

# Planejamento de trajetória de robô móvel usando visão aérea

Vinícius Scariot<sup>1</sup>, Matheus Antônio Corrêa Ribeiro<sup>2</sup>

TCC II – Curso de Engenharia de Controle e Automação

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha  
Farroupilha, Brasil

Discente<sup>1</sup>, vscariot95@gmail.com<sup>1</sup>. Orientador<sup>2</sup>, matheus.ribeiro@farroupilha.ifrs.edu.br<sup>2</sup>

**Resumo** — Este artigo trata da implementação de um sistema de planejamento de trajetória baseado em imagens aéreas, integrado com um pequeno robô móvel. O dispositivo vem de encontro à crescente demanda por veículos autônomos. O principal objetivo do trabalho dentro da disciplina de TCC II do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFRS – Campus Farroupilha é a construção do referido sistema, que opera sobre plataforma computacional, adquire informações do ambiente por meio de uma câmera e guia o robô móvel por um caminho com obstáculos através do acionamento remoto dos motores, seguindo a premissa do menor custo energético. Para isso, ocorreram a montagem de um ambiente de testes, a implementação de um sistema de visão computacional e de um algoritmo de planejamento de trajetória. Foram obtidos os traçados das rotas a serem seguidas pelo veículo bem como, após sua movimentação, os pontos ocupados por ele para validação.

**Palavras-chave** — *planejamento de trajetória, robô móvel, visão computacional*

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda por veículos que sejam guiados sem a intervenção humana tem se tornado cada vez mais acentuada. Seja para agilizar o tráfego de encomendas em um centro de distribuição ou explorar ambientes inóspitos fora de nosso planeta, os veículos autônomos têm sido cada vez mais estudados e aperfeiçoados [1].

O mundo está na iminência da implementação do uso massivo desses veículos para o transporte de pessoas. De acordo com um dos estudos de mercado em andamento [2], de cada dez automóveis existentes, um será autônomo até o ano de 2030. Essa é a aplicação dos AGVs (*Automated Guided Vehicles*) com maior risco à vida, e para ela tendem a ser direcionados os esforços de desenvolvimento de novas tecnologias. Tais inovações podem, porém, ser compartilhadas com aplicações industriais ou aeroespaciais.

De encontro a esta realidade, as indústrias vêm tendo esforços conjuntos com órgãos públicos e comunidade acadêmica no sentido de buscar alternativas que tornem o transporte autônomo mais prático, seguro e confiável [3]. Isto se traduz na criação e atualização de legislações pertinentes e também em novos processos produtivos nas empresas. A partir de então, os projetos terão como principais requisitos a segurança intrínseca, facilidade de uso e elevada autonomia.

Unindo estes três conceitos, o sistema de navegação de um carro automaticamente guiado desempenha um papel fundamental em proporcionar uma rota rápida, segura e econômica entre o usuário e seu destino. Quanto a este sistema, pode-se dizer que é dividido em duas partes

fundamentais: módulo de mapeamento do entorno e módulo de localização geográfica [4].

O módulo de mapeamento do entorno possui sensores que detectam posição, velocidade, tamanho e natureza dos obstáculos próximos do veículo. Tais equipamentos incluem unidades de radar, interruptores, sensores ultrassônicos, câmeras de curta visão, acelerômetros e unidades ópticas a *laser*. A função destes é auxiliar o módulo a evitar colisões e fazer alterações pontuais de trajeto.

O módulo de localização geográfica, por sua vez, detecta a posição do veículo em relação a um espaço mais amplo, bem como obstáculos a longas distâncias. Tal sistema geralmente é baseado em GPS (*Global Positioning System*) ou outras tecnologias de demarcação via rádio, mas pode operar também por meio de câmeras de ampla visão. Nestas situações, os dados são utilizados para propiciar o planejamento da trajetória mais adequada entre o veículo e seu destino.

Dentro deste contexto, o objetivo geral do trabalho é implementar um sistema de planejamento de trajetória baseado em informações extraídas de imagens aéreas do ambiente. Para isso, foram cumpridos os seguintes objetivos específicos: montagem de um ambiente de testes, construção de um robô móvel, implementação de um sistema de comunicação entre o robô e um computador e desenvolvimento de um programa capaz de processar imagens e planejar trajetórias.

No capítulo II é apresentada a revisão bibliográfica, contendo alguns trabalhos similares a este. No capítulo III está a fundamentação teórica, destinada a explicar os princípios de funcionamento do dispositivo proposto. No capítulo IV está a seção de materiais e métodos, que descreve os recursos utilizados. Finalmente, no capítulo V estão os resultados e uma análise dos dados obtidos com os experimentos.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentadas as características, condições de implementação e resultados de alguns trabalhos similares ao realizado.

Em [5], foi proposto um sistema de processamento de imagem para orientação de um pequeno robô. Neste trabalho, imagens aéreas são utilizadas para planejar a rota a ser seguida pelo veículo. O processamento é feito por meio do *software MATLAB*, e a passagem de parâmetros ao robô através da tecnologia *Bluetooth*. O documento apresenta uma explicação sobre as etapas de processamento pelas quais passa a imagem e propõe o uso de otimizações do diagrama de Voronoi. Dentre as principais conclusões estão

a importância de uma interface gráfica para que o usuário possa acompanhar o deslocamento em tempo real e a necessidade de um sistema de comunicação estável e de alta confiabilidade. Ao final do estudo, verificou-se que a otimização do tipo correção em tempo real obteve os melhores resultados na relação entre o trajeto pretendido e o executado.

Com o objetivo de estudar a técnica de planejamento de trajetórias baseada em campos potenciais, o trabalho em [6] avalia a possibilidade de aplicar a técnica nas competições de robótica e para isso explica seu princípio de funcionamento: a soma das forças de atração entre o carro e a meta e das forças de repulsão entre este e os obstáculos. O estudo demonstra que este método é apropriado ao uso esportivo, já que é capaz de lidar bem com obstáculos em movimento, atualizando constantemente as condições que regem o movimento do robô.

A dissertação [7] investigou situações de aplicação do algoritmo A\* ao controle do movimento de um veículo terrestre autônomo. O método foi adaptado para suavizar a trajetória entre os pontos selecionados de acordo com o modelo cinemático do carro. A implementação em um veículo de testes em tamanho real possibilitou avaliar a eficiência do sistema, que se mostrou mais assertivo do que um motorista recém habilitado, porém impreciso se comparado a um condutor experiente.

Em [8] é projetado um sistema que utiliza imagens aéreas de um robô móvel programável *E-puck* se movendo em uma bancada para implementar o mesmo algoritmo. O trabalho ainda compara dois métodos de construção de grafos de visibilidade: convencional e de varredura do plano rotacional. Após testes, concluiu-se que o método de varredura é mais eficiente no que diz respeito ao tempo necessário para processamento. O trajeto gerado e, portanto, o tempo de deslocamento do carro, é igual para ambos os métodos.

O estudo [9] avalia a possibilidade do uso de um veículo aéreo não tripulado para tomar imagens do ambiente e, desta maneira, orientar um veículo terrestre. O caminho é gerado segundo o algoritmo de *Dijkstra*. Ao fim das simulações, os algoritmos projetados para o *drone* e para o carro demonstraram comportamento satisfatório. O sistema, porém, possui algumas limitações, como o fato de a região onde os veículos se movem ter de ser conhecida previamente. Cabe salientar que atualmente a maior parte das vias do planeta são mapeadas, o que aumentaria as chances de sucesso de uma implementação prática.

De maneira similar, o artigo [10] avalia a aplicação colaborativa de robôs móveis aéreos e terrestres. Neste trabalho, ambos os veículos deveriam seguir um alvo se movendo ao longo do terreno. Para isso, foi utilizada uma abordagem probabilística. No cenário proposto, o veículo aéreo acompanha o alvo enquanto tenta prever sua posição futura. As informações passadas por ele ao veículo em terra possibilitam que este elabore uma rota mais curta para interceptar o alvo. O sistema demonstrou-se perfeitamente funcional no âmbito das simulações.

Por fim, a pesquisa [11] utiliza imagens aéreas de uma bancada para gerar trajetórias seguidas por um robô móvel, de modo similar a [8]. Neste trabalho, porém, compara-se cinco algoritmos de busca em grafo: busca em largura, busca em profundidade, busca gulosa, algoritmo de *Dijkstra*

e algoritmo A\*. Ao final do estudo, conclui-se que o A\* é o algoritmo mais eficiente (apesar da busca gulosa ter apresentado resultados melhores neste caso), pois gera o menor caminho e tem o segundo menor tempo de busca em relação aos demais.

### III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, será realizada uma breve fundamentação da teoria dos temas mais relevantes do trabalho: visão computacional, planejamento de trajetórias e algoritmo A\*.

#### A. Visão Computacional

Conforme [12], a visão computacional é uma área de estudo voltada a desenvolver sistemas que emulem a visão humana e os processos cognitivos a ela associados. Podemos dizer que trata-se de um sistema de visão artificial. Não existe um limite claro entre o processamento de imagens e a visão computacional.

A manipulação de imagens possui uma série de etapas básicas. Os processos utilizados estão listados no diagrama de blocos da Fig. 1.

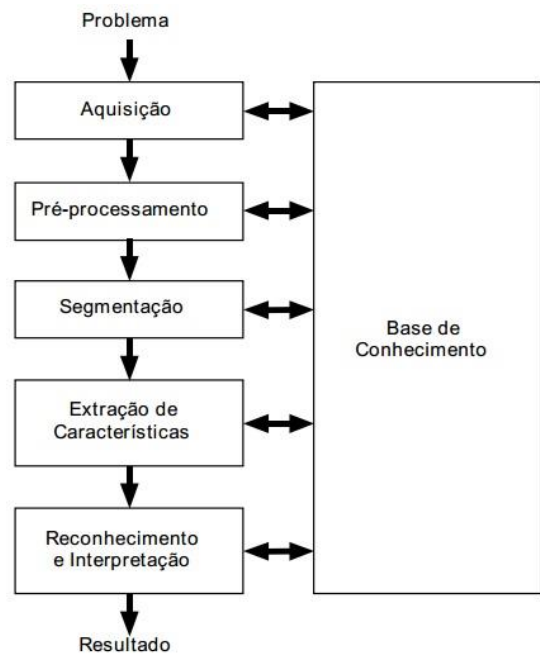


Figura 1 – Etapas do processamento de imagem. Adaptado de [12].

A etapa de aquisição compreende todos os processos necessários à entrada da imagem que se deseja tomar por base no sistema [13]. No caso de uma imagem gerada por câmera digital, a aquisição começa com o sensor utilizado e seus milhões de transistores sendo impressionados pela luz. A seguir, os padrões luminosos são convertidos em impulsos elétricos. A interpretação e agrupamento destes forma a imagem, cuja unidade fundamental é o *pixel*. Ela será então transmitida até a central de processamento, dentro da qual transita na memória. A fotografia pode passar ainda por conversão e redimensionamento para adentrar a aplicação.

O pré-processamento consiste na aplicação de técnicas voltadas ao aprimoramento da qualidade da imagem para as fases seguintes. Os recursos utilizados incluem ajustes de contraste e brilho, filtros para suavizar (passa-baixa) ou realçar (passa-alta) áreas, e alterações geométricas para ampliar, redimensionar, girar, espelhar ou emoldurar a imagem [12].

Segmentar significa dividir uma imagem em objetos ou partes fundamentais [12]. De maneira simples, imagens geradas por uma câmera são divididas para que se verifique o que está contido em cada um dos fragmentos. Assim, é possível tomar determinadas ações para cada um dos elementos presentes na imagem. Auxiliam nesta etapa os processos de limiarização e filtragem de cores. O primeiro transforma os *pixels* de uma imagem em preto quando o valor está abaixo de um limite e em branco quando o valor está acima dele. O segundo mantém regiões das cores selecionadas e descarta as demais. Dois outros processos que podem ser utilizados na segmentação são a dilatação e a erosão, cujos objetivos são unir e dividir regiões, respectivamente. Cores e bordas são poderosos elementos no que tange à descrição das propriedades de um objeto. Na segmentação, as cores de certas porções da imagem podem ser utilizadas para definir regiões de interesse. O arranjo entre áreas de cores diferentes pode indicar parâmetros como a posição e orientação de um móvel, por exemplo [13].

Justamente a cor e outros descritores de objetos são utilizados na fase de extração de características. Estes identificam atributos como forma geométrica, material, posição, entre outros. Os elementos de descrição podem ser divididos basicamente em fronteiros, regionais e relacionais. Podem ser citados como exemplos destas classes perímetro de borda, textura de região ou padrão de furações, respectivamente [13]. Os descritores são traduzidos pelo sistema em sequências numéricas e guardados em estruturas de memória computacional próprias, para posterior utilização. Por si só, estas séries de valores não representam ao operador qualquer informação útil.

Só na última etapa, de reconhecimento e interpretação, é que os elementos da imagem recebem rótulos de acordo com suas características [12]. Também avalia-se o estado do conjunto formado por eles para determinar o que se passa. De acordo com tal análise, é possível escolher a melhor maneira de atuar sobre o sistema. Este é o processo da visão computacional que corresponde às funções cognitivas do ser humano, extraindo de padrões de imagem informações que podem embasar decisões.

Tudo isso só ocorre graças a uma série de informações pré-existentes, unidas e organizadas de modo a produzir o efeito desejado [12]. Esse compêndio se denomina base de conhecimento. Ela é utilizada na construção da aplicação que opera o sistema, e se origina a partir da interpretação do programador a respeito do problema abordado e dos materiais de referência de que dispõe.

### B. Planejamento de Trajetórias

Uma trajetória é um caminho específico dentre todos aqueles que conectam um ponto de origem e um destino. A

escolha de um deles em detrimento de outros seguindo uma lógica é o que diferencia o planejamento de trajetórias do movimento aleatório. Esta decisão é pautada em condições particulares de cada cenário e pode levar em conta distância, tráfego, paradas intermediárias, entre outros. Segundo *Latombe* [14], apresentado em [15], podemos citar três métodos clássicos nos quais são baseados os sistemas conhecidos: mapa de rotas, decomposição de células e campos potenciais.

O mapa de rotas é um conjunto de linhas no espaço de trabalho que promove a ligação de pontos de interesse. A criação destes segmentos obedece a diferentes requisitos. No caso do grafo de visibilidade, um dos tipos de mapa mais utilizados, o objetivo é construir caminhos por meio de estruturas poligonais. Já no diagrama de *Voronoi* (vide Fig. 2), outro bastante popular, a construção se dá através de arcos, a fim de maximizar a distância entre a trajetória e os obstáculos.

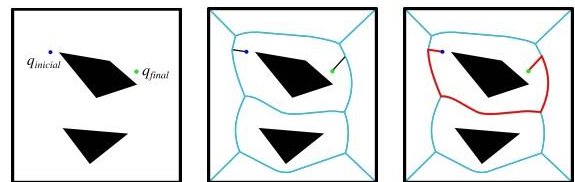


Figura 2 – Diagrama de Voronoi. Adaptado de [15].

A decomposição de células (vide Fig. 3) consiste em dividir o espaço de trabalho em inúmeras regiões menores, para que um móvel trafegue por elas entre dois pontos [16]. O objeto só pode ocupar células em que nenhum obstáculo estiver presente. A partir dos espaços livres, faz-se uma contagem para determinar qual é a menor trajetória possível. Este método também permite verificar se o móvel passará por caminhos estreitos ou sinuosos. Esta técnica pode ser dividida em decomposição exata de células e decomposição aproximada de células [16]. Na decomposição exata, o espaço é partido em divisões de tamanho variável, de modo a cobrir toda sua área livre. Note-se que os obstáculos não estão contidos nas células. Já na decomposição aproximada, a área é dividida em porções de tamanho fixo. Células ocupadas total ou parcialmente pelos obstáculos são desconsideradas no cálculo da trajetória desejada.

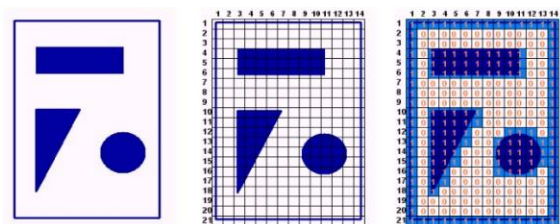


Figura 3 – Exemplo de decomposição de células. Adaptado de [16].

O método baseado em campos potenciais (vide Fig. 4) faz uma analogia com a atração entre partículas carregadas e o movimento de um objeto [6]. O móvel é atraído pelo destino, ao passo que é repellido pelos obstáculos. Partindo desse preceito e com o auxílio das equações adequadas, cria-se sobre o espaço de trabalho um campo vetorial que mostra a provável trajetória do objeto entre dois pontos quaisquer.

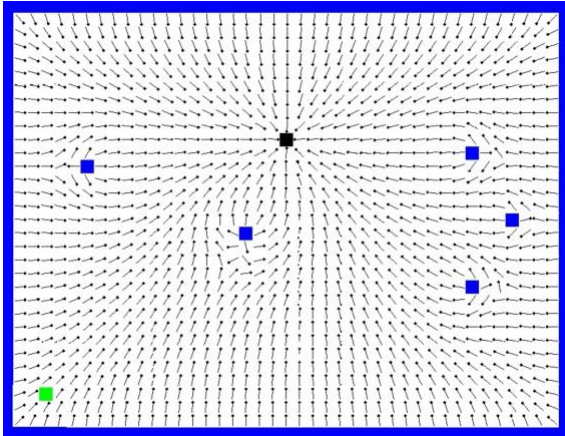


Figura 4 – Campos potenciais. Adaptado de [6].

Existem ainda os métodos modernos de planejamento, ditos reativos ou heurísticos. Neles, a trajetória é composta e otimizada com o passar de iterações. Pertencem a esta categoria o algoritmo genético, a lógica difusa, as redes neurais, o algoritmo vaga-lume, a otimização de nuvem de partículas, a otimização de colônia de formigas, o algoritmo de busca Cuckoo, a otimização de colônia de bactérias, o algoritmo de colônia artificial de abelhas, o algoritmo de salto aleatório, entre outros [17].

### C. Algoritmo A\*

O algoritmo A\* é apresentado em [18]. Este é um método heurístico baseado em grafos para otimização de trajetórias que resulta da combinação de diversas aproximações, como a busca em largura e o algoritmo de *Dijkstra* [19]. A partir de um sistema com uma série de nós no espaço, procede-se avaliação segundo a Eq. (1), em que  $f(n)$  é o custo (odométrico) da solução que passa pelo nó  $n$ ,  $g(n)$  é o custo para alcançar o nó  $n$  e  $h(n)$  é uma função heurística arbitrária, que estima o custo para atingir a meta a partir do nó  $n$ .

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

Uma importante limitação do algoritmo está no fato de que os obstáculos devem ser compostos de regiões poligonais, ou reduzidos a elas. Auxilia neste processo a decomposição em células, pois estas sempre descrevem polígonos.

O processamento ocorre através da passagem de pontos entre duas listas: lista fechada e lista aberta. Na lista aberta estão os nós que ainda não passaram por avaliação, e na lista fechada ficam os nós que já foram avaliados e ordenados. Cada nó é retirado da lista aberta e seus filhos

(os nós expandidos a partir dele) são avaliados. O nó é movido para a lista fechada e o filho de menor custo odométrico é que agora passará por análise. O processo se mantém até que o nó analisado seja o nó de destino.

## IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, a partir do objetivo de implementar um sistema de planejamento de trajetória baseado em informações extraídas de imagens aéreas do ambiente, será abordada a forma de execução do trabalho.

A interação dos componentes de *hardware* do sistema segue o processo descrito no diagrama de blocos da Fig. 5. A seguir, estão relacionadas algumas especificações quanto aos subsistemas que integram o projeto.

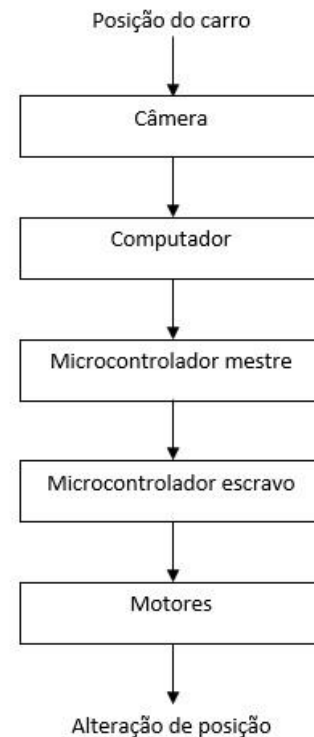


Figura 5 – Interação dos componentes de *Hardware* do sistema. Do autor.

### A. Ambiente de testes

O ambiente de testes consiste em uma bancada retangular plana sustentada por apoios, com 650 mm de largura e 1100 mm de comprimento, e um suporte de câmera, conforme a Fig. 6.

A área útil da bancada (0.715 m<sup>2</sup>), é revestida de material preto de baixa reflexividade, possibilitando às rodas do carro realizarem tração e, desta forma, movimentarem o mesmo. A área é demarcada com pintura em alto contraste, para facilitar o processamento das imagens geradas.

A bancada conta ainda com um sistema de iluminação dedicado à câmera, a fim de eliminar variações de luminosidade que tornam o sistema instável. O mesmo é composto de uma lâmpada de bulbo e um cabo com receptáculo e plugue.



Figura 6 – Bancada e suporte de câmera. Do autor.

### B. Robô móvel

O robô desenvolvido para ocupar a área de testes tem sua disposição mostrada na Fig. 7. Ele está totalmente contido em um cubo de 75 mm de aresta, o que permite que passe pelos obstáculos sem que ocorram colisões.

O carro é capaz de mover-se pelo piso da estação de maneira autônoma, para que possam ser realizadas as demonstrações. Para tanto, conta com dois motores, responsáveis pelos movimentos lineares, que ocorrem na bancada de maneira longitudinal (eixo Y) e transversal (eixo X), e também pelos de rotação. Ambos são dotados de rodas revestidas com material emborrachado, melhorando o contato com a superfície do ambiente de testes. Um pacote de baterias fornece a energia necessária ao funcionamento do sistema, podendo ser retirado do veículo para recarga.

Outra característica importante é a capacidade de comunicar-se com a estação, para que esta lhe envie os comandos necessários ao deslocamento. Na ausência de comunicação, o robô cessa seu movimento.

O veículo autônomo conta com um marcador visual em seu topo, por isso é perfeitamente visível ao sistema quanto à sua posição. Assim, pode-se definir o ponto da trajetória no qual se encontra. Através da filtragem de cores primárias, é possível determinar as coordenadas do

marcador e, conseqüentemente, do robô. Não é necessário determinar o ângulo de orientação do veículo, uma vez que ele inicia o trajeto sempre na mesma direção e somente realiza giros de 90°.

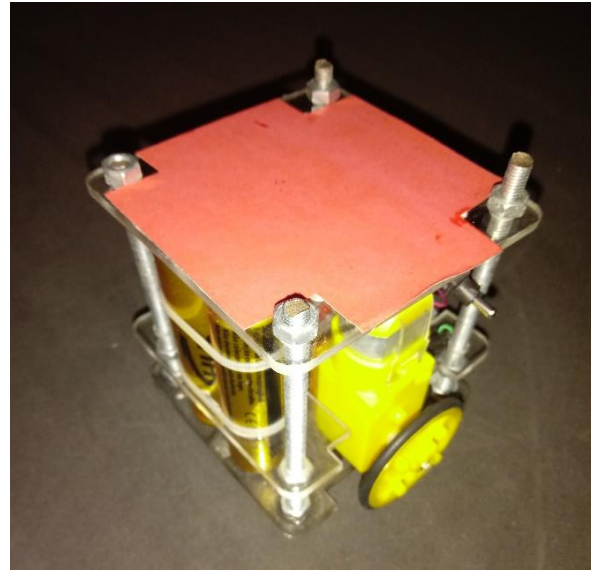


Figura 7 – Robô móvel programável. Do autor.

### C. Comunicação entre a unidade de processamento e o veículo

A comunicação entre o computador contendo a aplicação de processamento de imagens e o robô que se move em campo é feita através do uso de transceptores de rádio NRF24L01 acoplados a microcontroladores (vide Fig. 8).



Figura 8 – Placa *Arduino* Uno e módulo de comunicação sem fio NRF24L01. Do autor.

No sistema implementado, são utilizados dois chips *Atmel* ATmega 328. Um deles, chamado de mestre, fica conectado à unidade de processamento. O outro, chamado de escravo, está acoplado ao veículo autônomo.

As mensagens produzidas pelo mestre são consumidas pelo escravo, de forma unidirecional (vide Fig. 9). A aplicação presente no veículo monitora a chegada de novos comandos e faz o acionamento dos motores conforme os dados recebidos. Se nenhum novo comando for enviado a ele em 50 milissegundos, os motores são desligados e o

veículo só volta a se mover com a chegada de uma nova ordem.

Assim, é fornecida uma interface sem fios rápida e eficiente. A comunicação entre os módulos NRF24L01 opera na frequência de 2.4 GHz com taxa de 250 kbps [20] e não depende de nenhum tipo de infraestrutura de rede.

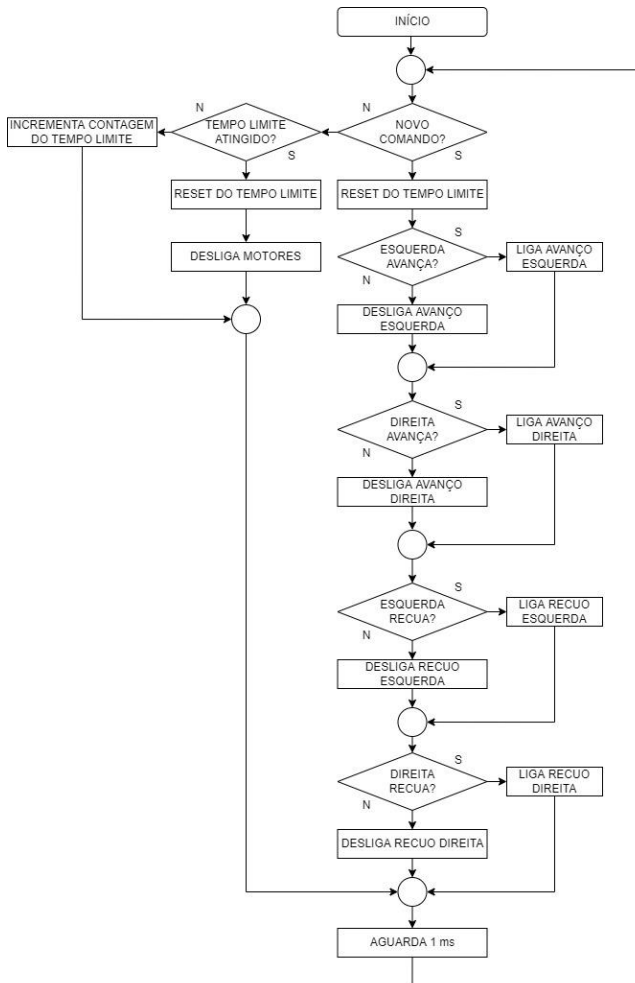


Figura 9 – Rotina do microcontrolador escravo. Do autor.

#### D. Aquisição e processamento das imagens

Neste sistema, as imagens da bancada de testes são captadas pela câmera de um *smartphone* posicionado no suporte, de modo a fornecer uma vista aérea da área demarcada. Esta câmera conta com balanço automático de luz e brancos e também com ajuste automático de foco, o que minimiza os efeitos de eventuais deficiências de iluminação. As imagens são enviadas ao computador com a aplicação principal (situado em local adjacente) por meio de uma rede *Wi-Fi* pelo aplicativo *IP Webcam* [21].

O programa foi desenvolvido conforme o fluxograma da Fig. 10, utilizando a linguagem *Python* e a biblioteca de processamento de imagens *OpenCV*. Com o uso desta biblioteca, foram executadas alterações nas imagens no âmbito de seus *pixels* [22]. O recurso também possibilitou a realização de operações como corte, redimensionamento e aplicação de máscara. Todas estas ferramentas foram úteis para cumprir as etapas do processamento implementado.

A imagem vinda da câmera passa pela aplicação de binarização por limiar, para que se realcem os contornos da bancada e dos obstáculos. A seguir, ocorre a filtragem de cores primárias para definir a posição do robô, a partir de seu marcador.

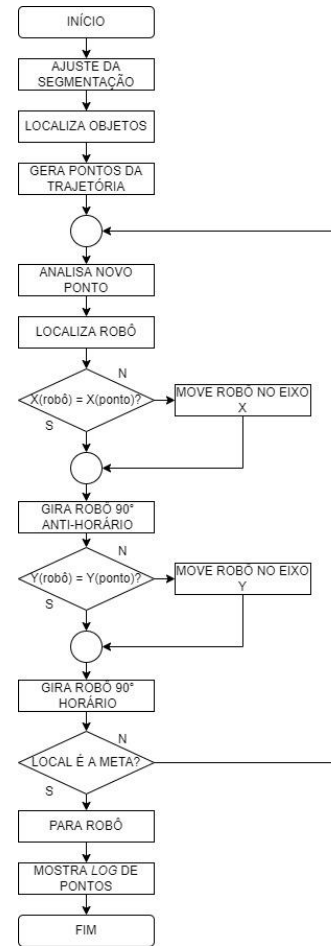


Figura 10 – Rotina da aplicação principal. Do autor.

A etapa seguinte envolve a alteração da morfologia dos elementos da imagem. O processo de erosão é responsável por eliminar falhas em regiões binarizadas, enquanto o processo oposto, de dilatação, reconstitui as dimensões originais das marcações e dos obstáculos, e ainda fornece uma margem de segurança para evitar colisões.

Por fim, a imagem é segmentada, isto é, são definidas as regiões de interesse. Desta forma é possível determinar se um ponto qualquer pertence ao espaço livre ou a um obstáculo. Após todas as etapas de processamento, a imagem resultante é utilizada como base para o algoritmo de planeamento de trajetórias.

#### E. Planeamento de trajetórias

As informações extraídas da imagem são utilizadas no planeamento da trajetória entre o veículo e o destino. Para isso é utilizado o algoritmo  $A^*$ , por conta da simplicidade

de implementação e pela trajetória fornecida, que é a mais curta.

De posse da localização dos pontos de interesse do sistema, é construído o grafo de visibilidade. A seguir, é avaliado o custo do movimento entre cada ponto e seus possíveis sucessores na trajetória. Este processo se mantém até o último local, que coincide com o destino selecionado pelo usuário. Só então, de posse dos pontos pertencentes à trajetória e dos segmentos de reta que os ligam, é que o veículo inicia a viagem, realizando movimentos nos eixos X e Y de maneira alternada, separados por rotações de 90° em torno do próprio eixo.

Foi desenvolvida uma interface gráfica para que o usuário possa acompanhar a evolução do movimento do veículo. No início do experimento, é mostrado o caminho a ser seguido pelo robô. Sempre que ele atinge um ponto de interesse da trajetória, uma nova imagem é exibida. Quando conclui a tarefa, são apresentados os pontos pelos quais transitou.

## V. RESULTADOS

A fim de validar a construção do sistema, foram propostos quatro diferentes circuitos a serem percorridos pelo robô, como mostra a Fig. 11.

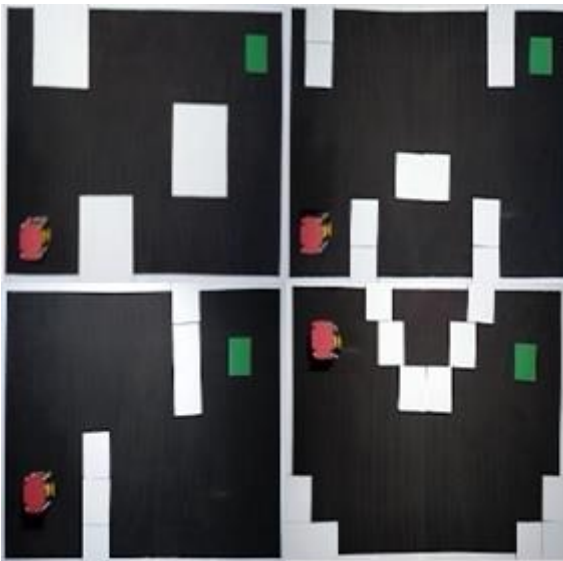


Figura 11 – Circuitos experimentais. Do autor.

As trajetórias a serem percorridas pelo veículo, geradas pela aplicação do algoritmo A\*, aparecem na Fig. 12. Em destaque, temos as posições do carro e da meta. O caminho real difere do ideal, e isso se deve às imperfeições mecânicas e limitações do sistema de visão computacional. Durante o deslocamento, foi aplicada uma correção do tipo histerese, que atua quando o robô deixa a faixa de tolerância estipulada em torno da trajetória desejada. Os pontos ocupados pelo carro ao longo da viagem podem ser vistos na Fig. 13.

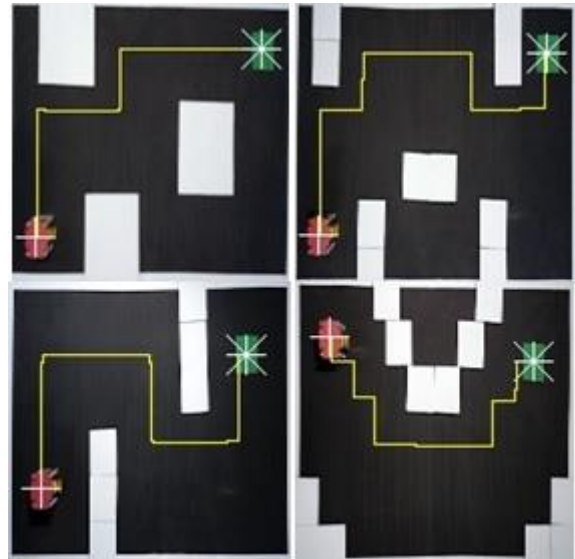


Figura 12 – Trajetórias geradas. Do autor.

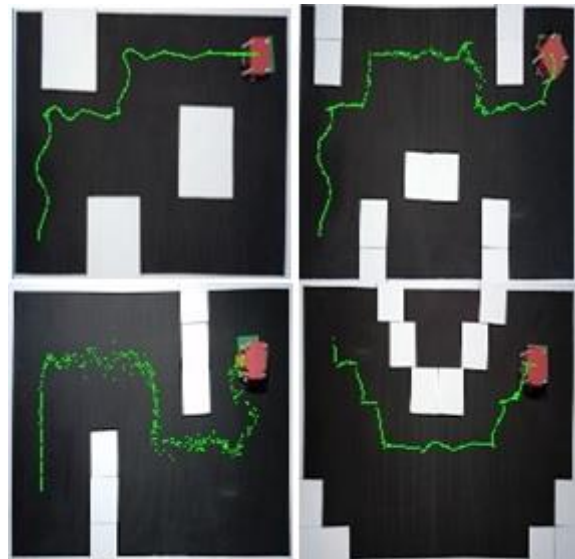


Figura 13 – Pontos ocupados pelo carro. Do autor.

No primeiro trajeto, é possível notar que ocorreram diversas oscilações, enquanto no segundo aparecem alguns trechos retos. No terceiro circuito observa-se pontos dispersos, resultantes de detecções de localização errôneas, já no último há predominância de trechos retos com oscilações pontuais.

Durante os testes, cogitou-se a possibilidade de a meta coincidir com um ponto impossível de ser atingido pelo veículo, como no exemplo da Fig. 14. A mensagem de erro emitida pelo programa mostra que não existem caminhos válidos entre robô e meta.



Figura 14 – Exemplo de circuito inválido. Do autor.

## VI. CONCLUSÃO

Dentro da proposta de implementar um sistema de planejamento de trajetória baseado em informações extraídas de imagens aéreas do ambiente, os resultados obtidos na prática condizem com as simulações.

A pequena discrepância ao percorrer a trajetória planejada se deve a aspectos construtivos, algo tolerável dentro das condições de execução do projeto. Através dos experimentos, foi possível validar resultados de simulações e perceber algumas limitações do sistema.

Apesar de compacta (devido a limitações na disponibilidade de materiais para construção), a bancada construída se mostrou eficiente em abrigar os elementos do sistema. A demarcação do tablado e a pintura dos obstáculos possibilitaram uma fácil identificação pelo sistema de visão computacional.

O veículo construído demonstrou autonomia e facilidade de controle, porém diferenças construtivas em suas partes causaram anomalias nas trajetórias executadas pelo mesmo. Não se fez possível sua movimentação de forma contínua, mas por meio de pulsos, uma vez que a aquisição e o processamento das imagens não puderam ser feitos de maneira suficientemente rápida para captar a localização em tempo real na primeira condição. Além disso, o tamanho reduzido dificultou sua localização. O aperfeiçoamento destas funcionalidades constitui uma oportunidade de estudos futuros.

A integração do sistema de visão computacional com o algoritmo de busca aconteceu de maneira bastante simples. Sua matriz de saída foi utilizada como argumento de entrada do sistema de planejamento de trajetória, informando-lhe posição, tamanho e forma dos obstáculos.

As principais dificuldades encontradas se relacionam com a variação de luminosidade ao longo do tempo e o

aparecimento de zonas de sombra no tablado. Todas foram sanadas pelo uso de iluminação complementar.

Passadas estas etapas, se deu o desenvolvimento de uma solução completa na área de engenharia: um sistema de visão computacional funcional que se comunica sem fios com um carro em campo para passar a estas instruções que auxiliam na resolução de um problema de maneira inteligente.

## REFERÊNCIAS

- [1] Laboratório de Aprendizagem em Logística e Transportes da Unicamp: Veículos autônomos e seus benefícios para a logística. Disponível em <http://lalt.fec.unicamp.br/index.php/2018/10/05/os-veiculos-autonomos-e-seus-beneficios-para-a-logistica/>. Acesso em 05/08/2021.
- [2] Statista: *Projected sales of autonomous vehicles worldwide from 2019 to 2030*. Disponível em <https://www.statista.com/statistics/1230733/projected-sales-autonomous-vehicles-worldwide/>. Acesso em 29/05/2021.
- [3] Instituto de Referência em Internet e Sociedade: Carros Autônomos: Desafios e Perspectivas. Disponível em <https://irisbh.com.br/carros-autonomos-desafios-e-perspectivas/>. Acesso em 05/08/2021.
- [4] Priscilla Kinast: O que é o SLAM? Entenda a tecnologia por trás dos carros autônomos. Disponível em <https://www.oficinadnet.com.br/carrosautonomos/24944-o-que-e-o-slam-entenda-a-tecnologia-por-tras-dos-carros-autonomos>. Acesso em 05/08/2021.
- [5] J. A. T. Velásquez, R. R. V. Ávila, F. M. Santa, “Procesamiento de Imágenes para la Planeación de Rutas para Robots Móviles Basados en Lego Mindstorms NXT”, *Redes de Ingeniería*. Colômbia, vol. 5, pp. 16-27, dezembro de 2014.
- [6] M. B. Santos *et al*: Planejamento de Caminhos para Robôs Móveis Autônomos Utilizando Campos Potenciais. Disponível em <http://sistemaolimpico.org/midias/uploads/5e42afb4b6825b9f749cef3bd43c5649.pdf>. Acesso em 26/05/2021.
- [7] M. A. Gonçalves: Algoritmo A-Estrela de estado híbrido aplicado à navegação autônoma de veículos. Disponível em <http://repositorio.ufes.br/handle/10/6369>. Acesso em 04/07/2021.
- [8] M. S. Sumbal, “Environment Detection and Path Planning Using the E- puck Robot”, *International Research Journal of Engineering and Technology*. Índia, vol. 3, pp. 54-62, janeiro de 2016.
- [9] F. B. de Sá *et al*, “Planejamento de Trajetória para um Robô Móvel usando Imagens Capturadas por um VANT: Conceitos e Resultados Preliminares”, *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*. Brasil, pp. 4013-4020, setembro de 2014.
- [10] H. Yu *et al*, “Probabilistic Path Planning for Cooperative Target Tracking Using Aerial and Ground Vehicles”, 2011 American Control Conference. EUA, pp. 4673-4678, junho de 2011.
- [11] M. M. Cunha: Planejamento de Caminho de Robôs Futebolistas Utilizando Busca em Grafo. Disponível em <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/2571>. Acesso em 04/07/2021.
- [12] O. M. Filho, H. V. Neto, *Processamento Digital de Imagens*, 1ª ed., Rio de Janeiro: Brasport, 1999.
- [13] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Processamento Digital de Imagens*, 3ª ed., São Paulo: Pearson, 2010.
- [14] J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, 1ª ed., Boston: Springer US, 1991.
- [15] A. O. Barradas Filho, P. P. M. Farias, R. A. L. Rabêlo, *Minicursos da ERCEMAPI e EAComp 2019*, 1ª ed., Porto Alegre: SBC, 2019, pp.70-90.
- [16] G. L. Ottoni, W. F. Lages, “Navegação de Robôs Móveis em Ambientes Desconhecidos Utilizando Sonares de Ultra-



- som”, Revista Controle & Automação. Brasil, vol. 14, pp. 402-411, novembro de 2003.
- [17] B. K. Patle *et al*, “A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot”, Defense Technology. Holanda, vol. 15, pp. 582-606, abril de 2019.
- [18] P. E. Hart, N. J. Nilsson, B. Raphael, “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths”, IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics. EUA, vol. 4, pp. 100-107, julho de 1968.
- [19] B. C. Zanchin: Análise do Algoritmo A\* (A Estrela) no Planejamento de Rotas de Veículos Autônomos. Disponível em [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10221/1/PG\\_COELE\\_2018\\_1\\_03.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10221/1/PG_COELE_2018_1_03.pdf). Acesso em 09/07/2021.
- [20] Nordic Semiconductor: nRF24L01+ Product Specification v1.0. Disponível em [https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF24L01P\\_PS\\_v1.0.pdf](https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF24L01P_PS_v1.0.pdf). Acesso em 29/06/2021.
- [21] Pavel Khlebovich: IP Webcam. Disponível em [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.pas.webcam&hl=pt\\_BR&gl=US](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.pas.webcam&hl=pt_BR&gl=US). Acesso em 13/10/2021.
- [22] M. Marengoni, D. Stringhini, “Tutorial: Introdução à Visão Computacional usando OpenCV”, RITA. Brasil, vol. 16, pp. 125-160, março de 2010.