

TECNOLOGIA DE RADOMES AUTOMOTIVOS: INTEGRAÇÃO DE CURSOS DE ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS E ELETRÔNICA AUTOMOTIVA - Projeto de Pesquisa

DIVANI BARBOSA GAVINIER¹; JORGE TADAO MATSUSHIMA²; MAURÍCIO RIBEIRO BALDAN³

¹Fatec Taubaté - Coordenadoria Análise e Desenvolvimento de Sistemas

²Fatec São José dos Campos - Coordenadoria Projeto em Estruturas Aeronáuticas

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Grupo de Materiais Avançados e Pesquisas Aeroespaciais
divani.gavinier@fatec.sp.gov.br

Automotive Radome Technology: An Integrated Project Between Systems Analysis and Development and Automotive Electronics Programs

Eixos Tecnológicos: Controle e Processos Industriais / Desenvolvimento Educacional e Social.

Resumo

O avanço contínuo da tecnologia automotiva, especialmente em veículos autônomos, impulsiona a necessidade de sistemas de detecção usando radares mais precisos e confiáveis. Os radomes, essenciais para proteger e otimizar sensores de radar, desempenham um papel crucial nesse cenário. O Centro Paula Souza e o Grupo de Materiais Avançados e Pesquisas Aeroespaciais (MAPA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) unem-se nesse projeto para desenvolver radomes de alta performance para *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS). O desenvolvimento será conduzido em parceria com o laboratório automotivo e alunos do curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, ambos da Fatec Taubaté. O laboratório automotivo da Fatec Taubaté possui infraestrutura para integrar e testar os radomes. Os alunos do curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas otimizarão as propriedades eletromagnéticas do radome utilizando técnicas avançadas de inteligência artificial e simulação 3D. O desenvolvimento do material e análise de interferência eletromagnética ocorrerão no INPE.

O projeto visa desenvolver radomes na faixa de frequência de aproximadamente 24 GHz, atendendo *Medium-Range Radar* (MRR) e *Short Range Radar* (SRR). A abordagem integra a infraestrutura física das duas instituições e maximiza os recursos acadêmicos, promovendo uma colaboração interdisciplinar que fortalece a inovação tecnológica e o desenvolvimento acadêmico nas áreas automotiva e de análise de sistemas.

Ressalta-se que atualmente o Brasil não produz radomes e que o projeto começará no meio do TRL 3 (validação em laboratório) com simulações avançadas na Fatec Taubaté realizadas pelos alunos de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, combinadas com testes dos alunos de Eletrônica Automotiva visando validar a viabilidade e eficiência do radome em condições práticas. Com o desenvolvimento de materiais (INPE), simulações e testes (Fatec), pretendemos alcançar o TRL 7 (demonstração em ambiente operacional) ao final do projeto.

Palavras-chave: Radomes, Tecnologia Automotiva, Simulação Computacional, Inteligência Artificial, Colaboração Interdisciplinar.

Abstract

The continuous advancement in automotive technology, especially in autonomous vehicles, drives the need for detection systems using more precise and reliable radars. Radomes, essential for protecting and optimizing radar sensors, play a crucial role in this scenario. Centro Paula Souza and the Advanced Materials and Aerospace Research Group (MAPA) at the National Institute for Space Research (INPE) join forces in this project to develop high-performance radomes for *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS).

The development will be conducted in partnership with the automotive laboratory and students from the Analysis and Systems Development course, both at Fatec Taubaté. Fatec Taubaté's automotive laboratory has the infrastructure to integrate and test radomes. Students from the Analysis and Systems Development course will optimize the electromagnetic properties of the radome using advanced techniques in artificial intelligence and 3D simulation. Material development and electromagnetic interference analysis will take place at INPE.

The project aims to develop radomes operating in the frequency range of approximately 24 GHz, catering to *Medium-range radar* (MRR) and *Short-range radar* (SRR). The approach integrates the physical infrastructure of both institutions and maximizes academic resources, promoting interdisciplinary collaboration that strengthens technological innovation and academic development in automotive and systems analysis fields.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

It is worth noting that Brazil currently does not produce radomes, and the project will start in the middle of TRL 3 (laboratory validation) with advanced simulations at Fatec Taubaté conducted by students of Analysis and Systems Development, combined with tests by Automotive Electronics students to validate the viability and efficiency of the radome in practical conditions. With material development (INPE), simulations, and testing (Fatec), we aim to achieve TRL 7 (operational environment demonstration) by the end of the project.

Key-words: *Radomes, Automotive Technology, Computational Simulation, Artificial Intelligence, Interdisciplinary Collaboration.*

1. Introdução

A evolução dos Sistemas Avançados de Assistência à Condução (ADAS) tem impulsionado significativamente o uso de radares automotivos com destaque aqueles que operam na frequência de 24 GHz. Essa frequência representa uma solução entre custo, desempenho e regulamentação, sendo amplamente empregada em aplicações de curto e médio alcance, como detecção de pontos cegos, alerta de tráfego cruzado traseiro e sistemas de frenagem autônoma [1, 2, 3]. Além disso, ela apresenta menor atenuação atmosférica em comparação com faixas superiores, o que favorece sua aplicação em ambientes urbanos e industriais [1,2].

Com a crescente complexidade dos cenários veiculares e a demanda por maior precisão na percepção do ambiente, os sistemas de radar automotivo passaram a incorporar arquiteturas mais sofisticadas. Nesse contexto, a tecnologia MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) tem se destacado por sua capacidade de ampliar a resolução espacial e melhorar a sensibilidade angular dos sensores. Essa abordagem utiliza múltiplas antenas transmissoras e receptoras para formar uma “matriz virtual” de antenas, permitindo uma representação mais detalhada do entorno, mesmo com arranjos fisicamente compactos — característica essencial para a detecção e classificação precisa de objetos em movimento em ambientes urbanos e rodoviários [4, 5].

Dentro desse contexto, os radomes — estruturas dielétricas que encapsulam os sensores — desempenham papel fundamental ao proteger fisicamente os elementos sensíveis do radar, como as antenas e os circuitos de RF (Rádio Frequência), sem comprometer a propagação das ondas eletromagnéticas. Quando mal projetados, esses elementos podem introduzir perdas por reflexão, absorção ou distorções de fase, afetando diretamente a precisão e o alcance dos sensores. Para evitar tais impactos, o projeto de radomes eficientes exige materiais com propriedades dielétricas adequadas, espessura otimizada e estrutura homogênea, além de considerar o comportamento eletromagnético do conjunto em diferentes ângulos de incidência e polarizações [6, 7].

Um exemplo de avanço na concepção de sensores de radar automotivos é apresentado por Abd El-Hameed et al. [6], que propuseram uma antena planar baseada em estruturas ressonantes do tipo *Split-Ring Resonator* (SRR), projetada para operar em torno de 24 GHz. O uso de SRRs — elementos metálicos em forma de anéis acoplados — permite ampliar a largura de banda e melhorar o ganho da antena. O trabalho demonstra que, ao incorporar uma camada de material dielétrico adicional, é possível aumentar significativamente o desempenho do radar. Isso evidencia a importância do controle preciso da interação eletromagnética entre a antena e os materiais de cobertura, como o radome.

Além disso, Liang et al. [2] avaliaram um sistema de radar do tipo FMCW (*Frequency-Modulated Continuous Wave*) operando em torno 24 GHz em aplicações de detecção de quedas. Diferentemente dos radares pulsados, os sistemas FMCW emitem sinais contínuos com variação linear de frequência, o que permite estimar simultaneamente distância e velocidade dos alvos. O estudo destaca a necessidade de preservar a integridade do sinal em todo o caminho de propagação — da emissão pela antena até a recepção — reforçando o papel crítico do radome

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

na transparência eletromagnética, especialmente em aplicações com alvos de baixa refletividade.

Outros estudos complementam essa perspectiva ao propor soluções inovadoras para radomes. Hossain et al. [7], por exemplo, demonstraram a eficácia de radomes com corrugações periódicas gravadas diretamente em sua superfície e o uso de multicamadas de materiais na sua concepção, aplicadas a radares veiculares de 76–81 GHz. Mesmo sendo voltado para frequências superiores à 24 GHz, o princípio de projeto adotado — baseado na redução de reflexões por texturização superficial — é aplicável a outras bandas e evidencia abordagens avançadas de controle de impedância e minimização de perdas em ampla faixa angular. A pesquisa também introduz uma geometria alternativa de cavidades em forma de pirâmide invertida, mais robusta e de fácil fabricação, que mantém desempenho eletromagnético similar à versão tradicional, oferecendo caminhos promissores para aplicações práticas.

Complementando essas abordagens, outras estratégias avançadas de projeto de radomes vêm sendo exploradas para mitigar perdas e distorções eletromagnéticas. Fitzek et al. [8], por exemplo, investigaram o uso de metamateriais do tipo *fishnet* para o desenvolvimento de radomes automotivos operando na faixa de 79 GHz. Esses materiais apresentam propriedades eletromagnéticas que permitem controlar a interação com ondas incidentes de maneira mais precisa do que materiais convencionais, contribuindo para a redução da refletividade e o aumento da transparência do radome mesmo em condições de variação angular. Embora aplicados a frequências superiores à de 24 GHz, os princípios demonstrados são relevantes para o entendimento das tendências em radomes de alta performance e aplicáveis com as devidas adaptações.

No nível do *front-end* dos sensores, trabalhos como o de Delwar et al. [1,9] destacam a necessidade de compatibilidade entre o projeto do transmissor de radar e as estruturas que o envolvem. O artigo propõe soluções específicas para o design de transmissores em 24 GHz, evidenciando como o desempenho eletromagnético do sistema depende da interação entre os componentes ativos e passivos, incluindo o radome. Já no campo histórico e conceitual, Grimes e Jones [3] apresentaram, ainda na década de 1970, uma visão pioneira sobre os desafios e promessas da implementação de radares automotivos, ressaltando desde então a importância da mitigação de interferências e da robustez estrutural — questões hoje diretamente relacionadas ao desenvolvimento de radomes otimizados para operação confiável em ambientes veiculares complexos.

Apesar dos avanços internacionais, o Brasil ainda não detém domínio tecnológico nem dispõe de produção de radomes automotivos, o que evidencia a urgência de iniciativas voltadas à formação de competências especializadas e à geração de conhecimento aplicado nessa área estratégica. Visando enfrentar esse desafio, o presente projeto propõe o desenvolvimento de radomes operando em 24 GHz por meio da articulação entre a infraestrutura existente e o corpo técnico capacitado da Fatec Taubaté e do Grupo de Materiais Avançados e Pesquisas Aeroespaciais (MAPA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A iniciativa contempla uma abordagem interdisciplinar que combina o uso de simulações eletromagnéticas tridimensionais, técnicas de inteligência artificial para otimização de parâmetros e caracterização experimental de materiais e estruturas dielétricas. Enquanto a Fatec Taubaté contribuirá com sua infraestrutura laboratorial para montagem e testes de radares veiculares, o INPE será responsável pelo desenvolvimento dos materiais e avaliação de desempenho eletromagnético.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Serão produzidos corpos de prova com materiais candidatos à aplicação como radomes para radares automotivos operando em 24 GHz. O radome é uma estrutura dielétrica cuja função principal é proteger fisicamente os componentes sensíveis do radar — como antenas e circuitos de RF — sem comprometer a propagação das ondas eletromagnéticas. Para cumprir essa função adequadamente, o material do radome deve apresentar propriedades específicas que assegurem transparência eletromagnética, baixa distorção de fase e mínima perda de sinal, mesmo sob diferentes ângulos de incidência e condições ambientais.

2.1.1 Parâmetros eletromagnéticos relevantes

Três parâmetros fundamentais determinam a adequação de um material para uso como radome:

- Permissividade relativa (ϵ_r): define a capacidade do material de armazenar energia elétrica. Para radomes, é desejável que ϵ_r seja baixa, visando minimizar descontinuidades de impedância e reflexões no acoplamento da onda com o ar.
- Tangente de perdas (δ): é a razão entre a parte imaginária e a parte real da permissividade complexa, expressando as perdas dielétricas do material. Uma δ baixa significa menor dissipação de energia por calor — característica crucial para permitir a passagem das ondas sem atenuações significativas.
- Permeabilidade relativa (μ_r): quantifica a resposta do material a campos magnéticos. A maioria dos polímeros usados em radomes é não magnética, com $\mu_r \approx 1$, sendo esse parâmetro usualmente constante.

2.1.2. Materiais candidatos

A literatura técnica destaca o uso de polímeros como Teflon (PTFE), polietileno de alta densidade (HDPE), polieterimida (PEI), além de materiais como PVC, ABS e policarbonato (PC) [4,7]. A empresa InnoSenT [10] também recomenda o uso de polipropileno (PP) e poliestireno (PS) como materiais viáveis para radomes, considerando seu bom desempenho eletromagnético e facilidade de processamento. A Tab. 1 apresenta os valores típicos de permissividade relativa e tangente de perdas desses materiais, conforme fontes técnicas e fabricantes.

Tab. 1 - Propriedades eletromagnéticas típicas de materiais candidatos a radome (24 GHz).

Material	ϵ_r	δ	Referência
Teflon (PTFE)	≈ 2.02	≈ 0.00025	[4,7]
HDPE	≈ 2.34	$\approx 0.0004 - 0.0007$	[4]
PEI (Ultem)	≈ 3.45	≈ 0.0064	[7]
PVC	≈ 2.86	$\approx 0.015 - 0.02$	[4]
Polipropileno (PP)	$\approx 2.2 - 2.3$	$\approx 0.0005 - 0.001$	[10]
Poliestireno (PS)	$\approx 2.5 - 2.6$	$\approx 0.0008 - 0.0012$	[10]
ABS	$\approx 2.7 - 2.9$	≈ 0.012	[11]
Policarbonato (PC)	$\approx 2.9 - 3.1$	$\approx 0.01 - 0.015$	[11]

Fonte: (Autores, 2025).

A seleção final dos materiais será realizada ao longo do projeto, levando em conta não apenas os parâmetros eletromagnéticos, mas também estabilidade térmica, resistência mecânica,

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

compatibilidade com processos de fabricação e custo. A preparação dos corpos de prova seguirá protocolo de cura e controle de espessura, visando garantir homogeneidade estrutural e reprodutibilidade experimental.

2.2. Metodologia

2.2.1. Caracterização experimental

Os corpos de prova serão submetidos às seguintes análises:

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV): análise da microestrutura e possíveis heterogeneidades internas;

Espectroscopia Raman: identificação da composição química e estrutura molecular;

Difratometria de Raios X (XRD): identificação de fases cristalinas e grau de cristalinidade;

Analizador de Rede Vetorial (VNA): medição da permissividade elétrica (ϵ_r) e da permeabilidade magnética (μ_r), tanto a parte real como imaginária em função da frequência.

2.2.2. Ensaios de desempenho e envelhecimento

Os materiais mais promissores serão avaliados sob condições extremas de uso:

Câmara de envelhecimento acelerado, simulando radiação UV, umidade e temperatura;

Equipamento de ensaio mecânico com controle térmico, para simular ciclos de temperatura;

Máquina de ensaio mecânico universal, para testes de tração e flexão.

2.2.3. Simulação eletromagnética

A resposta eletromagnética dos materiais será modelada com o uso do *software* comercial FEKO, considerando os dados experimentais como entrada para:

- Criação dos modelos geométricos dos corpos de prova;
- Definição das propriedades dos materiais a partir do VNA;
- Simulação de propagação eletromagnética em 24 GHz;
- Análise das curvas de absorção, reflexão e transmissão.

2.2.4. Aplicação de Inteligência Artificial (IA) e Simulação Computacional

O projeto incorpora ferramentas computacionais a serem desenvolvidas em Python para simulação da resposta eletromagnética de estruturas compostas por uma, duas e três camadas de materiais, com base em modelos analíticos clássicos de impedância de entrada e coeficiente de reflexão. Esses modelos serão validados por meio de dados obtidos com o Analizador de Rede Vetorial (VNA) e comparações com simulações realizadas no *software* FEKO.

Complementarmente, encontra-se em desenvolvimento uma aplicação de otimização baseada em algoritmos de inteligência artificial, especificamente o Colônias de Abelhas (*Artificial Bee Colony* – ABC). A aplicação da IA visa identificar automaticamente as configurações multicamadas de materiais mais eficientes, considerando a variação de espessura, ordem de empilhamento das camadas e propriedades eletromagnéticas. A meta é minimizar a perda por reflexão (*Reflection Loss* – RL), no caso em 24 GHz, otimizando a performance do radome por meio de análise computacional inteligente. Isso é alcançado ajustando-se a impedância eletromagnética efetiva do material multicamadas para que se aproxime da impedância do ar (casamento de impedância), reduzindo ao máximo a quantidade de onda refletida e, conseqüentemente, aumentando a transparência eletromagnética do radome.

Ademais, a estrutura dos algoritmos desenvolvidos permite a expansão futura para aplicações com antenas MIMO, cada vez mais comuns em sistemas automotivos avançados. Esses sistemas exigem controle mais preciso da distribuição espacial do campo

eletromagnético, e a integração com ferramentas de IA poderá oferecer caminhos promissores para otimização conjunta da geometria do radome e do desempenho de antenas em arranjos MIMO, especialmente em cenários com múltiplos feixes ou requisitos de alta resolução angular.

3. Resultados Parciais e Discussão

Como etapa preliminar, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica que abrangeu os principais avanços tecnológicos relacionados a sistemas ADAS e ao uso de radares automotivos operando em 24 GHz. A revisão contempla desde os fundamentos de operação desses radares, como a tecnologia de radar de sinal contínuo e arquiteturas MIMO, até aspectos críticos do projeto de radomes, incluindo materiais multicamadas, geometrias e impactos eletromagnéticos. A partir dessa revisão, foram identificadas abordagens promissoras para o desenvolvimento de radomes eficientes, com destaque para o uso de estruturas como técnicas de texturização superficial e o emprego de materiais compostos por mais de uma camada com propriedades eletromagnéticas customizadas para redução de perdas por reflexão.

Com base nos dados levantados, foram selecionados materiais candidatos à aplicação em radomes automotivos operando em 24 GHz. A revisão permitiu identificar materiais com boas propriedades dielétricas e baixa tangente de perdas, que estão atualmente em fase de aquisição para posterior caracterização experimental.

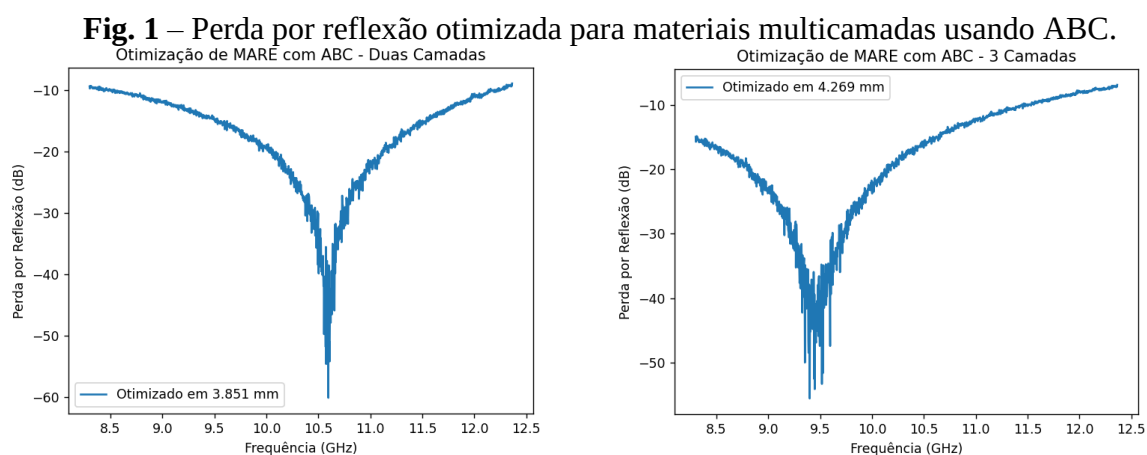
Paralelamente, foi desenvolvida uma interface gráfica em Python para simulação da perda por reflexão de materiais [12]. Esse parâmetro é de particular importância em radares automotivos, pois indica a quantidade de energia refletida de volta ao transmissor, ao invés de ser transmitida em direção ao ambiente externo ou absorvida pelo material. Em sistemas de assistência à condução, níveis elevados de reflexão nos componentes frontais do veículo, como o radome ou o para-choque, podem causar distorções de fase, pontos cegos ou erros na estimativa da posição de objetos. Isso demonstra a necessidade de projetar radomes com baixa refletividade e elevada transparência eletromagnética. A ferramenta desenvolvida permite analisar, de forma interativa, a influência da espessura, frequência e propriedades eletromagnéticas dos materiais sobre a RL. O sistema encontra-se finalizado e está em fase de submissão para revista científica.

O segundo trabalho refere-se ao desenvolvimento de um software de simulação para estruturas multicamadas com algoritmo de otimização baseado em inteligência artificial, utilizando o algoritmo *Artificial Bee Colony*. A ferramenta realiza uma varredura de combinações de materiais especificadas pelo usuário, espessuras e ordens de empilhamento, com o objetivo de identificar a configuração que resulta na menor perda por reflexão na faixa de frequência desejada. É importante salientar que minimizar a RL significa reduzir a quantidade de energia eletromagnética refletida de volta à fonte emissora, como no caso de radares. Na prática, isso corresponde a maximizar a transmissão do sinal através do material, garantindo que a maior parte da energia incidente atravesse o radome sem distorções. Por exemplo, um radome com $RL = -20$ dB permite que aproximadamente 99% do sinal seja transmitido e apenas 1% seja refletido. Quanto mais negativo for o valor da RL, melhor será o desempenho do sistema, pois maior será a eficiência na emissão e recepção do sinal, com menor interferência causada por reflexões indesejadas.

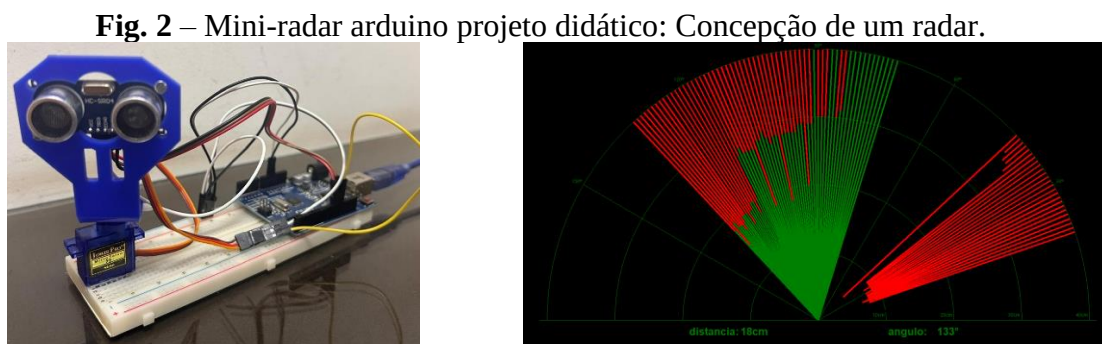
As espessuras das camadas otimizadas obtidas pelo software de otimização desenvolvido foram então utilizadas em simulações no FEKO, permitindo verificar a coerência dos resultados. Embora o FEKO não realize otimização, os dados simulados serviram como referência para validar a abordagem proposta, demonstrando compatibilidade entre os modelos e reforçando a utilidade do método desenvolvido na análise de radomes multicamadas. Na

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

Figura 1 apresenta-se os resultados obtidos para dois conjuntos de materiais, compostos de 2 e 3 camadas respectivamente: (a) ferrita manganês zinco e silicone puro onde foi otimizada as espessuras em 2.09 e 1.75 mm respectivamente e (b) ferrita manganês zinco, silicone puro e ferrocarbonila com espessuras otimizadas em 2.17, 1.79 e 0.3 mm respectivamente. Esse mesmo método será aplicado aos materiais candidatos a aplicação do radar automotivo proposto nesse trabalho,



O terceiro trabalho em desenvolvimento é o projeto de radar educacional com arduino e sensor ultrassônico, integrado a uma interface Python para visualização e análise de dados. Embora utilize uma faixa de operação distinta (ultrassônica), esse sistema será utilizado como plataforma de apoio didático e de extensão tecnológica, servindo para futuras aplicações de reconhecimento de objetos e integração com os algoritmos computacionais do projeto. Na Fig. 2 apresenta-se foto do sistema Arduino e tela radar desenvolvida nesse projeto.



4. Considerações finais

Foi conduzida uma pesquisa bibliográfica direcionada sobre materiais aplicáveis a radome automotivo de 24 GHz, resultando nas referências técnicas e científicas que embasaram a escrita da introdução deste projeto. Com base nessa pesquisa, foram identificados materiais promissores, que estão atualmente em fase de aquisição para posterior caracterização experimental. Essa etapa inicial permitiu contextualizar o problema, justificar a proposta e organizar os fundamentos teóricos que guiarão as fases seguintes da pesquisa.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

Foram realizados os primeiros desenvolvimentos de softwares previstos no projeto. Foi concluída uma interface gráfica em Python para simulação da perda por reflexão de materiais, atualmente em fase de submissão para revista científica. Também foi implementado um modelo de simulação e otimização de estruturas multicamadas com uso do algoritmo de otimização de inteligência artificial denominado colônias de abelhas, já validado com simulações no FEKO. Está em andamento o desenvolvimento de um radar educacional utilizando Arduino e sensor ultrassônico, com interface em Python. Essas atividades correspondem às etapas iniciais do projeto e servirão de base para os testes experimentais, simulações aplicadas e validação dos materiais candidatos ao longo das próximas fases.

Agradecimentos

Centro Paula Souza por esse projeto RJ, ao grupo MAPA/INPE e bolsas PIBIC/CNPq números: 158179/2023-4, 101700/2024-5 e 135964/2024-5.

Referências

- [1] DELWAR, T. S. et al. Front-End Development for Radar Applications: A Focus on 24 GHz Transmitter Design. **Sensors**, v. 23, n. 24, p. 9704, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23249704>
- [2] LIANG, T. et al. Fall Detection System Based on Point Cloud Enhancement Model for 24 GHz FMCW Radar. **Sensors**, v. 24, n. 2, p. 648, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24020648>
- [3] GRIMES, D. M.; JONES, T. O. Automotive Radar: A Brief Review. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 6, p. 804–822, 1974. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9520>
- [4] BRINKMANN, M. et al. MIMO Material Characterization Using High-Resolution Multiple-Input Multiple-Output Imaging Radars. **Proceedings of the 19th European Radar Conference (EuRAD)**, Milan, 2022. p. 229–232. <https://doi.org/10.23919/EuRAD54643.2022.9924972>
- [5] OMRI, A. et al. Advancing Cycling Safety: On-Bike Alert System Utilizing Multi-Layer Radar Point Cloud Clustering for Coarse Object Classification. **Sensors**, v. 24, n. 10, 3094, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24103094>
- [6] ABD EL-HAMEED, A. S. et al. An Improved Performance Radar Sensor for K-Band Automotive Radars. **Sensors**, v. 23, n. 16, p. 7070, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23167070>
- [7] HOSSAIN, A. et al. Wideband Radomes for Millimeter-Wave Automotive Radars. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 70, n. 2, p. 1178–1186, 2022. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9571077>
- [8] FITZEK, F. et al. Automotive radome design – fishnet structure for 79 GHz. In: **German Microwave Conference Digest of Papers**, Berlin, 2010. p. 146–149.
- [9] DELWAR, T. S. et al. A 65 nm Duplex Transconductance Path Up-Conversion Mixer for 24 GHz Automotive Short-Range Radar Sensor Applications. **Sensors**, v. 22, n. 2, 594, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22020594>
- [10] INNOSENT Ltda. **Design of a Radome**. Disponível em: <<https://radar-blog.innosent.de/en/design-of-a-radome/>>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- [11] ENSINGER Ltda. **High-performance plastic solutions**. Disponível em: <<https://www.ensingerplastics.com/en/>>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- [12] REFLECTIONLOSS. **Sistema de visualização e análise de perda por reflexão**. Disponível em: <<https://reflectionloss.pythonanywhere.com/>>. Acesso em: 15 abr. 2025.