

LiDAR para Condução Autônoma

Diana Laura Fernández Duarte (INATEL)¹, Alfredo Jesús Arbolaez Fundora (INATEL)²
diana.duarte@mtel.inatel.br¹, alfredo.fundora@mtel.inatel.br²

Resumo—Os veículos autônomos devem ser capazes de perceber com precisão o ambiente ao seu redor, para identificar outros veículos, pedestres ou obstáculos na estrada a fim de evitar possíveis acidentes. Essa necessidade levou as principais empresas do setor automotivo a incorporar a tecnologia LiDAR em seus carros. Este relatório apresenta uma visão geral do LiDAR automotivo com base em uma análise da literatura existente, abrangendo seus elementos constituintes, princípios de medição e escaneamento, bem como as principais vantagens e desvantagens dessa tecnologia. Por fim, são apresentadas as implementações práticas do LiDAR e as pesquisas em andamento.

I. INTRODUÇÃO

Os acidentes rodoviários matam 1,3 milhão de pessoas por ano, enquanto 50 milhões ficam gravemente feridas, de acordo com um relatório publicado pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 30 de junho de 2022 [1]. Para aumentar a segurança nas estradas e reduzir drasticamente esses números anuais de acidentes rodoviários, a direção autônoma não é mais uma visão futurista, mas uma realidade cada vez mais presente. Os Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista (ADAS) equipam os veículos com a capacidade de dirigir, acelerar e frear automaticamente sob a supervisão ativa do motorista. Os veículos autônomos têm sensores, como câmeras, radar e sensores de Medição e Detecção de Luz baseados em Laser (LiDAR), que permitem que eles construam o ambiente ao seu redor [2].

As câmeras podem identificar a cor, a forma, a orientação e a textura de um objeto; no entanto, em condições climáticas adversas e em cenários com pouca luz, elas são ineficientes. Os radares medem a distância e a velocidade dos objetos em seu campo de visão, que pode chegar a 110° com a seleção correta de antenas. Para obter uma cobertura de 360°, é necessário combinar vários radares distribuídos em diferentes partes do veículo. Essa limitação é superada pelo LiDAR, que é capaz de fornecer uma imagem tridimensional precisa do ambiente em 360°, o que é fundamental para o futuro da direção autônoma [2]. Um de seus principais desafios se deve à sua baixa capacidade de coletar informações semânticas, portanto, na prática, eles tendem a ser com-

binados com câmeras para complementar as deficiências de cada um [3].

Este artigo apresenta uma pesquisa sobre a tecnologia LiDAR no setor automotivo. As especificações técnicas, os princípios de medição, os modelos de escaneamento e as principais vantagens e desvantagens são apresentados nas Seções II, III, IV e V, respectivamente. Algumas de suas implementações e casos de uso são discutidos na Seção VI e, por fim, a Seção VII apresenta as conclusões obtidas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

II. CONCEITOS BÁSICOS DO LiDAR

O LiDAR é uma tecnologia de sensoriamento remoto que consiste no envio de pulsos ópticos com modulação de amplitude para estimar a distância entre o scanner e diferentes objetos no ambiente, com base no tempo de voo. Ele consiste em um diodo de laser responsável pela emissão dos pulsos de luz e um fotodetector para capturar o sinal refletido pelos objetos ao redor. A diferença entre os pulsos emitidos e refletidos é proporcional à distância entre o sensor e os alvos. O processo é repetido em vários pontos específicos, criando uma nuvem de pontos tridimensional. Os dados coletados são então verificados quanto a ruídos anômalos e redundâncias e convertidos em um formato de arquivo LAS. Isso permite a visualização de um mapa detalhado do terreno para orientar com segurança os veículos autônomos em ambientes altamente dinâmicos [2–4].

A. Faixa de Detecção

O alcance de detecção de um LiDAR é altamente dependente da potência de transmissão e é expresso como uma função das distâncias mínima e máxima alcançáveis, calculadas sob condições controladas com objetos com 80% de refletividade difusa. Devido à interferência da luz solar ou à refletividade do objeto detectado, esse intervalo pode variar um pouco em condições reais [4]. Os intervalos de detecção geralmente variam de alguns metros a mais de 200 metros [5].

B. Potência de Transmissão

A importância da segurança dos olhos em aplicações veiculares leva a certas limitações na potência máxima

do laser, regidas pela norma IEC 60825. Essas restrições podem reduzir o alcance do LiDAR e torná-lo mais vulnerável a ruídos, exigindo o uso de algoritmos avançados de processamento de sinais [4].

C. Comprimentos de Onda

Os primeiros sistemas LiDAR operavam em 905 nm devido à compatibilidade, ao baixo custo e à fácil disponibilidade de diodos de silício no mercado. No entanto, sua potência máxima de transmissão era limitada pelo possível dano ocular associado ao uso desse comprimento de onda. Posteriormente, os lasers começaram a operar em 1550 nm, oferecendo vantagens significativas em termos de segurança ocular, pois nesse comprimento de onda a luz é absorvida pelas camadas externas do olho, evitando danos à retina. Ao mesmo tempo, sua implementação é mais cara, pois exige o uso de diodos e detectores feitos de materiais mais exóticos, como fosfeto de índio (InP), arseneto de gálio (GaAs) e arseneto de índio e gálio (InGaAs). Como a luz em 1550 nm é mais facilmente absorvida em determinadas condições climáticas, como chuva, neblina ou umidade, os sistemas LiDAR em 905 nm ainda são comuns [3, 4].

D. Campo de Visão

O campo de visão (FoV) dos sistemas LiDAR é definido pelos azimutes e ângulos verticais nos quais os feixes de luz são emitidos. Alguns sistemas LiDAR oferecem um FoV horizontal de 360 graus, seja usando sensores mecânicos baseados em rotores, que giram continuamente para cobrir todo o ambiente, seja combinando a saída de vários sensores com FoV menor [3, 4].

III. PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO LiDAR

Dependendo do alcance, da precisão necessária e do orçamento disponível para a implementação do sistema, a distância até um alvo pode ser estimada por emissão de ondas pulsadas ou contínuas. As técnicas usadas são apresentadas a seguir.

A. LiDAR de Pulso

O LiDAR de pulso é a técnica de medição mais simples e econômica, consistindo na emissão de pulsos de luz e no uso de temporizadores precisos ou Conversores de Tempo para Digital (TDC) para a estimativa do atraso de ida e volta dos feixes de luz. A distância R é calculada de acordo com a Equação I, em que c representa a velocidade da luz e τ indica o tempo de voo [2–4].

$$R = \frac{1}{2} \times c \times \tau \quad (1)$$

B. Onda Contínua Modulada em Amplitude (AMCW)

A técnica AMCW envolve a emissão de uma onda contínua com modulação de amplitude em vez de pulsos agudos. A distância é calculada a partir da mudança de fase entre o sinal transmitido e o sinal refletido pelo alvo, dividindo o sinal refletido em uma série de janelas de integração para análise em diferentes intervalos de tempo. A Equação II permite o cálculo dessa distância R , em que $\Delta\Phi$ representa a mudança de fase entre os sinais e f_m a frequência de modulação [2–4].

$$R = \frac{c \times \Delta\Phi}{4 \times f_m} \quad (2)$$

C. Onda Contínua Modulada em Frequência (FMCW)

A técnica CWFM emite uma onda de luz contínua modulada linearmente em frequência. O objeto a ser detectado deve estar localizado a uma distância tal que o tempo de voo do sinal refletido seja menor do que o período de modulação. Um detector coerente compara o sinal refletido e o sinal emitido pelo oscilador local para estimar a diferença de frequência constante entre eles, proporcional à distância entre o sensor e o alvo. A Equação III permite o cálculo da distância R como uma função de f_R , em que c representa a velocidade da luz, T o período da rampa e B a largura de banda. Se o objeto estiver se movendo, é importante considerar que a diferença de frequência f_R depende não apenas da distância até o objeto, mas também do efeito Doppler [2–4].

$$R = \frac{c \times f_R \times T}{2B} \quad (3)$$

IV. SISTEMAS DE ESCANEAMENTO

Há diferentes arquiteturas para recriar o ambiente de um veículo, que implementam as técnicas de medição discutidas acima. As arquiteturas tradicionais são descritas abaixo, classificadas de acordo com a presença ou ausência de componentes rotativos, bem como abordagens mais inovadoras.

A. Rotação Mecânica

A técnica de rotação mecânica envolve o uso de um motor mecânico que gira um conjunto de espelhos oscilantes ou poligonais, proporcionando um FoV horizontal de 360° e diferentes faixas de FoV vertical, definidas pelo número de emissores/receptores integrados. Ela alcança uma alta relação sinal-ruído (SNR) em um amplo FoV, razão pela qual é a técnica de escaneamento mais popular entre as principais empresas

do setor automotivo, embora também apresente algumas desvantagens em termos de volume, peso, consumo de energia, custo e inércia que acrescenta ao sistema [3, 4].

B. Estado Sólido

Os sistemas LiDAR de estado sólido não integram componentes mecânicos rotativos, o que limita seu FoV. Algumas propostas sugerem a implementação de vários sensores na frente, na lateral e na traseira dos carros, de modo que o FoV resultante seja mais amplo, sendo mais econômico do que os sistemas LiDAR com rotação mecânica. O LiDAR de estado sólido tem vários métodos de implementação descritos abaixo [3, 4].

1) *MEMS*: Um sistema LiDAR baseado em componentes microeletromecânicos (MEMS) substitui as peças rotativas externas por pequenos espelhos eletromecânicos, cujo ângulo de inclinação pode ser ajustado com a aplicação de uma tensão de tração. Eles são classificados de acordo com seu modo de operação como ressonantes ou não ressonantes. Os espelhos ressonantes podem cobrir áreas relativamente grandes para altas frequências de oscilação, mas levam a velocidades de varredura instáveis devido à oscilação. Os espelhos não ressonantes, por outro lado, podem seguir um caminho de varredura mais livremente, seja triangular ou dente de serra, e ajustar o campo de visão e o caminho de varredura para focar em áreas específicas, embora exijam um controle mais sofisticado para manter a estabilidade da varredura. Para uma varredura tridimensional completa do ambiente, é possível usar dois espelhos com eixos de movimento em direções diferentes, um horizontal e outro vertical, ou usar um único espelho capaz de oscilar em ambos os eixos. Em comparação com os sistemas baseados em rotores mecânicos, o FoV é menor, variando entre 25° e 150°, pois a potência de transmissão deve ser reduzida para evitar danos às partes suscetíveis dos espelhos MEMS [3, 4].

2) *Matriz de Fase Óptica (OPA)*: Os sistemas OPA empregam moduladores de fase para direcionar o feixe de laser com um certo grau de precisão. Os moduladores ajustam a forma do sinal controlando a saída do feixe ou o tempo de chegada através da lente. Da mesma forma, o receptor capta somente a luz da área iluminada, o que permite eliminar os sinais indesejados e reduzir os reflexos. Essa tecnologia não requer componentes móveis, o que permite alcançar altas velocidades de varredura, superando as soluções mecânicas. Entretanto, devido à perda de potência do laser, esses sistemas são usados em aplicações de curto e médio alcance [3, 4].

3) *LiDAR Flash*: Os sistemas Flash LiDAR eliminam completamente os elementos rotativos. Seu comportamento é semelhante ao de uma câmera digital padrão, iluminando toda a cena simultaneamente por meio da emissão de um único laser. Os retornos são capturados por uma matriz de fotodiodos posicionada próxima ao laser. Como todo o ambiente é capturado em uma única imagem, ele é menos suscetível a distorções causadas por vibrações do sistema. Eles têm um baixo custo de produção, mas apresentam desvantagens significativas. Seu alcance de detecção é limitado a menos de 100 metros e seu FoV é extremamente pequeno devido à incapacidade de variar o ângulo de varredura. É necessária uma alta potência de pico para cobrir toda a cena e iluminar objetos distantes [3, 4].

C. Tecnologias Emergentes

Outras empresas lançaram abordagens de escaneamento menos convencionais. Um exemplo é o conceito LiDAR desenvolvido pela Miranda Technologies, que envolve a imersão da unidade rotativa em um fluido para estabilização. Outros fabricantes, como a Trilumina e a Sense Photonics, usam VCSEL, um tipo de diodo semiconductor capaz de emitir ondas de luz perpendicularmente. A empresa de tecnologia Spectrum-Scan usa um prisma óptico que muda a direção dos lasers que passam por ele de acordo com seus comprimentos de onda, em vez de usar componentes rotativos. Soluções híbridas também estão sendo desenvolvidas, embora, devido à intensa concorrência entre as empresas no mercado, muitos detalhes ainda sejam desconhecidos. A LeddarTech propõe melhorar a eficiência e a precisão desses sistemas combinando a tecnologia de flash de estado sólido com receptores baseados em fotodetectores MEMS. A Velodyne propõe soluções que integram os princípios de rotação mecânica com mecanismos de estado sólido para melhorar o desempenho e a confiabilidade do LiDAR [4].

V. VANTAGENS E DESVANTAGENS

A tecnologia LiDAR tem vantagens significativas para veículos autônomos, pois realiza uma varredura 3D detalhada do ambiente para a detecção precisa de obstáculos, pedestres ou outros veículos, garantindo maior segurança na estrada. Sua capacidade de fornecer dados em tempo real permite que o veículo ajuste sua direção e velocidade de acordo com as condições da estrada e do tráfego. Eles também têm algumas desvantagens, como o alto custo de implementação e a necessidade de algoritmos complexos para sua integração

nos veículos. Os efeitos da chuva ou da neblina podem reduzir sua eficiência, e eles não são tão precisos na detecção de objetos a distâncias superiores a 200 m. [6]

VI. APLICAÇÕES

Várias empresas e pesquisadores estão trabalhando atualmente para a integração do LiDAR em veículos autônomos, com uma ampla gama de funcionalidades. Alguns casos de uso são apresentados a seguir, abrangendo aplicativos já implementados em veículos comerciais e inovações que, embora promissoras, até agora só foram validadas em simulações.

A. Sistema de Autenticação para Comunicações V2V

Em [7] os autores propõem uma nova forma de autenticação para comunicação V2V usando sensores LiDAR já instalados em veículos. De acordo com o padrão IEEE 1609.2 para acesso sem fio em ambientes veiculares (WAVE) e comunicações dedicadas de curto alcance (DSRC), os certificados digitais emitidos por uma autoridade confiável (TA) ou uma autoridade de certificação (CA) constituem o caminho de autenticação entre os veículos antes de iniciar qualquer comunicação. No entanto, esse processo é lento e gera muita carga na rede, resultando ineficiente em situações em que a infraestrutura de telecomunicações é limitada.

Portanto, os autores desta pesquisa propõem um sistema de autenticação que consiste em um sensor LiDAR rotativo localizado no teto dos veículos para escanear o ambiente ao redor e um sensor de câmera para complementar essas informações e identificar o tipo de objeto. Os dados coletados são processados na unidade de bordo (OBU) para calcular a distância e o ângulo do veículo em relação aos objetos detectados. Essas informações de localização são compartilhadas entre os veículos por meio do DSCR, permitindo que eles sejam identificados e verificados como sendo quem dizem ser. Esse sistema é eficaz na prevenção de ataques de falsificação ou man-in-the-middle (MITM), pois os invasores teriam que falsificar não apenas a posição do GPS, mas também as informações precisas dos objetos ao redor capturadas pelos sensores. A viabilidade desse esquema foi avaliada por meio de uma extensa simulação em um ambiente de direção autônoma usando o CARLA, um simulador urbano.

B. Parceria Cooperativa de Dados de Comunicações V2X

Em [8] os autores propõem o uso de sensores LiDAR em conjunto com Redes Neurais de Passagem de

Mensagens (MPNNs), com o objetivo de fortalecer a associação cooperativa de dados entre veículos ou entre veículos e infraestrutura de beira de estrada, para detectar com mais precisão os Usuários Vulneráveis da Estrada (VRUs), especificamente pedestres. O esquema proposto considera que cada veículo é equipado com um único sensor LiDAR e faz parte de uma infraestrutura de rede centralizada, de modo que seus FoVs se sobrepõem uns aos outros. Isso significa que vários veículos detectam o mesmo objeto no mesmo instante de tempo, mas de perspectivas diferentes, o que exige uma associação precisa dos dados. Esse método foi validado em um ambiente de veículo simulado pelo software CARLA. Os dados obtidos corroboraram que os MPNNs podem, de fato, associar com precisão as caixas delimitadoras geradas por cada LiDAR e que seu desempenho é superior ao do método SPADA tradicional baseado em métodos probabilísticos, como o Belief Propagation (BP), especialmente em cenários com altos níveis de ruído.

C. Assistência à Condução baseada em LiDAR

Em junho de 2023, a Nissan demonstrou sua avançada tecnologia de assistência ao motorista baseada em LiDAR em suas instalações. Ela revelou sua capacidade de realizar manobras automáticas para evitar colisões, incorporando uma nova lógica de controle para evitar colisões em cruzamentos. Ela se baseia na tecnologia de detecção de terreno que usa LiDAR de última geração para estimar a velocidade e a localização de possíveis obstáculos na estrada. Seu design permite que ele responda rapidamente a eventos inesperados na estrada por meio de manobras como pressionar ou soltar os freios, conforme necessário. De acordo com Takao Asami, vice-presidente sênior e chefe da Divisão de Pesquisa Avançada e Engenharia da Nissan, o desenvolvimento dessas tecnologias faz parte da visão de longo prazo da empresa para desenvolver tecnologias futuras que proporcionem maior tranquilidade na condução autônoma [9].

Em outubro de 2021, a General Motors anunciou seu sistema Ultra Cruise para fornecer assistência de direção para veículos autônomos, projetado para 95% de direção com as mãos livres. Nesse sistema, o LiDAR atrás do para-brisa do veículo produz uma visão em 3D da cena, permitindo que objetos, veículos e características da estrada sejam detectados com mais precisão, mesmo em condições climáticas adversas [10].

D. Algoritmo de Estimativa de Velocidade baseado em Odometria LiDAR

Em [11] os autores propõem uma nova abordagem para estimar a velocidade absoluta dos objetos ao redor com base na odometria dos sensores LiDAR em veículos autônomos em movimento. O algoritmo compara as dimensões das caixas delimitadoras e o deslocamento de objetos entre quadros consecutivos, construindo uma matriz de conexão binária em que o bit 1 indica uma correspondência válida entre os dois quadros, a fim de estimar se eles são o mesmo objeto em movimento. Para finalmente estimar a velocidade, as coordenadas do objeto no quadro atual são transformadas no quadro de referência do quadro anterior usando uma matriz de transformação que leva em conta a rotação e a translação do veículo entre quadros consecutivos. A velocidade é calculada como a diferença de posições entre os dois quadros dividida pelo tempo decorrido entre os dois quadros. O algoritmo foi executado no ROS Noetic no Ubuntu 20, usando o conjunto de dados TiAND, em que a referência de velocidade foi obtida usando um sensor GNSS NovAtel PwrPak7 com precisão RTK de 1 cm. Os resultados produziram um rastreamento preciso da velocidade em 93,89% do total de quadros.

E. Ambiente de Teste de Sistemas de Transporte Inteligentes

O projeto do Laboratório Autônomo Paris-Saclay, inaugurado em 15 de maio de 2019, tem como objetivo recriar um ambiente de teste para serviços de mobilidade inteligente para demonstrar a adequação das soluções de mobilidade autônoma como parte de uma rede de transporte existente. Protótipos autônomos totalmente elétricos da Renault, Transdev e VEDECOM, equipados com sensores GPS, Lidar, câmeras, unidades inerciais e software de condução autônoma fazem parte dessa iniciativa. Um aplicativo para smartphone conhecido como Mobibot da Transdev permite que os participantes solicitem o serviço de um veículo autônomo para uso imediato ou posterior. Esses veículos são integrados às vias públicas e interagem com câmeras e sensores LiDAR localizados em 25 pontos estratégicos para garantir a segurança nas estradas. Todos os veículos são monitorados em tempo real a partir de um Centro de Controle Operacional e os passageiros estão em contato direto com o supervisor [12].

VII. CONCLUSÕES

A comercialização de carros autônomos está crescendo progressivamente ao longo dos anos, graças

à integração de novas tecnologias sensoriais focadas em perceber e recriar o ambiente ao redor com alta precisão. Entre as soluções mais promissoras está o LiDAR, com sua capacidade de gerar uma visão detalhada de 360° do ambiente. Diversas empresas automotivas líderes, como Nissan, General Motors, Renault e Transdev, decidiram integrar o LiDAR em seus veículos autônomos. Essa tecnologia ainda apresenta desafios relacionados a custo, peso, resolução de imagem e operacionalidade em condições climáticas adversas ou distâncias superiores a 200 m. Os pesquisadores estão concentrando seus esforços para superar essas dificuldades, testando os diferentes métodos de medição e escaneamento apresentados neste projeto. Mesmo com essas limitações, o LiDAR automotivo está sendo cada vez mais integrado aos carros produzidos em massa. Até o momento, nenhum sensor isolado pode atingir o nível de precisão necessário para garantir a segurança nas estradas, razão pela qual muitas vezes se decide combinar vários tipos de sensores em um único veículo.

REFERENCES

- [1] Naciones Unidas. (2022, Junio) Accidentes viales: “una epidemia silenciosa y ambulante” que mata a 1,3 millones de personas por año. Acceso el 20 de octubre de 2024. [Online]. Available: <https://news.un.org/es/story/2022/06/1511112>
- [2] L. Reddy Cenkeramaddi, J. Bhatia, A. Jha, S. Kumar Vishkarma, and J. Soumya, “A survey on sensors for autonomous systems,” in *2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2020, pp. 1182–1187.
- [3] Y. Li and J. Ibanez-Guzman, “Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 37, no. 4, pp. 50–61, 2020.
- [4] R. Roriz, J. Cabral, and T. Gomes, “Automotive lidar technology: A survey,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 7, pp. 6282–6297, 2022.
- [5] Texas Instrument. (2023, Agosto) An introduction to automotive lidar. [Online]. Available: <https://www.ti.com/solution/lidar-module>
- [6] P. Dakhore, M. Kitey, D. Themburne, C. Thombare, and P. J. D. Dhande, “Autonomous vehicle using lidar technology,” *Int. J. of Aquatic Science*, vol. 15, no. 1, pp. 442–445, 2024. [Online]. Available: <https://www.journal-aquaticscience.com/article203361.html>

- [7] K. Lim and K. M. Tuladhar, "Lidar: Lidar information based dynamic v2v authentication for roadside infrastructure-less vehicular networks," in *2019 16th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, 2019, pp. 1–6.
- [8] B. Camajori Tedeschini, M. Brambilla, L. Barbieri, G. Balducci, and M. Nicoli, "Cooperative lidar sensing for pedestrian detection: Data association based on message passing neural networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 71, pp. 3028–3042, 2023.
- [9] Nissan Motor Corporation. Nissan adds intersection collision avoidance to its in-development lidar-based driver-assistance technology. [Online]. Available: <https://usa.nissannews.com/en-US/releases/nissan-adds-intersection-collision-avoidance-to-its-in-development-lidar-based-driver-assistance-technology>
- [10] General Motors. GSA Index. [Online]. Available: <https://www.gm.com/>
- [11] A. Thakur and P. Rajalakshmi, "L3d-otve: Lidar-based 3-d object tracking and velocity estimation using lidar odometry," *IEEE Sensors Letters*, vol. 8, no. 7, pp. 1–4, 2024.
- [12] Renault Group. Paris-saclay autonomous lab: new autonomous, electric and shared mobility services. [Online]. Available: <https://media.renaultgroup.com/paris-saclay-autonomous-lab-new-autonomous-electric-and-shared-mobility-services/>