



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ
CAMPUS FORTALEZA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

Waleska Feitoza de Oliveira

**Sensor Óptico Distribuído e Não Destrutivo para Detecção, Classificação e
Aferição de Peso e Velocidade de Veículos Automotores**

FORTALEZA

2021

WALESKA FEITOZA DE OLIVEIRA

SENSOR ÓPTICO DISTRIBUÍDO E NÃO DESTRUTIVO PARA
DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E AFERIÇÃO DE PESO E
VELOCIDADE DE VEÍCULOS AUTOMOTORES

Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Micro-Ondas e Óptica Integrada.

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

Fortaleza
2021



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

Waleska Feitoza de Oliveira

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Glendo Freitas
Guimarães
Instituto Federal do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Wilton Bezerra de Fraga
Instituto Federal do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Marcus Vinícius Nunes de Oliveira
Instituto Federal do Ceará - IFCE

Prof. Dr. João Paulo Costa do Nascimento
Instituto Federal do Ceará - IFCE

Fortaleza, 20 de Setembro de 2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O48s Oliveira, Waleska Feitoza de.
 Sensor Óptico Distribuído e Não Destrutivo para Detecção, Classificação e Aferição de Peso e Velocidade de Veículos Automotores / Waleska Feitoza de Oliveira. - 2021.
 129 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2021.
 Orientação: Profa. Dra. Glendo de Freitas Guimarães .
1. Fibras Ópticas. 2. Sensoriamento Distribuído. 3. Monitoramento de Tráfego. I. Título.

CDD 621.382



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

Ata de defesa do **Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações**, do Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Telecomunicações (PPGET), ofertado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, apresentado e defendido pelo(a) mestrando(a) **WALESKA FEITOZA DE OLIVEIRA**.

No dia 20 (vinte) do mês de setembro do ano de 2021, às 14 horas, no IFCE *Campus* Fortaleza, local *Google Meet* - Link <<<https://meet.google.com/qfy-zqoy-aon>>>, foi realizada a defesa de dissertação do(a) mestrando(a) **Waleska Feitoza de Oliveira** sob o título: "SENSOR ÓPTICO DISTRIBUÍDO E NÃO DESTRUTIVO PARA DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E AFERIÇÃO DE PESO E VELOCIDADE DE VEÍCULOS AUTOMOTORES". Obedecendo ao disposto no Regulamento do PPGET, a Banca Examinadora foi constituída pelos seguintes professores: Prof. Dr. **Glendo de Freitas Guimarães** (Orientador) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE); Prof. Dr. **Wilton Bezerra de Fraga** - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Prof. Dr. **Marcus Vinicius Nunes de Oliveira** - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) e Prof. Dr. **João Paulo Costa do Nascimento** - Universidade Federal do Ceará (UFC).

O professor(a) orientador(a) apresentou o(a) mestrando(a) e os membros da Banca Examinadora bem como explicitou a dinâmica da defesa. Em continuidade, o(a) presidente cedeu a palavra ao(à) mestrando(a) para expor seu trabalho de pesquisa. Uma vez concluída a exposição pelo(a) mestrando(a), a Banca Examinadora procedeu às avaliações, sendo assegurado ao(à) mestrando(a) o direito de resposta ou de esclarecimento. Continuando o processo, a Banca Examinadora reuniu-se privativamente para emitir o parecer, através de videoconferência pelo aplicativo *WhatsApp*. E, sequencialmente, informou ao(à) mestrando(a) que a sua dissertação foi considerada:

(X) aprovado(a)

() reprovado(a)

A Banca Examinadora indicou, ainda, os seguintes ajustes e procedimentos necessários para a consolidação da pesquisa e redação final do produto educacional: seguir as recomendações dos membros da banca.

Nada mais havendo a tratar, o(a) presidente da Banca Examinadora lavrou esta Ata de Exame de defesa que, após assinada pelos seus membros, será encaminhada à Coordenação do **PPGET/IFCE** para registro acadêmico na documentação do(a) mestrando(a).

NOME COMPLETO ASSINATURA

Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Wilton Bezerra de Fraga

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. **Marcus Vinicius Nunes de Oliveira**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. **João Paulo Costa do Nascimento**
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Mestrando(a) **Waleska Feitoza de Oliveira**
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Documento assinado eletronicamente por **Glendo de Freitas Guimaraes, Coordenador(a) do PPGET**, em 28/09/2021, às 14:27, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Vinicius Nunes de Oliveira, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 29/09/2021, às 11:55, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wilton Bezerra de Fraga, Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 30/09/2021, às 08:41, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Paulo Costa do Nascimento, Usuário Externo**, em 30/09/2021, às 13:48, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **2989477** e o código CRC **A7B92C27**.

Esta dissertação é dedicada à memória de minha querida e doce avó.

Agradecimentos

Agradeço imensamente a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

À minha querida e doce vó pelo imenso amor e confiança depositados em mim. Que sempre me apoiou e incentivou meus sonhos por mais altos que eles fossem, que jamais duvidou do meu sucesso e potencial.

Ao meu noivo, amigo e companheiro pela paciência, companheirismo e apoio incondicional. Pelo incentivo a minha carreira e por despertar em mim o desejo de ser e fazer melhor. Pela paciência e imensa ajuda prestada durante os testes em campo. Obrigada por vibrar com minhas conquistas.

À minha querida mãe pelo apoio e confiança. Por nunca ter duvidado do meu potencial. Obrigada por sempre ter acreditado em mim.

À minha querida madrinha pela confiança depositada em mim durante minha trajetória acadêmica e pessoal. Agradeço por todo incentivo e apoio.

Ao meu irmão, Daniel, que sempre apoiou e incentivou minha educação. Obrigada por ter sido um paizão quando precisei.

Ao meu orientador, professor Glendo, pela paciência e orientação durante essa jornada. Por sempre valorizar meu trabalho, por menor que seja. Obrigada por ser essa máquina de motivação.

Ao professor Auzuir pelos ensinamentos e orientação prestados durante as disciplinas de metodologia científica e estudos especiais. Obrigada por ter sido fundamental neste trabalho.

Ao meu grande colega e menino dos meus olhos, Caio Herbbert, pelas grandes contribuições dadas a este trabalho, sem as quais este trabalho não seria possível. Este projeto é nosso legado.

Ao professor Agliberto e ao colega Gustavo pelo imenso apoio prestado no início deste projeto.

À minha grande amiga Luana pelo apoio incondicional e ao amigo Roberto Silva pela ajuda

prestada durante este projeto.

Aos demais colegas do Laboratório de Fotônica, ao colega Alan pelo suporte nos desenhos sempre que precisei, ao grande colega e professor Isaac que sempre me prestou auxílio dos seus conhecimentos e à toda família fotônica que sempre me acolheu, me incentivou e me ensinou, e que, durante este trabalho, sempre me prestou ajuda. Obrigada a todos pelo carinho e ensinamentos.

À banca, composta pelos professores Wilton, Marcus Vinícius e João Paulo, por aceitarem fazer parte deste trabalho. Espero não desapontá-los.

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.”.

Paulo Freire

"Seja a mudança que você quer ver no mundo."

Mahatma Gandhi

Resumo

Medidas de velocidade de veículos automotores em bandas de rodagem são, frequentemente, afetadas por erros de medição intrínsecos ou provenientes de fatores externos. Com o desenvolvimento das cidades inteligentes e o avanço da aplicação de tecnologia óptica em sensores, observou-se, nos últimos anos, o surgimento de diversas técnicas para aferição de peso e velocidade e outros parâmetros relacionados ao monitoramento de tráfego baseados em fibras ópticas. Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema óptico para detecção, classificação e aferição de peso e velocidade de veículos automotores, em vias de faixa única, utilizando fibra óptica. O sensor de fibra óptica distribuído é instalado sobre o asfalto, não sendo necessário destruir o pavimento. A fim de atingir o objetivo de desenvolver um sensor óptico não destrutivo para monitoramento de tráfego foram realizados testes, em laboratório e em campo, que possibilitaram a análise da sensibilidade da fibra a uma determinada massa e às vibrações causadas no ambiente ao redor da mesma. A partir dos níveis de tensão elétrica detectados pelo fotodiodo e tratados e armazenados em um sistema embarcado, foi possível detectar a presença do veículo que passa pela fibra sensora e, a partir dos níveis de variação e intervalo de tempo entre as detecções estimou-se o peso e a velocidade. Com base nas faixas de peso de cada veículo, o tipo de veículo pode ser determinado, permitindo assim, sua correta classificação. Com o intuito de apresentar um sistema capaz de monitorar o tráfego remotamente e em tempo real, foi desenvolvida uma interface gráfica de *website*, hospedada em um servidor *web*, para disponibilizar acesso remoto e em tempo real dos dados obtidos pelo sensor. O processo de desenvolvimento do sistema de detecção, classificação e medição de peso e velocidade de veículos retornou resultados satisfatórios acerca de sensoriamento distribuído por fibra óptica. Os resultados mostraram uma boa relação entre a magnitude do peso aplicado e o sinal óptico de saída em termos de intensidade do sinal. Para medição de peso, o sensor apresentou boa precisão com erros de medição entre 0,35 e 2,5 % e R^2 de 94,8 %. Para detecção, o sensor apresentou grande sensibilidade à presença de massa, os níveis de variação que garantem a confiabilidade da detecção são, em média, 3 vezes maior que a variação padrão do sinal devido a vibrações externas. Para aferição de velocidade observou-se boa relação entre os valores de velocidade aferidos e os valores reais para faixas de velocidade entre 10 e 40 km/h, obtendo-se erros de medição entre 0,30 e 15,5 %.

Palavras-chave: Fibras Ópticas, Sensoriamento distribuído, Monitoramento de Tráfego.

Abstract

Speed measurements of motor vehicles on roads are often affected by errors of certain intrinsic or from external factors. Like development of smart cities and the advancement of the application of optical technology in sensors, it has been observed, in recent years, the emergence of various techniques for measuring weight and speed and fiber optic traffic monitoring. This work clarifies the development of an optical system for detection, classification and measurement of weight and speed of motor vehicles, on single-lane roads, using fiber optics. The distributed optical fiber sensor is installed over the asphalt, it is not necessary to destroy the pavement. In order to achieve the goal of developing a non-destructive optical sensor for monitoring tests were carried out, in the laboratory and in the field, which enabled the analysis of the fiber sensitivity to a given mass and vibrations caused in the surrounding environment of the same. From the electrical voltage levels detected by the photodiode and treated stored in an embedded system, it was possible to detect the presence of the passing vehicle by the sensor fiber and, from the levels of variation and time interval between detections weight and speed were estimated. Based on the weight ranges of each vehicle, the vehicle type can be determined, thus allowing its correct classification. In order to present a system capable of monitoring traffic remotely and in real time, a graphical website interface, hosted on a web server, to provide remote access and in real time to the data obtained by the sensor. The system development process detection, classification and measurement of vehicle weight and speed returned results about fiber-optic distributed sensing. The results induced a good relationship between the magnitude of the applied weight and the optical output signal in terms of signal strength. To measure weight, the sensor has good accuracy with errors in mandatory between 0.35 and 2.5% and R^2 of 94.8%. For detection, the sensor has a large sensitivity to the presence of mass, the levels of variation that ensure the reliability of the detection are, on average, 3 times greater than the standard signal variation due to vibrations external. For speed measurement, a good relationship was observed between the measured speed values and the actual values for speed ranges between 10 and 40 km/h, obtaining measurement errors between 0.30 e 15.5 %.

Keywords: Optical Fibers, Distributed Optical Sensing, Traffic Monitoring.

Lista de Figuras

1	Representação da estrutura básica de uma fibra óptica.	34
2	Comparação entre as fibras ópticas monomodo, multimodo de índice degrau e multimodo de índice gradual.	36
3	Propagação da luz em fibra monomodo.	37
4	Propagação da luz em fibra multimodo.	37
5	Representação da abertura numérica e reflexão no interior do núcleo da fibra .	39
6	Representação da atenuação de um sinal em uma fibra óptica.	41
7	Esboço da perda de potência em uma fibra de curvatura R.	43
8	Esboço das flutuações de pequena escala no raio de curvatura do eixo que levam a perdas de potência.....	43
9	Processo de busca e seleção de trabalhos.	46
10	Mapa de ideias com todos os materiais utilizados na montagem do protótipo.....	60
11	LED de alta potência LED780E Thorlabs.	61
12	Modelagem acoplador LED/fibra no Solid Edge.	62
13	Circuito LED <i>DRIVER</i> para alimentação da fonte de luz do sensor.....	62
14	Foto do Arduino Nano utilizado no sistema proposto (à esquerda) e modelagem do Arduino Nano no <i>Solid Edge</i> (à direita).....	63
15	Representação da reflexão total da luz em uma fibra óptica.....	64
16	Fotodiodo de silício montado.	65
17	Fotodiodo de Si com acoplador para fibra FDS02.....	65
18	Módulo ADS1115.	66
19	Foto da <i>Raspberry Pi</i> 3B durante os testes em laboratório.	67

20	Tela inicial apresentada no <i>Firebase</i> para acesso aos dados do sensor	68
21	Arranjo experimental do sistema.	69
22	Representação da deformação sofrida pela fibra óptica e sua influência sobre o sinal propagante.	70
23	Representação da montagem do protótipo. a) Fonte de laser acoplada à fibra; b) Acoplador óptico; c) Fibra óptica 1; d) Fibra óptica 2; e) Fotodiodo 1; f) Fotodiodo 2; g) Placa eletrônica para acionamento do fotodiodo 1; h) Placa eletrônica para acionamento do fotodiodo 2; i) Osciloscópio.	71
24	Representação de um bloco de peso padrão sobre a plataforma de pesagem.	73
25	a) Fibra disposta a 180° na horizontal em relação a plataforma de pesagem. b) Fibra disposta numa curvatura de 135°. c) Fibra disposta na transversal em relação a plataforma de pesagem.	74
26	Modelagem 3D do sistema de pesagem de veículos automotores. a) LED <i>Driver</i> ; b) LED de alta potência; c) Fibra óptica; d) Sistema eletrônico de aquisição e leitura de dados	75
27	Mudanças no sinal óptico devido à presença do veículo.	76
28	Foto da realização de testes em ambiente simulado utilizando um objeto circular.	77
29	Representação do sistema de medição por fibra óptica instalado em campo.	78
30	Carro na área de sensoriamento durante os testes em campo.	79
31	Resposta do sensor em função da variação de peso.	81
32	Relação entre a velocidade medida pelo sensor e a velocidade exibida pelo velocímetro.	82
33	Vista superior do sistema de medição.	83
34	<i>Case 1</i> fechada (à esquerda) e aberta (à direita).	83
35	<i>Case 2</i> fechada (à esquerda) e aberta (à direita).	84
36	Perspectiva explodida do sistema eletrônico 1.	84
37	Perspectiva explodida do sistema eletrônico 2	85
38	Placa para fornecimento de luz: LED, <i>Driver</i> de LED e Arduino.	86
39	Placa para fornecimento de luz modelada e renderizada no Solid Edge.	86

40	Representação do circuito do fotodiodo recomendado pelo fabricante.	87
41	Placa para recebimento e tratamento de dados: Fotodiodo e módulo ADS1115.	87
42	Placa para recebimento e tratamento de dados modelada e renderizada no Solid Edge (com Raspberry).	88
43	Tela de acesso inicial da página hospedada no <i>Firebase</i>	89
44	Dados lidos pela <i>Raspberry</i> e enviados para página <i>web</i>	90
45	Variação da amplitude do sinal em cada uma das fibras vistas pelo osciloscópio durante o primeiro teste.	91
46	Variação da amplitude do sinal em cada uma das fibras vistas pelo osciloscópio durante o segundo teste.	92
47	Variação da amplitude do sinal em cada uma das fibras vistas pelo osciloscópio durante o terceiro teste.	92
48	Teste realizado em laboratório para três configurações distintas.	94
49	Teste realizado em laboratório para a configuração referente à Tensão 1.	95
50	Teste realizado em campo com veículos de duas e quatro rodas.	97
51	Representação do comportamento da tensão em função do peso para os ensaios de reprodutibilidade.	99
52	Ensaio 1: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença de massa na área de sensoramento.	101
53	Ensaio 2: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença de massa na área de sensoramento.	102
54	Ensaio 3: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença de massa na área de sensoramento.	102
55	Ensaio 4: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença de massa na área de sensoramento.	103
56	Ensaio 1: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença do veículo na área de sensoramento.	104
57	Ensaio 2: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença do veículo na área de sensoramento.	105

58	Ensaio 3: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença do veículo na área de sensoriamento.	105
59	Variação da tensão à medida que os veículos passam pela fibra óptica.	106
60	Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante o primeiro ensaio.	108
61	Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante o segundo ensaio.	109
62	Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante o terceiro ensaio.	109
63	Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante o quarto ensaio.	110
64	Ensaio 1: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante a passagem do veículo.	111
65	Ensaio 2: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante a passagem do veículo.	112
66	Ensaio 3: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante a passagem do veículo.	112
67	Circuito de alimentação do LED via Arduino.	125
68	Circuito da placa <i>Raspeberry</i>	126
69	Circuito da placa eletrônica para captação, conversão, tratamento e leitura dos dados.	127
70	Valores exibidos em tempo real aos usuários via página <i>web</i>	128

Lista de Tabelas

1	Metodologia de pesquisa e seleção trabalhos.	46
2	Seleção de trabalhos aplicando os critérios de inclusão e exclusão.....	48
3	Estudo comparativo dos trabalhos.	57
4	Valores obtidos para as três configurações propostas em função do peso.....	93
5	Variação da tensão em função do peso aplicado.....	95
6	Variação da tensão em função do peso do veículo.	96
7	Parâmetros de calibração do sensor obtidos a partir da equação da curva.....	98
8	Variação dos níveis de tensão para cada ensaio em função do peso.	99
9	Determinação da precisão e taxa de erro das medidas de peso para cada veículo.	100
10	Classificação do veículo com base na faixa de tensão aferida.....	100
11	Cálculo da atenuação do sinal durante a detecção dos eixos dianteiro e traseiro do veículo.	106
12	Cálculo da velocidade a partir da diferença entre os tempos finais e iniciais.	110
13	Cálculo da velocidade a partir da diferença entre os tempos finais e iniciais.	113
14	Cálculo dos erros de medição a partir da comparação entre os valores de velocidade aferidos pelo sensor e os valores mostrados no velocímetro.	114

Lista de Abreviações

AN	Abertura Numérica
AOM	<i>Acoustic Optical Modulator</i> (Modulador Acústico - Óptico)
DAS	<i>Distributed Acoustic Sensor</i> (Sensor Acústico Distribuído)
DLI	Detector por Laço Indutivo
DOFS	<i>Distributed Optical Fiber Sensor</i> (Sensor de Fibra Óptica Distribuído)
DOVS	<i>Detection Optical Vibration Sensor</i> (Sensor Ótico de Detecção de Vibração)
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i> (Amplificador de Fibra Dopada com Érbio)
EM	Eletromagnético
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> (Fibra Grade de Bragg)
FC/PC	<i>Fiber Conector/ Physical Contact</i>
FO	Fibra Óptica
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Plastic</i> (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i> (Dispersão da Velocidade de Grupo)
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
OMS	Organização Mundial da Saúde
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
OTDR	<i>Optical Time-domain Reflectometer</i> (Reflectômetro Óptico Domínio do Tempo)

PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
PMD	<i>Polarization Modes Dispersion</i> (Dispersão dos Modos de Polarização)
SFO	Sensores de Fibra Óptica
STI	Sistemas de Transporte Inteligentes
WIM	<i>Weigh in Motion</i> (Pesagem em Movimento)

Lista de Símbolos

n	Índice de refração
c	Velocidade da luz no vácuo
λ	Comprimento de onda
v	Velocidade da luz na fibra
Θ_i	Ângulo de incidência
Θ_n	Ângulo de transmissão
Δ	Diferença relativa do índice de refração
α	Atenuação
β	Constante de propagação
ω	Frequência angular

Sumário

1	INTRODUÇÃO	26
1.1	Motivação e Justificativa	26
1.2	Objetivos Gerais	30
1.2.1	Objetivos Específicos	30
1.3	Organização do Trabalho	31
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	Fibra Óptica	33
2.1.1	Principais tipos de fibra óptica	35
2.1.2	Modos de Propagação.....	36
2.2	Propagação de Luz em Fibras Ópticas.....	37
2.3	Atenuação e Dispersão em Fibras Ópticas.....	40
2.3.1	Atenuação	40
	Atenuação por absorção.....	41
	Atenuação por espalhamento	42
	Atenuação por curvatura.....	42
2.3.2	Dispersão	44
	Dispersão intermodal	45
	Dispersão intramodal	45
	Dispersão dos modos de polarização	45
2.4	Revisão Bibliográfica.....	45
2.4.1	Metodologia de busca e seleção dos trabalhos.....	45
2.4.2	Sensoriamento óptico, trabalhos correlatos e estado da arte	49

2.4.3	Pedidos de patente	56
2.4.4	Comparação entre trabalhos correlatos	57
3	MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1	Materiais Utilizados.....	60
3.1.1	Sistema eletrônico 1	61
	LED de alta potência.....	61
	LED <i>DRIVER</i>	62
	Arduino	63
3.1.2	Fibra óptica	63
3.1.3	Sistema eletrônico 2	64
	Fotodiodo	64
	Placa eletrônica PCB	65
	Raspberry PI 3B.....	66
	Página <i>web</i> e acesso remoto.....	67
3.2	Métodos	68
3.2.1	Arranjo experimental e metodologia de funcionamento do sistema .	68
3.2.2	Testes efetuados no protótipo.....	70
	3.2.2.1 Prova de Conceito: Testes de sensibilidade da fibra óptica a uma pressão externa.	70
	3.2.2.2 Estimativa de peso de veículos	72
	Testes em laboratório	72
	Testes em campo	73
	3.2.2.3 Classificação de veículos	74
	3.2.2.4 Detecção de veículos	75
	3.2.2.5 Estimativa de velocidade de veículos	76
	Testes realizados em laboratório.....	77
	Testes em campo	78

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1	Curva de Calibração do Sensor.....	80
4.2	Projeto Mecânico do Sensor	82
4.3	Instrumentação Eletrônica	85
4.4	Página Web e Acesso Remoto	88
4.5	Prova de Conceito: Testes de Sensibilidade da Fibra Óptica a uma Pressão Externa	90
4.6	Estimativa de Peso de Veículos em Movimento	93
4.6.1	Testes realizados em laboratório	93
4.6.2	Testes realizados em campo	96
4.7	Classificação de Veículos Automotores.....	100
4.8	Deteção de Veículos Automotores.....	100
4.8.1	Testes em laboratório	100
4.8.2	Testes em campo	104
4.9	Estimativa da Velocidade de Veículos.....	107
4.9.1	Testes realizados em laboratório	107
4.9.2	Testes realizados em campo	111
5	CONCLUSÕES	115
5.1	Conclusão	115
5.2	Trabalhos Futuros	116
	Referências Bibliográficas	117
	Apêndice A -- Produção Científica	124
	Apêndice B -- Circuito do Arduino e Drive de LED	125
	Apêndice C -- Circuito Raspberry	126

Apêndice D -- Circuito Fotodiodo, ADS115 e Raspberry	127
<u>Apêndice E -- Tela de visualização de dados em tempo real</u>	<u>128</u>

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Justificativa

Com o advento da Indústria 4.0 e o surgimento das Cidades Inteligentes ou "*Smarts Cities*", a busca por sistemas inovadores voltados para controle e monitoramento de tráfego de forma eficiente e inteligente torna-se cada vez mais frequente (DEY MEENU RANI E SHARMA, 2019). Nesse contexto, muitos sistemas são desenvolvidos para a detecção de parâmetros de veículos (peso, tipo, velocidade e número de eixos), condições e densidade de tráfego e condições de estrada, a fim de garantir maior segurança no trânsito, controle eficiente do tráfego e melhor mobilidade urbana (HUANG et al., 2018), (FALDU PRAYUSHI E DOSHI, 2019).

Ademais, observou-se, nos últimos anos, que o número de acidentes de trânsito envolvendo vítimas fatais aumentou, consideravelmente, no Brasil e no mundo. De acordo com o levantamento feito pela OPAS (Organização Pan-Americana da Saúde), cerca de 1,35 milhões de pessoas morrem por ano devido às fatalidades ocorridas no trânsito (OBSERVATÓRIO NACIONAL DE SEGURANÇA VIÁRIA, 2019). Mais de 70% dos acidentes de trânsito são atribuídos a erro humano, como erros de percepção, erro de julgamento de distância e excesso de velocidade.

Observou-se, nas últimas décadas, um aumento da concentração populacional nos centros urbanos, o que implica em um crescimento do número de veículos em circulação e, por conseguinte, o surgimento ou agravamento de diversos problemas relacionados à mobilidade urbana, como aumento de congestionamentos, o que implica diretamente nos atendimentos de emergência (ambulâncias, bombeiros, polícia, defesa-civil), maior tempo no trânsito, gerando prejuízos à economia, aumentando custos e reduzindo a produtividade, redução da qualidade de vida urbana e outros (ZHU et al., 2016). Ademais, um número maior de pessoas e veículos circulando em vias urbanas sem que haja o adequado planejamento e gerenciamento de controle de tráfego pode aumentar a probabilidade de acidentes de trânsito, que, por sua vez, podem provocar um crescimento na taxa de óbitos e de feridos (JORGE; LATORRE et al., 1994).

Pesquisas também mostram que esse tipo de problema é mais grave nos países de média e baixa renda (EM DISCUSSÃO: REVISTA DE AUDIÊNCIAS PÚBLICAS DO SENADO FEDERAL , 2012). Tendo em vista estes acontecimentos, torna-se necessário o desenvolvimento de medidas de prevenção contra essas casualidades.

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o Brasil ocupa a quinta posição entre os países que mais matam no trânsito, precedido por Índia, China, Estados Unidos e Rússia (OPAS/OMS BRASIL, 2019), (EM DISCUSSÃO: REVISTA DE AUDIÊNCIAS PÚBLICAS DO SENADO FEDERAL , 2012). Ainda segundo dados da OMS (2019), a cada ano morrem cerca de 1,2 milhão de pessoas por acidentes de trânsito no mundo. Além disso, tem-se o custo da perda laboral, perda de produtividade e potencial contribuinte dos planos de saúde e previdenciários e impactos na renda do domicílio. Logo, além de perturbar as operações do tráfego, interromper o fluxo do tráfego e causar graves problemas urbanos em todo o mundo, os acidentes de trânsito podem causar danos irreparáveis, ferimentos e até mortes, o que pode remeter a impactos econômicos, financeiros e atuariais nos sistemas de saúde, previdência, mercado de trabalho e arranjos familiares (MOHAMMED et al., 2019).

A gravidade desta problemática aliada ao constante desenvolvimento da ciência e tecnologia de tráfego inteligente torna imprescindível e fundamental o desenvolvimento de sistemas de monitoramento inteligente de fluxo de tráfego em tempo real que forneçam informações como velocidade, fluxo de tráfego, tipo de veículos, WIM (*Weight in Motion* ou *Pesagem em Movimento*), detecção de veículos e outros parâmetros que possam fornecer uma base de decisão de comando para gestão de tráfego e solução de problemas urgentes (CICARELLI; RIBEIRO; LEANDRO, 2011).

É válido destacar que no processo de detecção, classificação e estimativa de velocidade de veículos automotores é essencial garantir precisão e eficiência nas aferições, a fim de obter-se uma gestão inteligente de controle de tráfego (LIU et al., 2019). Deste modo é possível manter um gerenciamento de tráfego inteligente em tempo real capaz de reduzir não somente o número de acidentes de trânsito, mas também, servir de base para estudos relacionados a controle e regulação o tráfego, redução de congestionamentos, melhorarias na mobilidade urbana e detecção de eventos comportamentais anormais (HILMANI; MAIZATE; HASSOUNI, 2020).

Assim, pode-se concluir que a partir do desenvolvimento de sensores de detecção, classificação e velocidade de veículos automotores é possível regular e manter a segurança dos usuários que utilizam vias diariamente. Atualmente, existem diversas tecnologias utilizadas para o sensoriamento de presença e de velocidade de veículos automotores (NISHIMOTO, 2006). Dentre essas tecnologias as mais utilizadas são sensoriamento por laços indutivos e

cabos piezoelétricos, embora existam outras tecnologias, tais como infravermelhos, ultrassom e micro-ondas.

Os sensores de velocidade piezoelétricos possuem alta eficiência e confiabilidade na contagem de eixos de veículos, porém o custo do mesmo é elevado, logo são mais utilizados em sensores de pesagem em movimento ou WIM (*Weight in Motion*) (TOSI et al., 2010).

Além disso, para obter bom desempenho os sensores piezoelétricos precisam ser combinados a laços indutivos, visto que estes são capazes de detectar a presença do veículo, enquanto o piezoelétrico é responsável pela contagem dos eixos e aferição da velocidade do veículo (GAJDA et al., 2001).

Os sensores piezoelétricos são capazes de coletar, a partir de sinais analógicos, informações oriundas do esforço do pneu sobre o sensor. Isso é possível devido à relação proporcional entre o sinal analógico e a pressão exercida pelo pneu, o que garante aos sensores piezoelétricos alta precisão na diferenciação de eixos individuais. Um problema comum a este tipo de sensor, além do custo, é a instalação de um cabo longo e rígido na superfície da faixa de rodagem. Devido às ondulações do pavimento alguns trechos do cabo não se nivela, causando uma diferença de sensibilidade (GOODRIDGE, 2003).

Os sensores por laços indutivos ou detector laço indutivo (DLI) são o tipo de sistema de detecção e aferição de velocidade de veículos mais utilizado no Brasil. O sensoriamento por DLI se dá pelo aparecimento de um campo magnético nas bobinas dos laços devido à interação do mesmo com a massa metálica do veículo. Ou seja, quando um veículo passa por um sistema de fiscalização baseado em DLI, o campo criado nas bobinas detecta a presença do veículo e inicia-se a contagem do tempo de permanência do mesmo (SOCHOR; JURANEK; HEROUT, 2017). A partir desse intervalo de tempo a velocidade é calculada.

Apesar da grande comercialização e do bom desempenho como sensores de velocidade de veículos, os DLIs podem apresentar falhas de medição em determinadas situações, tais como: erros de detecção causados por veículos que trafegam na faixa adjacente (*splash over*), indução causada pelo campo magnético de um laço indutivo próximo (*crosstalk*), baixa sensibilidade na detecção de presença de motocicletas, além da instalação, que é feita sob o asfalto, sendo necessário retirar parte da via e pavimentá-la novamente, tornando inviável a instalação em vias de concreto (NISHIMOTO, 2006).

O crescimento do nível de intensidade do tráfego, a criação de sistemas de transporte inteligente de controle de tráfego e problemas de manutenção da qualidade das superfícies das estradas levaram à criação de sensores para pesagem de veículos em movimento. Embora a

maior aplicação seja relacionada a veículos rodoviários, sistemas de pesagem em movimento (WIM) são de extrema importância para identificação de veículos e controle de densidade de tráfego (BIN; XINGUO, 2010).

Os sistemas WIM e de monitoramento de tráfego empregados atualmente utilizam tecnologias eletrônicas, mecânicas, piezoelétricas e baseadas em imagens (PEDERSEN; HAUGEN, 2017). A grande desvantagem desses sistemas é a interferência do ambiente externo nas medições, especialmente na presença de vibrações e campos eletromagnéticos, além da complexidade dos componentes, instalação invasiva, uma vez que é necessário retirar parte do pavimento, e, no caso de sensores piezoelétricos, alto custo de instalação e manutenção (ZHANG et al., 2017). No caso de tecnologias de detecção de fluxo de tráfego baseadas em vídeo e imagem, além do alto custo de instalação e manutenção, as mesmas requerem uma análise contínua de vídeos e imagens (GRAKOVSKI; PILIPOVECS, 2017).

Portanto, há uma necessidade de uma tecnologia que otimize e aprimore os sistemas de pesagem existentes. Para isso, fibras ópticas podem ser aplicadas em sensores com diversas vantagens em relação às tecnologias convencionais. Sensores de fibra óptica são insensíveis à interferência eletromagnética, possuem baixo peso e pequenas dimensões, além de respostas rápidas e capacidade de multiplexação do sinal (MOURA et al., 2018). O sensor de fibra óptica fornece uma tecnologia promissora utilizando-se de redes de energia mais sustentáveis, com menor custos de manutenção e capacidade de autodiagnóstico, além de fornecer maior precisão nas medidas (PALMIERI; SCHENATO, 2013).

Em se tratando de sensores voltados para classificação de veículos automotores, embora não haja sensores empregados nas vias urbanas atualmente no Brasil, existem inúmeras propostas de sensores de identificação da categoria de veículo automotores, a partir de tecnologias, tais como redes neurais (GHOLAMALINEJAD; KHOSRAVI, 2021), detectores de radio frequência baseados em dispositivo (RFID, *Radio Frequency Identification* ou Identificação por Radiofrequência) (CAO et al., 2021), análise de vídeo (ARINALDI; PRADANA; GURUSINGA, 2018) e refletômetro óptico (CHEN et al., 2020). Além da classificação, a detecção automática de veículos também é um desafio para o controle e monitoramento de tráfego.

Na detecção inteligente de tráfego, a aquisição do fluxo de tráfego e outros parâmetros é um componente indispensável, desse modo, quando se fala sobre detecção de fluxo de tráfego inteligente e controle e gestão de tráfego, dois fatores são essenciais: precisão e eficiência, então, com boa detecção, é possível realizar um gerenciamento inteligente de previsão de tráfego, ajuste, controle de densidade, assim como regular o tráfego, ver congestionamentos

e detectar acidentes e eventos anormais (WANG; ZHAO; SHEN, 2019).

Portanto, existe a necessidade de uma nova tecnologia de baixo custo e fácil instalação que potencialize as tecnologias já existentes, contornando as desvantagens aqui citadas, em especial as que se referem a erros de medição. Neste contexto, a fibra óptica se destaca como elemento sensor de alta sensibilidade, dimensões compactas, baixa atenuação e imunidade à interferência eletromagnética, além de ter sua matéria prima abundante na natureza, visto que se baseia em sílica. Portanto, este trabalho propõe uma solução inovadora baseada na utilização de fibras ópticas em um sensor distribuído capaz de detectar, classificar e estimar o peso e a velocidade de veículos automotores em faixas de rodagem únicas.

1.2 Objetivos Gerais

Neste trabalho foram avaliadas as variações das tensões elétricas relacionadas ao sinal propagante devido às mudanças nos parâmetros do sinal óptico provocadas pela passagem de veículos nas fibras ópticas, a partir de testes realizados em laboratório que comprovaram a sensibilidade da fibra óptica à pressão exercida pelo pneu.

À vista disso, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema não destrutivo de baixo custo e fácil instalação para detecção, classificação e aferição de peso e velocidade de veículos automotores em bandas de rodagem de faixa única. Para isto, uma solução inovadora e não destrutiva é proposta baseada na utilização de sensores de fibra óptica distribuídos instalados sobre o asfalto.

Além de garantir maior segurança no trânsito e não destruir o pavimento, o sensor permite o monitoramento de tráfego em tempo real. É esperado obter-se um protótipo capaz de identificar, classificar e aferir a velocidade e o peso de veículos automotores para fins monitoramento de tráfego, melhoria na mobilidade urbana e redução do número de acidentes de trânsito.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar testes em laboratório com a finalidade de analisar as alterações no comportamento do sinal propagante causadas pela sensibilidade da fibra óptica à pressão;
- Analisar as alterações no comportamento do sinal propagante causadas pela sensibilidade da fibra óptica à deformação que ocorre devido à presença do veículo;

- Estimar o peso de veículos automotores, a partir das alterações nos parâmetros do sinal óptico devido ao peso do veículo, de modo a correlacionar a variação do sinal medido com o peso;
- Identificar e classificar os veículos a partir dos valores das quedas nos níveis de tensão elétrica ocasionadas pela passagem dos veículos;
- Estimar a velocidade de cada veículo a partir do intervalo de tempo mensurado durante a passagem do mesmo pelo sistema de sensoramento;
- Desenvolver um protótipo de sensor óptico distribuído, compacto, não destrutivo, de baixo custo e fácil instalação e alta precisão, capaz de detectar, classificar e estimar o peso e a velocidade de veículos automotores em faixas únicas.

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos apresentados como Introdução, Fundamentação Teórica, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão e Conclusão, respectivamente.

Na seção 2.1 do Capítulo 2, é realizada uma introdução sobre fibra óptica dividida em principais tipos de fibra óptica e modos de propagação, nas subseções 2.1.1 e 2.1.2, respectivamente. Na seção 2.2 é realizada uma breve explanação sobre propagação de luz em fibras ópticas e na seção 2.3 são apresentados os conceitos de atenuação e dispersão em fibras ópticas, destacando os principais tipos. Na seção 2.4 é apresentada uma ampla revisão da literatura acerca dos trabalhos correlatos com o proposto neste trabalho. Inicialmente é apresentada e explicada a metodologia utilizada no processo de busca e seleção dos trabalhos que constituem o estado da arte na subseção 2.4.1. Em seguida, na subseção 2.4.2 os trabalhos são apresentados e discutidos. Também são apresentadas as patentes e pedidos de patentes encontradas durante a busca de anterioridade na subseção 2.4.3. Por fim, na subseção 2.4.4, uma tabela de comparação entre os trabalhos discutidos no estado da arte é apresentada e discutida.

No Capítulo 3, são discutidos os materiais e os métodos utilizados na confecção do protótipo. Na seção 3.1 são apresentados os materiais utilizados para confecção do protótipo e suas definições e principais funções dentro do protótipo são explanadas, de forma breve e direta. Na seção 3.2 são descritos os métodos de funcionamento do sensor, de modo que cada parâmetro (peso, classificação, detecção e velocidade) são avaliados e discutidos separadamente. Na subseção 3.2.1 é apresentado o arranjo experimental do sistema de medição e explicada a

metodologia de aferição proposta pelo sensor. Na subseção 3.2.2 são apresentados e explicados os testes realizados no protótipo, tanto em laboratório como em campo, para aferição de peso e velocidade e detecção e classificação de veículos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos durante este trabalho, a partir dos testes realizados e comprovados em laboratório e em campo. A seção 4.1 apresenta a curva de calibração obtida pelo sensor. A seção 4.2 apresenta o projeto mecânico do sensor, explicitando os componentes que o compõe. A seção 4.3 explica os resultados obtidos durante o processo de instrumentação eletrônica que resultou nas placas eletrônicas utilizadas no sensor. A seção 4.4 apresenta e explica o funcionamento da página *web* e acesso remoto para monitoramento dos dados obtidos pelo sensor. A seção 4.5 apresenta e discute os resultados obtidos durante os testes de bancada para validação da sensibilidade da fibra à pressão. A seção 4.6 relata os resultados obtidos durante os testes para pesar veículos em movimento, tanto em laboratório, na subseção 4.6.1, como em campo, na seção 4.6.2. A seção 4.7 relata os resultados referentes à classificação de veículos automotores com base no peso dos mesmos. A seção 4.8 relata e discute os resultados obtidos durante os testes para detectar a presença de veículos, tanto em laboratório, na subseção 4.8.1, como em campo, na subseção 4.8.2. Por fim, a seção 4.9 relata e discute os resultados obtidos durante o processo de aferição de velocidade.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas nesse trabalho com base nos resultados retratados no Capítulo 4. Ao final são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para fundamentar esta dissertação, além dos conceitos, fundamentos e equações matemáticas necessários para compreensão deste trabalho, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica dos trabalhos publicados nos últimos 10 anos relacionados a sensoriamento óptico aplicado ao controle e monitoramento de tráfego urbano com ênfase na aferição de peso e velocidade de veículos automotores, embora também tenham sido estudados trabalhos relacionados a sensoriamento óptico de controle de tráfego em sistemas ferroviários.

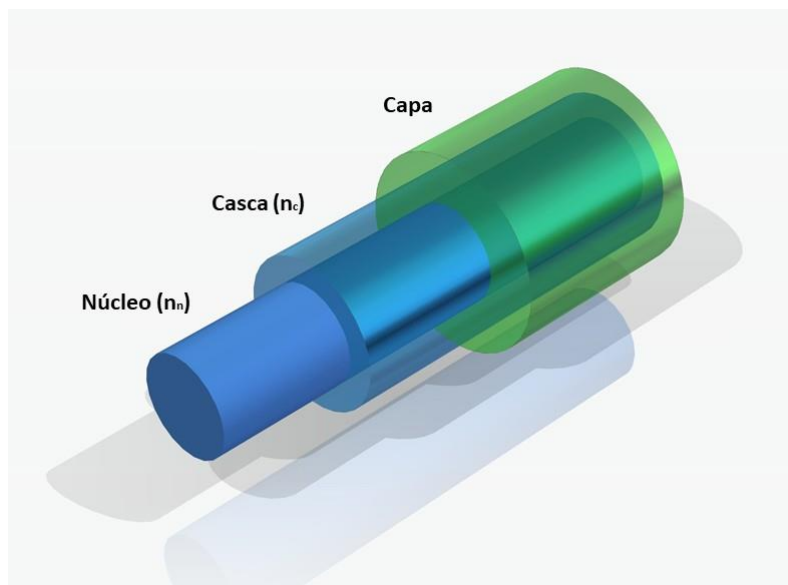
Ademais, foi realizada uma busca de patentes, em bancos de dados especializados, de sensores ópticos para medir velocidade de veículos automotores. Ao final, foi realizada uma comparação entre esses trabalhos por meio de uma tabela comparativa.

2.1 Fibra Óptica

A fibra óptica é um guia de ondas dielétrico ou filamento com formato cilíndrico capaz de transmitir luz. Há três componentes importantes em fibras ópticas: a capa, que geralmente é preparado a partir do vidro e cuja função é proteger a fibra, o núcleo de índice de refração n_n , que por sua vez é cercado por outro vidro ou uma camada de plástico chamada de revestimento ou casca, caracterizado por um material com menor índice de refração comparado ao material do núcleo representado por n_c , conforme ilustrado na Figura 1 (ADDANKI; AMIRI; YUPAPIN, 2018).

Atualmente, existem dois modelos de fibra óptica em relação ao modo de transmissão da luz: fibra monomodo e fibra multimodo. A luz é descrita por ondas eletromagnéticas e cada conjunto guiado pela fibra é chamado de modo. Desse modo, a fibra óptica monomodo permite, apenas, um modo de transmissão, enquanto a fibra multimodo permite mais de um modo de transmissão (AGRAWAL, 2002).

Apesar da produção de fibras ópticas ter iniciado na primeira metade do século XX, só a partir da década de 70 seu desenvolvimento foi intensificado, após o desenvolvimento de FOs

Figura 1: Representação da estrutura básica de uma fibra óptica.

Fonte: Autora.

(Fibras Ópticas) de alto desempenho. Desde então, a fim de atender às necessidades no campo de telecomunicações, a tecnologia da produção das fibras ópticas desenvolveu-se rapidamente (BALLATO; DRAGIC, 2016).

Ainda na década de 70 a FO (Fibra Óptica) começou a ser empregada para o desenvolvimento de sensores, além de comunicações ópticas e transporte de informação, e também as primeiras aplicações na transmissão de imagem e mais tarde em sistemas de comunicação de longa distância, que se tornaram possíveis com os avanços realizados ao nível da produção das fibras e ao nível da amplificação óptica para redução da atenuação do sinal (AGRAWAL, 2011).

No final da década de 60 surgiu a primeira investida para patentear um sistema que utilizava fibra óptica como elemento sensor (MENADIER; KISSINGER; ADKINS, 1967). Alguns anos depois surgiram outros trabalhos relacionados ao emprego de fibra ópticas em sensores (BUCARO; DARDY; CAROME, 1977). Os primeiros esforços no desenvolvimento de sensores a fibra ótica (SFO) incentivaram muitos grupos de pesquisadores a trabalhar para aperfeiçoar essa nova tecnologia, a qual atualmente apresenta muitas vantagens sobre os sensores eletromecânicos convencionais.

Verifica-se, portanto, que a tecnologia fibra de óptica foi desenvolvida para atender às necessidades no campo de telecomunicações na otimização e aperfeiçoamento de transmissão de sinais, mas logo começou a ser empregada no desenvolvimento de sensores (BAI et al., 2010).

A aplicação de fibras ópticas em sensores na engenharia tem se tornado cada vez mais frequente, uma vez que sensores de fibra óptica são capazes de aferir valores das mais variadas grandezas físicas, tais como intensidade luminosa, deslocamento, temperatura e rotação, são indicados em locais cujo espaço de instalação é reduzido, já que os sensores ópticos são mais compactos devido ao tamanho reduzido da fibra e são capazes de transmitir vários sinais diferentes ao mesmo tempo devido à multiplexação em fibras ópticas (LIU et al., 2018b), (ZHENG; BREMER; ROTH, 2018), (XINWEI et al., 2016).

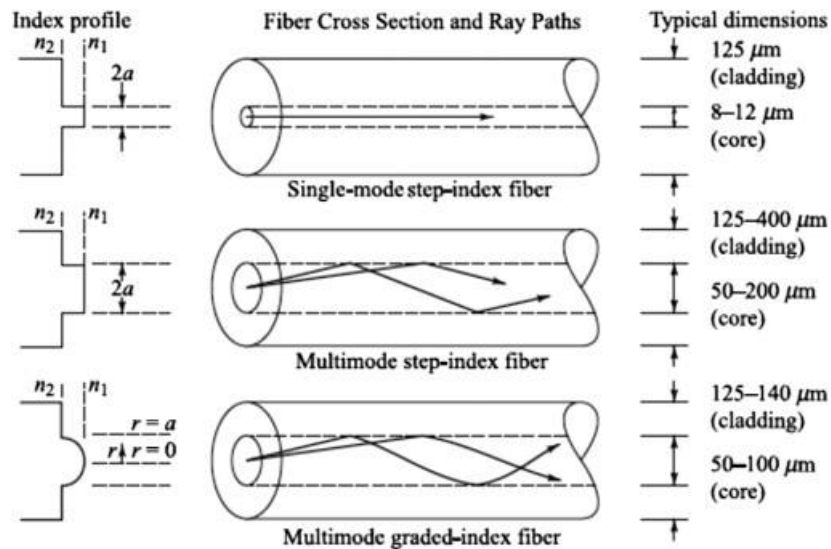
2.1.1 Principais tipos de fibra óptica

As fibras ópticas são comumente classificadas com bases nas suas características básicas de transmissão, em especial, pelo perfil de índices de refração da fibra e pela sua propriedade em propagar um ou vários modos de propagação. O que implica diretamente na sua capacidade de transmissão (banda passante), além da facilidade de acoplamento com outros dispositivos, tais como fontes de luz, detectores, acopladores etc (KEISER, 2014). Devido à diferença nos índices de refração entre a casca e o núcleo apresentados na seção anterior, a FO pode se apresentar de três formas. Degrau simples, quando há uma única variação abrupta da casca para o núcleo, degrau múltiplo, quando há várias variações de forma abruptas/degrau e gradual, quando a variação ocorre de maneira suave e gradual, conforme ilustra a Figura 2. A primeira configuração ou degrau simples representa as fibras monomodos, enquanto as outras duas representam fibras multimodos. Estas últimas configurações permitem uma maior banda de transmissão de informação, porém são mais suscetíveis a efeitos de dispersão óptica (AGRAWAL, 2011).

Em resumo, fibras ópticas monomodos são construídas de tal forma que apenas um único modo fundamental de distribuição eletromagnética é guiado no seu núcleo, evitando, assim, os vários caminhos de propagação da luz dentro do núcleo e, conseqüentemente, a diminuição da dispersão do pulso luminoso. As fibras ópticas multimodo de índice degrau são fabricadas de tal forma que o índice de refração do núcleo é uniforme, maior e diferente do índice de refração da casca, enquanto nas fibras multimodo índice gradual o núcleo não possui índice de refração constante, mas este aumenta progressivamente do eixo central até as bordas (AGRAWAL, 2014).

É importante lembrar que essa classificação reflete os tipos de fibras ópticas de uma maneira geral, de modo que existem subclassificações específicas se forem considerados outros critérios, tais como composição do material da FO, frequências ópticas de atenuação, sensibilidade, geometria e outros, que não serão abordados neste trabalho.

Figura 2: Comparação entre as fibras ópticas monomodo, multimodo de índice degrau e multimodo de índice gradual.



Fonte: (KEISER, 2014).

2.1.2 Modos de Propagação

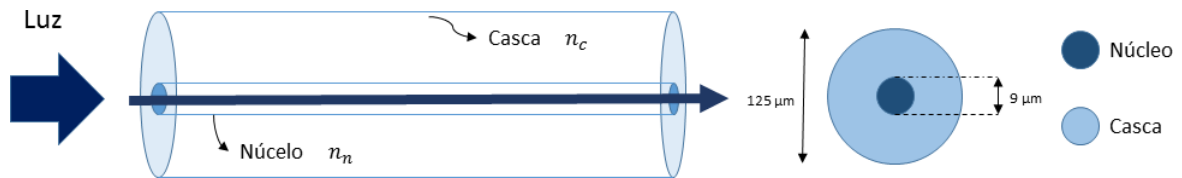
Com relação à transmissão da luz por uma FO, dois modelos teóricos são propostos na literatura. O modelo modal e o modelo de feixes. No modelo modal a luz é descrita por ondas eletromagnéticas, e cada conjunto guiado pela fibra é denominado de modo. Para uma dada FO, existe um número finito de modos permitidos (GOURE; VERRIER, 2016).

Já no modelo de feixes, a luz é encarada como constituída por raios luminosos e o seu comportamento é descrito pela óptica geométrica. Esse modelo fornece uma maneira clara de se entender a propagação da luz pela fibra, devido ao fenômeno de reflexão total (GHATAK et al., 1998).

Pela teoria de propagação eletromagnética, a luz é regida pelas equações de Maxwell, sob as condições de contornos impostas pelo tipo de guia de onda e representam um conjunto de ondas eletromagnéticas que são guiadas de maneira estável pelo guia (AGRAWAL, 2001). Portanto, a luz que percorre a fibra óptica não se propaga aleatoriamente, mas é canalizada em certos modos. Logo, modo de propagação é uma onda com determinada distribuição de campo eletromagnético que satisfaz as condições das equações de Maxwell e que transporta uma parcela individual da energia luminosa total transmitida. Esses modos podem ser entendidos e representados como sendo os possíveis caminhos que a luz pode ter no interior do núcleo, de forma que fibras que admitam um único modo de propagação sejam classificadas como monomodo e fibras que admitam mais de um modo de propagação sejam classificadas como

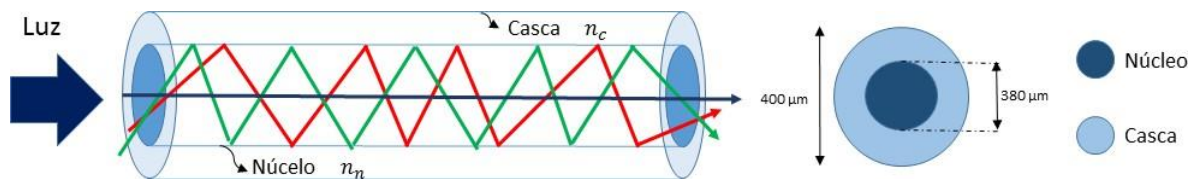
multimodos, consoante é apresentado nas Figuras 3 e 4, em que n_n representa o índice de refração do núcleo e n_c representa o índice de refração da casca (KEISER, 2014).

Figura 3: Propagação da luz em fibra monomodo.



Fonte: Autora.

Figura 4: Propagação da luz em fibra multimodo.



Fonte: Autora.

Ademais, os modos de propagação podem ser classificados como modos vazados, quando estão associados a raios inclinados e oblíquos que são atenuados à medida que a luz se propaga. E modos irradiados, quando os raios luminosos são guiados pelo núcleo e irradiam potência para fora do mesmo. São raios fora do cone de aceitação e são refratados para a casca, de modo que a reduzir a banda passante, ou seja, são raios que não incidem com o ângulo mínimo necessário para que haja reflexão.

2.2 Propagação de Luz em Fibras Ópticas

O modelo de fibra óptica mais atual é constituído de um núcleo com índice de refração n_n e uma casca com índice de refração n_c , de modo que $n_n > n_c$. Para isto, a fibra é fabricada com sílica e o núcleo é dopado com algum elemento químico específico, geralmente germânio, que torna o índice de refração do núcleo maior que o da casca (AGRAWAL, 2002).

A propagação da luz transmitida em uma fibra se dá usando o processo de reflexões sucessivas ao longo da fibra. O fenômeno de reflexão total da luz pode ser entendido como uma

particularidade da refração luminosa, que ocorre quando luz passa de um meio homogêneo e isotrópico para outro, de modo a apresentar distorções na velocidade e direção de propagação.

Assim, a velocidade de propagação da luz varia com o índice de refração do meio em que se propaga, caracterizando um meio dielétrico do ponto de vista óptico e determinando o comportamento da luz ao passar de um meio para outro, em que o índice de refração n é dado pela equação abaixo.

$$n = c/v. \quad (2.1)$$

Em que c é a velocidade da luz no vácuo e v é a velocidade da luz na fibra.

Além disso, para que $n_n > n_c$ deve ocorrer reflexão interna total da luz no interior da fibra, o que possibilita que a luz seja guiada através do núcleo (KEISER, 2014). A reflexão da luz no interior do núcleo é explicada pela lei de Snell, dada pela Equação 2.2.

$$\text{sen } \theta_i n_{ar} = \text{sen } \theta_{n1} n_n. \quad (2.2)$$

Em que θ_i é o ângulo de incidência e θ_{n1} é o ângulo de transmissão e n_{ar} é o índice de refração do ar. Isso vale para um raio de luz incidente em uma das aberturas da fibra óptica, a luz sai do meio em que se encontra a fonte luminosa, no caso o ar, e entra no núcleo da fibra óptica, ocorrendo refração.

Como o índice de refração do ar n_{ar} é aproximadamente 1, obtém-se a Equação 2.3.

$$\text{sen } \theta_i = \text{sen } \theta_{n1} n_n. \quad (2.3)$$

Dessa forma, uma vez que a luz já se propaga no núcleo, a mesma segue em direção a casca e ocorre, mais uma vez, refração, e é dada pela Equação 2.4.

$$\begin{aligned} \text{sen } \theta_{n2} n_n &= \text{sen } \theta_c n_c \\ \text{sen } \theta_{n2} &= \frac{n_c}{n_n}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Para que ocorra reflexão total é necessário que $\theta_c = \frac{\pi}{2}$ e θ_{n2} e θ_{n1} sejam complementares. Isso implica que $\text{sen } \theta_{n2} = \sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_{n1}}$. Substituindo, chega-se a Equação 2.5.

$$\frac{n_c^2}{n_n^2} = 1 - \sin^2 \theta_{n1}$$

$$\sin \theta_{n1} = \sqrt{1 - \frac{n_c^2}{n_n^2}} \quad (2.5)$$

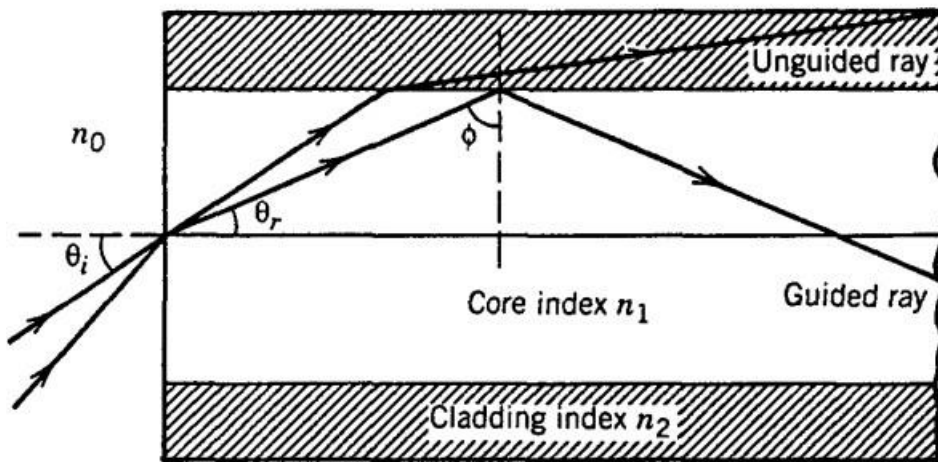
Substituindo a Equação 2.5 na Equação 2.3, tem-se:

$$\sin \theta_i = \sqrt{1 - \frac{n_c^2}{n_n^2}}$$

$$AN = \sin \theta_i = \sqrt{n_n^2 - n_c^2} \quad (2.6)$$

Em que AN é a abertura numérica da fibra. A abertura numérica da fibra descreve a energia luminosa captada e determina a eficiência de acoplamento entre a fonte irradiante e o núcleo da fibra óptica, o que é importante para garantir melhor propagação da luz e menores perdas conforme é ilustrado na Figura 5 (AGRAWAL, 2014).

Figura 5: Representação da abertura numérica e reflexão no interior do núcleo da fibra



Fonte: (KASHYAP, 2009).

Se um feixe de luz reduz seu índice de refração à medida que passa de um meio ao outro, o ângulo de refração tende a aumentar. Esse aumento é tanto maior quanto maior for o ângulo de incidência. Essa situação pode evoluir até um limite no qual a luz refratada é desviada 90° com

a vertical entre a superfície de separação entre os meios (casca e núcleo).

Neste caso, o ângulo de incidência da luz é conhecido como ângulo limite (L), e pode ser obtido a partir da Lei de Snell. Qualquer raio de luz que incida sobre a superfície de separação dos dois meios com ângulos superiores ao ângulo limite é totalmente refletido, o que possibilita que se guiem ondas de luz no interior de fibras ópticas.

$$\text{sen}(L) \cdot n_n = \text{sen}(90) \cdot n_c. \quad (2.7)$$

Se L é o ângulo limite e $\text{sen}(90) = 1$, obtém-se a Equação 2.8 abaixo.

$$\text{sen}(L) = n_c / n_n. \quad (2.8)$$

Outro parâmetro de relevância no estudo de propagação de luz em FO é a diferença do índice de refração entre o núcleo e a casca Δ . Como dito anteriormente, para que a luz seja confinada no guia e haja o processo de reflexões sucessivas, é necessário que o índice de refração do núcleo seja superior ao da casca, modificado em função de sua composição. A variação do perfil do índice na fibra é um dos fatores que caracteriza os tipos de fibra existentes: tais como fibra de índice degrau, fibra de índice gradual e fibra monomodo. O parâmetro Δ é representado pela equação abaixo.

$$\Delta = n_n - n_c / n_n. \quad (2.9)$$

Em que n_n é o índice de refração do núcleo e n_c é o índice de refração da casca.

2.3 Atenuação e Dispersão em Fibras Ópticas

2.3.1 Atenuação

A atenuação de um sinal luminoso que se propaga ao longo de uma fibra óptica é de grande importância no estudo de sensoriamento óptico, uma vez que, além de determinar a parcela de sinal absorvido ou refratado no decorrer da transmissão, o que causa as perdas de sinal, define a distância de transmissão máxima entre o transmissor e o receptor (AGRAWAL, 2002).

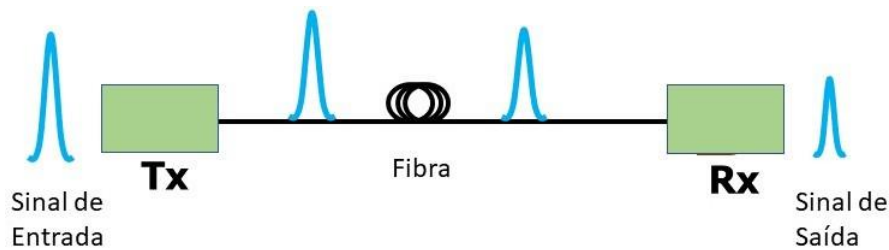
A atenuação foi uma das primeiras propriedades das fibras ópticas a ser intensamente estudada e corresponde a degradação desse sinal ao longo da distância e pode ser definida em

termos da relação logarítmica entre a potência luminosa na entrada da fibra de comprimento L e a potência luminosa na saída da mesma, conforme ilustra a Equação 2.10.

$$\alpha_L = \frac{10 \log(P_i/P_o)}{L} . \quad (2.10)$$

Em que P_i é o valor da potência do sinal na entrada da fibra, P_o é a potência do sinal da saída da fibra, L é o comprimento total da FO e o parâmetro α_L é, geralmente, denominado perda da fibra ou atenuação da fibra e é expresso em dB/km . A Figura 6 representa a atenuação de um sinal em uma fibra óptica, cujo transmissor é Tx e o receptor é Rx.

Figura 6: Representação da atenuação de um sinal em uma fibra óptica.



Fonte: Autora.

A atenuação em uma fibra óptica pode ocorrer em função dos seguintes fenômenos: absorção, espalhamento, dispersão e perdas por curvaturas. As perdas por absorção podem ser intrínsecas, quando está relacionada com os níveis de energia do material em escala atômica e extrínseca, quando está relacionada às impurezas que surgem na fibra durante seu processo de fabricação (KEISER, 2014).

Atenuação por absorção

As perdas por absorção ocorrem quando os átomos que constituem a própria fibra absorvem luz ou existem defeitos atômicos na composição do material da fibra, e extrínsecas, quando há impurezas no material da fibra. Dessa forma, quando a luz se depara com um átomo que compõe a fibra óptica, o mesmo absorve o fóton de luz, dependendo da sua frequência ou energia (KASHYAP, 2009).

As perdas por absorção intrínsecas dependem do material usado na composição da fibra e constituem-se no principal fator físico definindo a transparência de um material em uma região

espectral específica. A absorção intrínseca estabelece o limite mínimo fundamental na absorção para qualquer tipo de material usado. Os principais mecanismos de absorção são banda de absorção eletrônica (que ocorre na região do ultravioleta) e banda de vibrações atômicas (que ocorre na região do infravermelho) (AGRAWAL, 2011).

Já as perdas por absorção extrínsecas são caracterizadas como resultado da contaminação de impurezas que o material das fibras experimenta durante seu processo de fabricação. Entre as impurezas que podem contaminar as fibras estão alguns íons metálicos (cromo, ferro, cobre etc.) e hidroxila (OH-). Essa característica permite o desenvolvimento de sensores à fibra óptica destinados a análises químicas (AGRAWAL, 2014).

Atenuação por espalhamento

O espalhamento óptico pode ser classificado como linear ou não linear, e ocorre devido à interação entre a propagação da luz e a fibra óptica. É constituído por diferentes componentes espectrais e seus padrões são classificados como Rayleigh, Raman e Brillouin e são bastante utilizados em sensores de fibra óptica distribuídos (AGRAWAL, 2001).

O espalhamento *Rayleigh* é o mais intenso e tem o mesmo comprimento de onda que o pulso de luz inicial. Este tipo de espalhamento está relacionado a uma resposta elástica da interação fóton/elétron, de modo que as moléculas são elevadas a um estado de energia virtual e quando retornam ao seu estado de energia original liberam luz no comprimento de onda da estimulação (HUANG et al., 2019).

O espalhamento Raman tem sua origem devido à interação entre os fótons do pulso de luz e os átomos da fibra óptica. Tal interação provoca a produção de novos fótons com energia mais baixa (Anti-Stokes) ou mais alta que os originais (Stokes). Já no espalhamento Brillouin alguns fótons incidentes são aniquilados gerando fônons, que correspondem a estados quantizados da vibração (KEISER, 2014).

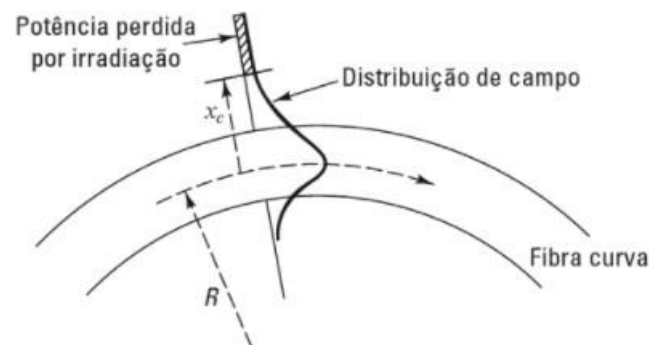
Atenuação por curvatura

As perdas por curvaturas ocorrem quando dobras na fibra reduzem o ângulo com o qual a luz incide sobre as paredes do núcleo até o ponto de não ser maior que o ângulo limite, assim deixando de haver reflexão total e havendo refração para a casca (AGRAWAL, 2002).

Logo, na atenuação causada por curvatura, dobras na fibra reduzem o ângulo com o qual a luz incide sobre as paredes do núcleo até o ponto de não ser maior que o ângulo limite, assim deixando de haver reflexão total e havendo refração para a casca (AGRAWAL, 2002).

As perdas de radiação por curvaturas maiores são conhecidas como perdas por macrocurvaturas, enquanto as perdas por curvaturas menores, que são praticamente ou totalmente imperceptíveis, são conhecidas como microcurvaturas (KEISER, 2014). As perdas por macrocurvaturas seguem o princípio explicado no parágrafo anterior, de modo que quando a fibra é dobrada parte da potência luminosa é perdida por irradiação ou irradiada para casca, como mostra o esboço da Figura 7.

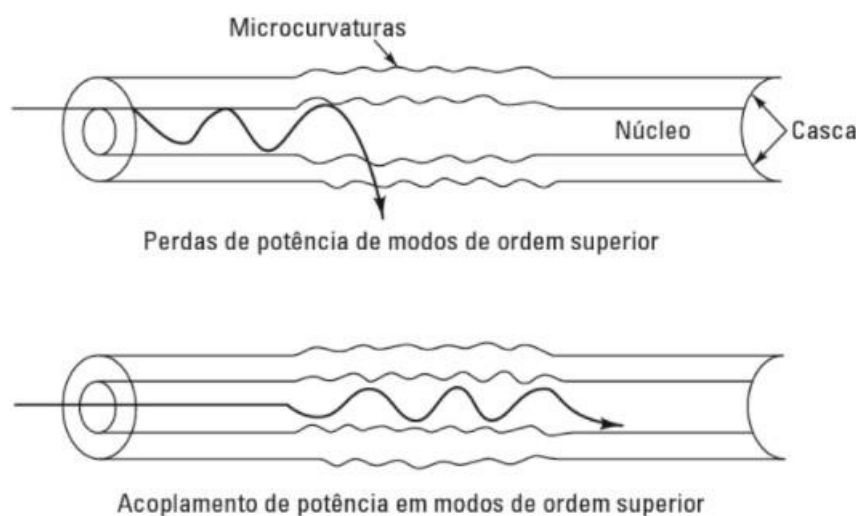
Figura 7: Esboço da perda de potência em uma fibra de curvatura R .



Fonte: (KEISER, 2014).

As perdas por microcurvaturas ocorrem quando um objeto é pressionado sobre a fibra, podendo ser pontiagudo ou não, de modo que gerando flutuações de pequena escala no raio de curvatura do eixo da fibra (KEISER, 2014). A imperfeição gerada entre a casca e o núcleo da fibra, conforme ilustra a Figura 8, ocasiona a perda de potência óptica.

Figura 8: Esboço das flutuações de pequena escala no raio de curvatura do eixo que levam a perdas de potência.



Fonte: (KEISER, 2014).

Dessa forma, sabendo que em sensores de FO, este detecta o ambiente medido por meio de interações da luz com o mensurando que podem se dar da forma de atraso óptico, perda óptica e propriedades espectrais, uma das classes de sensores que utilizam a alteração da luz na FO para realizar o sensoriamento são os sensores baseados em microcurvatura.

As perdas por curvaturas, mas especificamente microcurvaturas, são relevantes ao estudo de sensoriamento por fibra óptica, uma vez que esse fenômeno provoca acoplamento do modos de baixa ordem e ordem superior, resultando em perda de radiação.

2.3.2 Dispersão

A dispersão é um fenômeno óptico que provoca o alargamento temporal dos pulsos de luz, à medida que os mesmos propagam-se pela fibra óptica, resultando na interferência de um pulso nos pulsos vizinhos. A dispersão de sinal é uma consequência de fatores como atraso ou dispersão intermodal, dispersão intramodal e dispersão do modo de polarização e efeitos de dispersão de ordem superior, de tal forma que implica efeito a distorção dos sinais transmitidos, impondo uma limitação na sua capacidade de transmissão. Esta seção trata de explicar essas distorções de forma breve e sucinta (COSTA et al., 2019).

Sabendo que a constante de propagação β é uma função do comprimento de onda ou da frequência angular ω , é possível observar os efeitos de dispersão expandindo β em uma série de Taylor sobre uma frequência central ω_0 , segundo a Equação 2.11.

$$\beta_\omega = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2\beta_2 + \frac{1}{6}(\omega - \omega_0)^3\beta_3 + \dots \quad (2.11)$$

em que $\beta_m\omega_0$ indica a m-ésima derivada de β em relação a ω calculada para $\omega = \omega_0$, conforme mostra a Equação 2.12.

$$\beta_m = \beta \frac{d^m \beta}{d\omega^m} \bigg|_{\omega = \omega_0} \quad (2.12)$$

O coeficiente β_0 indica a constante de propagação inicial, e β_1 é o inverso da velocidade de grupo ($1/v_g$). O parâmetro β_2 representa a dispersão de segunda ordem, também conhecida como dispersão cromática ou dispersão de velocidade de grupo, enquanto β_3 representa a dispersão de terceira ordem (AGRAWAL, 2002).

Dispersão intermodal

A dispersão intermodal aparece apenas em fibras do tipo multimodo e ocorre devido às diferenças entre os valores de velocidade de grupo em uma mesma frequência ou comprimento de onda. Devido ao confinamento da luz num guia, o campo EM distribui-se espacialmente por várias formas de propagação, ditos modos do guia de onda, que são soluções ortogonais (linearmente independentes) da equação de onda no guia. Os diferentes modos de propagação tem diferentes caminhos ópticos, levando a diferentes atrasos do sinal na fibra multimodo, que resultam na dispersão intermodal (RIBEIRO, 2003).

Dispersão intramodal

A dispersão intramodal ou cromática é o espalhamento do pulso que ocorre dentro de um modo único. É o atraso diferencial que as várias componentes espectrais do pulso ou do sinal propagante experimentam. A dispersão intramodal é também conhecida como dispersão da velocidade de grupo (GVD), já que é um resultado de a velocidade do grupo ser função do comprimento de onda. Esta é a principal fonte de atraso em fibras monomodo, uma vez que depende apenas do comprimento de onda (KEISER, 2014).

Dispersão dos modos de polarização

Dispersão dos modos de polarização (PMD) trata-se da variação de velocidade de propagação das componentes ortogonais de polarização. Ocorre devido a efeitos de birrefringência da fibra, devido a tensões (embutidas no processo de puxamento da fibra) e imperfeições mecânicas no núcleo e nas interfaces núcleo-casca das fibras. É muito importante em fibras monomodo para altas taxas de transmissão e longas distâncias, especialmente quando se tem enlaces com mecanismos de compensação da dispersão GVD. Também ocorre em fibras multimodo, mas é irrelevante se comparada a dispersão modal (AGRAWAL, 2011).

2.4 Revisão Bibliográfica

2.4.1 Metodologia de busca e seleção dos trabalhos

Foram pesquisados por meio de critérios de inclusão e exclusão, bem como expressões lógicas em buscas avançadas, dissertações, teses e artigos correlatos a este trabalho, a fim de realizar um estudo do estado da arte. O processo de busca e seleção de trabalhos está

devidamente ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Processo de busca e seleção de trabalhos.



Fonte: Autora.

Conforme é ilustrado na Figura 9, a metodologia utilizada na seleção dos trabalhos correlatos iniciou-se com a busca de trabalhos por meio das palavras-chaves: "*speed sensor*", "*optical fiber*" e "*vehicles*" nas bases de dados *Science Direct*, Periódicos Capes, Scopus, *Web of Science* e *IEEE Xplore*. A fim de refinar a busca e analisar as contribuições mais recentes, o intervalo temporal de filtragem definido foram os últimos 10 anos (2011-2021), com foco nos trabalhos publicados nos últimos cinco anos.

Para refinar a busca e reduzir o volume de trabalhos encontrados, utilizou como critério de inclusão a expressão lógica "*Speed OR Velocity AND Optitcal Fiber AND Sensor OR Detector OR Radar*", conforme apresentado na Tabela 1. A busca resultou em dezenas de trabalhos que, posteriormente, foram selecionados por meio de critérios de exclusão.

Tabela 1: Metodologia de pesquisa e seleção trabalhos.

Base de dados	Intervalo Temporal	Expressão Lógica	Resultado Parcial
<i>IEEE Xplore</i>	2015-2021	<i>optical sensor AND optical fiber AND tra f fic control</i>	65
<i>Science Direct</i>	2015-2021	<i>optical sensor AND optical fiber AND tra f fic control AND vehicles speed</i>	643

Base de dados	Intervalo Temporal	Intervalo Temporal	Resultado Parcial
Periódicos Capes	2015-2021	<i>optical sensor AND optical fiber AND speed AND vehicles AND traf fic control</i>	476
<i>Web of Science</i>	2015-2021	<i>optical speed sensor AND optical fiber AND traf fic control AND vehicles</i>	21
Scopus	2015-2021	<i>optical sensor AND optical fiber AND tra ffic control AND vehicles speed</i>	641

Inicialmente, a partir da Tabela 1, utilizou-se os critérios exclusão por título e trabalhos repetidos, descartando os trabalhos que não utilizavam tecnologia óptica para detectar e aferir peso e velocidade de veículos, bem como trabalhos já selecionados em outras bases, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Seleção de trabalhos aplicando os critérios de inclusão e exclusão.

Resultado Parcial	CrITÉrios de Inclusão	CrITÉrios de exclusão	Resultado Final
<i>IEEE Xplore</i> - 65	Trabalhos propõem/apresentam sensores ópticos voltados para medição de parâmetros de controle, gestão e monitoramento de tráfego.	Trabalhos repetidos e trabalhos cujos títulos e/ou resumos não atendem aos critérios de inclusão e intervalo temporal.	9
<i>Science Direct</i> - 643	Trabalhos propõem/apresentam sensores ópticos voltados para medição de parâmetros de controle, gestão e monitoramento de tráfego.	Trabalhos repetidos e trabalhos cujos títulos e/ou resumos não atendem aos critérios de inclusão e intervalo temporal.	6
Periódicos Capes - 476	Trabalhos propõem/apresentam sensores ópticos voltados para medição de parâmetros de controle, gestão e monitoramento de tráfego.	Trabalhos repetidos e trabalhos cujos títulos e/ou resumos não atendem aos critérios de inclusão e intervalo temporal.	2
<i>Web of Science</i> - 21	Trabalhos propõem/apresentam sensores ópticos voltados para medição de parâmetros de controle, gestão e monitoramento de tráfego.	Trabalhos repetidos e trabalhos cujos títulos e/ou resumos não atendem aos critérios de inclusão e intervalo temporal.	0

Resultado Parcial	Critérios de Inclusão	Critérios de exclusão	Resultado Final
Scopus - 641	Trabalhos propõem/apresentam sensores ópticos voltados para medição de parâmetros de controle, gestão e monitoramento de tráfego.	Trabalhos repetidos e trabalhos cujos títulos e/ou resumos não atendem aos critérios de inclusão e intervalo temporal.	0

Após o descarte de trabalhos por título, foi realizada a leitura dos resumos e conclusões dos trabalhos restantes para filtragem final. Por fim, foram lidos, traduzidos e analisados os trabalhos cujo objetivo e metodologia mais se assemelham com o proposto neste trabalho. Como já citado, para fins de comparação foi produzida uma tabela de comparação com todos os trabalhos selecionados. Para construção do estado da arte, bem como a revisão da bibliografia, os trabalhos lidos e analisados são brevemente explicado e discutidos nas próximas seções.

2.4.2 Sensoriamento óptico, trabalhos correlatos e estado da arte

Apesar dos primeiros esforços voltados para fabricação de fibras ópticas terem se iniciado na década de 50, somente na década de 70, com a minimização da atenuação do sinal, as fibras ópticas tornaram-se uma tecnologia promissora em sistemas de telecomunicações (TRONCO; AVILA, 2007). Desde então, novas tecnologias de fabricação permitem que se obtenham fibras com perdas cada vez menores e grandes alcances, o que alavanca não somente o setor de comunicações, como emerge uma nova classe de sensores baseados em fibra conhecidos como sensores a fibra óptica ou sensores de fibra óptica (RIBEIRO, 2003).

No início da década de 1970, os primeiros esforços no desenvolvimento de sensores de fibra óptica (SFO) incentivaram a otimização e aperfeiçoamento desta tecnologia, a qual atualmente apresenta muitas vantagens sobre os sensores eletromecânicos convencionais, uma vez que quando se fala em SFO fica implícita a utilização de FOs como meio utilizado para inferir informações acerca do ambiente ao seu redor (GRATTAN; SUN, 2000).

Logo, a aplicação de fibras ópticas em sensores na engenharia se tornou cada vez mais

frequente e seu emprego tem sido observado em muitas situações, por meio de diferentes técnicas e para os mais variados fins (AJO-FRANKLIN et al., 2019). Isso acontece, uma vez que fibras ópticas são capazes de inferir valores sobre as mais variáveis propriedades físicas, tais como intensidade luminosa, deslocamento, temperatura, pressão, massa, deformação, campo magnético, radiação, fluxo, análise química, vibração, entre outros (ZHENG; BREMER; ROTH, 2018), (LIU et al., 2018b), (XINWEI et al., 2016), (SOUZA et al., 2018).

Em consequência disso, nas últimas décadas os setores de telecomunicações optoeletrônicos e de fibras ópticas adquiriram enorme desenvolvimento (ADDANKI; AMIRI; YUPAPIN, 2018). Paralelamente a esse desenvolvimento, a tecnologia de sensores de fibra óptica tem sido um grande usuário de tecnologia associada à indústria de comunicação optoeletrônica e de fibra óptica. A tecnologia de detecção de fibra óptica é um campo interdisciplinar que combina fibra óptica e ciência da informação (DI; XIN; JIAN, 2018).

Ademais, sensores de FO possuem inúmeras vantagens se comparados com as tecnologias de sensoriamento empregadas atualmente, das quais pode-se citar: insensibilidade a interferências eletromagnéticas, baixo peso, pequenas dimensões, respostas rápidas, capacidade de multiplexação de sinais e maior acuidade nas aferições (AGRAWAL, 2002).

Segundo Palmieri & Schenato (2013), os sensores de fibra óptica oferecem recursos sem precedentes, sendo que o mais exclusivo deles é a capacidade de monitorar variações do campo físico observado com continuidade espacial ao longo da fibra, o que configura um Sensor de Fibra Óptica Distribuído ou *Distributed Optical Fiber Sensor* (DOFS).

Em se tratando de sensores distribuídos, diferente dos pontuais e multiponto, neste tipo de sensor a fibra inteira funciona como um elemento sensor, ou seja, há infinitos elementos sensores posicionados sobre a FO, configurando um sensoriamento contínuo capaz de medir parâmetros em toda a extensão da fibra (BOOTH et al., 2020).

Nesse contexto, a utilização de FO como elemento sensor em aplicações voltadas para controle e monitoramento de tráfego, tais como detecção, classificação e medição de velocidade de veículos automotores, torna-se imprescindível devido à capacidade de aquisição contínua de vários parâmetros pela fibra em toda sua extensão (HUANG et al., 2019).

Além disso, medidas de velocidade em bandas de rodagem são frequentemente afetadas por erros de detecção causados por fatores externos, como interferência de um campo magnético induzido, e por erros de detecção intrínsecos, como baixa sensibilidade na detecção de presença de veículos menores e erros na aferição de velocidade de veículos que trafegam nas faixas adjacentes (NISHIMOTO, 2006).

Além dos sensores de velocidade, sensores de detecção, peso e identificação de veículos automotores são importantes para manter boas condições de densidade de tráfego e condições de estrada, além de garantir maior segurança no trânsito, controle eficiente do tráfego e melhor mobilidade urbana. Todavia, as tecnologias empregadas atualmente, tais como tecnologia mecânica, piezoelétrica, tapetes capacitivos e baseada em vídeo e imagem, apresentam desvantagens como fácil corrosão, escopo de pequena velocidade, vulnerabilidade à interferência eletromagnética, baixa precisão, instalação e construção inconveniente, tamanho grande e preços altos etc.

Dessa forma, são propostas soluções inovadoras de sensores que contornem essas limitações recorrendo ao uso de fibras ópticas (HUANG; LU; BRIDGELALL, 2018), e outras tecnologias ópticas (NEDOMA et al., 2018b) aplicadas como sensores. Várias tecnologias são desenvolvidas atualmente com a finalidade de classificar e controlar veículos automotores (NEDOMA et al., 2018a), (ZHAO et al., 2018). Além de garantir maior segurança nas vias, o uso de acelerômetros e magnetômetros possibilita o controle do tráfego, uma vez que são capazes de aferir parâmetros como distância entre os eixos, peso do veículos, densidade do tráfego, detecção e classificação de veículos (YUKSEL et al., 2018).

Existem inúmeras aplicações de sensores de fibra óptica em monitoramento e controle de tráfego. Gupta & Upadhyaya (2016) utilizaram cabos de fibra óptica para detectar e aferir o peso dos veículos em movimento a partir da flexão sofrida pela fibra e a correlação com as variações nas características do caminho de propagação que gera resultados monitorados por meio de um osciloscópio. Já Grakovski & Pilipovcs (2017) propuseram um sistema de fibra óptica multifuncional para aferição do peso em movimento do veículo (WIM) e, posteriormente, sua classificação. A metodologia apresentada é baseada em mudanças nos parâmetros de um sinal óptico devido à deformação da fibra óptica devido ao peso do veículo durante sua passagem. Grakovski & Pilipovcs (2017) comprovaram que o uso de sensores de fibra óptica (SFO) em uma medição WIM é aconselhável em comparação com os sensores piezoelétricos convencionais e outros por razões de economia e confiabilidade. No entanto os autores não apresentaram resultados com erros de medição da carga do eixo menor que 10%, o que limita seu uso apenas para pré-tarefas de seleção de veículos sobrecarregados.

No que se refere a aferição de velocidade de veículos automotores, Huang et al. (2019) propuseram um sensor de velocidade e densidade de veículos por detecção baseado em sensoriamento por fibra óptica distribuída (DFOS) e comunicação de alta velocidade, a partir da análise do espalhamento Rayleigh. A fibra óptica é sensível a mudanças em torno do ambiente. As vibrações ambientais irão induzir variações de tensão na fibra óptica e causar perturbações

que implicam uma pequena alteração no índice de refração da fibra e, consequentemente, uma mudança na intensidade do espalhamento de Rayleigh. Após testes em campo, Huang et al. (2019) apresentaram um protótipo de sensor de velocidade e densidade com precisão de 94,5% para medição de densidade de veículo em movimento e 98,5% para medição de velocidade em comparação com algoritmos de processamento de imagem.

Segundo Liu et al. (2019), o sensoriamento por fibra óptica distribuída DOFSs baseados em Rayleigh são potencialmente sensíveis a muitos diferentes aspectos físicos campos, ao lado de temperatura e tensão. Liu et al. (2019) apresentam em seu trabalho, um sistema de detecção, velocidade e classificação de veículos utilizando sensor DAS (*Distributed Acoustic Sensing* ou Sensoriamento Acústico Distribuído). Os autores analisaram as mudanças induzidas na luz de retroespalhada devido à variação no espalhamento Rayleigh causada pela presença do veículo, de modo que, a partir de um algoritmo de eliminação de ruído *wavelet* e o algoritmo de limiar duplo, fosse possível relacionar a intensidade da luz com a velocidade do veículo.

Liu et al. (2019) alcançaram neste trabalho uma precisão da detecção de veículo superior a 80%, erro de estimativa de velocidade inferior a 5% e precisão da classificação do veículo é superior a 70%.

Wellbrock et al. (2019) utilizaram uma metodologia semelhante, baseada na intensidade da mudança de espalhamento Rayleigh, porém por meio de fase interferométrica, na qual foi utilizado um OTDR (*Optical Time-domain Reflectometer* ou Reflectômetro Óptico Domínio do Tempo) para detectar a vibração causada pela presença do veículo e medir a intensidade do sinal retroespalhado refletido pelo OTDR. Os autores obtiveram excelentes resultados, uma vez que o protótipo apresentou uma precisão de 94,5% para a medição da unidade de veículos em movimento e 98,5% para a medição da velocidade. Enquanto Nedoma et al. (2016) propuseram um sistema de aferição de velocidade de veículos automotores baseados em interferometria de fibra óptica, a partir do uso de interferômetro Mach-Zehnder.

O sistema óptico proposto por Nedoma et al. (2016) processa a resposta vibracional e a velocidade do veículo é calculado no domínio de tempo, de modo que a velocidade do veículo foi monitorada por GPS e comparada com os valores obtidos experimentalmente pelo sistema interferométrico, obtendo taxa de erro de medição entre 1,36 % e 7,7%.

Em seu trabalho, Liang et al. (2019) desenvolvem um sensor de vibração distribuída de fibra óptica para estimar o fluxo de tráfego, a partir da implementação de sensores de fibra do tipo OTDR no solo, de modo a estabelecer uma relação entre a mudança de fase no OTDR e a vibração que a ocasiona. Assim, pela contagem da vibração, é possível estimar o fluxo de tráfego.

Desde o surgimento de grades de Bragg em fibras ópticas, observou-se que elas seriam excelentes sensores de grandezas físicas estáticas e dinâmicas, tais como temperatura, deformação e pressão. A grande vantagem é que a informação a ser medida está contida no comprimento de onda (AGRAWAL, 2001).

Visando o emprego de grades de Bragg em fibra (FBG) em sistemas de controle e monitoramento de tráfego, Huang et al. (2018) desenvolveram um sistema baseado em sensores FBG para classificação de veículos e medição de velocidade e distância entre eixos de veículos. Para isto, os autores analisaram as mudanças do comprimento de onda central dos sensores 3D GFRP-FBG, que consiste em um sensor com três componenetes FBG de GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic ou Plástico Reforçado com Fibra de Vidro): uma na direção vertical, uma na longitudinal e uma na transversal. Quando as cargas externas são aplicadas no sensor, seu comprimento mudará induzindo tensões que podem ser detectado pelas FBGs incorporadas. Huang et al. (2018) apresentam um sistema de classificação e medição de velocidade e distância entre eixos de veículos capaz de estimar com precisão de 98% a velocidade e a distância entre eixos.

Alamandala et al. (2018) descrevem em seu trabalho o desenvolvimento de um protótipo para monitoramento das condições das pontes contra efeitos do envelhecimento e desgaste na infraestrutura de transporte. Para testar o sistema proposto, Alamandala et al. (2018) desenvolveram um protótipo de ponte e um veículo robótico com cargas variáveis em diferentes velocidades. Utilizando duas FBGs inclinadas a 45° como transdutor do sistema e um interrogador óptico, que é um fotodetector específico para leitura de sensores baseados em FBG, para leitura do mesmo, os autores registraram a mudança no comprimento de onda das grades de Bragg devido ao peso em movimento do veículo e, posteriormente, correlacionaram com a carga e a velocidade do veículo. A resposta do sistema de sensor para velocidade e carga mostrou um variação linear com uma boa correlação de velocidade de até 150 m/s.

Ainda sobre a aplicação de fibras grade de Bragg em sensores de controle e monitoramento de tráfego, Fajkus et al. (2020) apresentam um sistema capaz de monitorar a densidade do tráfego ou velocidade dos carros que circulam em uma única faixa, a partir de um sensor, construído em laboratório, composto por cinco grades de Bragg encapsuladas em polímero de polidimetilsiloxano (PDMS), de modo que quatro grades são responsáveis pela sensoriameto e uma pela análise dos sinais refletidos. Assim, a partir da mudança no comprimento de onda refletido pela grade analisadora foi possível mensurar a densidade do tráfego e a velocidade do veículo. A taxa de sucesso de detecção de veículos do sistema é de 99,62%. E além disso, uma erro absoluta médio de 1,35 km/h e erro relativo de 2,62% ao medir a velocidade do veículo.

Outras tecnologias de fibra óptica são desenvolvidas com propósitos semelhantes, Zhao et al. (2018) desenvolveram um sensor de baixo custo utilizando tecnologia óptica de detecção de vibração distribuída ou *Detection Optical Vibration Sensor* (DOVS) capaz de coletar sinais de vibração induzidos pelo tráfego e depois extrair vários recursos dos sinais brutos para estimar a velocidade e configuração dos eixos dos veículos, bem como categorizá-los em diferentes classes. Enquanto Liu et al. (2018a) desenvolveram um detector de fluxo de tráfego baseado em sensoriamento acústico de fibra óptica distribuída (DAS) atrelado a um algoritmo de limiar de "wavelet" aprimorado e um algoritmo de limiar duplo aprimorado. O detector óptico proposto por Liu et al. (2018a), apresentou boa precisão e a faixa de erro controlada menor que 6%.

Segundo Nedoma et al. (2018a), o avanço de sistemas de comunicações a fibra óptica causou grande impacto em telecomunicações, uma vez que esses sistemas limitam os efeitos do ambiente na transmissão de informações. Em seu trabalho intitulado "*Fiber – optic interferometric sensor for monitoring automobile and rail traffic*", Nedoma et al. (2018a) utilizaram o interferômetro Mach-Zehnder para calcular e controlar a densidade do tráfego. O princípio da medição proposto por Nedoma et al. (2018a) baseia-se na análise da resposta à vibração dos veículos que passam pelo sensor. Assim, com base no processamento do sinal, Nedoma et al. (2018a) obtiveram um registro de amplitude da passagem do veículo que é analisado no domínio do tempo.

Para analisar a densidade do tráfego, Nedoma et al. (2018a) também desenvolveram um aplicativo no ambiente de desenvolvimento LabVIEW, a fim de controlar os valores obtidos. O protótipo do sensor foi instalado a uma distância de 1 m da beira da estrada e testado sucessivas vezes. Para garantir estabilidade durante todo o período de medição, Nedoma et al. (2018a) utilizaram *drivers* do estabilizador de corrente e temperatura da ThorLabs e obtiveram uma eficiência do sensor ou precisamente a capacidade de detecção do veículo foram baseadas em 500 medições, de forma que 97 % dos veículos que passavam foram detectados corretamente para uma distância de até 250 cm.

Em outro trabalho intitulado "*Analysis of the use of fiber – optic sensors in the road traffic*", Nedoma et al. (2018b) também desenvolveram um sensor de detecção de veículos automotores utilizando interferômetro March-Zehnder, a fim de controlar a densidade do tráfego. Todavia, neste trabalho os experimentos com carros obtiveram mais sucesso, pois além de terem sido realizados em distâncias maiores (de 1 a 3 metros), obteve-se maior sucesso na taxa de detecção.

O sensoriamento proposto por Nedoma et al. (2018b) se baseia na comparação entre as fases dos sinais luminosos que se propagam pelos dois braços do interferômetro Mach-Zehnder,

o braço de referência e o braço de medição, de modo que a porcentagem de potência que será transmitida pelo braço de medição será proporcional a vibração gerada no ambiente pelo veículo e a diferença entre as fases dos sinais do braço de referência e do braço de medição é captada por um fotodetector acoplado na saída do interferômetro, que transforma o sinal luminoso em corrente elétrica mensurável. A variação da amplitude do sinal é, posteriormente, analisada em um computador.

O protótipo de sensor foi instalado e testado em uma via de faixa única, na qual foram aferidos os valores da tensão em função do tempo para diferentes distâncias entre o sensor e o veículo. Para cada distância, Nedoma et al. (2018b) analisaram o número de passos e a confiabilidade da detecção, onde constataram que para uma distância de 1 m entre o sensor e o veículo ou 504 passos a confiabilidade da detecção é de 98,14 %.

Malla, Sen & Garrick (2008) propuseram um conjunto de tecnologias de comunicação, informação e monitoramento do tráfego em tempo real. Para isto, Malla, Sen & Garrick (2008) desenvolveram uma rede de sensores incorporados em uma infraestrutura sob o asfalto, a fim de obter informações sobre as condições da estrada como volume de tráfego, composição (classificação do veículo), velocidade do veículo, peso dinâmico via pesagem em movimento (WIM) e outros dados.

Outras literaturas utilizaram sensoriamento óptico para desenvolver sistemas de monitoramento de tráfego ferroviário. Yuksel et al. (2018) desenvolveram um sistema de monitoramento inteligente baseado em fibra grade de Bragg capaz de identificar o eixo e aferir a velocidade de trens sem interromper a operacionalidade ferroviária. Já Wang et al. (2019) utilizaram interferômetros duplos Sagnac conectados por fibra óptica e a partir de algoritmo de correlação cruzada para detectar vibrações causadas por trens no ambiente.

Kepak et al. (2018) propuseram a utilização de interferômetro de fibra óptica para detecção de veículos ferroviários, baseado na sensibilidade a mudanças de fase do interferômetro Mach-Zehnder devido à presença de vibrações no ambiente ao redor da fibra. De forma semelhante, He, Feng & Zhao (2019) propuseram a utilização de fibra óptica para detectar mudanças nas vibrações do ambiente ao redor da mesma devido à passagem de trens em ferrovias de transporte pesado, a fim de garantir mais segurança nesses ambientes.

O experimento realizado por He, Feng & Zhao (2019) consistiu na aplicação de uma fibra óptica como sensor, em uma estação na China, por 8 km. A fibra óptica detecta vibrações diferentes no ambiente com e sem a presença de trens, isso é possível pois por essa fibra se propaga luz oriunda de uma laser semiconductor de largura de linha estreita (≈ 3 kHz) com potência de 12,7 dB m e a potência desse sinal luminoso na fibra se altera

em função da intensidade da vibração, He, Feng & Zhao (2019) também utilizaram um modulador acústico-óptico AOM para moldar o sinal que posteriormente será demodulado e um amplificador EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*) para amplificar o sinal transmitido que chegaria ao fotodetector que transforma o sinal luminoso em sinal elétrico, o qual será convertido para digital e analisado em um computador.

Atrelado ao setup descrito acima, He, Feng & Zhao (2019) utilizaram um reflectômetro óptico de domínio de tempo sensível à fase (OTDR) para monitorar e localizar os sinais de vibração fraca. Quando as mudanças circundantes, a fibra óptica vai vibrar na posição correspondente. Devido ao efeito elasto-óptico, o índice de refração e o comprimento da fibra mudam, o que resulta na mudança de fase do sinal transmitido na fibra e na mudança da intensidade de interferência retornada. Por meio de dispositivos Db12, Sym8 e Coif5 o sinal é convertido em uma onda mecânica e posteriormente detectado pelo sensor acústico DAS no computador que mostra a amplitude do sinal variando em função do tempo de acordo com o comprimento, a velocidade e a posição do trem.

2.4.3 Pedidos de patente

A partir de uma busca realizada em bases de dados especializadas (INPI, WOPI, Espacenet e *google patents*) foram encontrados patentes e pedidos de patentes nacionais e internacionais acerca sensores de velocidade e monitoramento de parâmetros e condições de tráfego utilizando fibra óptica.

O documento CN103439526A descreve um sensor de velocidade aplicado em trânsito ferroviário, a partir da utilização de grade de Bragg em fibra óptica combinada a um dispositivo emissor de luz e um detector óptico (DACHENG et al., 2013).

Enquanto, o documento US10861328B2 refere-se a um sistema de monitoramento de pesagem dinâmica de veículos e medição de velocidade para monitoramento e controle de parâmetros de tráfego rodoviário, por meio de tecnologia de sensores de fibra óptica distribuídos (GONÇALVES, 2020).

A patente CN105122328B trata sobre um sensor para monitoramento de tráfego baseado na aplicação de tecnologia DAS para detectar número de eixos e mensurar velocidade de veículos em bandas de rodagem (CRICKMORE D. HILL, 2018). A invenção proposta em CN109508631A se refere a um método para a construção de um sistema de fluxo de tráfego com base na tecnologia de detecção de fibra óptica distribuída, que é caracterizado por compreender as seguintes etapas: um sensor de fibra óptica distribuído é conectado ao longo da estrada onde

o cabo óptico é colocado para coletar o dados de vibração do cabo óptico e passagem do veículo (QILIN ZHAO HUAIBAI, 2019).

Em se tratando da aplicação de sensores de fibra óptica para controle e monitoramento de tráfego ferroviário, a patente CN112345787A refere-se um sistema de medição de direção e velocidade de avanço de trem que compreende uma fonte de luz, um cabo de fibra óptica, um sistema de processamento de informações de trem, uma matriz de ímã permanente montado em um veículo e pelo menos dois sensores magnéticos de fibra óptica que são separados por uma distância fixa que configuram o elemento sensor do sistema (XINGLIN XU SIYU, 2021). Enquanto o documento CN108431880A apresenta um sistema para monitoramento de fluxo de tráfego rodoviário, a partir da detecção, usando sensoriamento acústico distribuído por fibra óptica (MARTIN, 2018).

A partir dos documentos descritos nesta seção, que se referem a sensores de medição de velocidade e outros parâmetros de tráfego, é possível inferir que o dispositivo proposto neste trabalho é passível de pedido de depósito de patente.

2.4.4 Comparação entre trabalhos correlatos

Esta seção trata de apresentar a tabela comparativa, citada em seções anteriores, referente aos trabalhos apresentados e discutidos durante a revisão da bibliografia, conforme pode-se observar na Tabela 3.

Tabela 3: Estudo comparativo dos trabalhos.

Autores	Parâmetro Aferido	Método de Sensoriamento	Resultados
NEDOMA et al., 2016	Velocidade de veículos	Interferômetro Mach-Zehnder	Taxa de erro entre 1,36 % e 7,7%
Grakovski & Pilipovecs, 2017	Peso e classificação de veículos	Fibra Óptica	Erro de medição de até 5%
ALAMANDALA et al., 2018	Peso e velocidade de veículos	FBG	-

Autores	Parâmetro Aferido	Método de Sensoriamento	Resultados
HUANG et al., 2018	Velocidade, distância entre eixos e classificação de veículos,	FBG	Precisão de 98%
KEPAK et al., 2018	Deteção de veículos ferroviários	Interferômetro Mach-Zehnder	-
LIU et al. , 2018	Fluxo de tráfego	DAS	Faixa de erro menor que 6%
NEDOMA et al., 2018a	Densidade de tráfego	Interferômetro Mach-Zehnder	Precisão de 97 % até 250 cm
NEDOMA et al., 2018b	Densidade de tráfego	Interferômetro Mach-Zehnder	Precisão de 98,14 % até 1 m
YUKSEL et al. (2018)	Identificar o eixo e aferir a velocidade de trens	FBG	Erro absoluto máximo de 1 km/h
He, Feng & Zhao , 2019	Velocidade, posição e direção dos trens	DAS + OTDR	-
HUANG et al., 2019	Velocidade e densidade do veículo	DFOS	Precisão de 94,5% (densidade) e 98,5% (velocidade)
LIANG et al. ,2019	Estimativa de fluxo de tráfego	OTDR	-

Autores	Parâmetro Aferido	Método de Sensoriamento	Resultados
LIU et al. , 2019	Detecção, velocidade e classificação de veículos	DAS	Precisão de 80% (detecção), erro de 5% (velocidade) e precisão de a 70% (classificação)
WANG et al. (2019)	Detecção de vibração de trens	Interferômetro Sagnac	-
WELLBROCK et al., 2019	Velocidade e densidade de veículos	OTDR	Precisão de 94,5% (densidade) e 98,5% (velocidade)
FAJKUS et al., 2020	Densidade do tráfego e velocidade de veículos	FBG	Taxa de erro de 2,62%

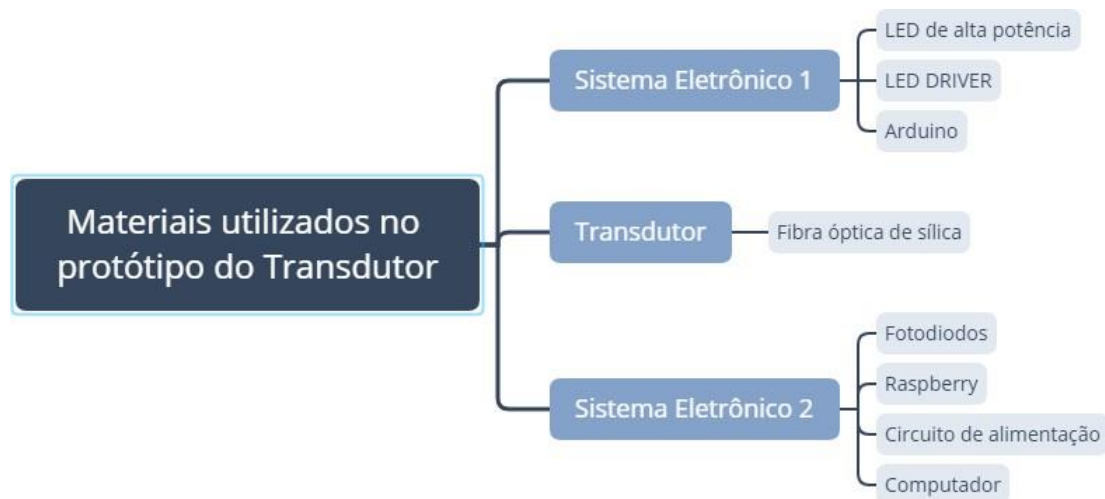
A partir da Tabela 3 , é possível constatar que a maioria dos trabalhos correlatos discutidos na revisão bibliográfica utilizam tecnologias de fibra óptica mais caras e mais complexas, havendo poucos trabalhos que utilizam fibra óptica simples disponíveis na literatura. Dessa forma, verifica-se que o método de sensoriamento proposto neste trabalho é de fundamental relevância na área de sensores ópticos, uma vez que constitui um sensor simples, de baixo custo e fácil instalação. Verifica-se, também, devido ao número limitado de trabalhos na literatura acerca de sensores de fibra óptica aplicado em controle e monitoramento de tráfego, que este trabalho é de grande relevância para a comunidade científica.

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais Utilizados

O mapa de ideias da Figura 10 apresenta a relação dos materiais utilizados na confecção do protótipo do transdutor de que se trata este trabalho. O sistema de sensoriamento é composto por um sistema eletrônico responsável pela emissão contínua de luz em potência e comprimento de onda pré-estabelecidos, uma fibra óptica multimodo que configura o elemento transdutor responsável pelo sensoriamento e um segundo sistema eletrônico responsável pela aquisição, conversão, leitura e armazenamento de dados.

Figura 10. Mapa de ideias com todos os materiais utilizados na montagem do protótipo.



Fonte: Autora.

3.1.1 Sistema eletrônico 1

Como dito anteriormente, o primeiro sistema eletrônico do sensor é responsável por garantir que a fonte luz forneça luz continuamente ao transdutor. À vista disso, o sistema é composto por um LED de alta potência, um circuito LED *DRIVER* e um microcontrolador, descritos adequadamente nas subseções seguintes.

LED de alta potência

LED (Diodo Emissor de Luz ou *Light Emitting Diode*) é um dispositivo eletrônico semicondutor cuja função é emitir luz (KEISER, 2003). Para construção do protótipo apresentado neste trabalho, foi utilizado como fonte luminosa um LED de alta potência com comprimento de onda centralizado em 780 nm e largura de banda de 10 nm (Thorlabs, 2007), corretamente ilustrado na Figura 11. A fim de estabelecer a correta interconexão entre o LED e a fibra e garantir o confinamento da luz, foi criado, modelado e impresso um modelo de acoplador/adaptador capaz de acoplar um LED (LED780E) a uma fibra FT400EMT, mas especificamente a um conector de fibra óptica do tipo FC/PC (*Fiber Conector/ Physical Contact*). A Figura 12 mostra a modelagem 3D do acoplador LED/fibra criado e produzido em laboratório por meio de impressão 3D.

Figura 11: LED de alta potência LED780E Thorlabs.



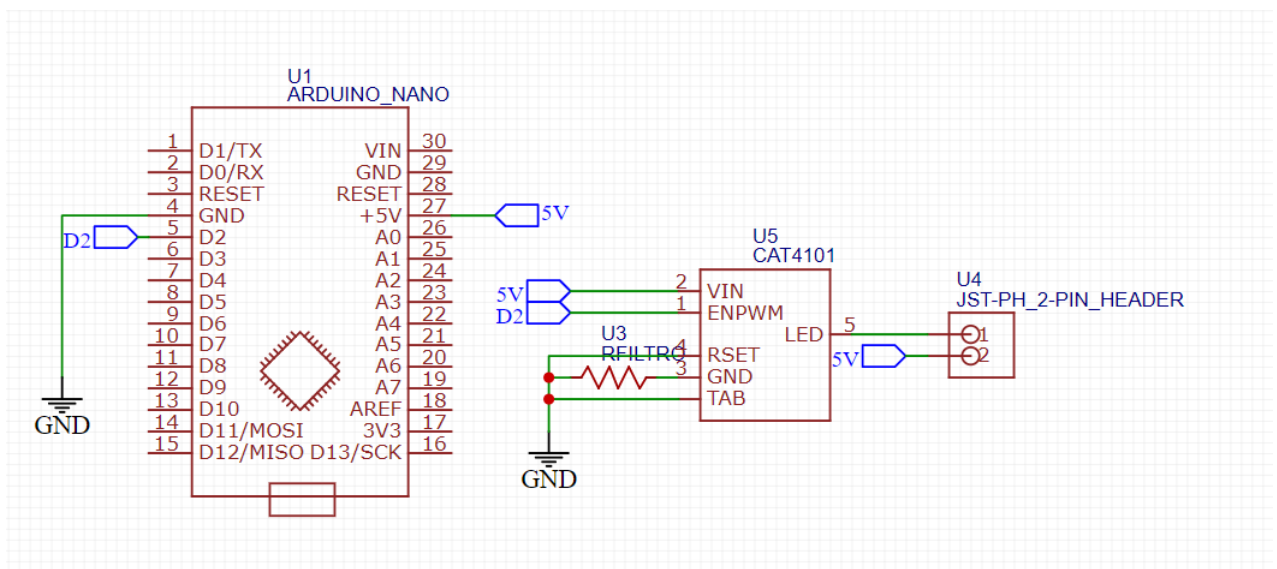
Fonte: (THORLABS, 2007).

Figura 12: Modelagem acoplador LED/fibra no Solid Edge.

Fonte: Autora.

LED DRIVER

O *driver* de LED corresponde ao circuito elétrico projetado e confeccionado para alimentar o LED. A fim de garantir que haja corrente elétrica suficiente para acender o LED (LED780E) e mantê-lo fornecendo luz constantemente ao transdutor, foi projetado um circuito de alimentação ou *driver* de LED mediante as recomendações do fabricante, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13: Circuito LED *DRIVER* para alimentação da fonte de luz do sensor.

Fonte: Autora.

O circuito foi projetado e testado e, posteriormente, foi realizada a modelagem da placa eletrônica PCB, a partir de uma ferramenta *web* online voltada para projetos e simulações de placas PCB (*Printed Circuit Board*) no *EasyEDA*. A placa obtida a partir da modelagem via *EasyEDA* é abrigada em uma "case" ou caixa de plástico resistente para fins de confinamento e proteção dos componentes.

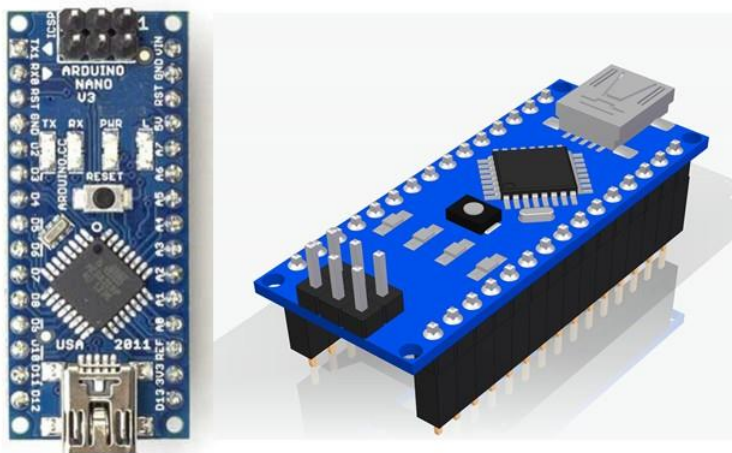
Uma vez modelada a placa PCB, a mesma foi impressa por intermédio de uma prensa LPKF C30/S e posteriormente, os componentes eletrônicos, tais como LED, resistores, capacitores e outros componentes eletrônicos necessários para o devido funcionamento do sistema eletrônico da fonte de luz, foram soldados na placa PCB em laboratório, onde os primeiros testes para verificar o bom funcionamento da placa foram realizados. Os resultados obtidos, a partir da impressão, serão discutidos no Capítulo 4.

Arduino

Arduíno é uma placa de prototipagem eletrônica de código aberto composta, basicamente, por um controlador Atmel AVR de 8 bits, uma interface serial ou USB e alguns pinos digitais e analógicos (CANALTECH, 2015).

Trata-se do projeto de uma placa eletrônica microcontrolada capaz de fornecer ao sistema tensão elétrica necessária para o correto funcionamento da fonte de luz. Para isto, utilizou-se um Arduino Nano V3.0, representado na Figura 14, a função do Arduino dentro deste sistema é alimentar o LED continuamente.

Figura 14. Foto do Arduino Nano utilizado no sistema proposto (à esquerda) e modelagem do Arduino Nano no *Solid Edge* (à direita).



Fonte: Autora.

3.1.2 Fibra óptica

Fibra óptica é um filamento, de vidro ou plástico, muito fino capaz de transmitir dados (AGRAWAL, 2014). Fibras Ópticas são comumente utilizadas para transmitir luz. A

transmissão de luz no interior de uma fibra ocorre por reflexão total, conforme é ilustrado na Figura 15, em que n_1 é o índice de refração do meio, n_2 é o índice de refração da casca e n_3 é o índice de refração do núcleo.

Figura 15. Representação da reflexão total da luz em uma fibra óptica.



Fonte: Autora.

Para construir o sensor óptico de que se trata este trabalho, foi utilizada uma fibra óptica multimodo índice - degrau com comprimento de onda central de 780 nm (THORLABS, 2011). Por se tratar de fibra multimodo, ela tem um núcleo maior, de modo que a luz é facilmente acoplada à fibra e pode ser usada com lasers e LEDs como fonte de luz. As perdas de acoplamento são muito menores quando comparadas a uma fibra monomodo. Além disso, por ser um revestimento de plástico e índice de degrau, é relativamente fácil de trabalhar e apresenta pequena atenuação em uma ampla faixa de comprimento de onda.

3.1.3 Sistema eletrônico 2

Como citado anteriormente, o segundo sistema eletrônico do sensor é responsável pela aquisição, leitura, armazenamento e exibição dos dados coletados durante as aferições. Desse modo, o sistema é constituído por um fotodiodo, responsável por captar o sinal na saída da fibra e convertê-lo em tensão elétrica, um mini computador integrado, responsável por ler e armazenar os dados, uma placa eletrônica PCB, para garantir a correta alimentação e funcionamento do sistema e um computador, no qual os dados armazenados serão exibidos em tempo real em uma página *Web*.

Fotodiodo

Fotodiodo é um dispositivo optoeletrônico que converte sinal luminoso em sinal elétrico a partir de um circuito RC (Resistor-Capacitor) (KEISER, 2003).

Inicialmente, durante as realizações dos testes de bancada, utilizou-se o fotodiodo

SM05PD1A de faixa de comprimento de onda entre 350 e 1100 nm (THORLABS, 2006) representado na Figura 16, que quando excitado age como fonte de corrente, uma resistência de carga e um circuito de filtragem, de modo a converter o sinal luminoso na saída da fibra em tensão elétrica mensurável.

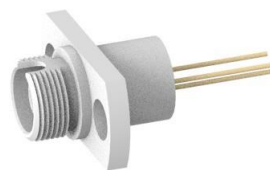
Figura 16. Fotodiodo de silício montado.



Fonte: Autora.

A fim de embarcar e compactar o processo de aquisição e leitura de dados, o fotodiodo SM05PD1A foi substituído pelo FDS02 (THORLABS, 2007) representado na Figura 17, cuja função e especificações são semelhantes, diferindo apenas no fato do FDS02 ser adequado para soldagem direta na placa PCB.

Figura 17. Fotodiodo de Si com acoplador para fibra FDS02.



Fonte: Autora.

Placa eletrônica PCB

A placa eletrônica configura um circuito impresso confeccionado por meio de linhas condutoras em cobre que leva corrente elétrica até os componentes físicos (BRAGA, 2005).

Neste trabalho, foi confeccionada uma placa PCB com os respectivos circuitos de polarização e de carga do fotodiodo, a partir das recomendações do fabricante, que por sua

vez é conectado diretamente a um mini computador integrado *Raspberry*, de modo que ocorra transferência direta de dados.

Para converter os dados digitais gerado pela *Raspberry* em dados analógicos, utilizou-se um conversor A/D (Analógico/Digital), no caso o módulo ADS1115, representado na Figura 18, soldado diretamente na placa. É válido salientar que a alimentação do fotodiodo é realizada diretamente na *Raspberry*.

Figura 18: Módulo ADS1115.



Fonte: Autora.

Raspberry PI 3B

Raspberry PI é uma placa de dimensões reduzidas que funciona como um mini computador integrado barato, portátil e versátil capaz de processar dados de maneira eficiente (Raspberry, 2019).

Para construção do sistema de aquisição, leitura e armazenamento de dados do protótipo do transdutor foi utilizada uma *Raspberry* PI 3B para processar os dados de leitura provenientes dos fotodiodos, tratá-los e armazená-los. A comunicação entre a *Raspberry* e o fotodiodo, responsável pela leitura e conversão dos dados, é realizada por meio de uma placa de circuito impressa que contém o circuito de filtragem do fotodiodo. Ademais, foi utilizado um conversor A/D no circuito, discutido na seção anterior, para converter o sinal digital gerado pela *Raspberry* em sinal analógico.

A *Raspberry* recebe e demodula esse sinal analógico em dados reais, os quais são tratados na mesma por meio de um código desenvolvido em *python* e, posteriormente, enviados e armazenados em uma página *WEB* para monitoramento em tempo real. Dessa forma, o sensor proposto atua continuamente, coletando dados e enviando a uma servidor *web* que disponibiliza os dados para os usuários. A Figura 19 mostra a *Raspberry* utilizada no protótipo de que se trata esta dissertação.

Figura 19: Foto da *Raspberry Pi 3B* durante os testes em laboratório.



Fonte: Autora.

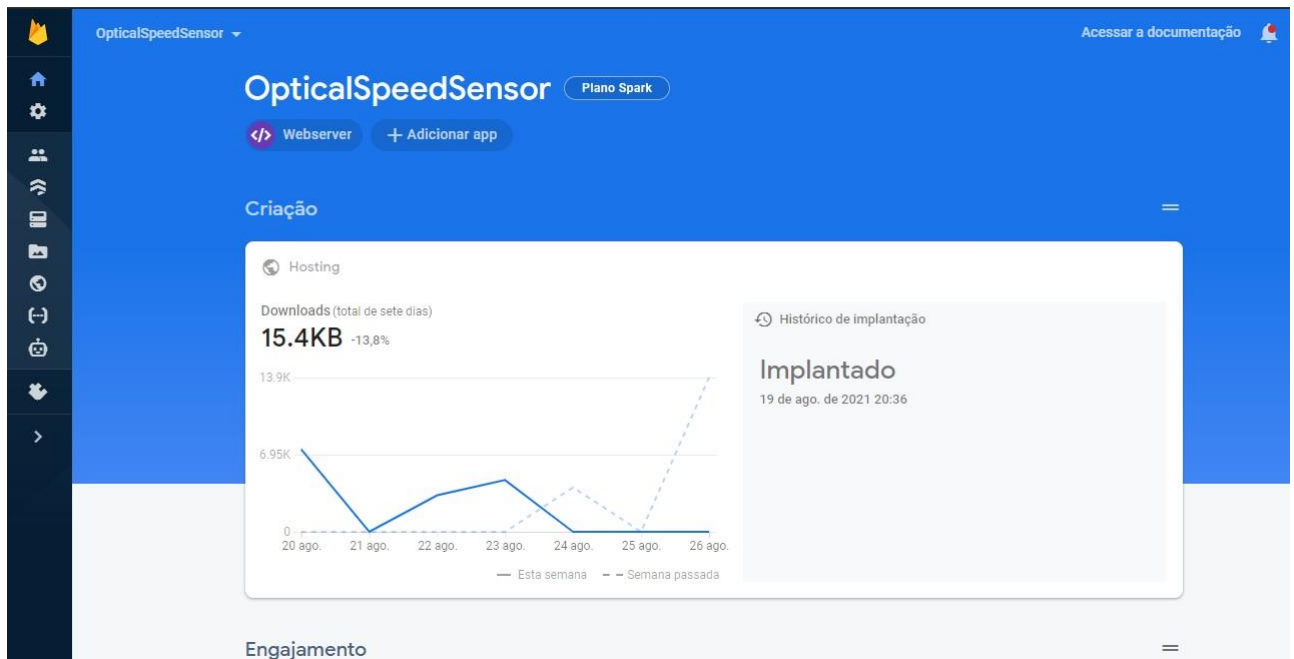
Página web e acesso remoto

Com o crescimento e a popularização da tecnologia de acesso remoto emerge a importância do sensoriamento remoto, capaz de garantir conexão à distância com segurança de dados. Ademais, a transmissão remota de dados obtidos por um sensor torna o processo mais cômodo e econômico, uma vez que não há necessidade de ser realizada leitura de dados *in loco*.

Como mencionado anteriormente, o sensor de monitoramento de tráfego proposto neste trabalho, envia as informações obtidas durante as aferições para uma página Web, tornando o processo de monitoramento mais ágil, uma vez que é possível realizar o acompanhamento diário, ou até mesmo em tempo real dos dados referentes a detecção, peso, classificação e velocidade de veículos.

Para realização do monitoramento das medidas em tempo real, o sensor óptico proposto neste trabalho possui um sistema eletrônico com mini computador integrado ou *Raspberry*, que é capaz de conectar-se à Internet via Wi-Fi e enviar para o servidor, em tempo real, os dados referentes às medidas obtidas pelo fotodiodo.

O servidor local recebe os dados que são apresentados em uma interface para o usuário. A interface do *software* foi desenvolvida em *JavaScript* e hospedada no servidor web *Firebase*, o que possibilita o acesso à informação de qualquer máquina ou dispositivo móvel, conforme ilustra a Figura 20.

Figura 20: Tela inicial apresentada no *Firebase* para acesso aos dados do sensor.

Fonte: Autora.

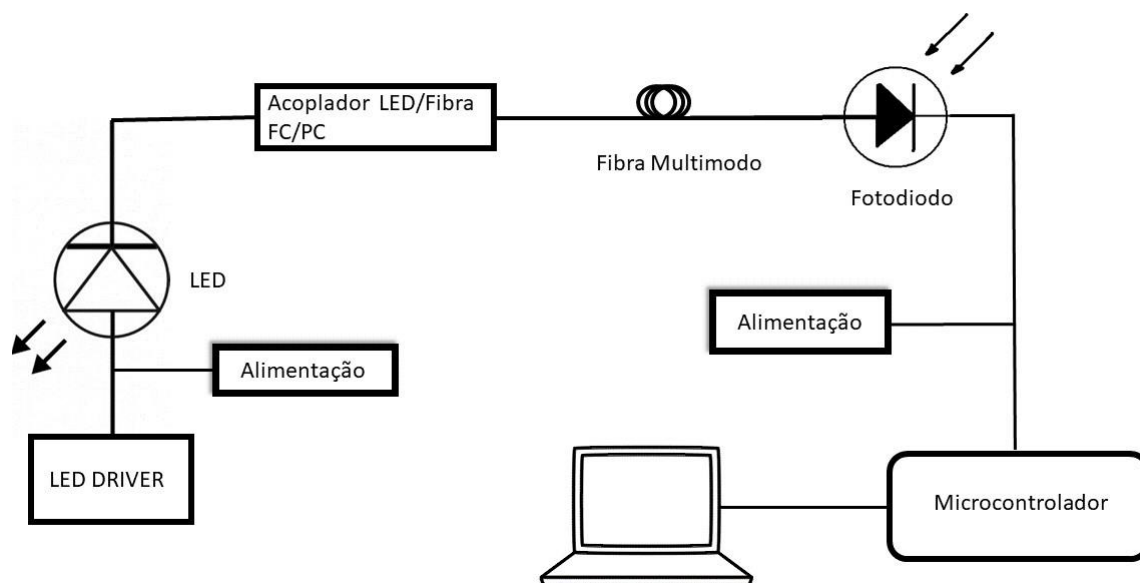
3.2 Métodos

3.2.1 Arranjo experimental e metodologia de funcionamento do sistema

Para construção do protótipo de que se trata esta dissertação, foram utilizados como fonte luminosa, elemento sensor e equipamento de análise, um dispositivo emissor de luz de banda larga estabilizada em comprimento de onda de 780 nm (Thorlabs, LED780E), um fibra óptica multimodo (Thorlabs, FT400EMT) e um fotodiodo (Thorlabs, FDS-100), respectivamente, para levantar os requisitos necessários para o dispositivo.

Ademais, o sistema eletrônico do sensor consiste, além do circuito de acionamento do fotodetector, um dispositivo microcontrolado responsável por automatizar as medições e a leitura dos dados obtidos pelo fotodiodo, além de outros componentes passivos necessários para o funcionamento e alimentação do sistema, consoante é mostrado no esquemático da Figura 21.

A variação do peso provoca uma variação na intensidade luminosa que chega ao fotodiodo, de modo que seja possível relacionar essas variações com a intensidade do peso e gerar, assim, um dispositivo óptico capaz de aferir o peso. De forma semelhante, a presença do veículo sobre a fibra óptica, ainda pela ação da força peso e, por conseguinte a variação na intensidade luminosa, permite detectar a presença do mesmo e, posteriormente, inferir a velocidade do mesmo por meio do intervalo de tempo entre as perturbações causadas na FO.

Figura 21. Arranjo experimental do sistema.

Fonte: Autora.

Isso é possível pois a presença de massa sobre a fibra óptica produz uma deformação na mesma devido à tração, o que interfere diretamente no caminho óptico de propagação da luz e, consequentemente, induz mudanças na intensidade, na frequência e na fase do sinal luminoso. Neste trabalho, são analisadas as mudanças da intensidade de potência do sinal, que é uma consequência da atenuação do sinal devido a curvatura causada pela pressão.

Em outras palavras, quando uma pressão é aplicada sobre a fibra gera uma microcurvatura, que como discutido no Capítulo 2, resulta em uma atenuação do sinal. Na atenuação causada por microcurvatura, a perturbação na fibra faz com que um raio de modo de ordem superior (que se propaga em zigue-zague) saia da condição de reflexão interna total, de modo que esse raio seja refratado, ou seja, transmitido para fora do núcleo da fibra, resultando em perda de potência. Assim, pode-se concluir que intensidade do sinal é inversamente proporcional a pressão, uma vez que um aumento da pressão implica um aumento da microcurvatura e, consequentemente, dos modos não guiados.

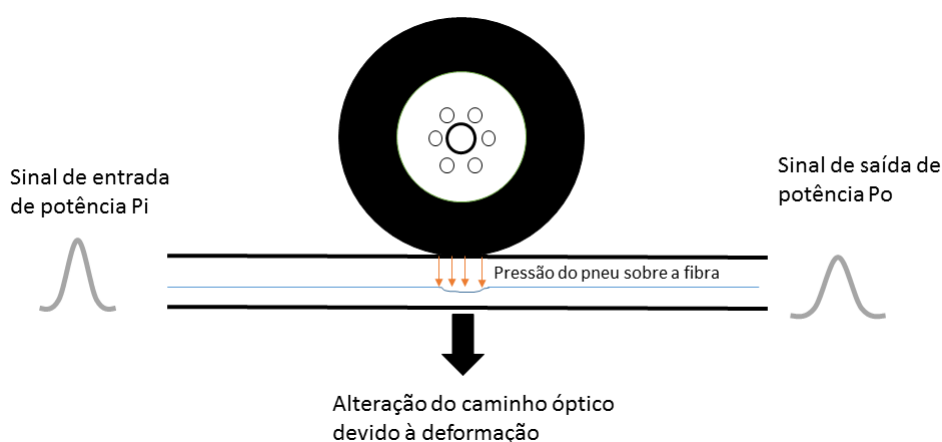
Na Figura 22 é possível observar atenuação do sinal propagante devido à pressão exercida pela roda do veículo na FO.

Para o cálculo da velocidade do veículo é necessário que o transdutor esteja associado a um contador virtual, de modo que o timer é iniciado no instante de tempo em que o o eixo dianteiro

do veículo é detectado e interrompido no instante de tempo em que o o eixo traseiro do veículo é detectado, finalizando a contagem.

O intervalo de tempo mensurado (tempo real) durante a passagem do veículo pelo sistema de sensoriamento é armazenado na *Raspberry*, onde a velocidade é calculada por meio de um código em *python* e, posteriormente, armazenada e transmitida para uma página na *web*, possibilitando a visualização dos dados por um computador ou dispositivo móvel.

Figura 22. Representação da deformação sofrida pela fibra óptica e sua influência sobre o sinal propagante.



Fonte: Autora.

3.2.2 Testes efetuados no protótipo

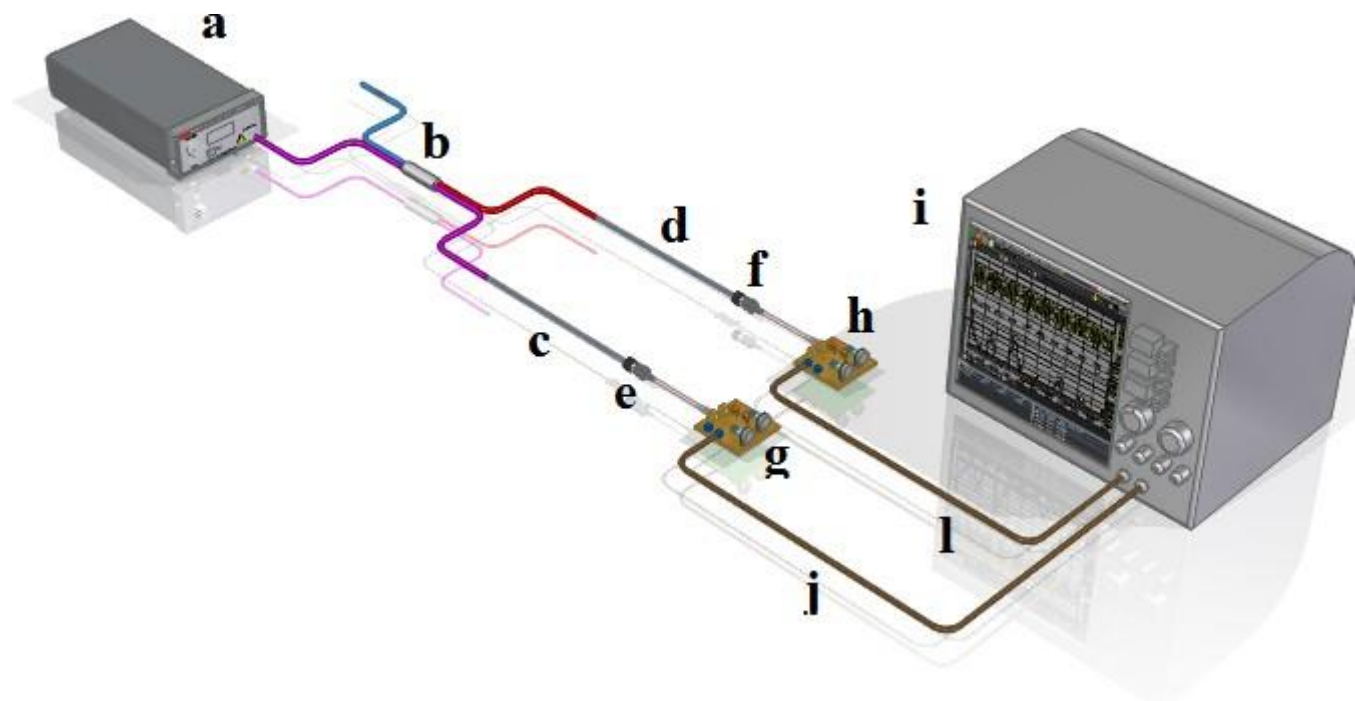
3.2.2.1 Prova de Conceito: Testes de sensibilidade da fibra óptica a uma pressão externa.

Com o objetivo de avaliar e comprovar a sensibilidade da fibra óptica à pressão, foi analisada a resposta da mesma quando submetida a uma pressão externa por meio de um osciloscópio.

Para fins de testes de laboratório iniciais, utilizou-se um laser acoplado a fibra com comprimento de onda central de 1550 nm, uma vez que em comparação com o LED, o laser oferece maior potência e comprimento de onda mais definido (largura de banda menor). A fim de impedir que qualquer parcela de luz volte para o laser, foi conectado ao mesmo um isolador óptico de comprimento de onda centralizado em 1550 nm integrado no laser, o isolador restringe a propagação de luz em um único sentido. A saída do isolador óptico foi conectada a um acoplador óptico responsável por distribuir a potência luminosa igualmente entre duas

fibras ópticas. Na saída das fibras são acoplados fotodiodos responsáveis por converter o sinal luminoso em tensão elétrica mensurável, a qual foi analisada em um osciloscópio. A Figura 23 apresenta a modelagem da montagem apresentada nesta seção para os testes de bancada. A placa eletrônica utilizada corresponde ao circuito de acionamento dos fotodiodos.

Figura 23. Representação da montagem do protótipo. a) Fonte de laser acoplada à fibra; b) Acoplador óptico; c) Fibra óptica 1; d) Fibra óptica 2; e) Fotodiodo 1; f) Fotodiodo 2; g) Placa eletrônica para acionamento do fotodiodo 1; h) Placa eletrônica para acionamento do fotodiodo 2; i) Osciloscópio.



Fonte: Autora.

Para validar a prova de conceito de que trata esta seção, foi confeccionado um objeto circular de poliacetal para simular um pneu. Observou-se que a passagem da roda sobre as fibras provoca uma deformação axial na mesma que implica alterações o caminho óptico da luz e resulta em uma alteração na potência luminosa que corresponde a uma variação da tensão elétrica no fotodiodo. Além da massa, a vibração que surge no ambiente próximo às fibras, quando há presença de veículos, já é o suficiente para causar uma variação da potência luminosa transmitida.

Para garantir a confiabilidade das medidas, os testes foram repetidos e validados por meio da variação da intensidade da pressão, obtendo-se os resultados satisfatório para detecção de

objetos na área de sensoriamento e adjacências.

3.2.2.2 Estimativa de peso de veículos

A pesagem em movimento ou Weight in Motion (WIM) é um processo de grande importância para monitoramento de tráfego e para a construção de estradas e modernização de gestão de tráfego e consiste em pesar veículos conforme eles trafegam em velocidade na estrada.

Os sistemas WIM (Peso em Movimento) para monitoramento de tráfego empregados atualmente utilizam tecnologias eletrônicas, mecânicas, piezoelétricas e baseadas em imagens. A grande desvantagem desses sistemas é a interferência do ambiente externo nas medições, especialmente a presença de vibrações e campos eletromagnéticos, além da complexidade dos componentes e instalação complexa e invasiva, uma vez que é necessário retirar parte do o pavimento, e, no caso de sensores piezoelétricos, alto custo de instalação e manutenção. No caso de trânsito tecnologia de detecção de fluxo baseada em vídeo / imagem, além ao alto custo de instalação e manutenção, requer uma análise contínua de vídeos e imagens.

Neste projeto, o protótipo de sensor de peso em movimento com aplicação em pesagem de veículos automotores em vias urbanas foi testado e validado em laboratório e em campo, conforme será discutidos nas próximas subseções.

Testes em laboratório

Para construção do sensor de peso de que trata esta seção, utilizou-se como elemento sensor uma fibra óptica multimodo e índice - degrau de sílica com comprimento de onda centralizado em 780 nm. Por ser uma fibra multimodo possui um núcleo maior, logo, a luz é facilmente acoplada à fibra e pode ser usada tanto com lasers como com LEDs como fonte de luz. As perdas de acoplamento são bem menores se comparada a uma fibra monomodo. Além do que, por ser de plástico e índice - degrau, é relativamente fácil de se trabalhar e apresenta atenuação pequena para uma ampla faixa de comprimento de onda.

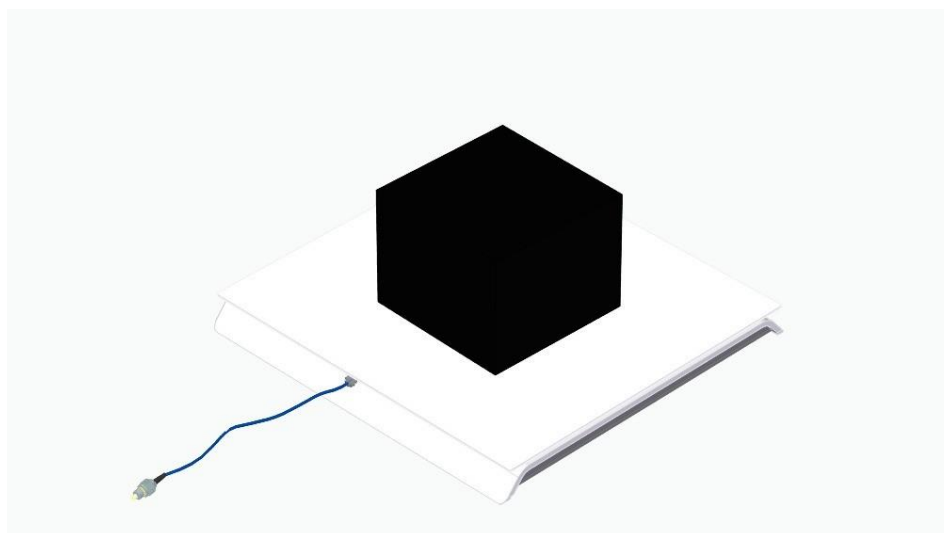
Foram utilizados como fonte luminosa e equipamento de análise, um diodo emissor de luz (LED) de banda larga estabilizada em 780 nm e um fotodiodo de largura de banda entre 350 e 1100 nm, respectivamente.

Conforme abordado na seção 3.1, o primeiro sistema eletrônico do sensor consiste no circuito de acionamento do LED, enquanto o segundo sistema ou sistema de leitura e armazenamento consiste, além do circuito de acionamento do fotodiodo, um dispositivo

microcontrolado responsável por automatizar as medições e a leitura dos dados obtidos pelo fotodiodo.

Com a finalidade de analisar a resposta da fibra óptica à pressão exercida pelo peso, realizou-se testes em laboratório. Para isto, selecionou-se pesos padrões que variam entre 0,5 kg e 2 kg, os quais foram adicionados em ordem crescente de massa sobre uma plataforma de pesagem, devidamente representada na Figura 24 .

Figura 24: Representação de um bloco de peso padrão sobre a plataforma de pesagem.



Fonte: Autora.

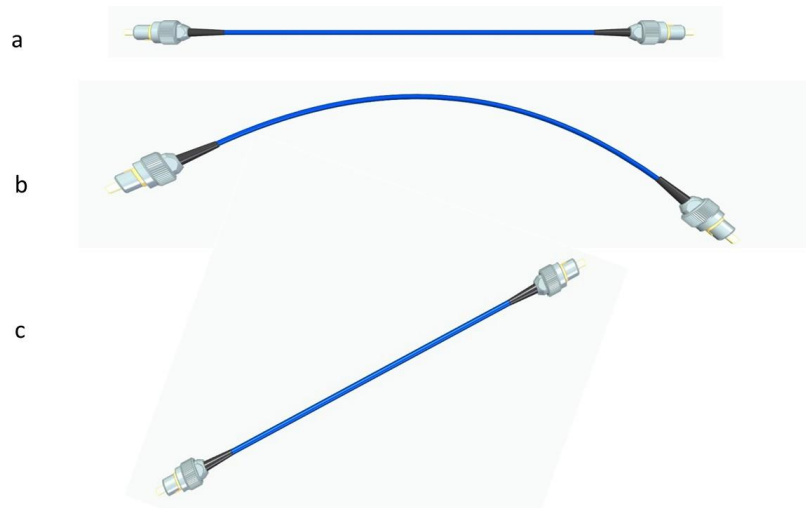
Inicialmente, para determinar a melhor configuração do sensor, testou-se o sistema de pesagem com a fibra óptica em três posições diferentes: reta e horizontal, curva de 135° e transversal, consoante é ilustrado na Figura 25.

Definida a melhor configuração para o sensor, realizou-se novos testes para uma faixa de peso entre 500 g e 5000 g e, em seguida, comprovada a sensibilidade e confiabilidade do sensor em laboratório, iniciou-se os testes em banda de rodagem de faixa única.

Testes em campo

O teste em campo consistiu na implantação do sensor em uma via de faixa única, de modo que o dispositivo emissor de luz foi implantado junto ao meio fio e uma "case" fabricada em impressora 3D foi alocada no lado oposto da via. A "case" é responsável por abrigar o sistema eletrônico de aquisição e leitura dos dados, ou seja, uma placa eletrônica composta por um fotodetector, um microcontrolador e outros componentes eletrônicos necessários para o devido funcionamento do sistema.

Figura 25: a) Fibra disposta a 180° na horizontal em relação a plataforma de pesagem. b) Fibra disposta numa curvatura de 135° . c) Fibra disposta na transversal em relação a plataforma de pesagem.



Fonte: Autora.

O elemento sensor FO foi conectado em uma de suas extremidades ao dispositivo emissor de luz por meio de conectores FC/PC e a outra extremidade foi conectada ao fotodetector, também por meio de conectores FC/PC, de modo que a fibra óptica se estendesse por toda a via, caracterizando um sensor distribuído ilustrado corretamente na Figura 26 .

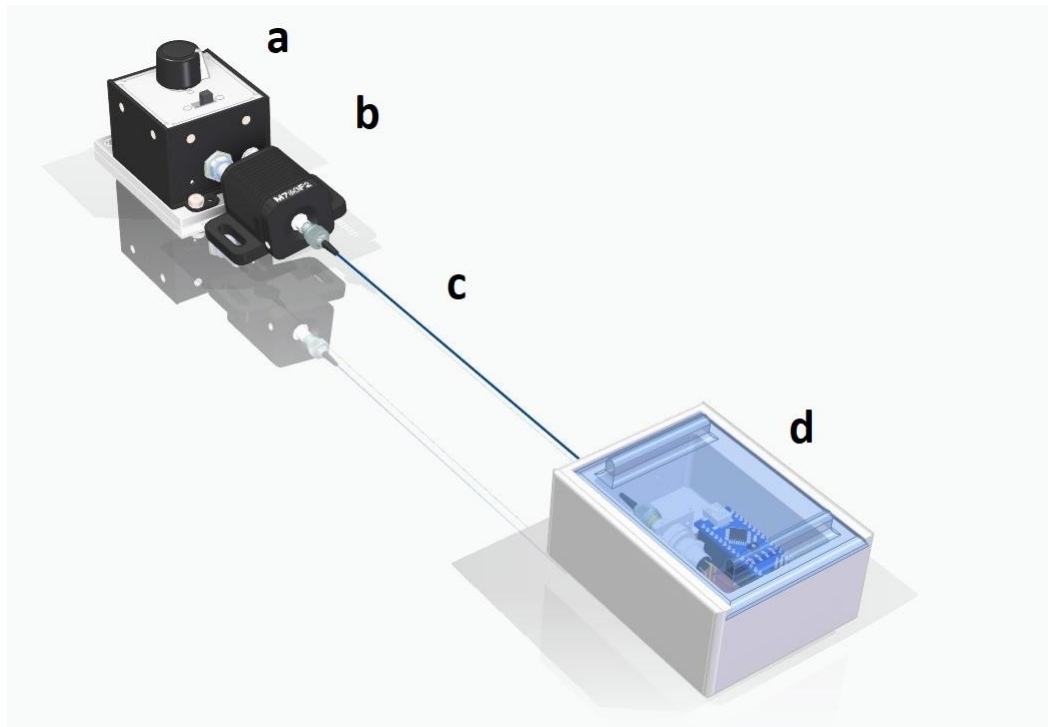
3.2.2.3 Classificação de veículos

Sistemas de Transporte Inteligentes (STI) integram várias tecnologias como tecnologia eletrônica, tecnologia da informação, tecnologia de sensoriamento e tecnologia de engenharia de sistema para gestão de tráfego com base em instalações rodoviárias. Nesse contexto, a detecção e classificação de veículos é um ramo importante do STI, que tem amplas possibilidades de aplicação em áreas como monitoramento de rodovias, cobrança automática de pedágio em rodovias, fluxo de veículos e dados para estatísticas.

Como já discutido, o sensor de fibra óptica desenvolvido neste trabalho é baseado no princípio de flexão axial da fibra óptica, causando perda de intensidade de luz.

A partir do sistema de medição WIM, que relaciona a tensão elétrica mensurada com o peso do veículo, é possível identificar o tipo de veículo e classificá-lo. A classificação do veículo pertence a um campo de reconhecimento de padrão de problemas em que os veículos são categorizados em diferentes tipos. Neste estudo, os veículos são divididos em quatro categorias: veículo de 2 rodas de pequeno porte, veículo de 2 rodas de grande porte, veículo de 4 rodas de

Figura 26: Modelagem 3D do sistema de pesagem de veículos automotores. a) LED Driver; b) LED de alta potência; c) Fibra óptica; d) Sistema eletrônico de aquisição e leitura de dados



Fonte: Autora.

pequeno porte e veículo de 4 rodas de grande porte.

3.2.2.4 Detecção de veículos

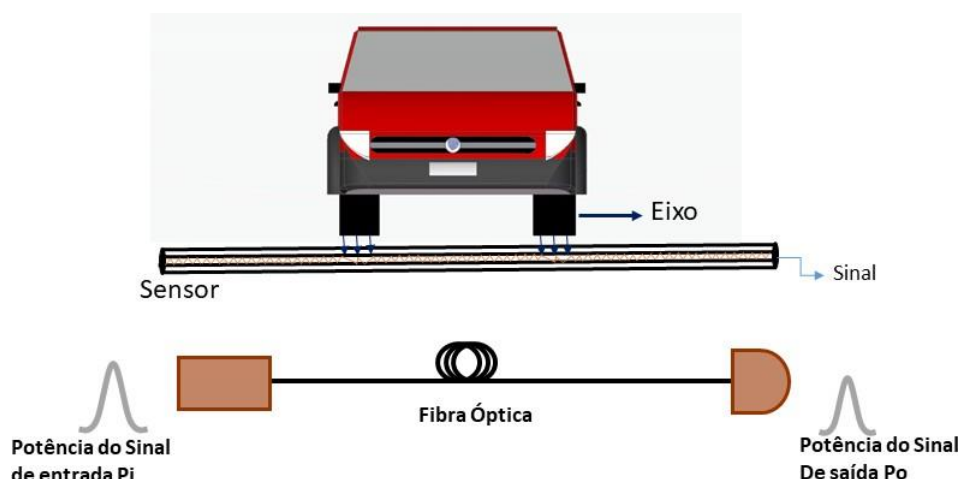
A detecção automática de veículos ainda é um desafio para o controle e monitoramento de tráfego. Na detecção inteligente de tráfego, a aquisição do fluxo de tráfego e outros parâmetros é um componente indispensável, desse modo, quando se fala sobre detecção de fluxo de tráfego inteligente e controle e gestão de tráfego, dois fatores são essenciais: precisão e eficiência, então, com boa detecção, é possível realizar um gerenciamento inteligente de previsão de tráfego, ajuste, controle de densidade, detecção de congestionamentos e detecção de acidentes e eventos anormais.

A metodologia de aferição para detecção de veículos em faixas de rodagem única é a mesma utilizada para aferir o peso dos veículos, metodologia baseada nas mudanças induzidas no caminho de propagação óptica devido à deformação sofrida pela fibra em virtude da perturbação externa.

Como já visto e discutido, essas mudanças induzidas ocorrem porque a massa sobre a fibra óptica produz deformação devido à tração, que interfere diretamente no caminho óptico de

propagação da luz e, conseqüentemente, induz mudanças na intensidade, frequência e fase do sinal de luz. Dessa forma, a medida que o veículo se aproxima da fibra, há uma variação do sinal elétrico aferido no microcontrolador, o qual é menos intenso no momento em que o veículo passa pela fibra, detectando assim, a presença de veículos, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27: Mudanças no sinal óptico devido à presença do veículo.



Fonte: Autora.

3.2.2.5 Estimativa de velocidade de veículos

Como já discutido em seções anteriores, medidas de velocidade são frequentemente afetadas por fatores externos de diversas origens, em especial, pela presença de vibrações mecânicas e campos eletromagnéticos. Com a utilização de sensores de fibra óptica, a velocidade do veículo é estimada quase que instantaneamente, ademais por constituir um sensor distribuído, permite uma cobertura total da área instrumentada, uma vez que a técnica de detecção distribuída em vez de unir um grande número de sensores, utiliza fibras ópticas simples nas regiões de interesse, melhorando significativamente a instrumentação de estruturas testes.

Nesta seção é apresentado um sensor de fibra óptica distribuído para estimar a velocidade de veículos automotores em bandas de rodagem de faixas únicas. Para isto, dois parâmetros são necessários para a estimativa da velocidade do veículo: a trajetória do veículo e o tempo gasto pelo veículo para passar uma certa distância ao longo da trajetória.

A área de sensoriamento do protótipo desenvolvido neste trabalho é delimitada por uma fibra óptica do tipo multimodo índice - degrau de sílica considerando uma distância média entre os eixos de carros de 2,6 m. Foram utilizados como fonte luminosa e equipamento de análise, um diodo emissor de luz (LED) de banda larga estabilizada em 780 nm e em regime CW

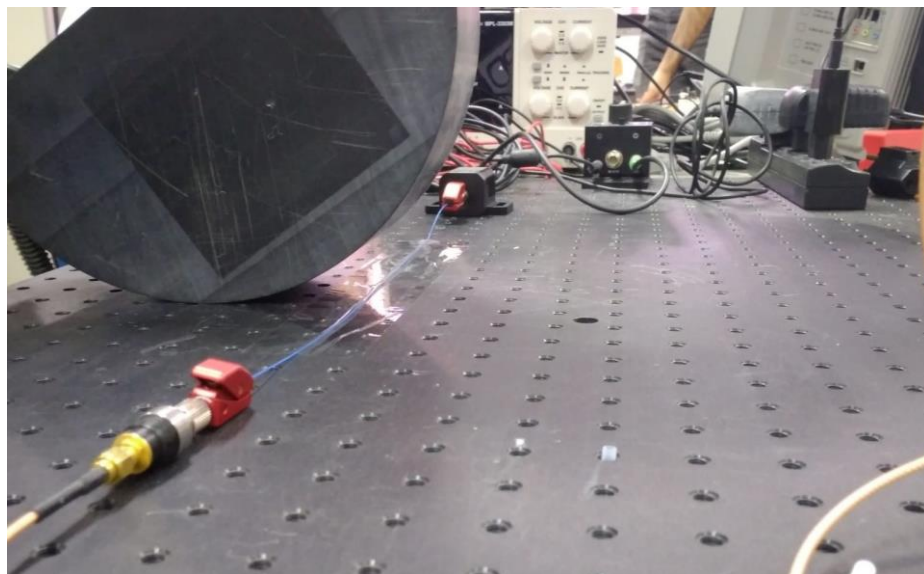
(*Continuous Wave*) e um fotodiodo de largura de banda entre 350 e 1100 nm, respectivamente.

Conforme abordado na seção 3.1, o primeiro sistema eletrônico do sensor consiste no circuito de acionamento do LED, enquanto o segundo sistema ou sistema de leitura e armazenamento consiste, além do circuito de acionamento do fotodiodo, um dispositivo microcontrolado responsável por automatizar as medições e a leitura dos dados obtidos pelo fotodiodo.

Testes realizados em laboratório

Inicialmente, com a finalidade de analisar a resposta do sensor a variação de velocidade, realizou-se testes de bancada em ambiente simulado. Para isto, utilizou-se um objeto circular de 20 cm de diâmetro para simular um pneu. O LED de alta potência emite um sinal de comprimento de onda central de 780 nm. A fibra recebe que recebe esse sinal, transmite com uma potência que equivale a diferença entre a potência na saída do laser e as perdas de potência durante a transmissão, como mostra Figura 28.

Figura 28. Foto da realização de testes em ambiente simulado utilizando um objeto circular.



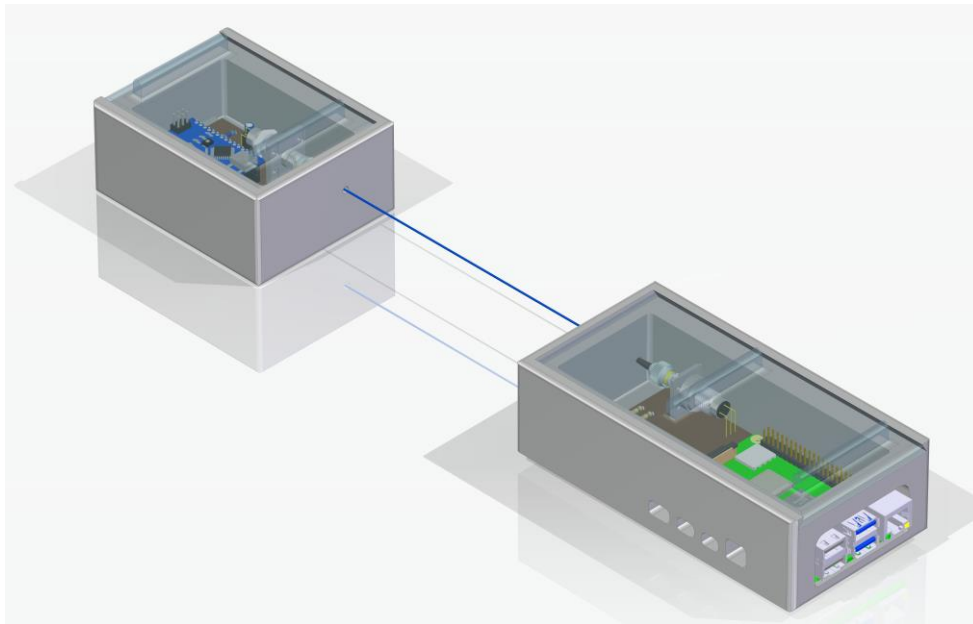
Fonte: Autora.

A presença de massa sobre a fibra gera uma pressão, ou seja, uma força *Peso* capaz de deformar as fibras. Essa deformação no caminho óptico da luz causa uma alteração na potência luminosa que equivale a uma variação da tensão elétrica. Além da massa, a vibração que surge no ambiente próximo às fibras, quando há presença de veículos, já é o suficiente para causar uma variação da potência luminosa transmitida. A variação da potência na fibra é captada pelo fotodiodo e convertida em variação de tensão elétrica.

Testes em campo

Assim como no protótipo desenvolvido para aferir o peso em movimento dos veículos, o teste em campo para aferir a velocidade consistiu na implantação do sensor em uma via de faixa única, conforme ilustra a Figura 29.

Figura 29. Representação do sistema de medição por fibra óptica instalado em campo.



Fonte: Autora.

A fim de assegurar que o sensor se estendesse durante toda a via, aproveitando o máximo de área de detecção e sensoriamento, o dispositivo emissor de luz foi implantado junto ao meio fio e o dispositivo receptor foi implantado no meio fio oposto. Ambos os sistemas, da fonte de luz e do fotodetector, foram abrigados em uma *case* ou caixa de plástico resistente, a fim de proteger os componentes ópticos e eletrônicos do ambiente externo, dessa forma, apenas o elemento sensor de fibra óptica fica exposto sobre o asfalto, como mostra a Figura 30.

Com base na alteração do valor de limiar da tensão elétrica medida pelo fotodiodo, é possível estimar a velocidade de veículos. Para isto, implementou-se na *Raspberry* um contador virtual que é acionado quando o valor de tensão gerado pelo fotodiodo é menor que o valor de limiar, indicando a detecção do primeiro eixo do veículo pela fibra. O mesmo contador será encerrado no instante de tempo em que o segundo eixo do veículo passar pela fibra.

Dessa forma, com base no intervalo de tempo medido pelo contador, em virtude das quedas nos níveis de tensão, é possível estimar a velocidade.

Figura 30. Carro na área de sensoriamento durante os testes em campo.



Fonte: Autora.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos durante os procedimentos experimentais e testes em campo. Os resultados numéricos, apresentados por meio de gráficos e equações, são validados a partir da aplicação de estatística descritiva e análise de regressão na amostra referente aos dados obtidos pelo sensor.

É válido salientar que, apesar de se tratar de um único sensor, os resultados obtidos para cada parâmetro aferido (peso, classificação, detecção e velocidade) são discutidos separadamente, possibilitando uma visão mais detalhada acerca do funcionamento do sensor.

4.1 Curva de Calibração do Sensor

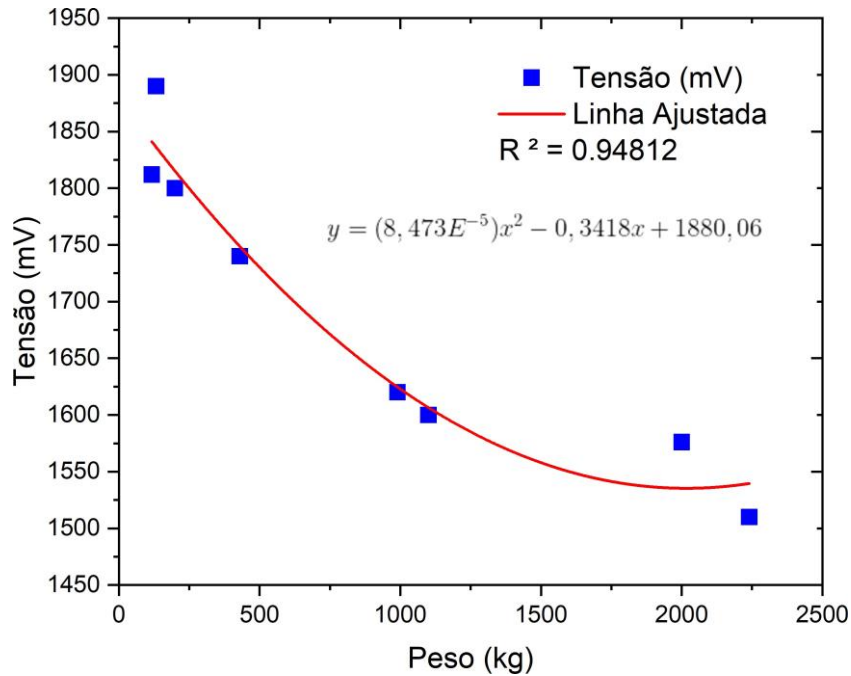
O sinal óptico proveniente da fibra sensora é convertido pelo fotodiodo em tensão elétrica e, posteriormente, é filtrado. A partir dos valores de peso medidos, é gerado um gráfico com a curva de resposta do sensor. Os parâmetros da curva de calibração são obtidos a partir de análise de regressão e inseridos como entrada no microcontrolador, o qual será responsável por calcular os valores de peso a partir dos parâmetros estabelecidos durante a calibração.

Na Figura 31 é apresentada a resposta do sensor, a partir da leitura da tensão elétrica captada pelo fotodiodo. A curva de resposta do sensor apresenta comportamento polinomial de ordem 2 em função do peso, como mostra a Figura 31.

Por meio da análise de regressão, que será discutida na Seção 4.6 e da Equação Geral 4.1, obteve-se um coeficiente de regressão $R^2 = 0,94812$ e curva de calibração dada pela Equação 4.2:

$$y = B_2x^2 + B_1x + C. \quad (4.1)$$

$$y = 8,473 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,3418x + 1880,06. \quad (4.2)$$

Figura 31: Resposta do sensor em função da variação de peso.

Fonte: Autora.

Em que B_1 é igual a $-0,3418$, B_2 é $8,473 \cdot 10^{-5}$ e C é igual a $1880,06$.

Assim, y representa a tensão elétrica aferida pelo fotodiodo, x representa o valor o peso a ser estimado e os parâmetros B_1 , B_2 e C são os parâmetros constantes do sensor. O sensor foi calibrado para realizar medições de peso em movimento de veículos automotores na faixa de 117 a 2240 kg apresentando resposta bem ajustada e aproximadamente polinomial para esta faixa.

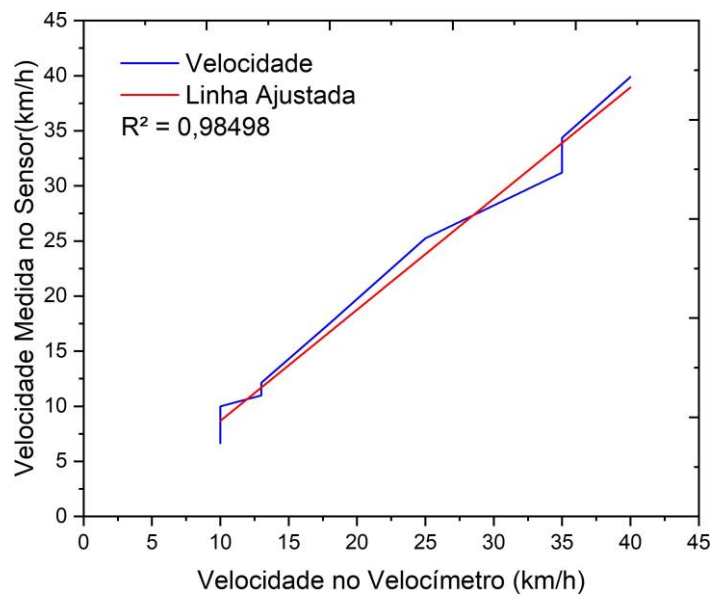
Para medição de velocidade a calibração do sensor é mais simples, pois depende apenas dos intervalos de tempo aferidos. O intervalo de tempo é medido por um contador virtual implementado na *Raspberry*, conforme será discutido na Seção 4.9. Considerando que a velocidade depende unicamente da variação do tempo, visto que o valor da distância é constante, tem-se que a velocidade é estimada segundo a Equação 4.3.

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad (4.3)$$

A partir dos valores de Δt calculados pelo microcontrolador com base nos instantes de tempo correspondentes as tensões detectadas pela fibra, os valores de velocidade foram

calculados e comparados com os valores de velocidade mostrados pelo velocímetro, conforme mostra a Figura 32, que, a partir da análise de regressão, foi obtido um R^2 de 0,98498, o qual comprova a relação praticamente linear entre as velocidades medidas e as velocidades exibidas pelo velocímetro.

Figura 32: Relação entre a velocidade medida pelo sensor e a velocidade exibida pelo velocímetro.



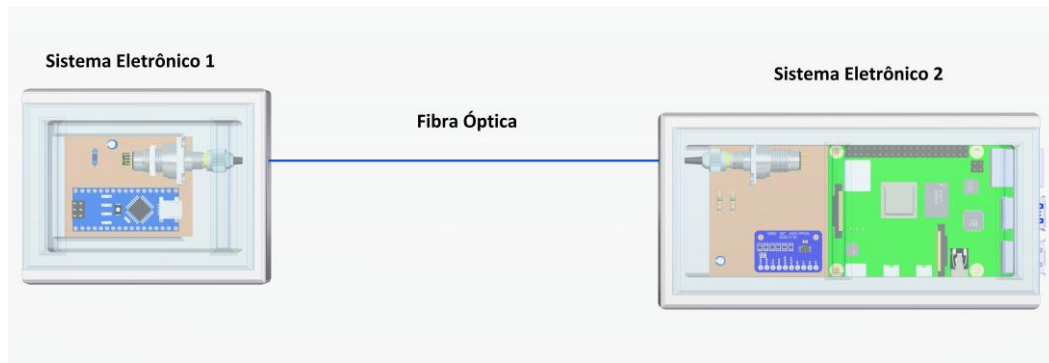
Fonte: Autora.

4.2 Projeto Mecânico do Sensor

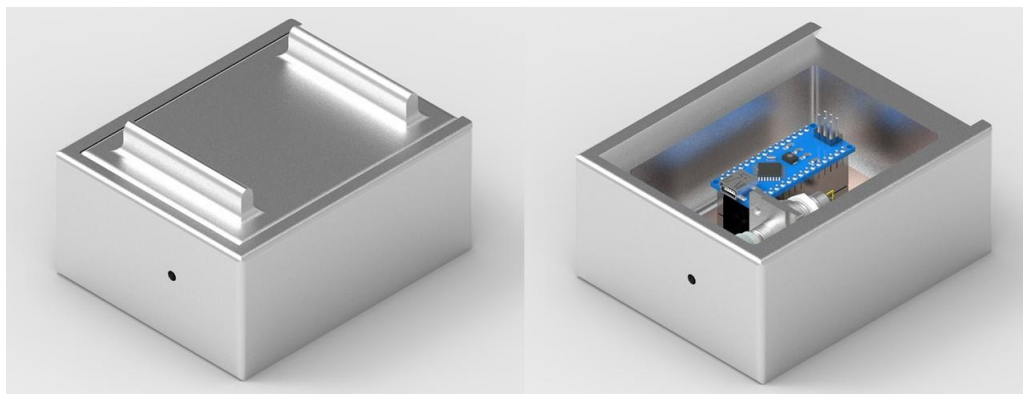
O sensor desenvolvido é formado, basicamente, pelo transdutor, placas eletrônicas, estrutura mecânica e *Raspberry*. O projeto mecânico foi desenvolvido e modelado no *software* Solid Edge. A organização do sensor, dividido em três partes (sistema eletrônico 1, fibra óptica e sistema eletrônico 2), pode ser observada na vista superior do sensor apresentada na Figura 33.

O projeto mecânico corresponde as duas *cases* ou caixas, o recorte da caixa é simples e retangular, uma vez que sua principal função é acomodar e proteger as partes eletrônicas que constituem o sensor.

A *case* 1, representada na Figura 34, acomoda a placa eletrônica correspondente ao sistema eletrônico responsável pela emissão de luz. A parte superior corresponde a tampa conectada à *case* por meio de parafusos. Para garantir o correto acoplamento da fibra ao LED, além da utilização de um acoplador foi necessário a inserção do furo para permitir a saída da fibra.

Figura 33. Vista superior do sistema de medição.

Fonte: Autora.

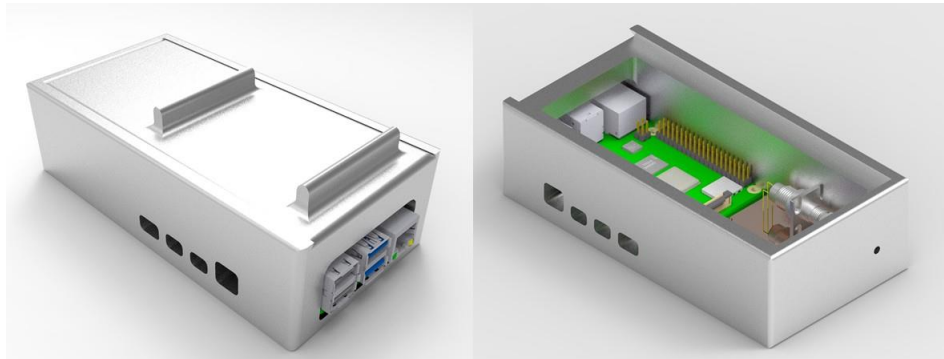
Figura 34. Case 1 fechada (à esquerda) e aberta (à direita).

Fonte: Autora.

O sistema é constituído pelo LED, LED driver e arduino. Para acoplar o LED à fibra, um acoplador LED/Fibra é inserido no LED.

A fibra óptica que sai da *case 1* é conectada diretamente na *case 2*, representada na Figura 35, onde é diretamente acoplada ao fotodiodo, a partir de um furo na *case* centralizado na área de conexão do fotodiodo. Além do furo para entrada da fibra na *case*, foram inseridos recortes ou furos na *case 2* para as saídas de alimentação, VGA, HDMI e USB da *raspberry*.

Figura 35. Case 2 fechada (à esquerda) e aberta (à direita).

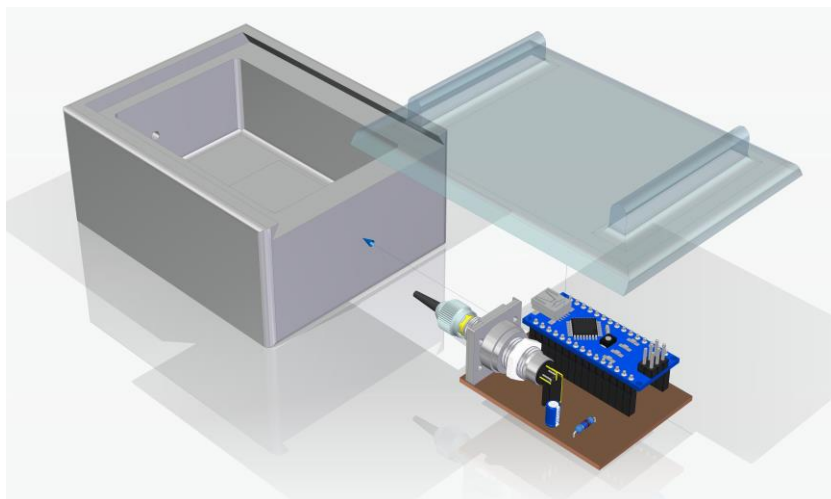


Fonte: Autora.

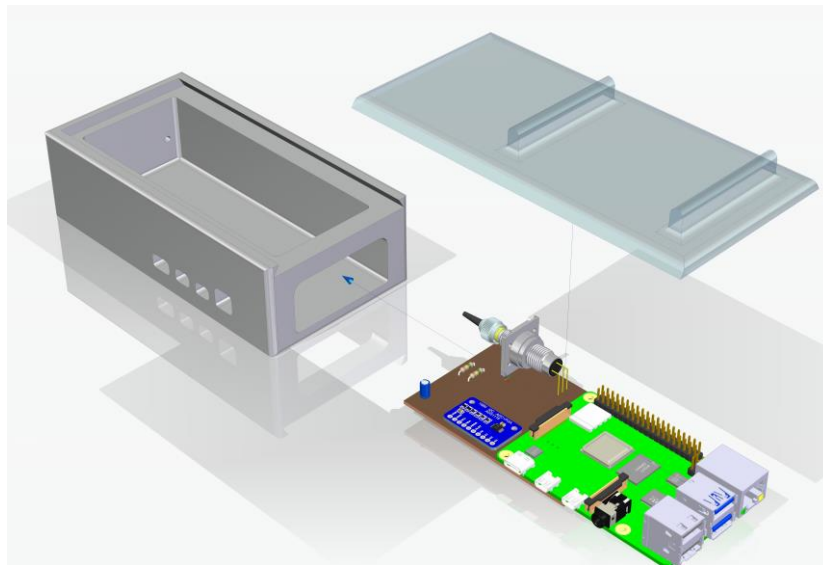
A *case 2* acomoda o sistema eletrônico 2 do sensor, o qual é responsável pela captação, leitura e armazenamento de dados. Para isto, o sistema é constituído por uma placa eletrônica que contém o fotodiodo, o circuito do fotodiodo, o conversor A/D, o circuito de comunicação do conversor com a *raspberry* e a própria *raspberry*.

Para facilitar a compreensão acerca da montagem do sistema, as Figuras 36 e 37 apresentam, respectivamente, as perspectivas explodidas das *case 1* e da *case 2*.

Figura 36. Perspectiva explodida do sistema eletrônico 1.



Fonte: Autora.

Figura 37. Perspectiva explodida do sistema eletrônico 2 .

Fonte: Autora.

4.3 Instrumentação Eletrônica

Esta seção apresenta os resultados relativos às placas eletrônicas obtidas como resultado final dos circuitos eletrônicos. Para o circuito de acionamento do LED, que representa o circuito de alimentação do sistema de sensoriamento, a partir dos circuitos apresentados nas Seções 3.1.1 e 3.1.3, modelou-se as placas de circuito impresso (PCB - *Printed Circuit Board*) referentes ao sistema de acionamento do LED e sistema de captura e armazenamento de dados.

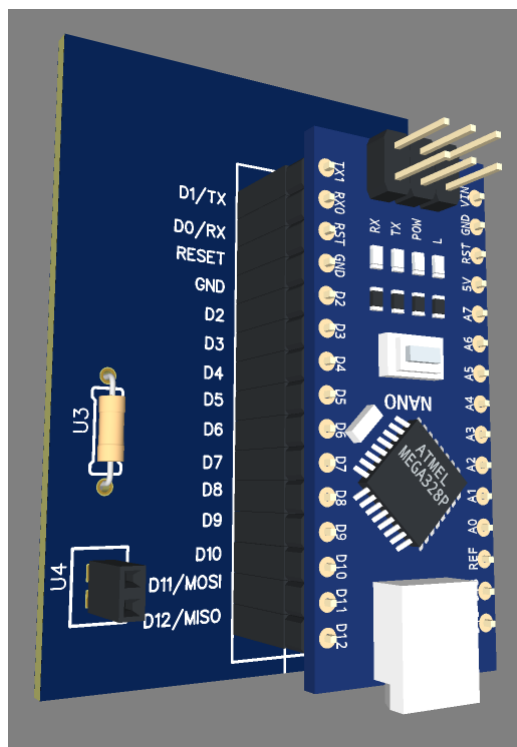
Dessa forma, a placa foi modelada, no *EasyEda*, como mostra a Figura 38 e, posteriormente, foram gerados os arquivos *gerber* necessários para impressão. Após a impressão do circuito elétrico, os componentes eletrônicos apresentados no circuito de acionamento foram soldados na placa, juntamente com o LED, obtendo como produto final a placa da Figura 39.

Para o circuito utilizado na filtragem, processamento, leitura e transmissão de dados do sinal elétrico, tem-se: o circuito do fotodiodo e o módulo ADS1115.

O circuito do fotodiodo, conforme ilustra a Figura 40, é composto por um filtro passa-baixa, uma fonte de alimentação e uma resistência de carga, seguindo as recomendações do fabricante.

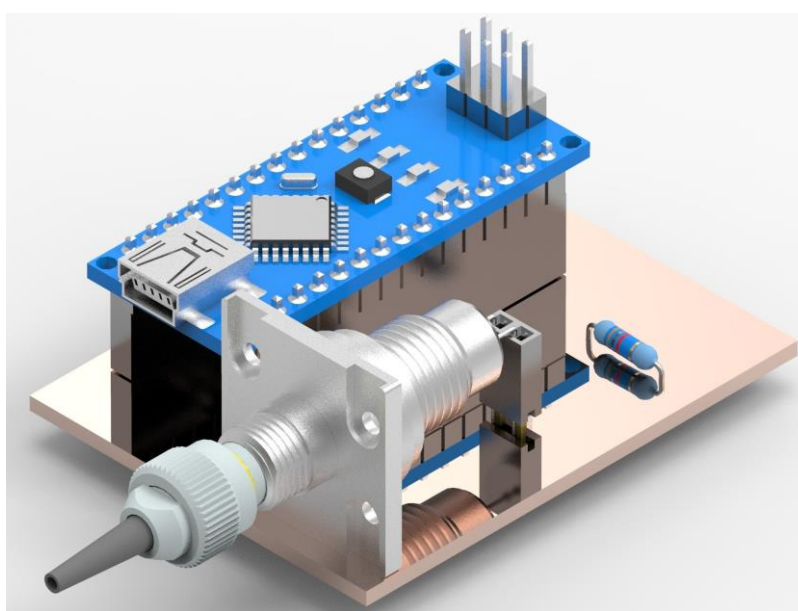
A intensidade da excitação do fotodiodo é diretamente proporcional a tensão sobre a resistência de carga e, conseqüentemente, a intensidade da corrente elétrica no condutor. O circuito de filtragem do fotodiodo tem como objetivo promover maior precisão e imunidade

Figura 38. Placa para fornecimento de luz: LED, *Driver* de LED e Arduino.

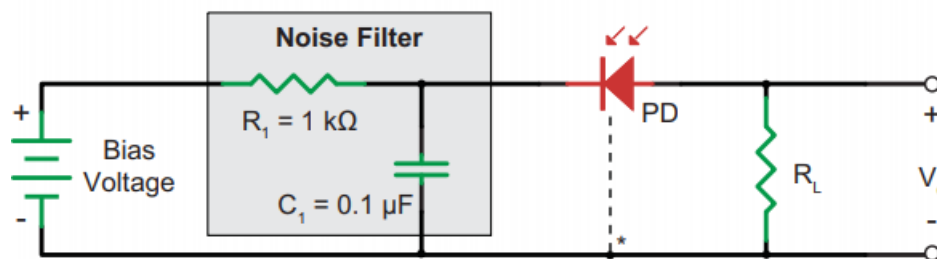


Fonte: Autora.

Figura 39. Placa para fornecimento de luz modelada e renderizada no Solid Edge.



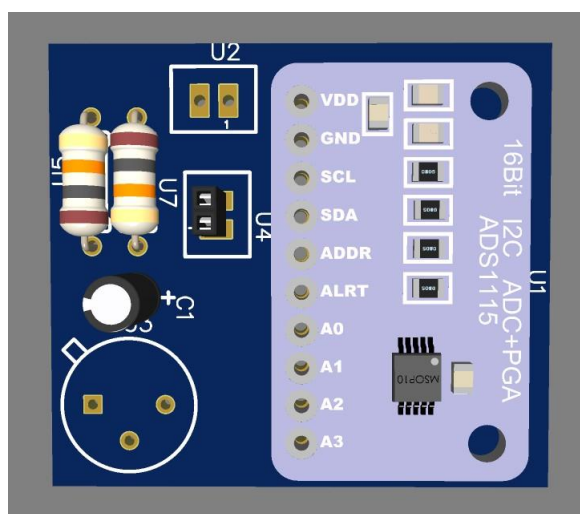
Fonte: Autora.

Figura 40. Representação do circuito do fotodiodo recomendado pelo fabricante.

Fonte: (THORLABS,2007).

ao ruído. Arelado ao circuito do fotodiodo, utilizou-se um conversor A/D ADS1115 para converter o sinal digital gerado pela *raspberry* em sinal analógico.

A partir da modelagem da placa de circuito impresso, representada na Figura 41, e a soldagem dos componentes eletrônicos do circuito, bem como o fotodiodo e o conversor A/D, obteve-se como produto final, a placa mostrada na Figura 42.

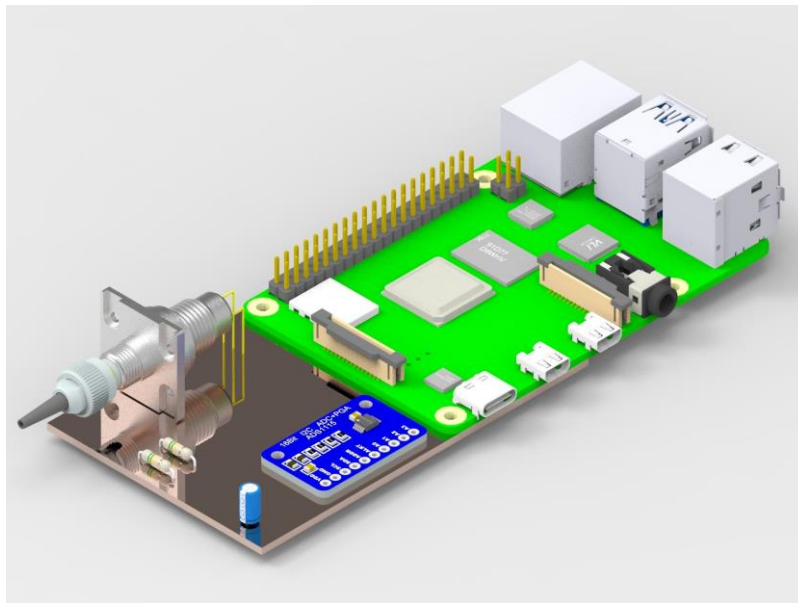
Figura 41. Placa para recebimento e tratamento de dados: Fotodiodo e módulo ADS1115.

Fonte: Autora.

Para realizar a transferência dos dados captados pelo fotodiodo, o sistema possui, integrado ao sistema embarcado, um microcontrolador que efetua a transmissão dos dados obtidos de intensidade da tensão elétrica e armazena em cartão SD. É válido salientar que a alimentação do circuito é feita na própria *Raspberry* e que a mesma se comunica com a *Web* via *Wi-fi*.

Para isto, foi desenvolvida uma interface de tratamento e envio de dados que será responsável por enviar as medições para um segundo servidor, hospedado na plataforma *Firebase*, possibilitando assim o acesso às informações de qualquer lugar ou dispositivo, por

Figura 42. Placa para recebimento e tratamento de dados modelada e renderizada no Solid Edge (com Raspberry).



Fonte: Autora.

meio de ferramentas *web*.

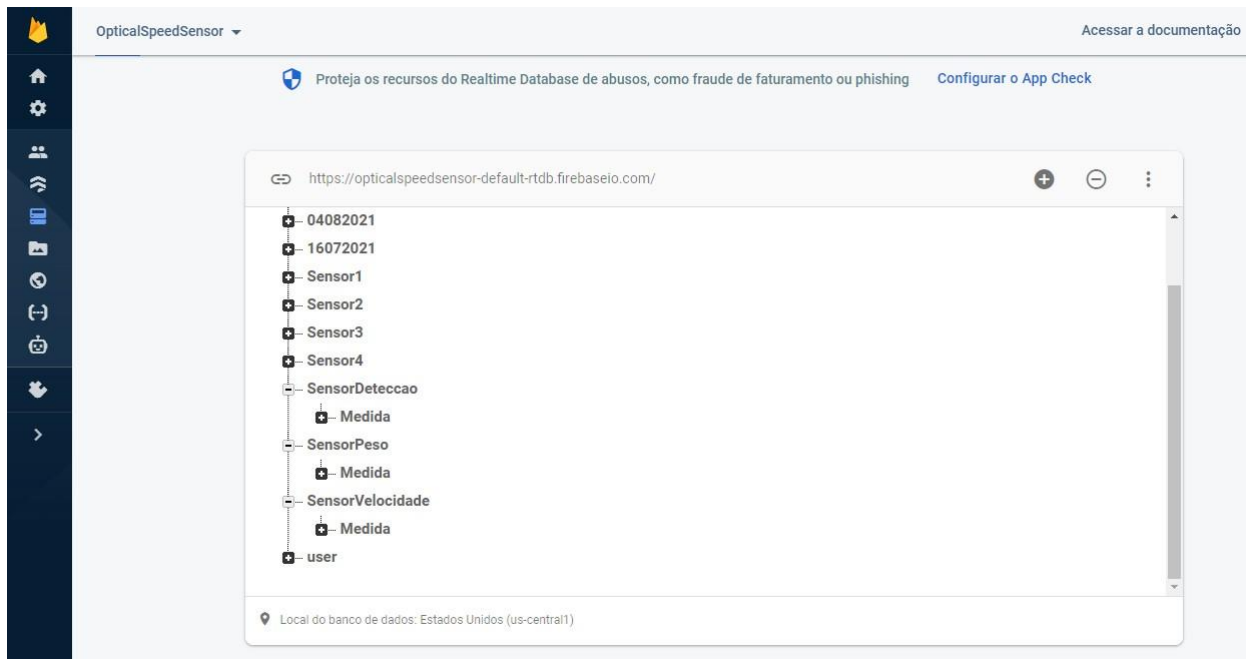
4.4 Página Web e Acesso Remoto

A medição remota é uma área de pesquisa na qual os usuários podem utilizar recursos como a Internet para terem acesso remoto aos dados do sensor. O sistema proposto neste trabalho tem como finalidade facilitar a visualização das informações de interesse dos seus usuários, de modo que o usuário possa ter acesso remoto das informações obtidas pelo sensor óptico por meio de uma página *Web*. Para a construção de um protótipo de um medidor de peso e velocidade e detector de veículos automotores com acesso remoto utilizou-se o microcontrolador *Raspberry*, *wi-fi* e um servidor *web*.

O microcontrolador *Raspberry* é utilizado para receber os dados analógicos de tensão e fazer todo o processamento necessário para a obtenção do peso e velocidade dos veículos, além da detecção do mesmo. Dessa forma, o sistema embarcado realiza transmissões de dados em tempo real. O servidor local recebe os dados e apresenta-os em uma interface para o usuário final. A interface do *software* foi desenvolvida em *JavaScript* e hospedada no servidor *web Firebase*, com o intuito de disponibilizar o acesso do usuário aos dados referentes ao monitoramento do tráfego. A hospedagem do site em um servidor *web* possibilita o acesso à informação de qualquer máquina e lugar.

Para permitir acesso aos dados dos sensores ópticos instalados na banda de rodagem de faixa única, o sistema dispõe de uma página *web* que permite ao usuário escolher quais medidas deseja acessar: medidas do sensor de detecção, medidas do sensor de peso e medidas do sensor de velocidade. Conforme é apresentado na Figura 43, que mostra a tela inicial do sistema.

Figura 43. Tela de acesso inicial da página hospedada no *Firebase*.



Fonte: Autora.

Uma vez no *website*, o usuário pode acessar os valores de tensão correspondentes à detecção, peso e velocidade dos veículos que trafegam na faixa onde o sensor está instalado, conforme mostra o exemplo da Figura 44, que mostra os valores de tensão que obtidos pelo sensor em tempo real.

Os dados exibidos à esquerda da tela referem-se aos valores de tensão em volts, enquanto os dados exibidos à direita referem-se ao horário (instante de tempo) que os valores de tensão são captados. É importante ressaltar que os valores de tensão transmitidos pela *Raspberry* são exibidos em intervalos de tempo muito pequeno, de modo que cerca de 90 valores de tensão são exibidos por segundo, no caso de não haver veículos na área de sensoriamento, os valores exibidos serão os valores de referência.

A precisão de 6 casas decimais é ideal para que seja possível analisar corretamente os dados e relacioná-los, uma vez que os testes iniciais de laboratório para calibração do sensor mostram que as variações na tensão elétrica ocorrem especialmente da terceira casa em diante.

Figura 44. Dados lidos pela *Raspberry* e enviados para página web.

```

pi@raspberrypi: ~
1.349134826660156 15:44:49.692888
1.349134826660156 15:44:49.704243
1.3490139770507812 15:44:49.715598
1.3489434814453127 15:44:49.726959
1.3489334106445314 15:44:49.738363
1.3490542602539064 15:44:49.749730
1.3490441894531249 15:44:49.761155
1.3491146850585933 15:44:49.772530
1.349134826660156 15:44:49.783894
1.349255676269531 15:44:49.795270
1.3493261718749998 15:44:49.806619
1.3492959594726561 15:44:49.817967
1.34940673828125 15:44:49.829339
1.349356384277344 15:44:49.840779
1.349376525878906 15:44:49.852188
1.3493865966796872 15:44:49.863550
1.3493060302734372 15:44:49.874901
1.3492858886718748 15:44:49.886250
1.3492858886718748 15:44:49.897597
1.34940673828125 15:44:49.908952
1.349477233886719 15:44:49.920299
1.3493261718749998 15:44:49.931739
1.34940673828125 15:44:49.943152
1.3493966674804687 15:44:49.954509
1.3493865966796872 15:44:49.965856
1.3493865966796872 15:44:49.977210
1.3494268798828126 15:44:49.988564
1.349436950683594 15:44:49.999926
1.349477233886719 15:44:50.011373
1.3494873046875 15:44:50.022756
1.3494873046875 15:44:50.034107
1.34956787109375 15:44:50.045520
1.3495074462890626 15:44:50.056878
1.3494470214843752 15:44:50.068245
1.349477233886719 15:44:50.079628
1.3496081542968748 15:44:50.091033
1.3496786499023439 15:44:50.102441
1.3497290039062502 15:44:50.113811
1.3496987915039065 15:44:50.125201
1.3496887207031252 15:44:50.136573
1.3496484375 15:44:50.147976
1.3497592163085934 15:44:50.159326
1.3497088623046876 15:44:50.170680
1.3498095703125002 15:44:50.182088

```

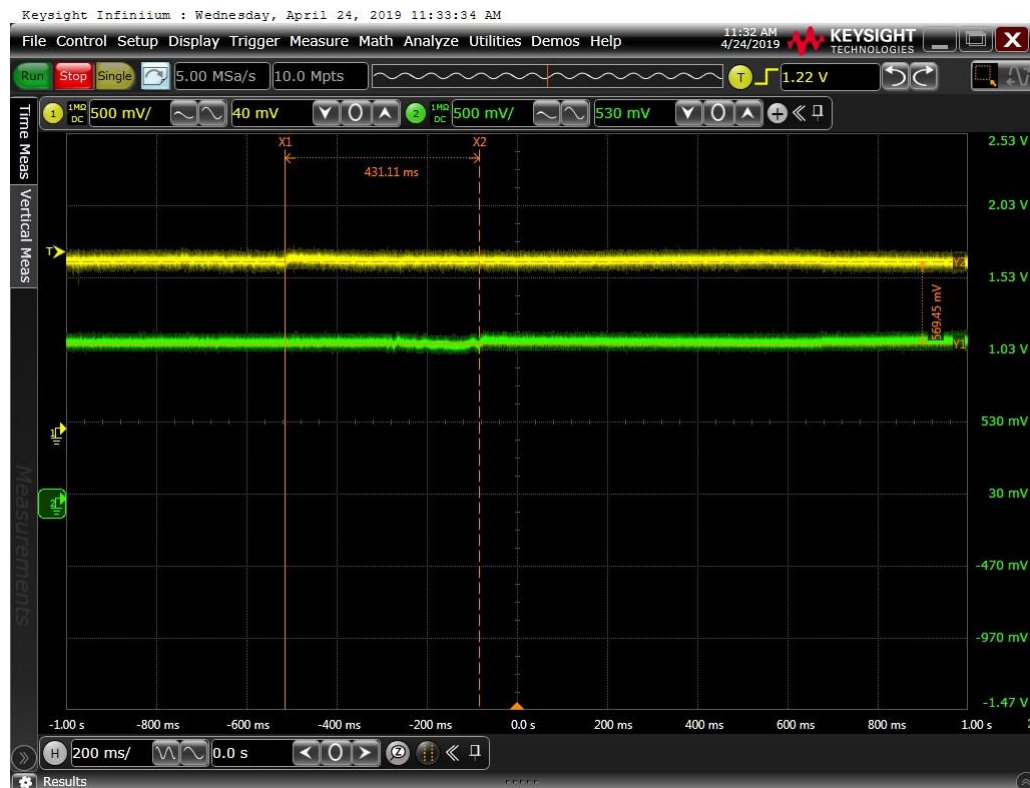
Fonte: Autora.

4.5 Prova de Conceito: Testes de Sensibilidade da Fibra Óptica a uma Pressão Externa

Esta seção apresenta os resultados obtidos e analisados no osciloscópio para os testes iniciais realizados na fibra óptica com intuito de comprovar a sensibilidade da mesma a uma pressão externa, conforme discutido na seção 3.2.

A passagem da roda sobre as fibras resultou em uma deformação axial capaz de alterar o caminho óptico de propagação da luz, causando uma variação da potência luminosa, analisada no osciloscópio em termos de tensão elétrica, conforme mostra a Figura 45.

Figura 45. Variação da amplitude do sinal em cada uma das fibras vistas pelo osciloscópio durante o primeiro teste.



Fonte: Autora.

A fim de garantir a confiabilidade dos testes, os mesmos foram repetidos sob diferentes condições de pressão e intervalos de tempo, resultando em uma variação visível da tensão elétrica, como pode-se observar nas Figuras 46 e 47.

Figura 46. Variação da amplitude do sinal em cada uma das fibras vistas pelo osciloscópio durante o segundo teste.



Fonte: Autora.

Figura 47. Variação da amplitude do sinal em cada uma das fibras vistas pelo osciloscópio durante o terceiro teste.



Fonte: Autora.

A partir destes resultados é possível concluir que a fibra óptica é sensível à pressão causada pela massa, de modo que quanto maior a massa ou pressão na fibra, maior será a variação na tensão observada.

4.6 Estimativa de Peso de Veículos em Movimento

4.6.1 Testes realizados em laboratório

Para os testes realizados em laboratório, analisou-se as alterações no sinal transmitido pela fibra óptica durante a inserção e retirada de massa, a fim de assegurar a confiabilidade da metodologia aplicada.

Os testes iniciais para determinação da melhor configuração do sensor foram realizados em três momentos distintos: primeiramente com a fibra disposta a 180° na horizontal em relação à plataforma de pesagem, em seguida com uma curva de 135° e, finalmente, disposta transversalmente em relação à plataforma de pesagem. Os dados obtidos para essas três configurações sob as mesmas condições de medição e pesos padrões são retratados na Tabela 4, de maneira que os valores para Tensão 1 referem-se a primeira configuração ou fibra disposta a 180°, os valores para Tensão 2 referem-se a segunda configuração ou FO com uma curva de 135° e os valores para Tensão 3, a terceira configuração ou FO disposta na transversal.

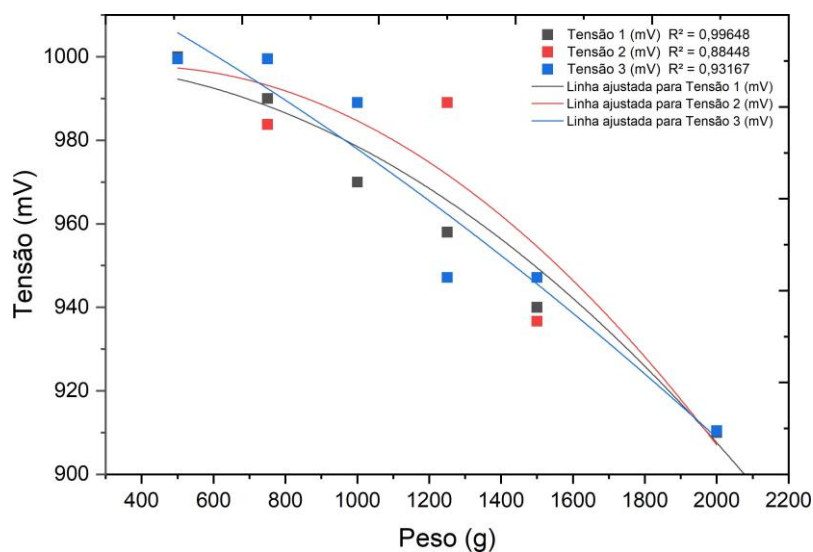
Tabela 4: Valores obtidos para as três configurações propostas em função do peso.

Faixa de Peso(g)	Tensão 1(mV)	Tensão 2(mV)	Tensão 3(mV)
500	1000	992	1000
750	990	989	1000
1000	970	990	998
1250	958	990	990
1500	940	980	990
2000	910	975	983

Fonte: Autora.

A partir dos dados registrados na Tabela 4, plotou-se o gráfico da Figura 48, que representa geometricamente esse conjunto de dados, o que possibilita a análise e o estudo do comportamento da luz em cada uma das configurações quando submetidas a uma força Peso.

O sensor posicionado na horizontal e com ângulo de 180° apresentou melhor ajuste a linha ou curva de tendência (linha ajustada), com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,99758, ou seja, maior que os coeficientes obtidos para as configurações transversal e com uma curvatura

Figura 48: Teste realizado em laboratório para três configurações distintas.

Fonte: Autora.

de 135°. É válido ressaltar que o (R^2) é o parâmetro que mede o quão próximo os valores estão da curva de tendência.

Tal comportamento pode ser justificado com base nas perdas do sinal. É comprovado que uma das principais causas da atenuação de sinal em FOs são as perdas por curvatura, o que justifica as maiores perdas de sinal na configuração 2 (Tensão 2) e menor acuidade, além da menor proximidade dos dados a linha ou curva ajustada ($R^2 = 0,88448$).

Embora o coeficiente de regressão para Tensão 3 (FO disposta na transversal) seja de 0,93167, ou seja, apresenta um bom ajuste em relação a linha de tendência, a melhor configuração da fibra para o sistema de pesagem é a configuração correspondente à Tensão 1 (FO a 180° e horizontal em relação a plataforma de pesagem).

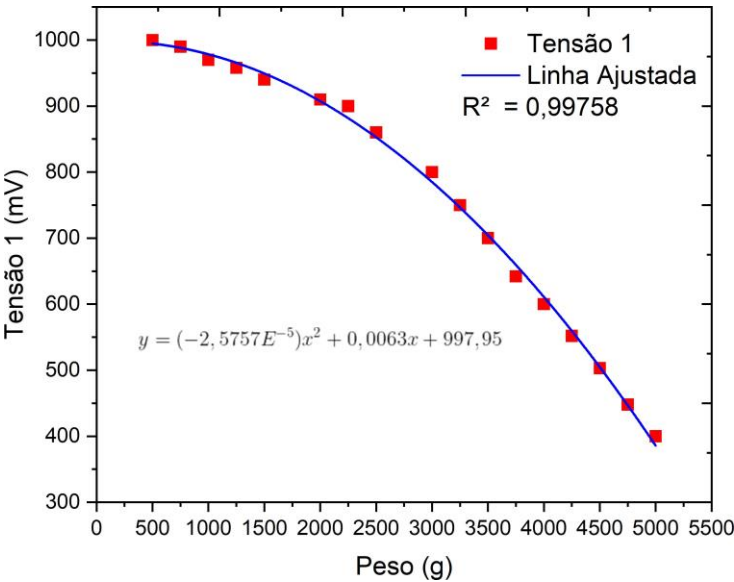
Dessa forma, deu-se continuidade aos testes em laboratório utilizando a fibra óptica disposta na horizontal com ângulo de 180°. Foi analisada a variação da tensão elétrica (devido à variação de potência luminosa) durante a inserção e retirada de pesos padrões entre 500 g e 5000 g. Os dados obtidos, disponibilizados na Tabela 5, estão devidamente representados no gráfico da Figura 49.

Tabela 5: Variação da tensão em função do peso aplicado.

Faixa de Peso(g)	Tensão (mV)
500	1000
750	990
1000	970
1250	958
1500	940
2000	910
2250	900
2500	860
3000	800
3250	750
3500	700
3750	642
4000	600
4250	552
4500	503
4750	448
5000	400

Fonte: Autora.

Figura 49: Teste realizado em laboratório para a configuração referente à Tensão 1.



Fonte: Autora.

A fim de garantir o correto ajuste do modelo de regressão polinomial, obteve-se um

coeficiente de regressão R^2 de 0,99758. O valor do R^2 representa a fração da variância de Y (potência) é explicada por X (peso), ou seja, um coeficiente de regressão de 0,99758 indica que um ajuste de 99,758 % dos dados obtidos em relação à linha ou curva ajustada (polinômio de ordem 2), o que implica dizer que a linha de regressão está bem ajustada ao modelo.

A fim de determinar o grau de uniformidade e distribuição destes dados, calculou-se as medidas de dispersão do desvio padrão, que representa o grau de dispersão dos valores de tensão obtidos em torno do valor médio. Como resultado obteve-se um valor de desvio padrão igual a 203,00623 , o que implica que os valores obtidos estão bem distribuídos em torno da média.

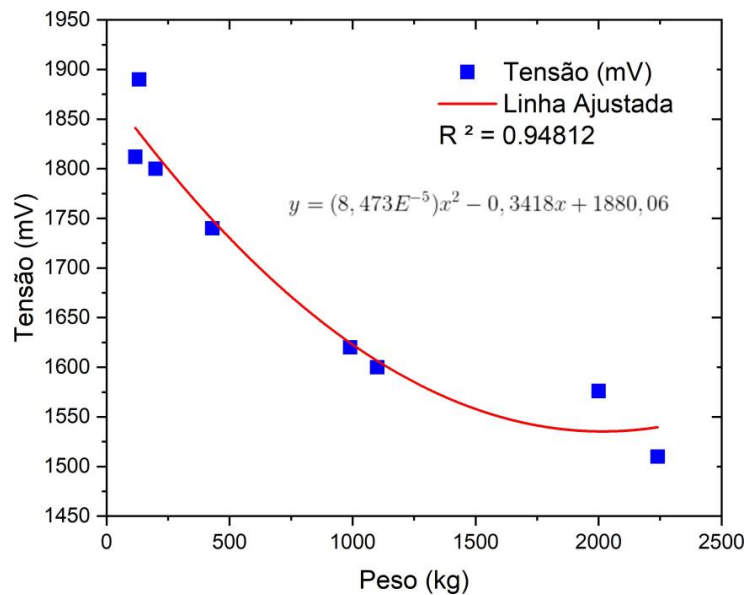
4.6.2 Testes realizados em campo

Nos testes realizados em campo, os resultados foram obtidos a partir da pressão dos pneus dos veículos sobre a fibra óptica disposta na extensão da via. Com base nos modelos dos veículos automotores de duas e quatro rodas, é possível determinar o peso do mesmo e relacioná-lo com a tensão elétrica do sinal na saída da fibra, assim, com pesos que variam entre 117 kg e 2240 kg, foram obtidos os valores correspondentes de tensão elétrica representados numericamente na Tabela 6 e geometricamente no gráfico da Figura 50.

Tabela 6: Variação da tensão em função do peso do veículo.

Faixa de peso(kg)	Tensão (mV)
117	1812
132	1890
199	1800
430	1740
990	1620
1100	1600
2000	1576
2240	1510

Fonte: Autora.

Figura 50: Teste realizado em campo com veículos de duas e quatro rodas.

Fonte: Autora.

Para análise de regressão linear, o ajuste do modelo de regressão a uma função polinomial de ordem 2 mostrou que os valores de tensão da amostra analisada estão bem ajustados em relação a linha ou curva de tendência ou ajustada. Dessa forma, verifica-se o comportamento polinomial da distribuição dos valores de tensão elétrica em mV em função da variação do peso dos veículos em kg que resulta em um coeficiente de regressão ou determinação de 0,94812, o que comprova a proximidade dos valores de tensão medidos em relação a linha ou curva ajustada.

Comprovado que a função polinomial de ordem 2 apresenta o modelo matemático que melhor descreve a relação entre variáveis peso e tensão elétrica, foi realizado o cálculo, em *software* especializado (*Origin*), dos coeficientes das variáveis dependentes x^2 (B2) e x (B1) e a variável independente C (intercepção), de modo que os valores calculados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros de calibração do sensor obtidos a partir da equação da curva.

Coeficiente	Valor	Erro Padrão
Intercepção	1880,06	26,82
B_1	-0,3418	0,069
B_2	$8,473 \cdot 10^{-5}$	$2,97 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Autora.

Sabendo que a forma geral de uma função polinomial de segunda ordem é dada pela Equação 4.4 a seguir:

$$y = B_2x^2 + B_1x + C. \quad (4.4)$$

Em que C é o ponto de intercepção com o eixo y, substituindo os coeficientes pelos valores apresentados na Tabela 7, obtém-se a Equação 4.5, que representa a função que melhor descreve a relação entre o peso do veículo e o valor de tensão elétrica medido pelo sensor.

$$y = 8,473E^{-5}x^2 - 0,3418x + 1880,06. \quad (4.5)$$

Além da análise de regressão linear múltipla, foram determinadas medidas de dispersão e distribuição, a fim de analisar a uniformidade e a distribuição dos valores de tensão obtidos durante as aferições. Obteve-se valores de 135,10948 e -1,5546 para o desvio padrão e curtose dos valores de tensão, respectivamente. Isso implica um comportamento além de polinomial, bem distribuído em relação à média.

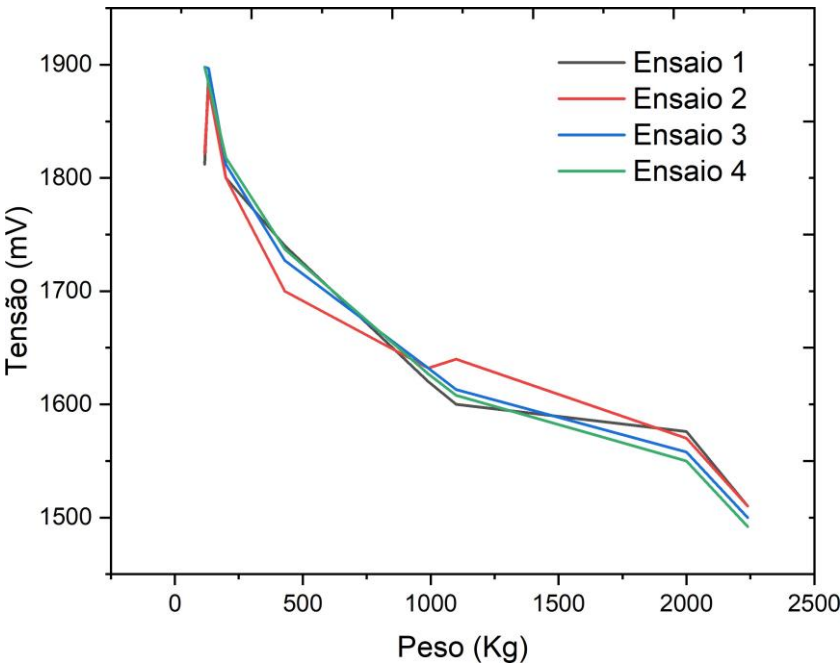
Com o objetivo de investigar a reprodutibilidade das medidas, os mesmos automóveis foram pesados repetidas vezes. A Tabela 8 apresenta as variações nos níveis de tensão durante quatro ensaios diferentes, bem como o Gráfico da Figura 51 representa o comportamento destes dados.

Tabela 8: Variação dos níveis de tensão para cada ensaio em função do peso.

Faixa de peso(kg)	Ensaio 1 (mV)	Ensaio 2(mV)	Ensaio 3(mV)	Ensaio 4(mV)
117	1812	1822	1898	1898
132	1890	1881	1897	1884
199	1800	1800	1812	1818
430	1740	1700	1727	1737
990	1620	1632	1632	1627
1100	1600	1640	1613	1608
2000	1576	1570	1558	1550
2240	1510	1510	1500	1492

Fonte: Autora.

Figura 51. Representação do comportamento da tensão em função do peso para os ensaios de reprodutibilidade.



Fonte: Autora.

Para determinar a precisão dos resultados, foram calculados para amostra referente aos quatro ensaios apresentados acima, a média das tensões elétricas medidas e desvio padrão, obtendo os resultados mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Determinação da precisão e taxa de erro das medidas de peso para cada veículo.

Faixa de peso(kg)	Média	Desvio padrão	Precisão(mV)	Erro (%)
117	1857,50	46,940	1857,50 $\pm$ 46,940	2,52
132	1888,00	7,071	1888,00 $\pm$ 7,071	0,37
199	1807,50	9,000	1807,50 $\pm$ 9,000	0,45
430	1726,00	18,202	1726,00 $\pm$ 18,202	1,05
990	1627,75	5,679	1627,75 $\pm$ 5,679	0,35
1100	1615,25	17,347	1615,25 $\pm$ 17,347	1,07
2000	1563,50	11,705	1563,50 $\pm$ 11,705	0,75
2240	1503,00	8,718	1503,00 $\pm$ 8,718	0,58

Fonte: Autora.

4.7 Classificação de Veículos Automotores

A partir da estimativa do peso de um veículo em movimento é possível identificar o tipo de veículo e classificá-lo. Logo, a partir dos resultados obtidos na seção anterior, que trata da estimativa de peso de veículos automotores, foi estabelecida uma relação direta entre a faixa de peso do veículo e a variação de tensão, conforme os dados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Classificação do veículo com base na faixa de tensão aferida.

Faixa de peso(kg)	Faixa de tensão (mV)	Classificação
117 - 132	1812 - 1898	Motocicleta de pequeno porte
199 - 430	1700 - 1818	Motocicleta de grande porte
990 - 1100	1600 - 1632	Carro de pequeno porte
2000 - 2240	1492 - 1576	Carro de grande porte

Fonte: Autora.

4.8 Detecção de Veículos Automotores

Esta seção trata dos resultados obtidos durante os testes em laboratório e em campo realizados com o protótipo do sensor óptico para detecção em tempo real do fluxo de veículos em bandas de rodagem de faixa única.

4.8.1 Testes em laboratório

Os testes foram realizados em ambiente simulado utilizando um objeto circular que se movimenta pela área de sensoriamento por fibra óptica sob diferentes pressões, assim, os

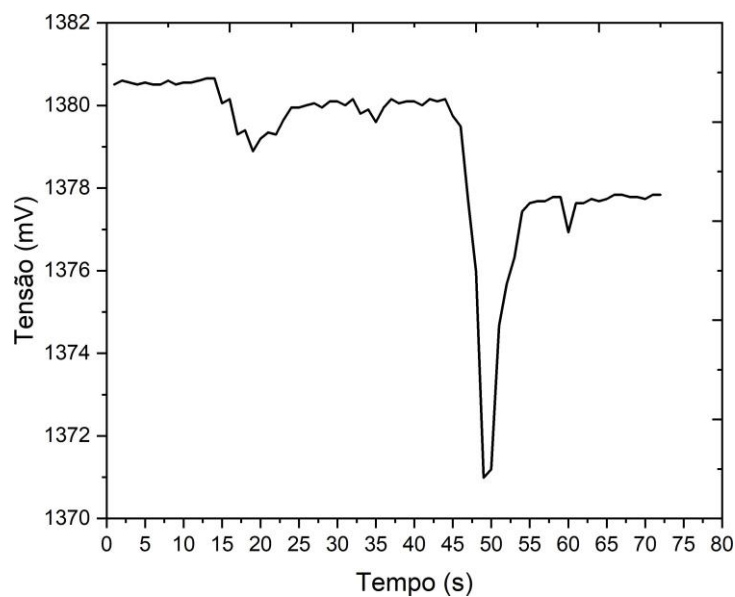
valores da queda de tensão causados em virtude da detecção são observados em termos de tensão elétrica virtualmente.

Para os valores obtidos diretamente da página *web* em tempo real para até 80 segundos em testes distintos sob diferentes valores de tempo e pressão estão devidamente representados nos Gráficos das Figuras 52, 53, 54 e 55.

O objeto circular em movimento passou duas vezes sobre o sistema de sensoriamento por fibra óptica, de modo que a primeira passagem representa a detecção do eixo dianteiro do veículo sobre a fibra e a segunda passagem representada a detecção do eixo traseiro do veículo.

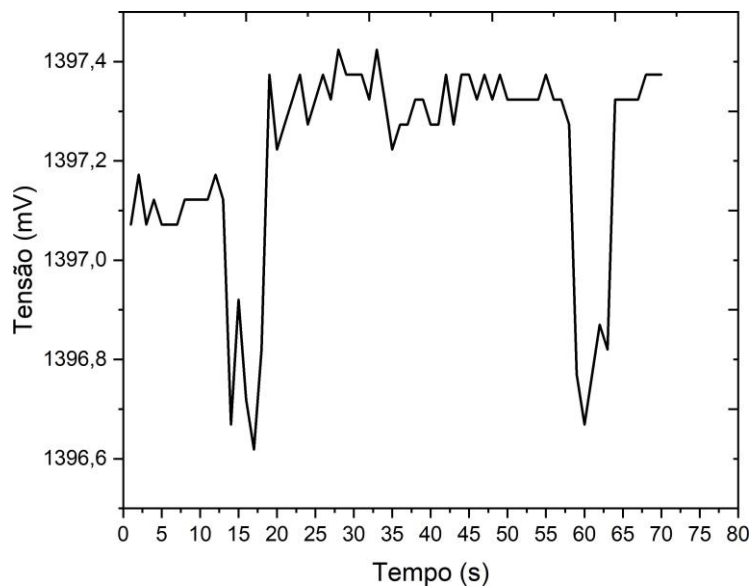
As diferenças nas quedas dos níveis de tensão elétrica em cada passagem ocorre devido à diferença das pressões aplicadas pelo objeto sobre a fibra.

Figura 52: Ensaio 1: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença de massa na área de sensoriamento.



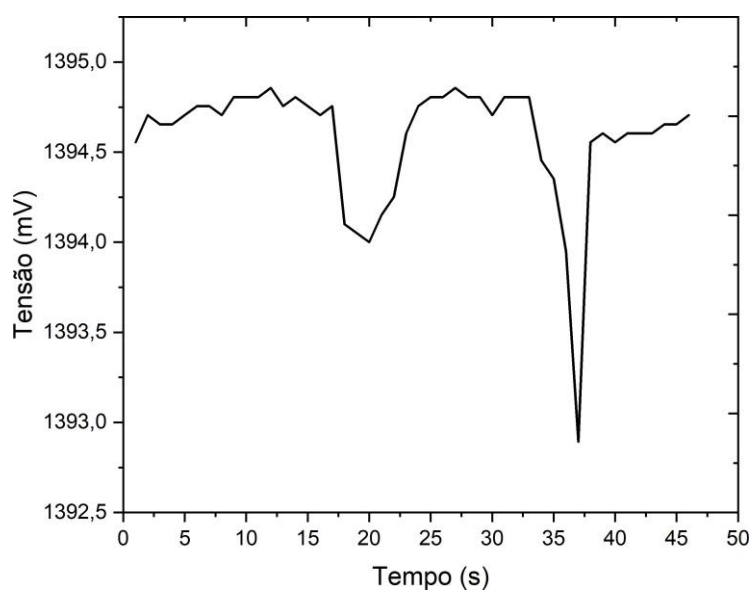
Fonte: Autora.

Figura 53: Ensaio 2: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença de massa na área de sensoriamento.



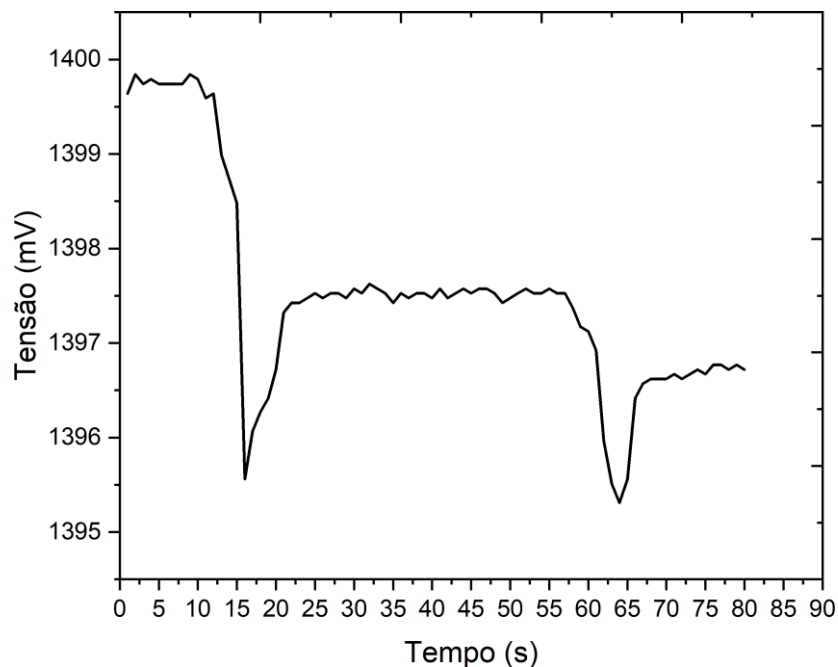
Fonte: Autora.

Figura 54: Ensaio 3: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença de massa na área de sensoriamento.



Fonte: Autora.

Figura 55: Ensaio 4: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença de massa na área de sensoriamento.



Fonte: Autora.

O Gráfico da Figura 52 mostra o desempenho do sensor quanto a detecção de objetos em movimento. Pode-se constatar uma atenuação maior ou variação mais brusca e fora do padrão dos níveis de tensão entre 49 e 50 segundos aproximadamente, em outras palavras, durante o trajeto, o objeto permaneceu cerca de 1 s na área de sensoriamento, tornando possível detectá-lo com precisão considerável.

Considerando que os valores variam cerca de 1 mV quando não há presença de objetos na região de sensoriamento por fibra óptica e variam cerca de 6,3 mV durante a detecção do objeto, comprova-se a veracidade da sensibilidade do sensor com base na atenuação do sinal.

As variações padrões de até 1mV do sensor ocorrem devido à sensibilidade da fibra óptica a vibrações no ambiente circuncidante, de modo que sempre haverá variação do sinal, ainda que muito pequena.

A fim de avaliar a precisão dos resultados obtidos durante os testes para detecção, os mesmos foram repetidos utilizando o mesmo objeto, ou seja, mesma massa aplicada sobre a fibra. Os resultados são apresentados nos Gráficos das Figuras 53, 54 e 55.

No gráfico da Figura 53 é possível observar nitidamente as quedas nos níveis de tensão durante as passagens do objeto em intervalos de tempo próximos a 15 s e 62 s, respectivamente. Embora as variações do sinal sejam visivelmente superiores quando se trata do intervalo de tempo correspondente a detecção/presença de massa, nota-se que o sinal é naturalmente ruidoso, havendo variações contínuas do sinal durante todo intervalo de tempo. Isso significa que as vibrações nas adjacências da FO estão mais intensas. Em contrapartida, as aferições apresentadas no Gráfico da Figura 54 demonstram variações mais suaves, indicando que há pouca interferência das vibrações externas no sinal que se propaga pela fibra.

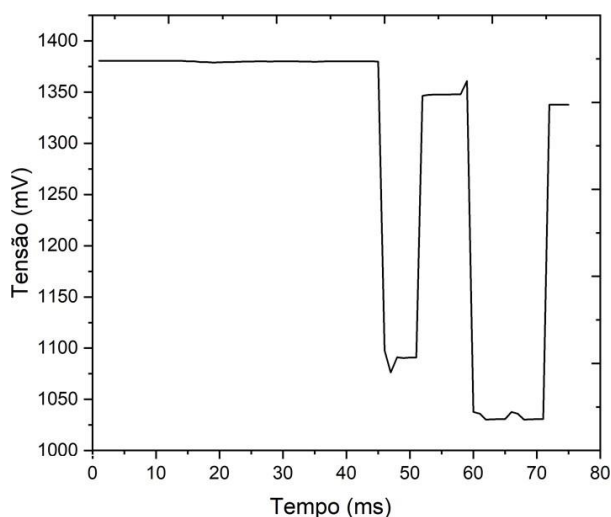
No Gráfico da Figura 55 nota-se que o valor de referência para o sinal quando não há detecção se estabiliza em um valor muito menor, se comparado com valor de referência inicial, isso pode ocorrer em virtude da intensidade da pressão sobre a fibra, de modo que, em consequência da deformação sofrida, a fibra necessita de um tempo para recuperar parte do sinal refratado.

4.8.2 Testes em campo

A detecção automática de veículos utilizando fibra óptica é baseada na variação da tensão elétrica detectada pelo sensor conforme o eixo do veículo passa pela fibra óptica, estabelecendo, assim, uma relação entre a presença do veículo e a atenuação do sinal.

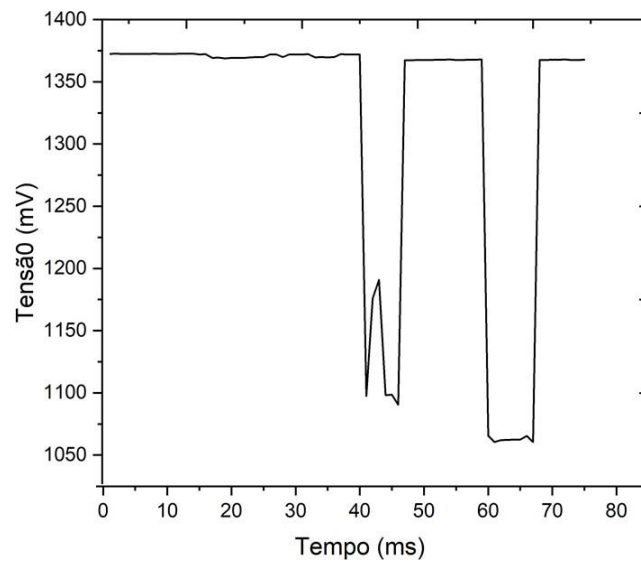
Para os valores capturados diretamente da página *web* em tempo real para até 60 segundos, obteve-se como resultado para cada ensaio os Gráficos das Figuras 56, 57 e 58.

Figura 56: Ensaio 1: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença do veículo na área de sensoriamento.



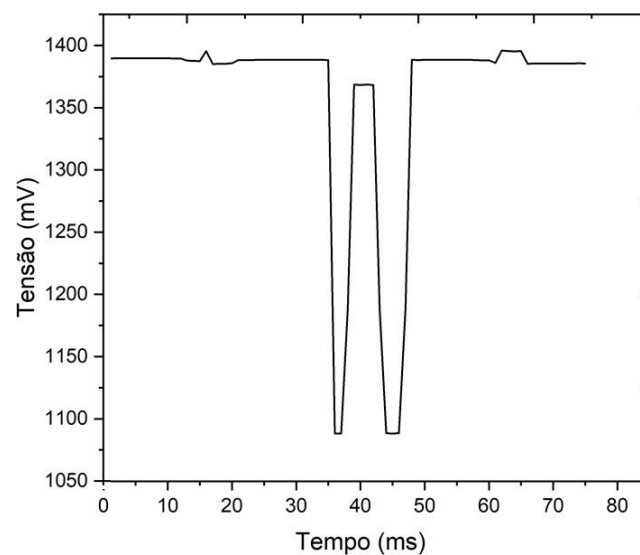
Fonte: Autora.

Figura 57: Ensaio 2: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença do veículo na área de sensoriamento.



Fonte: Autora.

Figura 58: Ensaio 3: Variação dos dados obtidos em tempo real pelo servidor devido a presença do veículo na área de sensoriamento.



Fonte: Autora.

É importante ressaltar que foram realizados testes diferentes para um carro de porte pequeno de aproximadamente 990 kg com velocidade variável.

A partir dos resultados relatados nesta seção, é possível constatar a precisão na detecção do veículo, a partir dos valores de atenuação em virtude das quedas nos níveis de tensão

representadas nos gráficos. A Tabela 11 apresenta os valores das atenuações do sinal durante a passagem dos eixos dianteiro e traseiro do veículo para cada um dos ensaios.

Tabela 11: Cálculo da atenuação do sinal durante a detecção dos eixos dianteiro e traseiro do veículo.

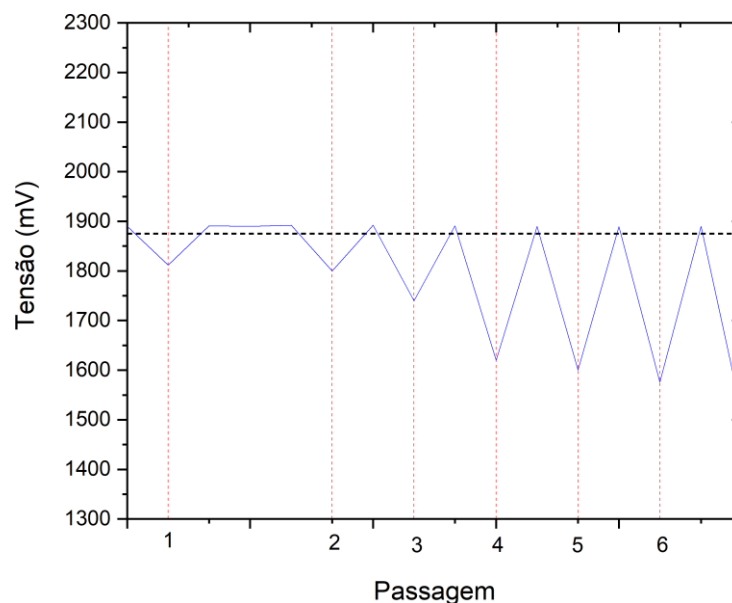
Ensaio	Atenuação eixo dianteiro (mV/m)	Atenuação eixo traseiro (mV/m)
Ensaio 1	0,30991	0,36297
Ensaio 2	0,29272	0,32501
Ensaio 3	0,29500	0,29500

Fonte: Autora.

Os ensaios apresentados e discutidos foram realizados com o mesmo veículo de quatro rodas de aproximadamente 990 kg. O teste abaixo, representado pelo gráfico da Figura 59, apresenta a detecção de veículos diferentes (de pesos diferentes) obtidas pelo sensor.

A Figura 59 mostra a variação da tensão elétrica medida pelo sensor a medida que os veículos atravessam a região de sensoriamento.

Figura 59: Variação da tensão à medida que os veículos passam pela fibra óptica.



Fonte: Autora.

A partir do gráfico da Figura 59, é possível detectar a passagem de diferentes veículos de forma consecutiva, a partir da variação da tensão. Enquanto o eixo das ordenadas apresenta os valores de tensão medidos pelo sensor, o eixo das abscisas se refere as passagens dos veículos

sobre a fibra sensora, de modo que o 1 representa a primeira passagem, o 2 a segunda passagem e assim, sucessivamente, até a sexta passagem. É válido salientar que não se trata do mesmo veículo sendo detectado, o que explica os valores diferentes para as variações de tensão em cada passagem, uma vez que foi comprovado em seções anteriores que quanto maior o peso do veículo, maior será a variação da tensão aferida.

A linha horizontal tracejada representa o valor limite, o qual delimita os valores padrões de tensão elétricas de modo que quando não há veículo na área de sensoriamento, os valores de tensão são praticamente constantes acima da linha tracejada, enquanto quando o veículo se aproxima, há uma queda de tensão que caracteriza sua detecção.

As linhas tracejadas vermelhas verticais representam o momento de detecção do veículo, ou seja, o momento em que ocorre uma queda de tensão instantânea. Também pode-se observar que a queda de tensão aumenta para cada detecção, o que infere que o tipo de veículo que passa pela fibra é mais pesado.

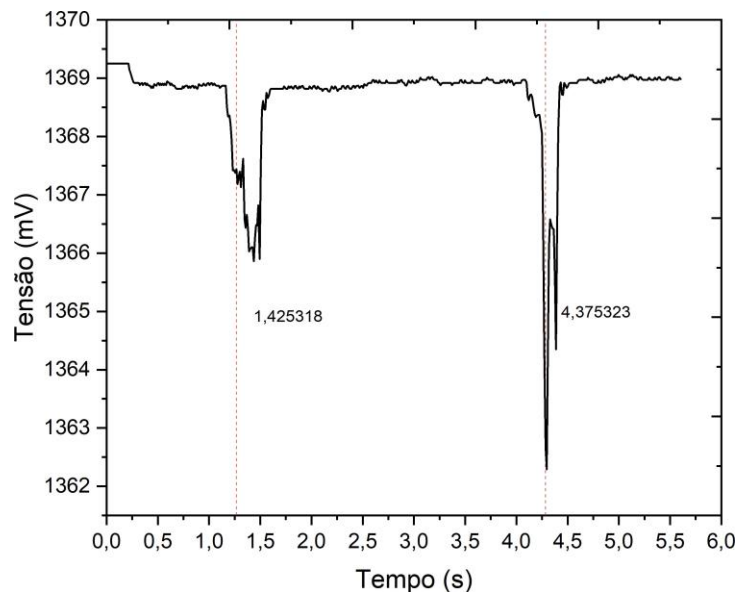
4.9 Estimativa da Velocidade de Veículos

O processo de desenvolvimento do sistema de aferição de WIM, classificação, detecção e aferição de velocidade de veículos automotores retornou resultados sobre a caracterização do comportamento elasto-óptico da fibra. Os resultados obtidos pelo sensor para medição de velocidade serão discutidos nesta seção.

4.9.1 Testes realizados em laboratório

Assim como nos ensaios para detecção de objetos, os ensaios realizados em laboratório para estimativa de velocidade consistiram no movimento de um objeto circular sobre a área de sensoriamento sob diferentes intervalos de tempo e pressão. Assim, em virtude da queda dos níveis de tensão causados pela detecção do objeto são observados os instantes de tempo correspondentes a cada detecção, de modo que a primeira detecção do objeto simula a passagem do eixo dianteiro de um carro, enquanto a segunda detecção do objeto simula a passagem do eixo traseiro.

Os valores de tensão, em mV, obtidos diretamente da página *web* durante os testes de bancada são apresentados no Gráfico da Figura 60.

Figura 60: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante o primeiro ensaio.

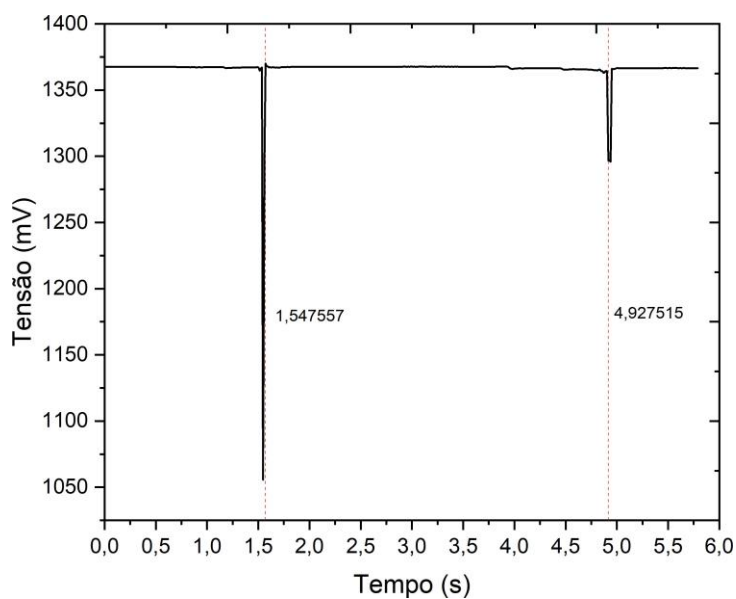
Fonte: Autora.

Durante a detecção do objeto, observa-se uma queda brusca nos níveis de tensão medidos pelo sensor, de modo que o eixo das ordenadas representa os níveis de tensão elétrica recebidos pelo sensor e o eixo das abcissas representas os instantes de tempo relacionados a cada medida de tensão em tempo real e preciso.

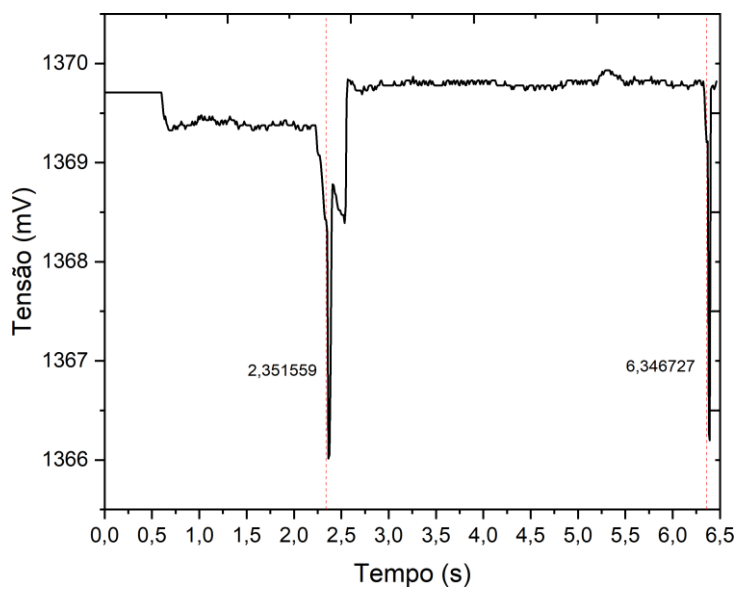
Segundo o Gráfico da Figura 60, é possível averiguar os instantes de tempo em o objeto é detectado pelo sensor. Os valores 1,425318 s para primeira detecção e 4,375323 s para segunda detecção são exibidos, virtualmente, por meio página *web*, bem como os valores de tensão relacionados a cada instante de tempo. As linhas verticais tracejadas em vermelho destacam os instantes de tempo em que o objeto atravessa a área de sensoriamento por fibra.

É importante destacar que os Gráficos apresentam resultados de mais de 400 medições, uma vez que o sensor recebe cerca de 90 medidas por segundo, o que justifica a precisão de seis casas decimais para medidas de tempo.

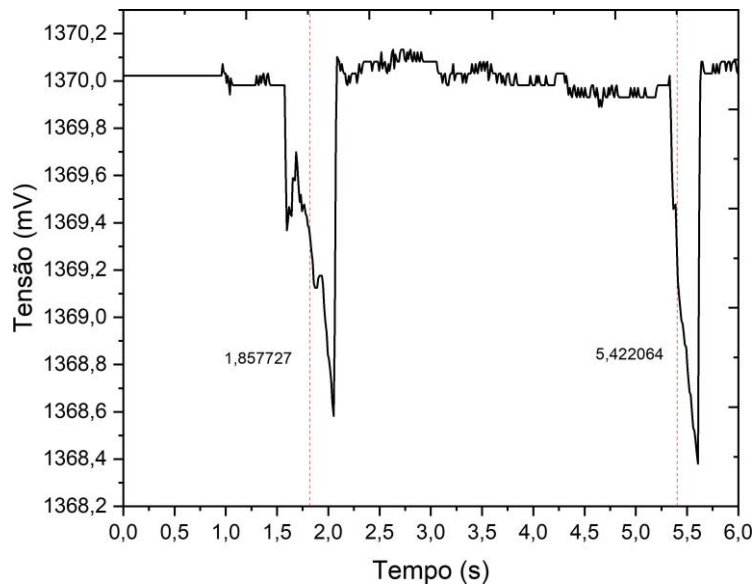
Para avaliar a resposta do sensor a uma variação de tempo causada pela detecção, o experimento foi repetido aleatoriamente, obtendo-se os dados representados nos Gráficos das Figuras 61, 62 e 63.

Figura 61: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante o segundo ensaio.

Fonte: Autora.

Figura 62: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante o terceiro ensaio.

Fonte: Autora.

Figura 63: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante o quarto ensaio.

Fonte: Autora.

Com base nos resultados apresentados acima, a velocidade do objeto é estimada considerando os instantes de tempo aferidos durante a primeira e a segunda detecção para uma distância fixa de 60 cm. Dessa forma, os dados observados nos gráficos acima, bem como o cálculo da velocidade do objeto são apresentados na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12: Cálculo da velocidade a partir da diferença entre os tempos finais e iniciais.

Detecção 1 (mV)	Detecção 2 (mV)	Tempo Inicial(s)	Tempo Final(s)	Velocidade (m/s)
2,77	36,62	1,425318	4,375323	0,20339
74,00	68,50	1,547557	4,927515	0,17752
3,40	3,62	2,351559	6,346727	0,15018
1,40	1,54	1,857727	5,422064	0,16833

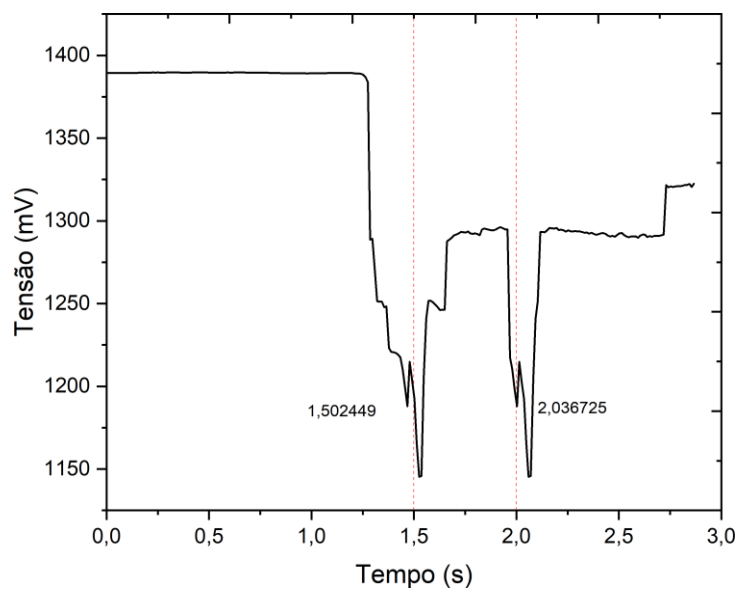
Fonte: Autora.

Para investigar a taxa de variação de tensão que corresponde a detecção do objeto e estabelecer um valor de limiar que traduza para o sensor quando não há presença de objetos na área de sensoriamento, foi realizado o cálculo das atenuações para uma faixa de valores medidos pelo sensor com e sem detecção. A comparação entre os valores de atenuação permite inferir a detecção de veículos.

4.9.2 Testes realizados em campo

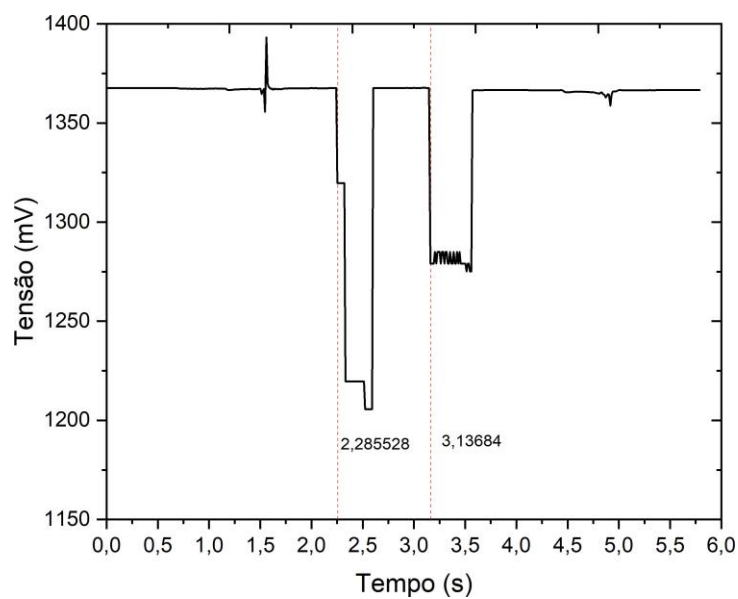
Nos testes realizados em campo, os resultados foram obtidos a partir da pressão dos pneus dos veículos sobre a fibra óptica disposta na extensão da via. Observou-se grande atenuação da intensidade do sinal nos instantes de tempo correspondentes as detecções dos eixos dianteiro e traseiro, respectivamente. A Figura 64 relata os primeiros resultados resultados obtidos durante os testes em campo.

Figura 64: Ensaio 1: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante a passagem do veículo.

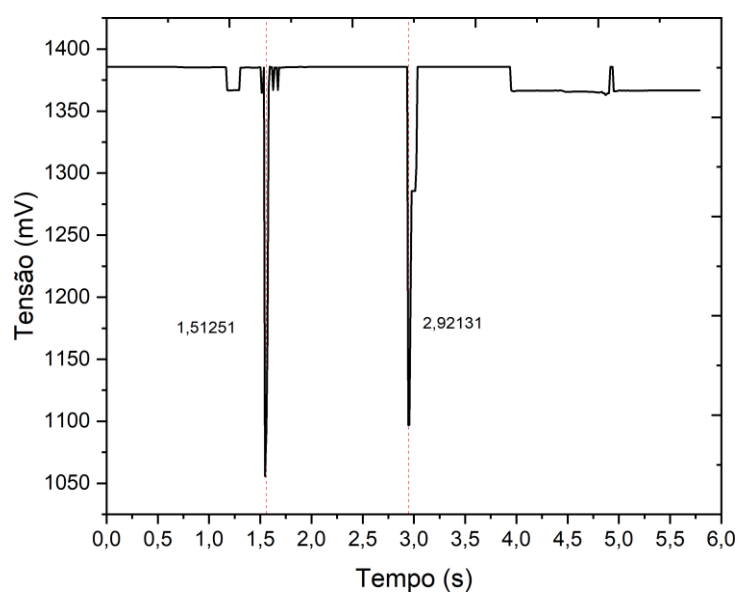


Fonte: Autora.

Para avaliar a resposta do sensor a diferentes valores de velocidade, os testes foram repetidos, os resultados relativos à detecção dos eixos foi armazenado e a a variação de tempo foi estimada a partir do algoritmo implementado no microcontrolador. Dessa forma, as Figuras 65 e 66 apresentam os resultados obtidos pelo sensor em campo.

Figura 65: Ensaio 2: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante a passagem do veículo.

Fonte: Autora.

Figura 66: Ensaio 3: Variação dos níveis de tensão em função do tempo durante a passagem do veículo.

Fonte: Autora.

A velocidade do veículo é calculada a partir da variação de tempo obtida por meio do

algoritmo que associa os instantes de tempo inicial e final à detecção dos eixos do veículo. A Tabela 13 apresenta os valores de velocidade obtidos a partir das variações de tempo aferidas pelo sensor.

Tabela 13: Cálculo da velocidade a partir da diferença entre os tempos finais e iniciais.

Detecção D (mV)	Detecção T (mV)	Tempo Inicial(s)	Tempo Final(s)	Velocidade (Km/h)
243,32	149,10	1,502449	2,036725	17,52
148,00	88,61	2,285528	3,13684	11,00
329,40	288,97	1,51251	2,92131	6,64

Fonte: Autora.

Os valores apresentados em Detecção D correspondem aos valores da variação nos níveis de tensão elétrica no momento em que o eixo dianteiro é detectado, enquanto os valores apresentados em Detecção T correspondem aos valores da variação nos níveis de tensão elétrica no momento em que o eixo traseiro é detectado. O tempo inicial é o valor do instante de tempo em que o eixo dianteiro é detectado e o tempo final é o valor do instante de tempo em que o eixo traseiro é detectado. A partir dos valores de tempo mensurados pelo sensor, a velocidade média do veículo é calcula mediante a fórmula apresentada na Equação 4.6.

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad (4.6)$$

Em que d é distância média entre os eixos de um carro no valor de 2,6 m.

Para estimar o grau de exatidão dos resultados obtidos nos testes em campo, calculou-se a taxa de erro das medições a partir da comparação entre os valores de velocidade medidos pelo sensor e os valores exibidos pelo velocímetro, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Cálculo dos erros de medição a partir da comparação entre os valores de velocidade aferidos pelo sensor e os valores mostrados no velocímetro.

Tempo Inicial(s)	Tempo Final(s)	Velocidade Estimada(Km/h)	Velocidade Real(Km/h)	Erro(%)
1,51251	2,92131	6,64	10	33,60
2,02150	2,96150	9,95	10	0,50
2,28553	3,13684	10,99	13	15,5
1,25060	2,02130	12,14	13	6,61
1,50245	2,03672	17,52	18	2,66
1,78560	2,15630	25,25	25	1,00
1,65420	1,95420	31,20	35	10,85
1,92560	2,19800	34,36	35	1,82
1,85630	2,09100	39,88	40	0,30

Fonte: Autora.

A partir dos dados e taxas de erro apresentados na Tabela 14, conclui-se que o sensor apresenta confiabilidade para faixas de medição de velocidade entre 10 e 40 km/h. Para valores abaixo de 10 km/h as taxas de erro foram muito altas, acima de 30%, o que torna inviável a aferição de velocidade entre 0 e 10 km/h. Para velocidades mais altas, acima de 40 km/h, o sensor não apresentou sensibilidade adequada, visto que não houve queda de tensão suficiente para detectar a presença do veículo sobre a fibra óptica, isto pode ocorrer devido ao tempo de contato entre o pneu e a fibra não ser suficiente para garantir a detecção do mesmo.

CONCLUSÕES

5.1 Conclusão

Este trabalho relata os resultados do desenvolvimento e calibração de um protótipo de sensor óptico para detecção, classificação e medição de peso e velocidade de veículos em bandas de rodagem de faixa única. O sensor apresentou resposta polinomial bem ajustada, boa precisão e taxas de erro de medição pequenas.

Considerando o objetivo deste trabalho, que é desenvolver um sistema para detecção, classificação e aferição de peso e velocidade de veículos automotores em bandas de rodagem de faixa única, atingiram-se resultados satisfatórios para o sensoriamento proposto por meio de fibra óptica.

Foram realizados testes de bancada que comprovaram a sensibilidade da fibra óptica à aplicação de uma pressão externa. Logo, foi analisada a resposta do sensor a presença de massa de maneira dinâmica, tanto os testes em laboratório como os testes em campo demonstraram alta sensibilidade a detecção de objetos em movimento, confirmando a viabilidade do sensor para detecção de veículos.

Confirmada a boa relação entre a presença de massa e a intensidade do sinal óptico, iniciou-se o processo de construção e calibração do sensor de peso. Para medição de peso, o sensor apresentou resposta polinomial bem ajustada quando exposto a variações de pesos entre 0,5 kg e 5 kg para testes realizados em laboratório e 117 kg e 2240 kg para testes realizados em campo.

Os ensaios realizados em campo comprovaram a precisão do sensor e foi obtido um R^2 de 0,94812. As taxas de erros variam entre 0,35 e 2,5 %, mostrando que o equipamento é confiável para faixas de peso de peso entre 117 kg e 2240 kg.

O sensor foi calibrado e os parâmetros que descrevem a relação entre peso e tensão foram determinados pela técnica de análise de regressão, a qual retornou um R^2 de 0,94812 e uma linha de tendência polinomial de segunda ordem bem ajustada.

Os ensaios realizados para aferição de peso permitiu identificar e classificar veículos com base na faixa de peso mensurada. Embora os resultados para classificação de veículos de duas rodas que permitem estabelecer distinção entre os mesmos não tenham apresentado confiabilidade considerável, os resultados para identificar se o veículo é de duas ou quatro rodas mostrou confiabilidade devido a alta taxa de variação de tensão. Da mesma forma, se tratando de classificar o veículo como carro de grande porte e carro de pequeno porte, atingiu-se resultados satisfatórios.

Com base no exposto, comprovou-se a eficácia da técnica de detecção e aferição de peso e velocidade por sensoriamento distribuído por fibra óptica. Para o cálculo de velocidade, a partir do algoritmo implementado no microcontrolador para obtenção da variação de tempo, comprovou-se a confiabilidade do sensor para valores entre 10 e 40 km/h, uma vez que para essa faixa de velocidade o sensor apresentou taxa de erros de medição mais baixas entre 0,30 e 15,5 %.

Embora a taxas de erro ainda sejam relativamente altas, são suficientes para validar o sensor quanto a sua capacidade de medir velocidade. Para valores de velocidade menos que 10 km/h a taxa de erro observada foi muito alta, para valores acima de 40 km/h a sensibilidade da fibra à pressão do pneu é baixa.

5.2 **Trabalhos Futuros**

Para trabalhos futuros sugere-se as propostas apresentadas a seguir:

- Realizar mais testes em campo e adquirir mais dados para uma faixa maior de peso.
- Realizar ensaio de exatidão, a partir da comparação com equipamentos do mercado.
- Realizar testes para detectar, classificar e calcular o peso e velocidade de veículos com mais de quatro rodas.
- Realizar teste para medição de velocidade utilizando duas fibras ópticas separas por uma distância fixa, a fim de aferir a velocidade veículos independente da distância entre os eixos.
- Criar front end e back end para página web, fim de aperfeiçoar a interface do site e garantir maior segurança dos dados por meio de login e senha para os usuários.

Referências Bibliográficas

ADDANKI, S.; AMIRI, I.; YUPAPIN, P. Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers. **Results in Physics**, v. 10, p. 743 – 750, 2018. ISSN 2211-3797. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379718314268>>.

AGRAWAL, G. **Sistemas de comunicação por fibra óptica**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2014.

AGRAWAL, G. P. Chapter 1 - fiber gratings. In: AGRAWAL, G. P. (Ed.). **Applications of Nonlinear Fiber Optics**. San Diego: Academic Press, 2001. p. 1 – 61. ISBN 978-0-12-045144-9. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780120451449500011>>.

_____. **Fiber-optic communication systems**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002.

_____. Nonlinear fiber optics: its history and recent progress. **JOSA B**, Optical Society of America, v. 28, n. 12, p. A1–A10, 2011.

AJO-FRANKLIN, J. B.; DOU, S.; LINDSEY, N. J.; MONGA, I.; TRACY, C.; ROBERTSON, M.; TRIBALDOS, V. R.; ULRICH, C.; FREIFELD, B.; DALEY, T. et al. Distributed acoustic sensing using dark fiber for near-surface characterization and broadband seismic event detection. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2019.

ALAMANDALA, S.; PUTHA, K.; PRASAD, R. S.; KUMAR, P. R. Fbg sensing system to study the bridge weigh-in-motion for measuring the vehicle parameters. In: IEEE. **2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)**. [S.l.], 2018. p. 1–2.

ARINALDI, A.; PRADANA, J. A.; GURUSINGA, A. A. Detection and classification of vehicles for traffic video analytics. **Procedia computer science**, Elsevier, v. 144, p. 259–268, 2018.

BAI, H.; CHEN, Z.; CHEN, N.; GUO, Q.; ZHANG, K.; PANG, F.; WANG, T. Surface-enhanced raman scattering optical fiber sensor using biconical taper fiber. In: . [S.l.: s.n.], 2010. p. 176–177. ISSN 2162-108X.

BALLATO, J.; DRAGIC, P. Glass: the carrier of light-a brief history of optical fiber. **International Journal of Applied Glass Science**, Wiley Online Library, v. 7, n. 4, p. 413–422, 2016.

BIN, M.; XINGUO, Z. Study of vehicle weight-in-motion system based on fiber-optic microbend sensor. In: IEEE. **2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation**. [S.l.], 2010. v. 3, p. 458–461.

- BOOTH, A. D.; CHRISTOFFERSEN, P.; SCHOONMAN, C.; CLARKE, A.; HUBBARD, B.; LAW, R.; DOYLE, S. H.; CHUDLEY, T. R.; CHALARI, A. Distributed acoustic sensing of seismic properties in a borehole drilled on a fast-flowing greenlandic outlet glacier. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 47, n. 13, p. e2020GL088148, 2020.
- BRAGA, N. C. **Eletrônica básica para mecatrônica**. [S.l.]: Saber São Paulo, 2005.
- BUCARO, J. A.; DARDY, H. D.; CAROME, E. F. Optical fiber acoustic sensor. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 16, n. 7, p. 1761–1762, 1977.
- CANALTECH . **O que é Arduino?** 2015. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/hardware/o-que-e-arduino/>>. Acesso em: 23 set. 2021.
- CAO, Y.; TANG, K.; SUN, J.; JI, Y. Day-to-day dynamic origin–destination flow estimation using connected vehicle trajectories and automatic vehicle identification data. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier, v. 129, p. 103241, 2021.
- CHEN, S.; LI, Y.; HUANG, L.; YIN, H.; ZHANG, J.; SONG, Y.; WANG, M. Vehicle identification based on variational mode decomposition in phase sensitive optical time-domain reflectometer. **Optical Fiber Technology**, Elsevier, v. 60, p. 102374, 2020.
- CICARELLI, L. C.; RIBEIRO, E. P.; LEANDRO, G. V. Classificação de veículos automotivos através de sensores indutivos e redes neurais. 2011.
- COSTA, M. B. C. et al. Análise comparativa do desempenho da compensação da dispersão em redes de fibras ópticas. Universidade Federal do Pará, 2019.
- J. Richards R. Martin M. McEwan-King R. Crickmore D. Hill. 2018. 04/09/2018.
- Ni Dacheng, Zhao Chengrui, Wang Fei, Zhang Yanliang, Dong Peng, Cheng Wan, Ren Qiang, Chen Zengxian & Li Junwei. 2013. 11/12/2013.
- DEY MEENU RANI E SHARMA, S. e. M. R. C. e. M. C. P. e. P. H. K. Sistema de monitoramento de tráfego inteligente em tempo real baseado em iov para cidades inteligentes usando realidade aumentada. In: **Conferência Internacional de 2019 sobre Visão para Tendências Emergentes em Comunicação e Rede (ViTECoN)**. [S.l.: s.n.], 2019.
- DI, H.; XIN, Y.; JIAN, J. Review of optical fiber sensors for deformation measurement. **Optik**, v. 168, p. 703 – 713, 2018. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618306375>>.
- EM DISCUSSÃO: REVISTA DE AUDIÊNCIAS PÚBLICAS DO SENADO FEDERAL . **Catástrofe mundial que ceifa 1,3 milhão de vidas**. 2012. Disponível em: <<https://www.onsv.org.br/oms-divulga-relatorio-sobre-mortes-no-transito-e-sugere-reducao-de-velocidade-em-areas-urbanas/>>. Acesso em: 22 set. 2021.
- FAJKUS, M.; FRIDRICH, M.; NEDOMA, J.; KAHANKOVA, R.; MARTINEK, R.; BEDNAR, E.; KOLARIK, J. Pdms-fbg-based fiber optic system for traffic monitoring in urban areas. **IEEE Access**, IEEE, v. 8, p. 127648–127658, 2020.

- FALDU PRAYUSHI E DOSHI, N. e. P. R. Sistema de controle de tráfego adaptável em tempo real: uma abordagem híbrida. In: **2019 IEEE 4ª Conferência Internacional sobre Computadores e Sistemas de Comunicação (ICCCS)**. [S.l.: s.n.], 2019.
- GAJDA, J.; SROKA, R.; STENCEL, M.; WAJDA, A.; ZEGLIN, T. A vehicle classification based on inductive loop detectors. In: IEEE. **IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No. 01CH 37188)**. [S.l.], 2001. v. 1, p. 460–464.
- GHATAK, A. A.; GHATAK, A.; THYAGARAJAN, K.; THYAGARAJAN, K. **An introduction to fiber optics**. [S.l.]: Cambridge university press, 1998.
- GHOLAMALINEJAD, H.; KHOSRAVI, H. Vehicle classification using a real-time convolutional structure based on dwt pooling layer and se blocks. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, p. 115420, 2021.
- Sergio Machado GONÇALVES. 2020. 08/12/2020.
- GOODRIDGE, S. G. Detection of bicycles by quadrupole loops at demand-actuated traffic signals. In: **Bicycle Forum IEEE**. [S.l.: s.n.], 2003.
- GOURE, J.-P.; VERRIER, I. **Optical fibre devices**. [S.l.]: CRC Press, 2016.
- GRAKOVSKI, A.; PILIPOVECS, A. Multi-purpose fibre optic system for automated vehicle's weighting-in-motion and classification in applications of intelligent transport systems. In: IEEE. **2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)**. [S.l.], 2017. p. 610–615.
- GRATTAN, K.; SUN, T. Fiber optic sensor technology: an overview. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 82, n. 1-3, p. 40–61, 2000.
- Gupta, S.; Upadhyaya, V. Automated vehicle detection using optical fiber communication. p. 1–3, Oct 2016.
- HE, M.; FENG, L.; ZHAO, D. Application of distributed acoustic sensor technology in train running condition monitoring of the heavy-haul railway. **Optik**, v. 181, p. 343 – 350, 2019. ISSN 0030-4026. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402618319983>>.
- HILMANI, A.; MAIZATE, A.; HASSOUNI, L. Automated real-time intelligent traffic control system for smart cities using wireless sensor networks. **Wireless Communications and Mobile Computing**, Hindawi, v. 2020, 2020.
- HUANG, M.-F.; SALEMI, M.; CHEN, Y.; ZHAO, J.; XIA, T. J.; WELLBROCK, G. A.; HUANG, Y.-K.; MILIONE, G.; IP, E.; JI, P. et al. First field trial of distributed fiber optical sensing and high-speed communication over an operational telecom network. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 38, n. 1, p. 75–81, 2019.
- HUANG, Y.; LU, P.; BRIDGELALL, R. Road Sensor Network for Smart City Application. In: Sohn, H and Lynch, JP and Wang, KW (Ed.). [S.l.], 2018. (Proceedings of SPIE, 10598). ISBN 978-1-5106-1693-6. ISSN 0277-786X. Conference on Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, Denver, CA, MAR 05-08, 2018.

HUANG, Y.; LU, P.; TOLLIVER, D. et al. Vehicle classification system using in-pavement fiber bragg grating sensors. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 18, n. 7, p. 2807–2815, 2018.

JORGE, M.; LATORRE, M. R. et al. Acidentes de trânsito no brasil: dados e tendências. **Cadernos de Saúde Pública**, SciELO Public Health, v. 10, p. S19–S44, 1994.

KASHYAP, R. **Fiber bragg gratings**. [S.l.]: Academic press, 2009.

KEISER, G. Optical fiber communications. **Wiley Encyclopedia of Telecommunications**, Wiley Online Library, 2003.

____. **Comunicações por Fibras Ópticas-4**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.

KEPAK, S.; CUBIK, J.; NEDOMA, J.; HRUBY, D.; HEJDUK, S.; ZAVODNY, P.; FAJKUS, M.; VASINEK, V. Compact fiber optic trackside sensor for rail vehicle detection and analysis. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier, v. 51, n. 6, p. 220–224, 2018.

LIANG, S.; ZHAO, X.; LIU, R.; ZHANG, X.; WANG, L.; ZHANG, X.; LV, Y.; MENG, F. Fiber-optic auditory nerve of ground in the suburb: For traffic flow monitoring. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 166704–166710, 2019.

LIU, H.; MA, J.; XU, T.; YAN, W.; MA, L.; ZHANG, X. Vehicle detection and classification using distributed fiber optic acoustic sensing. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 69, n. 2, p. 1363–1374, 2019.

LIU, H.; MA, J.; YAN, W.; LIU, W.; ZHANG, X.; LI, C. Traffic flow detection using distributed fiber optic acoustic sensing. **IEEE Access**, IEEE, v. 6, p. 68968–68980, 2018.

LIU, H. lin; ZHU, Z. wei; ZHENG, Y.; LIU, B.; XIAO, F. Experimental study on an fbg strain sensor. **Optical Fiber Technology**, v. 40, p. 144 – 151, 2018. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520016302814>>.

MALLA, R. B.; SEN, A.; GARRICK, N. W. A special fiber optic sensor for measuring wheel loads of vehicles on highways. **SENSORS**, 8, n. 4, p. 2551–2568, APR 2008. ISSN 1424-8220.

G. Bruce R. Martin. 2018. 21/08/2018.

MENADIER, C.; KISSINGER, C.; ADKINS, H. The fotonic sensor. **Instruments and Control Systems**, v. 40, p. 114–120, 1967.

MOHAMMED, A. A.; AMBAK, K.; MOSA, A. M.; SYAMSUNUR, D. A review of traffic accidents and related practices worldwide. **The Open Transportation Journal**, v. 13, n. 1, 2019.

MOURA, L. P. de; PINTO, P. V. F.; MEDEIROS, G. M. de; OLIVEIRA, W. F. de; MIRANDA, J. I. S.; GUIMARÃES, G. F. Development of an alternating electrical current meter mobile for low and high voltage: polarimetric analysis, mathematical model, design, and field tests. **Optical Engineering**, International Society for Optics and Photonics, v. 57, n. 10, p. 104105, 2018.

NEDOMA, J.; FAJKUS, M.; BEDNAREK, L.; VASINEK, V. Non-destructive fiber-optic sensor system for the measurement of speed in road traffic. **Advances in Electrical and Electronic Engineering**, v. 14, n. 5, p. 602–608, 2016.

NEDOMA, J.; FAJKUS, M.; KAHANKOVA, R.; MARTINEK, R.; DVORSKY, M.; VANUS, J.; VASINEK, V.; CVEJN, D. Fiber-optic interferometric sensor for monitoring automobile and rail traffic. **Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, TUBITAK, v. 26, p. 2986 – 2995, 2018. ISSN 1300-0632.

NEDOMA, J.; FAJKUS, M.; MARTINEK, R.; VANUS, J.; KEPAK, S.; KAHANKOVA, R.; JAROS, R.; CVEJN, D.; PRAUZEK, M. Analysis of the use of fiber-optic sensors in the road traffic. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 6, p. 420 – 425, 2018. ISSN 2405-8963. 15th IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems PDeS 2018. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318308619>>.

NISHIMOTO, R. E. **Novas Geometrias de Laços Indutivos**. Tese (Doutorado) — Dissertação apresentado a UTFPR, 2006.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE SEGURANÇA VIÁRIA. **OMS DIVULGA RELATÓRIO SOBRE MORTES NO TRÂNSITO E SUGERE REDUÇÃO DE VELOCIDADE EM ÁREAS URBANAS**. 2019. Disponível em: <<https://www.onsv.org.br/oms-divulga-relatorio-sobre-mortes-no-transito-e-sugere-reducao-de-velocidade-em-areas-urbanas/>>. Acesso em: 22 set. 2021.

OPAS/OMS BRASIL. **Folha informativo Acidentes trânsito**. 2019. Disponível em: <https://www.paho.org/bra/index.php?option=com_content&view=article&id=5147:acidentes-de-transito-folha-informativa&Itemid=779>. Acesso em: 10 nov. 2019.

PALMIERI, L.; SCHENATO, L. Distributed optical fiber sensing based on rayleigh scattering. **The Open Optics Journal**, v. 7, n. 1, 2013.

PEDERSEN, T.; HAUGEN, T. Vehicle weight estimation based on piezoelectric sensors used at traffic enforcement cameras experiences from the norwegian system. In: IEEE. **2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**. [S.l.], 2017. p. 1–5.

Huanbin Yin Lu Zhou Jianfeng Chen Yun Wang Yifan Wang Qian Ping Qilin Zhao Huaibai. 2019. 22/03/2019.

Raspberry. **Raspberry Pi 400 Personal Computer Kit**. 2019. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/>>. Acesso em: 30 aug. 2021.

RIBEIRO, J. A. J. **Comunicações ópticas**. [S.l.]: Érica, 2003.

SOCHOR, J.; JURANEK, R.; HEROUT, A. Traffic surveillance camera calibration by 3d model bounding box alignment for accurate vehicle speed measurement. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 161, p. 87 – 98, 2017. ISSN 1077-3142. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314217301108>>.

SOUZA, F. C. d. N. de; MAIA, L. S. P.; MEDEIROS, G. M. de; MIRANDA, M. A. R.; SASAKI, J. M.; GUIMARÃES, G. F. Optical current and magnetic field sensor using mach-zehnder interferometer with nanoparticles. **IEEE Sensors Journal**, v. 18, n. 19, p. 7998–8004, 2018.

THORLABS. **Large Area Mounted Germanium Photodiode, 800-1800 nm, Cathode Grounded**. 2006. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/drawings/9346cd9be184e4b6-537FF779-A20E-D7C8-61DFD0D142D6882F/SM05PD6A-SpecSheet.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

_____. **FDS02 - Fotodiodo de Si com acoplador para fibra**. 2007. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/drawings/75204aaf61fe6ee1-8CD3EFF5-ACD1-54CA-86FE2BBA5B7F6F38/FDS02-SpecSheet.pdf>>. Acesso em: 09 dez. 2020.

Thorlabs. **LED630E Ultra Bright Red LED**. 2007. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LED630E>>. Acesso em: 16 jun. 2021.

THORLABS. **Multimode Fiber with Ø400 m Hytrel Jacket**. 2011. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/drawings/9346cd9be184e4b6-537FF779-A20E-D7C8-61DFD0D142D6882F/FT400EMT-SpecSheet.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2019.

TOSI, D.; OLIVERO, M.; VALLAN, A.; PERRONE, G. Weigh-in-motion through fibre bragg grating optical sensors. **Electronics letters**, IET, v. 46, n. 17, p. 1223–1225, 2010.

TRONCO, T. R.; AVILA, L. F. de. Fundamentos de comunicações ópticas. **1a Edição: Abril de**, 2007.

WANG, X.-X.; ZHAO, X.-M.; SHEN, Y. A video traffic flow detection system based on machine vision. **Journal of Information Processing Systems**, Korea Information Processing Society, v. 15, n. 5, p. 1218–1230, 2019.

WANG, Y.; LI, P.; ZHANG, J.; LIU, X.; BAI, Q.; WANG, D.; ZHANG, M.; JIN, B. Distributed optical fiber vibration sensor using generalized cross-correlation algorithm. **Measurement**, Elsevier, v. 144, p. 58–66, 2019.

WELLBROCK, G. A.; XIA, T. J.; HUANG, M.-F.; CHEN, Y.; SALEMI, M.; HUANG, Y.-K.; JI, P.; IP, E.; WANG, T. First field trial of sensing vehicle speed, density, and road conditions by using fiber carrying high speed data. In: IEEE. **2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)**. [S.l.], 2019. p. 1–3.

Li Meng Zhang Cui Deng Chengwei Wei Jingchuang Tong Xinglin Xu Siyu. 2021. 09/02/2021.

XINWEI, C.; SHENGNAN, H.; DANDAN, L.; KAI, W.; YAN'EN, F.; SHUAI, W. Optical fiber voltage sensor based on michelson interferometer using phase generated carrier demodulation algorithm. **IEEE SENSORS JOURNAL**, v. 16, p. 349 – 354, 2016. Disponível em: <<https://www.ieee.org/publications/rights/index.html>>.

YUKSEL, K.; KINET, D.; MOEYAERT, V.; KOUROUSSIS, G.; CAUCHETEUR, C. Railway monitoring system using optical fiber grating accelerometers. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 27, n. 10, p. 105033, sep 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088%2F1361-665x%2Faadb62>>.

ZHANG, Z.; HUANG, Y.; BRIDGELALL, R.; LU, P. et al. Optimal system design for weigh-in-motion measurements using in-pavement strain sensors. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 17, n. 23, p. 7677–7684, 2017.

ZHAO, H.; WU, D.; ZENG, M.; ZHONG, S. A vibration-based vehicle classification system using distributed optical sensing technology. **Transportation Research Record**, v. 2672, n. 43, p. 12–23, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0361198118775840>>.

ZHENG, Y.; BREMER, K.; ROTH, B. Investigating the strain, temperature and humidity sensitivity of a multimode graded-index perfluorinated polymer optical fiber with bragg grating. **Sensors**, v. 18, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/5/1436#framed_div_cited_count>.

ZHU, F.; LI, Z.; CHEN, S.; XIONG, G. Parallel transportation management and control system and its applications in building smart cities. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, IEEE, v. 17, n. 6, p. 1576–1585, 2016.

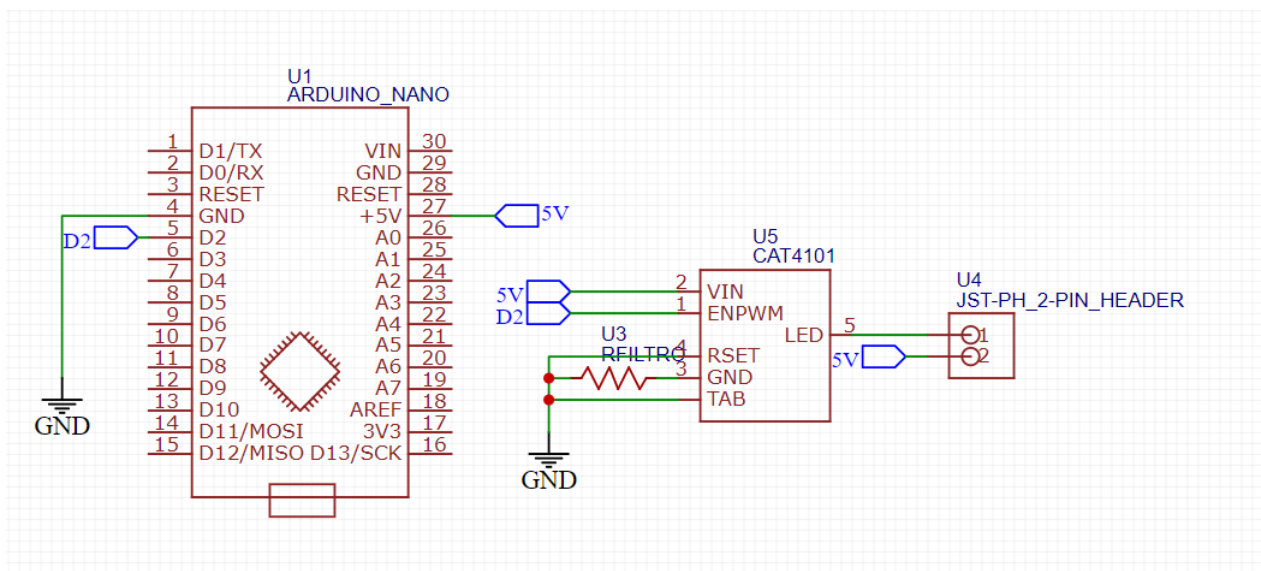
APÊNDICE A -- Produção Científica

Os trabalhos publicados ao longo desta dissertação foram:

1. OLIVEIRA, WALESKA FEITOZA; DA SILVA, FRANCISCO GUSTAVO LOPES; BRAGA, CAIO HERBERTT COSTA; BASTOS, AGLIBERTO MELO; GUIMARÃES, GLENDO DE FREITAS. Sensor Óptico para Aferição de Velocidade em Veículos Automotores. XIV Simpósio de Lasers e sua Aplicações, 2019.
2. OLIVEIRA, WALESKA FEITOZA; DA SILVA, FRANCISCO GUSTAVO LOPES; BRAGA, CAIO HERBERTT COSTA; GUIMARÃES, GLENDO DE FREITAS. Sensor Óptico para Aferição de Massa Utilizando Fibra Óptica. XIV Simpósio de Lasers e sua Aplicações, 2019.
3. OLIVEIRA, WALESKA FEITOZA; BRASIL, BEATRIZ SILVA; ALEXANDRIA, AUZUIR RIPARDO; GUIMARÃES, GLENDO DE FREITAS. OPTICAL SENSOR FOR MASS MEASURING USING OPTICAL FIBER. I Congresso Internacional Virtual de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (CONINP), 2020.
4. OLIVEIRA, Waleska Feitoza; BRAGA, Caio Herbertt Costa; MARINHO, Tiago Bezerra; GUIMARÃES, Glendo de Freitas. I Distributed Fiber Optic Sensor for Weight Measurement and Classification of Motor Vehicles in Single Tracks. IEEE 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies 2021.

APÊNDICE B -- Circuito do Arduino e Drive de LED

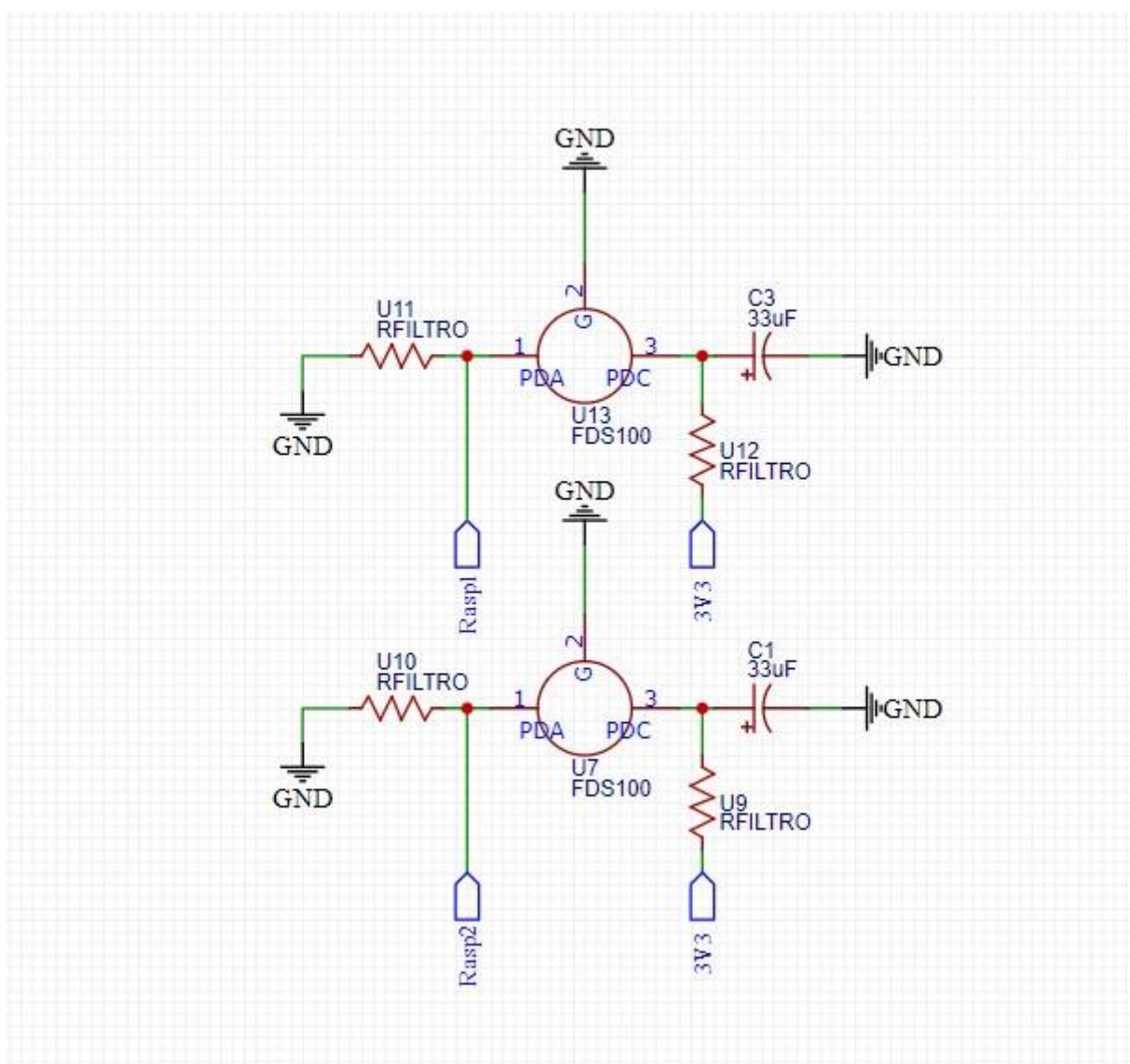
Figura 67: Circuito de alimentação do LED via Arduino.



Fonte: Autora.

APÊNDICE C -- Circuito Raspberry

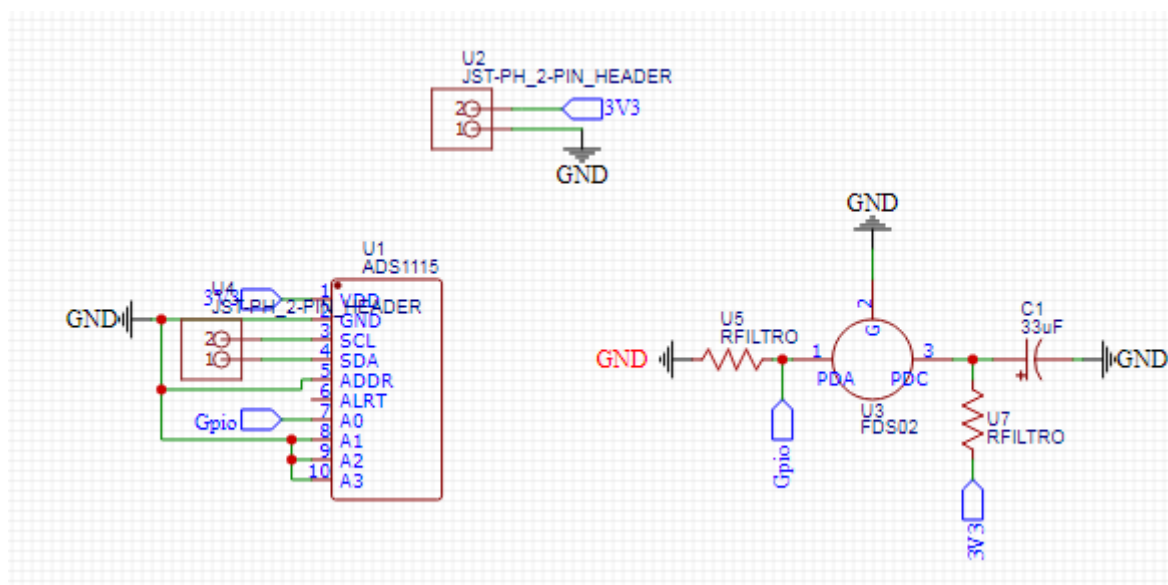
Figura 68: Circuito da placa *Raspeberry*.



Fonte: Autora.

APÊNDICE D -- Circuito Fotodiodo, ADS1115 e Raspberry

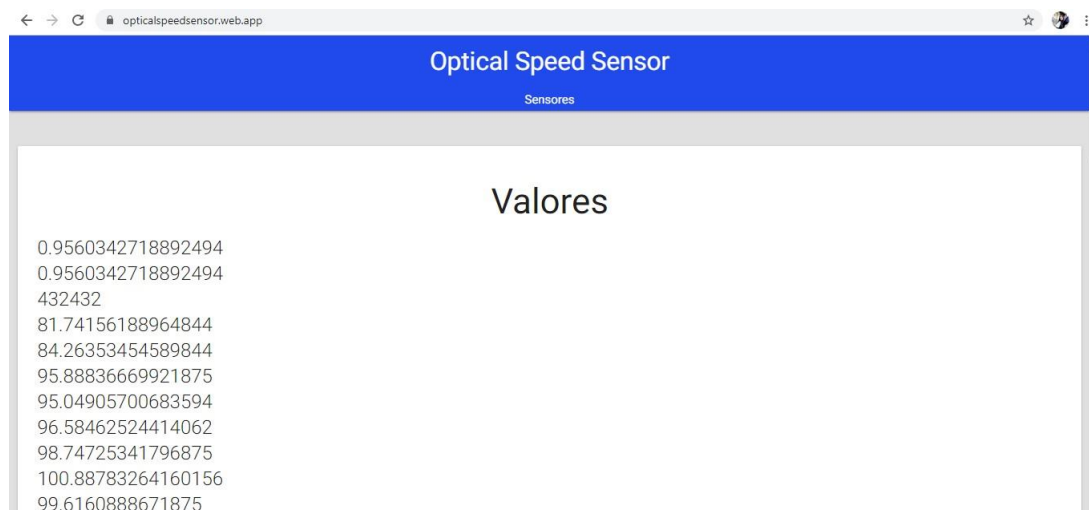
Figura 69: Circuito da placa eletrônica para captação, conversão, tratamento e leitura dos dados.



Fonte: Autora.

APÊNDICE E -- Tela de visualização de dados em tempo real

Figura 70: Valores exibidos em tempo real aos usuários via página web.



Fonte: Autora.