

Filipe Cardoso, Diogo Miguel Matos, Pedro Costa e Héber Sobreira
CRIS – Centre of Robotics in Industry and Intelligent Systems
INESC TEC – Institute for Systems and Computer Engineering, Technology and Science
filipe.a.cardoso, diogo.m.matos, pedro.g.costa, heber.m.sobreira@inesctec.pt
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
pedro.g.c.heber@fe.up.pt

Coordenação de frotas de *robots* móveis: o caso do sistema MAESTRO

O presente artigo expõe uma análise da evolução dos algoritmos de planeamento de trajetórias, enfatizando o surgimento de modelos híbridos que integrem a flexibilidade das trajetórias livres com a previsibilidade das trajetórias fixas.

A adoção crescente de *robots* móveis em ambientes industriais complexos exige soluções de coordenação cada vez mais eficazes e escaláveis. O algoritmo *Time Enhanced A** (TEA*) é objeto de destaque, enquanto incorpora a variável temporal no processo de planeamento, possibilitando a prevenção de conflitos em contextos multi-robot. Com base neste conceito, apresenta-se o MAESTRO, um sistema de coordenação centralizado e desenvolvido no INESC TEC, que integra o TEA* com módulos de supervisão e análise de grafos, viabilizando a operação de frotas heterogêneas em ambientes industriais reais.

Index Terms: Robótica móvel, Gestão de frotas, Planeamento de trajetórias, Algoritmo *Time Enhanced A** (TEA*), Coordenação multi-robot, Indústria 5.0, Navegação autónoma, Eficiência logística, MAESTRO.

I. INTRODUÇÃO

A Indústria 5.0 integra a robótica móvel inteligente para promover uma colaboração mais personalizada e eficiente entre humanos e máquinas no ambiente produtivo, com o propósito de revolucionar os processos produtivos e aumentar a sua eficiência. Neste âmbito, os *robots* móveis emergem como componentes centrais da transformação logística. Conforme referido em [1], a robótica industrial e móvel proporciona benefícios substanciais, incluindo o aumento da produtividade, precisão e repetibilidade, facultando a substituição das pessoas por máquinas em atividades perigosas ou extenuantes, ao mesmo tempo que se permite que os operadores se dediquem a tarefas mais cognitivas e criativas.

Esta crescente necessidade de *robots* móveis surge como resposta à demanda da indústria e dos serviços por uma maior eficiência, flexibilidade e automação em ambientes dinâmicos e cada vez mais exigentes. Esta elevada demanda por soluções de automatização e de apoio ao operador leva a que cada vez mais seja importante a componente de escalabilidade destes sistemas. Estes sistemas apresentam uma natureza intrínseca e multifacetada, exigindo soluções para a localização, perceção, mapeamento, planeamento de trajetórias e controlo de movimento. Dentre estes elementos, o planeamento de trajetórias reveste-se de especial importância no que toca à escalabilida-

de dos mesmos, por garantir que os *robots* se movimentem de forma eficiente, segura e coordenada, mesmo em ambientes dinâmicos e altamente compartilhados [2].

Em sistemas multi-robot, a previsão de conflitos e a alocação de rotas com separação temporal são determinantes para evitar situações de bloqueios [3], e a monitorização contínua com a capacidade de replaneamento adaptativo é uma característica essencial para garantir segurança e resiliência operativa. O gestor de frota, neste contexto, assume assim um papel semelhante ao de um controlador de tráfego aéreo: supervisiona múltiplas entidades móveis, assegura o cumprimento dos planos e inter-vém sempre que são detetadas perturbações que coloquem em risco o desempenho global do sistema.

O sistema desenvolvido no INESC TEC [4], apelidado MAESTRO, assenta numa arquitetura centralizada onde o gestor de frota utiliza o TEA* para atribuir rotas seguras e eficientes, considerando simultaneamente restrições espaciais e temporais. Ao contrário de soluções puramente reativas ou locais, o MAESTRO possui uma visão global do ambiente e das ordens de produção, o que lhe permite tomar decisões informadas que maximizam a fluidez do sistema.

Este artigo irá aprofundar como o TEA* funciona e falar do sistema de coordenação de frota do INESC TEC, o MAESTRO e a sua arquitetura e impacto na prática.

II. GESTÃO DE CONFLITOS E RECURSOS EM ROBÓTICA MÓVEL: O PAPEL DO PLANEAMENTO TEMPORAL

Ao longo do tempo, os algoritmos de planeamento de trajetórias evoluíram significativamente, acompanhando o avanço e a crescente adoção de *robots* móveis em ambientes industriais e de serviços. Inicialmente, esses algoritmos tinham como principal objetivo simplesmente calcular caminhos que permitissem ao robot deslocar-se de um ponto a outro. No entanto, com a proliferação de *robots* móveis a operar simultaneamente nos mesmos espaços, surgiram novos desafios relacionados com a coordenação, a segurança e a eficiência global do sistema. Assim, os objetivos do planeamento de trajetórias expandiram-se para incluir a gestão de conflitos em recursos partilhados, como corredores, estações de carregamento ou zonas de trabalho, exigindo algoritmos mais sofisticados capazes de otimizar o fluxo de múltiplos agentes em ambientes complexos e dinâmicos [3].

Existem duas grandes tipologias no que toca aos algoritmos de planeamento de trajetórias, esta classificação baseia-se no tipo de trajetórias que os *robots* efetuam:

- **Trajcetórias livres:** são caminhos calculados dinamicamente com base no ambiente atual, permitindo que o robot adapte a sua rota em tempo real para evitar obstáculos e