorno Paletes Vazias | 160 | 140 | 22400 |

O tempo total estritamente produtivo é de 24 horas, 53 minutos e 20 segundos

4.5.2 Cálculo de Viagens em Vazio e Reequilíbrio (ΔH)

A análise de fluxo identificou a necessidade de um movimento de reequilíbrio entre o Ponto 2 e o Ponto 4. Após o AGV entregar uma paleta vazia no Ponto 2, fica disponível. No entanto, a próxima carga (paleta cheia) encontra-se no Ponto 4 (saída da linha). O AGV deve, portanto, deslocar-se em vazio do P2 para o P4.

- **Número de viagens:** 160 viagens (para recolher as 160 paletes produzidas).
- **Tempo por viagem:** Considerando a distância de 10 metros e velocidade de 2 m/s:

$$t_{s,24} = \frac{10 \text{ m}}{2 \text{ m/s}} = 5 \text{ s}$$

O tempo total de reequilíbrio é dado por:

$$\Delta H = 160 \times 5s = 800s$$

4.5.3 Dimensionamento da Frota (Y)

O tempo total de atividade da frota (H) para o turno é a soma do tempo produtivo e do tempo de reequilíbrio:

$$H = H_0 + \Delta H = 89600 + 800 = 90400 \text{ s}$$

Considerando a disponibilidade de tempo por turno (h) de 8 horas (28.800 segundos), o número mínimo de veículos (Y) é:

$$Y = \left\lceil \frac{H}{h} \right\rceil = \left\lceil \frac{90400}{28800} \right\rceil = [3,14] = 4 \text{ AGVs}$$

4.5.4 Taxa de Ocupação da Frota (ρ)

Com uma frota dimensionada de 4 veículos, a utilização média esperada é calculada por:

$$\rho = \frac{H}{h \cdot Y} = \frac{90400}{28800 \cdot 4} = 0,785$$

4.5.5 Validação Computacional e Ferramenta de Simulação

De forma a validar os resultados foi desenvolvido um algoritmo em ambiente MATLAB.

Esta ferramenta automatiza a aplicação das equações do modelo matemático, ao receber como *inputs* as variáveis de fluxo, as distâncias do *layout* e os parâmetros de velocidade da frota. A utilização de uma abordagem matricial permite escalar o problema para *layouts* mais complexos ou alterar volumes de produção sem incorrer em erros de cálculo manual.

```

% --- DADOS DE ENTRADA ---
% Definição dos parâmetros operacionais
v_carga = 1.0;
v_vazio = 2.0;
t_manus = 60;
turno = 28800;

fluxos = [
    0 160 0 0 0;
    160 0 0 0 0;
    0 160 0 0 0;
    0 0 0 0 160;
    0 0 160 0 0
];

dist_rotas = [
    45; % P1->P2
    45; % P2->P-2
    30; % P3->P2
    60; % P4->P5
    80 % P5->P3
];

% --- CÁLCULO DO TEMPO PRODUTIVO (H0) ---
tempos_ciclo = (dist_rotas ./ v_carga) + t_manus;

% Selecionar apenas os fluxos ativos (não nulos) para cálculo
fluxos_ativos = [160; 160; 160; 160; 160];

H0 = sum(fluxos_ativos .* tempos_ciclo);

% --- CÁLCULO DO REEQUILÍBRIO (Delta H) ---
n_reequilibrio = 160;
dist_vazio = 10;
tempo_reequilibrio = (dist_vazio / v_vazio) * n_reequilibrio;

% --- DIMENSIONAMENTO FINAL ---
H_total = H0 + tempo_reequilibrio;
num_agvs = ceil(H_total / turno);
ocupacao = (H_total / (num_agvs * turno)) * 100;

% --- OUTPUT ---
fprintf('--- RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO ---\n');
fprintf('Tempo Total de Trabalho (H): %.0f segundos\n', H_total);
fprintf('Número de AGVs Necessários: %d\n', num_agvs);
fprintf('Taxa de Ocupação da Frota: %.2f%%\n', ocupacao);

```

```

Command Window
>> script_automatico
--- RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO ---
Tempo Total de Trabalho (H): 90400 segundos
Número de AGVs Necessários: 4
Taxa de Ocupação da Frota: 78.47%

```

Figura 28 – Script Automático em MATLAB análise normalizada

4.5.6 Análise dos Resultados

O dimensionamento aponta para a necessidade de 4 AGVs. A taxa de ocupação resultante é de 78,5%. Este valor encontra-se abaixo do limite crítico de 80-85% frequentemente citado na literatura, o que valida a robustez da solução. Uma ocupação de 78,5% significa que a frota possui uma folga operacional de aproximadamente 21,5% do tempo, suficiente para acomodar:

1. Pequenos atrasos no transporte de carga;
2. Desvios de trajetória para gestão de tráfego;
3. Pausas curtas para carregamento de oportunidade, caso o sistema de baterias o exija.

Em conclusão, a frota de 4 veículos é tecnicamente capaz de assegurar o fluxo de trabalho

4.6 Análise de Sensibilidade e Discussão

O dimensionamento base indicou a necessidade de uma frota de 4 AGVs com uma taxa de ocupação de 78,5%. No entanto, em ambiente industrial, as condições operacionais são dinâmicas. Recorrendo à ferramenta de simulação desenvolvida, avaliou-se a robustez do sistema face a variações no aumento de produção e no tempo disponível de cada AGV.

4.6.1 Cenário A: Aumento da Capacidade Produtiva (+20%)

Neste cenário, avalia-se o impacto de um aumento da procura de mercado ou de picos sazonais, elevando a meta de produção de 160 para 192 unidades por turno (+20%). O modelo assume que a estrutura de rotas se mantém, aumentando linearmente o número de missões.

```

% --- DADOS DE ENTRADA ---
% Definição dos parametros operacionais
v_carga = 1.0;
v_vazio = 2.0;
t_manus = 60;
turno = 28800;

fluxos = [
    0 192 0 0 0;
    192 0 0 0 0;
    0 192 0 0 0;
    0 0 0 0 192;
    0 0 192 0 0
];

dist_rotas = [
    45; % P1->P2
    45; % P2->P1
    30; % P3->P2
    60; % P4->P5
    80 % P5->P3
];

% --- Cálculo do tempo produtivo (H0) ---
tempos_ciclo = (dist_rotas ./ v_carga) + t_manus;

% Selecionar apenas os fluxos ativos (não nulos) para calculo
fluxos_ativos = [192; 192; 192; 192; 192];

H0 = sum(fluxos_ativos .* tempos_ciclo);

% --- CALCULO DO REEQUILIBRIO (Delta H) ---
n_reequilibrio = 192;
dist_vazio = 10;
tempo_reequilibrio = (dist_vazio / v_vazio) * n_reequilibrio;

% --- DIMENSIONAMENTO FINAL ---
H_total = H0 + tempo_reequilibrio;
num_agvs = ceil(H_total / turno);
ocupacao = (H_total / (num_agvs * turno)) * 100;

% --- OUTPUT ---
fprintf('--- RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO ---\n');
fprintf('Tempo Total de Trabalho (H): %.0f segundos\n', H_total);
fprintf('Numero de AGVs Necessários: %d\n', num_agvs);
fprintf('Taxa de Ocupação da Frota: %.2f%%\n', ocupacao);

```

Command Window

```

--- RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO ---
Tempo Total de Trabalho (H): 108480 segundos
Numero de AGVs Necessários: 4
Taxa de Ocupação da Frota: 94.17%

```

Figura 29 – Script Automático em MATLAB +20% produtividade

Embora matematicamente o sistema suporte a carga ($\rho < 100\%$), uma ocupação de 94,17% é considerada operacionalmente crítica. Com apenas ~6% de tempo livre, o sistema perde a capacidade de absorver micro-paragens, bloqueios de corredor ou

variabilidade nos tempos de manuseamento, resultando num elevado risco de congestionamento e paragem de linha. Para sustentar este nível de produção de forma fiável, seria recomendada a aquisição de um 5.º veículo, o que reduziria a ocupação para um valor seguro de aproximadamente 75%.

4.6.2 Cenário B: Impacto da Disponibilidade e Carregamentos

O dimensionamento realizado no cenário nominal assume condições ideais de operação. No entanto, em ambiente industrial, o sistema está sujeito a variáveis que afetam o seu desempenho. Nesta secção, avalia-se a robustez da solução de 4 AGVs face a duas perturbações críticas: a redução da disponibilidade técnica (baterias e manutenção) e a degradação da velocidade de navegação. No cálculo nominal, considerou-se que os veículos estariam disponíveis durante 100% do turno de trabalho ($h = 28.8s$). Neste cenário, introduz-se um fator de disponibilidade realista de 85% ($A = 0,85$). Isto implica que 15% do turno é consumido por atividades não produtivas, reduzindo o tempo efetivo disponível por veículo (h_{real}) para:

$$h_{real} = h_{nominal} \times A = 28800s \times 0,85 = 24480$$

```

% --- DADOS DE ENTRADA ---
% Definição dos parametros operacionais
v_carga = 1.0;
v_vazio = 2.0;
t_manus = 60;
turno = 24480;

fluxos = [
    0 160 0 0 0;
    160 0 0 0 0;
    0 160 0 0 0;
    0 0 0 0 160;
    0 0 160 0 0
];

dist_rotas = [
    45; % P1->P2
    45; % P2->P1
    30; % P3->P2
    60; % P4->P5
    80 % P5->P3
];

% --- Cálculo do tempo produtivo (H0) ---
tempos_ciclo = (dist_rotas ./ v_carga) + t_manus;

% Selecionar apenas os fluxos ativos (não nulos) para calculo
fluxos_ativos = [160; 160; 160; 160; 160];

H0 = sum(fluxos_ativos .* tempos_ciclo);

% --- CALCULO DO REEQUILIBRIO (Delta H) ---
n_reequilibrio = 192;
dist_vazio = 10;
tempo_reequilibrio = (dist_vazio / v_vazio) * n_reequilibrio;

% --- DIMENSIONAMENTO FINAL ---
H_total = H0 + tempo_reequilibrio;
num_agvs = ceil(H_total / turno);
ocupacao = (H_total / (num_agvs * turno)) * 100;

% --- OUTPUT ---
fprintf('--- RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO ---\n');
fprintf('Tempo Total de Trabalho (H): %.0f segundos\n', H_total);
fprintf('Numero de AGVs Necessários: %d\n', num_agvs);
fprintf('Taxa de Ocupação da Frota: %.2f%%\n', ocupacao);

--- RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO ---
Tempo Total de Trabalho (H): 90560 segundos
Numero de AGVs Necessários: 4
Taxa de Ocupação da Frota: 92.48%

```

Figura 30 - Script Automático em MATLAB, impacto disponibilidade e gestão de energia

A análise revela uma elevada sensibilidade do sistema ao fator de disponibilidade. Ao considerar as paragens para manutenção, a taxa de ocupação dispara de uns confortáveis 78,5% para 92,3%. Este valor indica que o sistema opera próximo da saturação. Se a estratégia de carregamento ou as paragens técnicas consumirem mais de 15% do tempo (aproximadamente 1h12m por turno), a frota de 4 AGVs será insuficiente.

4.6.3 Análise de Resiliência: Comportamento AGV vs. AMR sob Constrangimentos

Uma das distinções fundamentais entre as tecnologias reside na capacidade de lidar com imprevistos no chão de fábrica.

Cenário: Bloqueio da Via imaginemos que uma palete ou um operador bloqueiam o corredor principal durante 5 minutos.

- **Comportamento com AGV:** Sendo um sistema de navegação fixa, o AGV deteta o obstáculo através dos seus sensores de segurança e imobiliza-se imediatamente. O veículo permanece parado e emite um alerta sonoro/luminoso até que o obstáculo seja removido manualmente. Impacto: A paragem de um veículo bloqueia os que vêm atrás, reduzindo drasticamente a produtividade do turno.
- **Comportamento com AMR:** Deteta o bloqueio e avalia o espaço disponível. O processador calcula, em tempo real, uma trajetória alternativa segura para contornar o obstáculo. Impacto: A missão continua sem intervenção humana. Embora o desvio possa acrescentar alguns segundos ao tempo de ciclo, o fluxo logístico não é interrompido, garantindo que a produção não é interrompida.

4.7 Conclusão do Estudo de Caso

O presente capítulo dedicou-se ao dimensionamento analítico de um sistema de transporte AGV para uma unidade fabril com uma produtividade de 160 unidades por turno.

Os resultados demonstraram que uma frota de 4 veículos é suficiente para assegurar a produção ao apresentar uma taxa de ocupação média de 78,5%.

Este valor situa-se abaixo do limiar crítico de 85%, com uma margem de segurança de aproximadamente 21% essencial para absorver variabilidades naturais do processo logístico.

No entanto, revelou-se que esta estabilidade é vulnerável a alterações:

Capacidade de expansão: Um aumento de 20% no volume de produção eleva a taxa de ocupação para 94,1%, estando esta acima do limiar crítico.

Disponibilidade da frota: Ao introduzir variáveis de gestão de energia dos robôs moveis onde a disponibilidade da frota é reduzida para 85% (devido a cargas de bateria e manutenção) resulta num aumento da ocupação para 92,3%.

Recomendações finais: Com base nos resultados obtidos, recomenda-se a implementação inicial da frota de 4 AGVs, validando a viabilidade técnica e económica do projeto para as condições atuais. Para cenários futuros de expansão o estudo indica que a aquisição de um 5.º veículo seria a medida adequada para manter a robustez a longo prazo.

Em suma, o modelo analítico cumpriu o objetivo de fornecer uma estimativa sólida da frota necessária, servindo de base para eventuais estudos de simulação que permitam refinar a análise de congestionamentos e gestão de tráfego em tempo real.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

Através da revisão bibliográfica e do estudo de caso desenvolvido, foi possível dar resposta aos objetivos propostos, permitindo aferir como e quantos equipamentos serão necessários para utilizar este tipo de tecnologias. A mudança de paradigma na navegação na atualidade e com a tecnologia tradicional em o sistema depende das infraestruturas físicas, os AMRs, suportados por tecnologias SLAM e sensores LiDAR, oferecem uma flexibilidade vital para a Indústria 4.0. A "inteligência" migrou do servidor central para o próprio veículo, permitindo decisões autónomas em tempo real. A superioridade da tecnológica dos AMRs não os torna, automaticamente, a escolha certa para todas as indústrias, o custo de aquisição e implementação de um sistema é significativamente superior aos AGV. Verificou-se que, para casos de utilização com fluxos estáveis e baixo risco de obstrução (como linhas de montagem contínuas), o AGV continua a ser a solução mais racional e eficiente, cumprindo os requisitos operacionais com um investimento menor. A opção pelos AMRs só se justifica financeiramente quando o "trabalho necessário" exige muita flexibilidade, algo que o AGV não consegue. O AMR consegue ser um tarefeiro, pode efetuar missões em ambientes dinâmicos, *layouts* variáveis ou zonas de tráfego misto intenso. A decisão de investimento requer uma análise rigorosa: a tecnologia deve servir a necessidade, e não o contrário. O estudo de caso validou um exemplo para uma frota de 4 veículos, pretendeu-se mostrar que seria o suficiente para cumprir a produção em condições nominais. Contudo, a análise de sensibilidade provou que os sistemas AGV tradicionais são frágeis perante imprevistos. Neste ponto, o AMR destaca-se pela sua capacidade de reencaminhamento dinâmico passagem sobre obstáculos, oferecendo assim uma robustez operacional que, em fábricas com elevado índice de imprevisibilidade são os mais adequados.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mecalux, «Indústria 5.0 vs. indústria 4.0». Disponível em:
<https://www.mecalux.com.br/blog/industria-4-0-vs-industria-5-0>
- [2] C.-C. e I. Especializada, «Da Indústria 4.0 à Indústria 5.0 - revista robótica». Disponível em: <https://www.robotica.pt/da-industria-4-0-a-industria-5-0/>
- [3] «Industry 4.0: The Future of Manufacturing», SAP. Acedido: [Online]. Disponível em: <https://www.sap.com/portugal/products/scm/industry-4-0/what-is-industry-4-0.html>
- [4] B. A. Peixoto, «Indústria 4.0: Conheça as principais tecnologias que marcam a quarta revolução industrial», InvoiceXpress. Disponível em:
<https://invoicexpress.com/blog/industria-4-0-principais-tecnologias-quarta-revolucao-industrial/>
- [5] «Destaques». Disponível em:
https://www.compete2020.gov.pt/destaques/detalhe/industria_4ponto0
- [6] M. Holubčík, G. Koman, e J. Soviar, «Industry 4.0 in Logistics Operations», *Transp. Res. Procedia*, vol. 53, pp. 282–288, jan. 2021, doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.040.
- [7] X. Sun, H. Yu, W. D. Solvang, Y. Wang, e K. Wang, «The application of Industry 4.0 technologies in sustainable logistics: a systematic literature review (2012–2020) to explore future research opportunities», *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 29, n.º 7, pp. 9560–9591, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-17693-y.
- [8] C.-C. e I. Especializada, «Robots em movimento: a revolução silenciosa em curso na logística e indústria - revista robótica». Disponível em:
<https://www.robotica.pt/robots-em-movimento-revolucao-logistica-industria/>
- [9] «Robótica móvel autônoma (AMR) na logística e produção», KUKA. Disponível em: <https://www.kuka.com/pt-pt/produtos-servi%C3%A7os/amr-robotica-movel-autonoma>
- [10] M. Silva, «O impacto da robótica na logística», *Cad. Investig. Mestr. Em Neg. Eletrónico*, vol. 3, 2023, Disponível em:
<https://www.iscap.pt/edicoesceos/index.php/mne-rj/article/view/322>

- [11] S. Insights, «Top 10 Industry 4.0 Trends in 2025», StartUs Insights. Disponível em: <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/top-10-industry-4-0-trends-innovations-in-2021/>
- [12] «Qual é a história do desenvolvimento de AGV? - Blog». Disponível em: <https://pt.bhthv.com/blog/what-is-the-history-of-agv-development-478726.html>
- [13] A. Tech, «AGVs - Veículos Guiados Automatizados», Aventa Tech. Disponível em: <https://www.aventatech.com.br/post/agv-veiculo-guiado-automatizado>
- [14] «Veículos guiados automaticamente», *Wikipédia, a enciclopédia livre*. 8 de outubro de 2025. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ve%C3%ADculos_guiados_automaticamente&oldid=70988690
- [15] «ISO 22598:2020», ISO. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/73544.html>
- [16] «Proteus - ROBOTS: Your Guide to the World of Robotics» Disponível em: <https://robotsguide.com/robots/proteus>
- [17] «O que é um AMR (Autonomous Mobile Robot) e como ele funciona na prática?», Blog ARV Systems. Disponível em: <https://www.arvsystems.com.br/blog/o-que-e-um-amr-autonomous-mobile-robot-e-como-ele-funciona-na-pratica/>
- [18] Mecalux, «AMR vs. AGV: quais as diferenças e qual é melhor?» Disponível em: <https://www.mecalux.com.br/blog/amr-vs-agv>
- [19] «ISO 22598:2020», ISO. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/73544.html>
- [20] J. M. Mota Brito, E. R. Almeida, M. P. Silva, S. B. Santiago, e A. A. Souza Júnior, «Aplicação de veículo guiado automaticamente nas diversas áreas de produção da indústria: revisão sistemática da literatura», *Braz. J. Dev.*, vol. 6, n.º 2, pp. 9486–9502, 2020, doi: 10.34117/bjdv6n2-310.
- [21] L. Schulze e A. Wullner, «The Approach of Automated Guided Vehicle Systems», em *2006 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, jun. 2006, pp. 522–527. doi: 10.1109/SOLI.2006.328941.

- [22] «Veículos guiados automaticamente: Melhorando a fabricação e o armazenamento». Disponível em:
<https://www.eammosca.com/br/news/newsdetail/automatic-guided-vehicles-the-future-of-manufacturing-and-warehousing-1891>
- [23] J. A. J. Neto, «AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL POR VEÍCULOS GUIADOS AUTOMATICAMENTE (AGV)».
- [24] «Indústria 4.0: Otimização de Linhas de Produção com Automated Mobile Robots - ProQuest». Disponível em:
<https://www.proquest.com/openview/aaf6ec51e99b216043c8bbd7564d20a2/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- [25] S. Benzidia, B. Ageron, O. Bentahar, e J. Husson, «Investigating automation and AGV in healthcare logistics: a case study based approach», *Int. J. Logist. Res. Appl.*, vol. 22, n.º 3, pp. 273–293, mai. 2019, doi: 10.1080/13675567.2018.1518414.
- [26] M. Antony, M. Parameswaran, N. Mathew, S. V.S, J. Joseph, e C. M. Jacob, «Design and Implementation of Automatic Guided Vehicle for Hospital Application», em *2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, jun. 2020, pp. 1031–1036. doi: 10.1109/ICCES48766.2020.9137867.
- [27] Y. Zhou e N. Huang, «Airport AGV path optimization model based on ant colony algorithm to optimize Dijkstra algorithm in urban systems», *Sustain. Comput. Inform. Syst.*, vol. 35, p. 100716, set. 2022, doi: 10.1016/j.suscom.2022.100716.
- [28] B. Fernandes, «Simulação e estudo da logística interna baseada em AGVs de uma empresa de componentes elétricos».
- [29] admin, «A fita magnética AGV e suas vantagens», IMA. Disponível em:
<https://imamagnets.com/pt-pt/blog/a-fita-magnetica-e-suas-vantagens/>
- [30] L. A. F. da Rocha, *Logística flexível baseada em AGVs*, (2010).
- [31] «AGV Battery - Wewo TM», Wewo TM (EN). Disponível em:
<https://wewo-techmotion.com/solutions/automatic-guided-vehicle/agv-battery>
- [32] «AGV Battery Charging Systems Comparison. What's the best?» Acedido: 20 de outubro de 2025. [Online]. Disponível em:

<https://www.agvnetwork.com/automated-guided-vehicles-battery-charging-solutions>

[33]«Como o carro AGV consegue o posicionamento RFID inteligente?», Cartão RFID, Cartão de proximidade de RFID Huayuan, O fabricante RFID.

Acedido: Disponível em: <https://www.rfidhy.com/how-agv-car-achieves-intelligent-rfid-positioning/>

