www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 163, 2026 | DOI: 10.69849/5eef6633

Radar doppler: análise comparativa com radar indutivo convencional

Doppler radar: comparison with conventional inductive radar

Lucas Barbosa Duarte[1]
Peterson Cavalcante Vilas Boas[2]
Markus Paulo Silva Marques[3]
Gustavo Ferreira Machado[4]
Flávio Augusto Barrella (Orientador)

RESUMO: Este artigo apresenta uma comparação entre os radares Doppler e os sistemas de laço indutivo utilizados na fiscalização e monitoramento de veículos. Consiste em uma pesquisa bibliográfica de caráter qualitativo, baseada em referências científicas e técnicas sobre radares Doppler e sistemas de laço indutivo. O estudo aborda os princípios físicos dessas tecnologias, como eletromagnetismo, indutância e efeito Doppler, além de analisar seus processos de instalação, operação e manutenção. Os resultados mostram que o radar Doppler possui vantagens em relação aos sistemas convencionais, destacando-se pela instalação menos invasiva, menor necessidade de manutenção, preservação do pavimento e capacidade de monitorar múltiplas faixas simultaneamente. Dessa forma, faz-se uma análise se a tecnologia Doppler é uma solução mais moderna, eficiente e adequada às demandas atuais de mobilidade urbana e fiscalização eletrônica.

Palavras-chave: Doppler; Indutivo; Radar; Fiscalização; Monitoramento; Detecção.

[1] Graduando do curso de Automação Industrial Fatec Osasco
[2] Graduando do curso de Automação Industrial Fatec Osasco
[3] Graduando do curso de Automação Industrial Fatec Osasco
[4] Graduando do curso de Automação Industrial Fatec Osasco

ABSTRACT: This article presents a comparison between Doppler radar and inductive loop systems used for vehicle monitoring and enforcement. It consists of a qualitative bibliographic study based on scientific and technical references concerning Doppler radar and inductive loop technologies. The study addresses the physical principles underlying these technologies such as electromagnetism, inductance, and the Doppler Effect while also analyzing their respective installation, operation, and maintenance processes. The results indicate that Doppler radar offers advantages over conventional systems, notably through less invasive installation, reduced maintenance requirements, preservation of the road surface, and the ability to monitor multiple lanes simultaneously. Consequently, the study evaluates whether Doppler technology represents a more modern, efficient solution, well suited to current demands in urban mobility and electronic traffic enforcement.
Keywords: Doppler; Inductive; Radar; Surveillance; Monitoring; Detection.

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento do fluxo de veículos nas vias urbanas e rodovias, os sistemas de monitoramento e fiscalização eletrônica se tornaram essenciais para garantir a segurança no trânsito, controlar a velocidade e auxiliar na mobilidade urbana. Entre as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de fiscalização, destacam-se os radares de laço indutivo e os radares Doppler, ambos desenvolvidos a partir de princípios físicos relacionados ao eletromagnetismo e à propagação de ondas.

Os radares de laço indutivo utilizam sensores instalados sob o pavimento para detectar alterações no campo magnético causadas pela presença de veículos metálicos. Apesar de serem amplamente utilizados devido à sua confiabilidade, esses sistemas exigem intervenções diretas na via, como cortes no asfalto e interrupções temporárias do tráfego para instalação e manutenção.

Em contrapartida, o radar Doppler opera por meio da emissão e recepção de ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas, utilizando o efeito Doppler para calcular a velocidade dos veículos sem a necessidade de

contato físico com o pavimento. Essa tecnologia vem ganhando destaque por apresentar instalação menos invasiva, maior facilidade de manutenção e capacidade de monitorar múltiplas faixas simultaneamente.

Dessa forma, este trabalho tem apresenta os conceitos físicos envolvidos no funcionamento dos radares Doppler e dos sensores de laço indutivo, abordando princípios como indutância, fluxo magnético e efeito Doppler. Além disso, busca comparar as vantagens operacionais do radar Doppler em relação aos sistemas convencionais, destacando aspectos como instalação, operação, manutenção, precisão e eficiência no monitoramento veicular.

2. CONCEITOS FÍSICOS

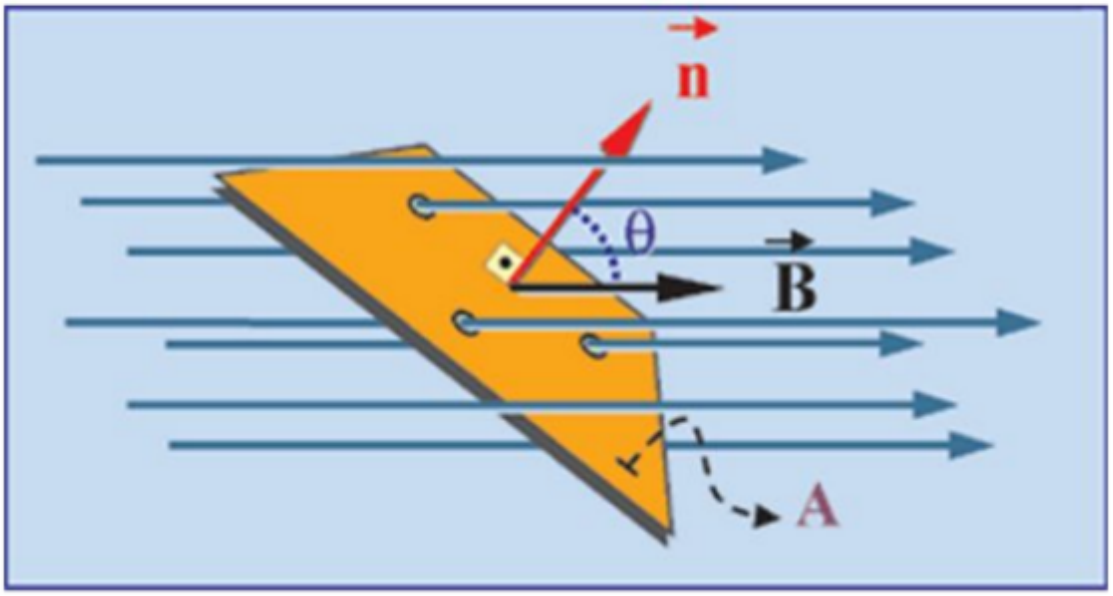
2.1 ELETROMAGNETISMO E INDUTÂNCIA

Quando a corrente elétrica (I) percorre o laço, ela cria um campo magnético (B). De acordo com a Lei de Ampère, a intensidade desse campo é proporcional ao número de voltas de fio na bobina e à intensidade da corrente (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). No asfalto, o laço geralmente tem de 2 a 5 voltas de fio, criando uma "zona de influência" magnética que se projeta para cima, geralmente entre 0,5m até 1m de altura.

2.1.2 CONCEITO DE FLUXO MAGNÉTICO

Simplificando o conceito de Michael Faraday e Carl Friedrich Gauss (TIPLER; MOSCA, 2015), o fluxo magnético é a grandeza física que mede a quantidade total de linhas de indução de um campo magnético (*B*) que atravessa uma determinada superfície (*A)*. Ele quantifica a intensidade do campo em uma área, conforme figura 1.

Figura 1: Fluxo magnético através de uma espira.



Fonte: Passei Direto, 2020

O fluxo (□) é a medida de "quanto" campo magnético atravessa a área do laço. A equação 1 apresenta a expressão para o cálculo do fluxo.

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos\cos\theta \qquad [1]$$

Onde B é a intensidade do campo magnético; A é a área projetada na horizontal (pavimento) e ⌀ é o ângulo entre o plano observado e a horizontal. Esse fluxo é a ferramenta de medição do radar.

2.1.3 AUTOINDUTÂNCIA (L)

A autoindutância é a propriedade física de um componente elétrico de se opor a variações na corrente elétrica que o atravessa. Esse fenômeno ocorre porque qualquer mudança na corrente gera uma variação no fluxo magnético do próprio circuito, o que pela Lei de Faraday, induz uma força eletromotriz (FEM) que tenta manter o estado anterior da corrente.

No laço do radar, a indutância é a propriedade física que quantifica a eficiência do laço em criar um fluxo magnético por unidade de corrente. Para definir, é utilizada conforme apresentada na equação 2 consolidada pelo físico estadunidense Joseph Henry:

$$L = N . \frac{\Phi}{I} \qquad [2]$$

Onde:

N: Número de espiras (voltas do fio).

Φ: Fluxo magnético.

I: Corrente.

Em um laço vazio, a indutância é constante e depende apenas da geometria do fio. Quando um veículo atravessa o laço indutivo, ocorre alteração na indutância do circuito devido à presença da massa metálica do veículo (OLUWATOBI et al., 2021)

A autoindutância representa a capacidade de um circuito gerar força contra eletromotriz devido à variação da corrente elétrica (SERWAY; JEWETT, 2014). Sensores a laço indutivo são amplamente utilizados devido à robustez e ao baixo custo operacional da tecnologia (MAGALHÃES, 2008).

2.2 EFEITO DOPPLER

O efeito Doppler corresponde à alteração aparente da frequência de uma onda em razão do movimento relativo entre fonte e observador (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Onde:

As ondas são comprimidas, resultando em uma frequência mais alta (aproximação) e as ondas esticadas, resultando em uma frequência mais baixa (afastamento).

2.2.1 EMISSÃO DE MICRO-ONDAS

O radar emite uma onda eletromagnética contínua em uma frequência precisa, aproximadamente em GHz, muito parecida com a banda K e Ka.

Banda K

Comprimento de onda de cerca de 1,2 cm. É a mais comum hoje por ser mais compacta. (Aproximadamente 24.1 GHz).

Banda Ka

Ondas ainda menores, geralmente menores que 1cm. O que permite que radares muito pequenos e feixes estreitos e precisos. (Aproximadamente 34.7 GHz).

Elas são ondas de rádio de alta frequência e tem o comprimento de onda curta. Diferente das ondas de rádio AM/FM, que contornam os obstáculos, as micro-ondas se comportam de forma mais direcional, parecido com feixes de lanterna.

2.2.2 REFLEXÃO E DESVIO DE FREQUÊNCIA

Quando a onda acerta a massa do veículo, agindo como um refletor, ela bate e volta. Se o veículo estiver se movendo, a onda refletida retorna para o radar, porém, com uma variação na frequência. Podendo ser calculada com a seguinte fórmula que foi desenvolvida pelo Físico austríaco Christian Doppler:

$$\Delta f = 2 . v . \frac{f_0}{c} \qquad [3]$$

Essa relação matemática foi proposta originalmente por Christian Doppler em seus estudos sobre propagação de ondas (SKOLNIK, 2008).

Onde:

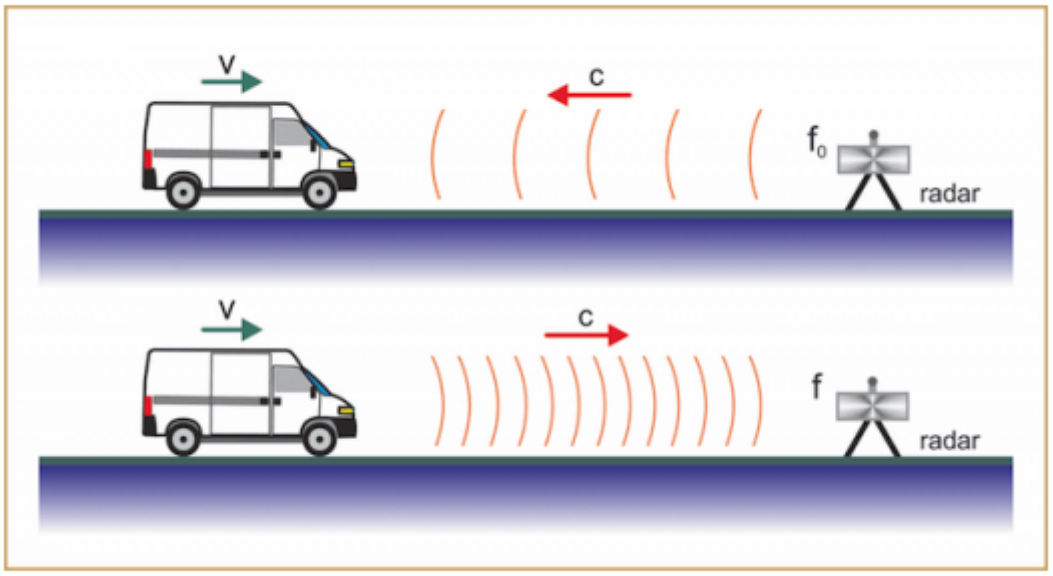
Δf: **Variação da frequência**

v: **Velocidade do veículo**

f_o: Frequência inicial

***c*: Velocidade de propagação da onda no meio**

Figura 2: Exemplificação visual do efeito Doppler.



Fonte: Automóveis Online, 2024

2.2.3 DESVIO DE FASE E BATIMENTO (HETERODINAÇÃO)

O radar possui um receptor que capta a frequência de retorno e subtrai a frequência inicial. A diferença entre as duas frequências gera um “batimento eletrônico”.

Ele não consegue medir a frequência de retorno diretamente, pois é alta demais para ser contada de forma eletronicamente simples. A interferência entre essas frequências cria uma nova, muito mais lenta, chamada de frequência Doppler.

Onde:

$$(fd = |f\,retorno - f_0|) \quad [4]$$

fd: **Valor da diferença entre a frequência que volta para o sensor e a frequência inicial.**

O princípio da heterodinação é amplamente utilizado em sistemas de radar modernos para simplificar o processamento eletrônico do sinal (RICHARDS, 2014). Essa frequência resultante está na faixa dos (kHz), facilitando o processamento eletrônico para calcular a velocidade final.

3. PROCESSO DE INSTALAÇÃO E INTERVENÇÕES NAS VIAS

Como visto nos tópicos anteriores, para que o radar indutivo consiga detectar a velocidade, ele precisa de bobinas (laços) para gerar um campo eletromagnético e detectar a massa do veículo.

E para fazer essa instalação nas vias, é necessário um processo de intervenção para fazer um bloqueio temporário.

Segundo o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) por meio da Resolução nº 798/2020, os equipamentos medidores de velocidade devem obedecer a critérios específicos de instalação e sinalização.

3.1 CORTE DO PAVIMENTO OU FRESAGEM

A etapa de corte do pavimento é um processo técnico crítico, pois define a precisão e a vida útil do sensor. Diferente de uma fresagem de manutenção de asfalto comum, esta é uma fresagem descontínua e cirúrgica.

3.1.1 GEOMETRIA DOS CORTES

O asfalto é cortado em formatos geométricos específicos, geralmente em retângulos ou quadrados. Um detalhe fundamental é o corte das extremidades, elas devem ser arredondadas ou cortadas em ângulos de 45 graus para evitar que a vibração do tráfego cause o rompimento do fio de cobre nas quinas.

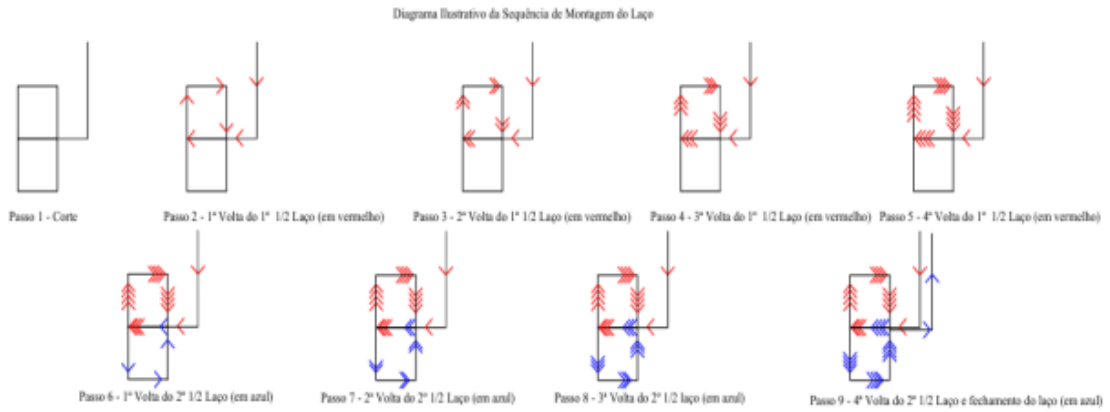
3.1.2 PROFUNDIDADE E LARGURA

O corte deve seguir algumas exigências para um melhor funcionamento. A profundidade do corte deve ter entre 5 a 10 cm, pois se o laço ficar muito acima, pode ser danificado pelo peso dos veículos ou pelo calor do asfalto.

Entretanto, se o laço ficar muito abaixo, isso também implicará em um problema. A sensibilidade eletromagnética diminui, assim dificultando a detecção de veículos menores.

A fenda aberta costuma ter de 6 a 10 mm de largura, o suficiente para acomodar de 3 a 5 voltas de cabo isolado.

Figura 3: Diagrama ilustrativo da sequência de montagem do laço.



Fonte: Brascontrol, 2026.

3.1.3 INSTALAÇÃO DOS FIOS E SELAGEM

Fios de cobre isolados são inseridos nestes cortes, formando laços (bobinas) que atuarão como sensores eletromagnéticos para detectar os veículos. Após a passagem dos fios, os cortes são preenchidos com um material selante, como selante asfálticos, selantes de poliuretano e resina de cura rápida para nivelar a pista e proteger os componentes.

Figura 4: Laços indutivos instalados em rodovias



Fonte: Monólito Nimbus, 2016

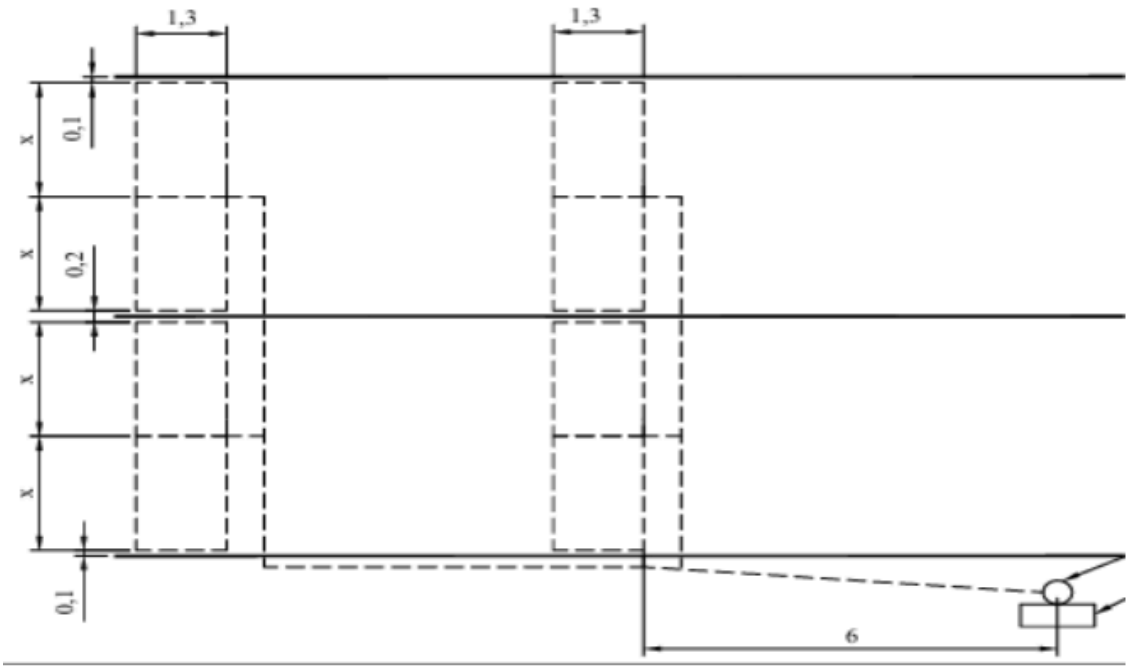
3.1.4 DISTÂNCIA ENTRE SENSORES

São feitos dois conjuntos de cortes paralelos a uma distância fixa e conhecida (entre 3 a 5 metros) podendo chegar a 6 metros segundo o INMETRO. Como a fórmula de velocidade média é dada pela seguinte formula atribuída ao cientista italiano Galileu Galilei:

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad \textbf{[5]}$$

Qualquer variação no ***Δs*** **(**distância entre os laços) quebra a precisão do radar.

Figura 5: Ilustração do posicionamento dos laços.



Fonte: Brascontrol, 2026.

3.2 PROCESSO DE INTERVENÇÃO E INSTALAÇÃO DO RADAR DOPPLER

Sensores de micro-ondas apresentam vantagens em relação aos sensores invasivos por reduzirem intervenções no pavimento e impactos nas condições da via (HO; CHUNG, 2016). Para minimizar o impacto no trânsito, a instalação segue os seguintes passos:

3.2.1 INSTALAÇÃO AÉREA

A principal intervenção ocorre fora da pista. As equipes trabalham na instalação de braços metálicos ou postes ao lado da via ou no canteiro central. Para colocar os módulos sensores e as câmeras, as concessionárias ou órgãos como o DER, costumam realizar o serviço durante a noite. Isso exige apenas o fechamento temporário das faixas, sem a necessidade de interditar a via por longos períodos.

3.2.2 PRESERVAÇÃO DO PAVIMENTO

Como não há cortes, a estrutura do asfalto permanece intacta. Sendo ideal para vias com pavimento de concreto (por serem mais difíceis de fazer o corte) ou rodovias que passam por manutenções recorrentes, pois o radar continuará funcionando mesmo que o asfalto seja trocado. Diferentemente dos sensores invasivos por laço indutivo, sistemas não invasivos preservam a integridade estrutural do pavimento (MAGALHÃES, 2008).

3.2.3 ESTUDO DE VIABILIDADE E GEOMETRIA DE VISÃO

Antes da instalação, é feito um levantamento topográfico do local, pois o Doppler precisa de uma linha de visada limpa, onde é feito uma verificação de obstáculos (árvores, e placas) que possam causar reflexões indesejadas nas ondas de rádio.

O Doppler precisa ser instalado em um ângulo que pode variar entre 10º a 30º (0,98 a 0,86) em relação ao eixo para evitar o efeito cosseno e garantir a precisão.

3.2.4 AJUSTE DE FOCO

O sensor Doppler e as câmeras OCR (Optical Character Recognition) que fazem a leitura das placas são posicionados e através de um notebook conectado ao sistema, é gerado um “laço virtual” na imagem da câmera. O radar Doppler detecta o veículo metros antes e o rastreia até o ponto onde a foto deve ser tirada.

RESULTADO

A tecnologia do radar Doppler vem se tornando cada vez mais eficaz em relação ao radar de laço indutivo pela sua praticidade em relação a

manutenções, tendo em mente que para fazer a troca dos laços indutivos é feito toda uma paralização das vias, corte no pavimento gerando um maior custo diferente do radar Doppler que tem uma manutenção fácil e rápida, não tendo a necessidade de interditar vias e nem fazer cortes gerando uma economia notável.

Tem uma melhor cobertura de múltiplas faixas em relação ao radar de laço indutivo pois o Doppler emite um feixe em formato de cone, fazendo com que ele consiga monitorar duas ou mais faixa e detectar veículos vindo em sentidos diferentes possibilitando a detecção de conversões erradas.

Tabela 1 – Resumo das vantagens

Tecnologia	Laço Indutivo	Doppler
Intervenção na Via	SIM	NÃO
Instalação	COMPLEXA	SIMPLES
Pavimento NÃO Danificado	NÃO	SIM
Tempo de Instalação	DEMORADO	RÁPIDO
Manutenção Corretiva	REPARO NOS SENSORES E PAVIMENTO	SUBSTITUIÇÃO DO COMPONENTE E AJUSTE
Expansão de faixas	EXIGE NOVOS LAÇOS E NOVOS CORTES NO PAVIMENTO	REALIZADO POR CONFIGURAÇÃO OU AMPLIAÇÃO DOS SENSORES

CONCLUSÃO

Conclui-se que a tecnologia de radar Doppler apresenta vantagens significativas em relação aos sistemas de laço indutivo, principalmente no que se refere à praticidade de instalação, redução de intervenções nas vias e facilidade de manutenção. Enquanto os sensores indutivos exigem cortes no pavimento, interrupções no tráfego e manutenção mais complexa, o radar Doppler opera de forma não invasiva, preservando a estrutura do asfalto e reduzindo custos operacionais ao longo do tempo.

Além disso, o estudo sugere que o efeito Doppler permite a medição precisa da velocidade dos veículos por meio da variação da frequência das ondas eletromagnéticas refletidas. Essa tecnologia possibilita maior cobertura

de múltiplas faixas, monitoramento simultâneo de diferentes veículos e melhor adaptação às demandas atuais de fiscalização e controle inteligente do trânsito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASCONTROL. Acervo técnico institucional fornecido pela empresa. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). Resolução nº 798, de 02 de setembro de 2020. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/resolucao798-2020.pdf. Acesso em: 26 maio 2026.

FHWA. Traffic Detector Handbook. 3. ed. Washington, DC: Federal Highway Administration, 2006. Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/hpms/volumeroutes/ch4.cfm. Acesso em: 02 junho 2026.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física: Eletromagnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Disponível em: https://www.eletrica.ufpr.br/armando/index_arquivos/FIsica%203%20Eletromagnetismo%20Halliday.pdf. Acesso em: 02 junho 2026.

HO, Tan-Jan; CHUNG, Meng-Ju. Information-Aided Smart Schemes for Vehicle Flow Detection Enhancements of Traffic Microwave Radar Detectors. Applied Sciences, v. 6, n. 7, p. 196, 2016. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/6/7/196. Acesso em: 02 junho 2026.

INMETRO. Regulamento Técnico Metrológico para Medidores de Velocidade de Veículos Automotores. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=2969 Acesso em: 02 junho 2026.

MAGALHÃES, Hermes Aguiar. Análise em alta resolução de perfis magnéticos de sensores a laço indutivo para classificação de veículos automotores. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/items/9616a3fe-01c7-45ff-b9cc-5ca456c9d973. Acesso em 02 junho 2026.

OLUWATOBI, Akande Noah et al. The design of a vehicle detector and counter system using inductive loop technology. Procedia Computer Science, v. 183, p. 493-503, 2021. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em 02 junho 2026.

RICHARDS, Mark A. Fundamentals of Radar Signal Processing. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2014. Disponível em: https://www.fccdecastro.com.br/pdf/FRSPMR.pdf. Acesso em: 02 junho 2026.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. Física para Cientistas e Engenheiros. São Paulo: Cengage Learning, 2014

SKOLNIK, Merrill I. Introduction to Radar Systems. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. Disponível em: https://pt.scribd.com/doc/235342662/Introduction-to-Radar-Systems-Third-Edition. Acesso em 02 junho 2026.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. Física para Cientistas e Engenheiros. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. Disponível em: https://minhabiblioteca.com.br/catalogo/livro/76875/f-sica-para-cientistas-e-engenheiros-v-2/. Acesso em: 02 junho 2026.

https://noticias.automoveis-online.com/efeito-doppler-e-radar-de-velocidade-sabe-o-que-e/. Acesso em 02 junho 2026.

https://www.monolitonimbus.com.br/como-funciona-a-fiscalizacao-eletronica-de-transito/. Acesso em 02 junho 2026.

https://www.passeidireto.com/pergunta/76634765/o-que-e-o-fluxo-magnetico. Acesso em: 02 junho 2026.