

Daniel Augusto de Castro Spegiorin

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DEDICADO AO
CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS PARA UM DETECTOR DE
ALTA RESOLUÇÃO ESPECTRAL**

Versão Corrigida

São Paulo

2023

Daniel Augusto de Castro Spegiorin

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DEDICADO AO
CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS PARA UM DETECTOR DE
ALTA RESOLUÇÃO ESPECTRAL**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:

Engenharia Elétrica-Microeletrônica

Orientador: Prof. Dr. Fernando Josepetti Fonseca

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Spegiorin, Daniel Augusto de Castro Spegiorin

Projeto e desenvolvimento de um sistema dedicado ao controle e aquisição de dados para um detector de alta resolução espectral / D. A. C. S. Spegiorin -- versão corr. -- São Paulo, 2022.

78 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Fotometria 2.Filtros ópticos 3.Detectores de alta resolução espectral 4.Internet das coisas 5.Microeletrônica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta de projeto e construção de um sistema de aquisição de dados para um detector óptico multiespectral, baseado em Filtros de Interferência Variável (FIV) que incorpora uma camada ressoante de Fabry-Perot, inclinada dentro da área opticamente ativa do FIV, que pode funcionar como espectrofotômetro de baixo custo para fins didáticos. O desenvolvimento desse dispositivo composto pelo detector multiespectral e o sistema de *software* dedicado envolveu o estudo de microeletrônica dos seus componentes, para garantir a viabilidade da configuração entre esses componentes na sua montagem. Também faz parte o estudo da análise de requisitos e programação em ambientes de desenvolvimento distintos para que o sistema seja adaptável em questão ao *software*. Para garantir a portabilidade do sistema desenvolvido, foi realizado uma pesquisa para que os ambientes de desenvolvimento e tecnologia usada sejam adaptáveis e maleáveis. Quanto ao detector, para garantir que o sistema se ajuste aos fins didáticos, seus componentes na montagem apresentam certa mobilidade, para que sejam posteriormente calibrados. Essa mobilidade é obtida nos suportes desses componentes. Por fim, para o dispositivo gerar dados que sejam transmitidos remotamente, foi realizado e desenvolvido uma arquitetura baseada em *Internet of Things* (IoT). O desenvolvimento da pesquisa envolveu estudos multidisciplinares e suas etapas pode colaborar para um ambiente de difusão científica, com destaque para ondas eletromagnéticas, processos de fabricação em microeletrônica, espectrofotometria, programação de microcontroladores e desenvolvimento de *software*, que contribuíram para o dispositivo apresentado no final.

Palavras Chaves: Arquitetura de sistemas, Microeletrônica, IoT, Detector multiespectral, Espectrofotometria.

Abstract

This work presents a proposal for the design and construction of a data acquisition system for a multispectral optical detector, based on Variable Interference Filters (VIF) that incorporates a resonant Fabry-Perot layer, inclined within the optically active area of the VIF, which can function as a low-cost spectrophotometer for teaching purposes. The development of this device composed of the multispectral detector and the dedicated software system involved the study of microelectronics of its components, to guarantee the prediction of the configuration between these components in its assembly. Also part of the study is the analysis of requirements and programming in different development environments so that the system is adaptable to the software in question. To ensure the portability of the developed system, research was carried out so that the development and technology environments used are adaptable and malleable. As for the detector, to ensure that the system adapts to teaching purposes, its components in the assembly present a certain mobility, so that they can later be calibrated. This mobility is obtained in the supports of these components. Finally, for the device to generate data that can be transmitted remotely, an architecture based on the Internet of Things (IoT) was created and developed. The development of research involving multidisciplinary studies and their stages can contribute to an environment of scientific dissemination, with emphasis on electromagnetic waves, microelectronics manufacturing processes, spectrophotometry, microcontroller programming and software development, which are developed for the device presented at the end.

Keywords: Systems architecture. Microelectronics, Internet of Things, Spectral Detector, Spectrophotometry.

Lista de Figuras

Figura 1: Quadro esquemático das revoluções industriais e suas transformações.....	14
Figura 2: Esquema de funcionamento de um espectrofotômetro.....	20
Figura 3: Modelo MQTT de publicação e assinatura para sensores IoT.....	23
Figura 4: Esquema das funcionalidades entre o módulo eletrônico e a aplicação.....	23
Figura 5: Representação do espectro eletromagnético em função do comprimento de onda e da frequência.....	27
Figura 6: Resumo simplificado de absorção.....	30
Figura 7: Ilustração de um diodo em polarização inversa.....	36
Figura 8: Ilustração de uma onda plana através de um meio periódico que forma um Ressonador de Fabry-Perot com espelhos plano-paralelos.....	38
Figura 9: Esquema representativo em corte transversal da estrutura física de um FIV com camadas inclinadas, salientando principalmente a cavidade ressonante de Fabry-Perot em forma de cunha.....	39
Figura 10: Imagem do gradiente de cores no FIV.....	40
Figura 11: Representação de um possível Sistema de Aquisição de Dados.....	41
Figura 12: Arquitetura Básica de um Microcontrolador.....	42
Figura 13: Captura de tela com a IDE do Arduino e as duas funções básicas.....	45
Figura 14: Representação do efeito causado no sinal de digitalização.....	46
Figura 15: Esquema de conversão de um sinal analógico em digital.....	47
Figura 16: Principais componentes do detector óptico.....	51
Figura 17: Imagem dos detectores.....	53
Figura 18: Diagrama de blocos do sensor linear TSL201R.....	54

Figura 19: Esquema básico de ligações do PDA TSL201.....	55
Figura 20: Compilação do sketch para funcionamento do PDA TSL201R.....	56
Figura 21: FIV no suporte colocado bem rente ao detector.....	57
Figura 22: Projeto do suporte nas duas primeiras ilustrações e o suporte produzido.....	58
Figura 23: Início da montagem em um tubo adaptável.....	59
Figura 24: Imagem do conjunto detector, detalhando o PDA, o suporte para o FIV, difusor e lente.....	60
Figura 25: Esquema simplificado do conjunto detector, detalhando o PDA, FIV, difusor e o feixe eletromagnético incidente.....	61
Figura 26: Acoplamento do FIV ao conjunto óptico.....	62
Figura 27: Frente e verso da placa NodeMCU Esp8266 v3.....	63
Figura 28: Saída de dados pelo serial plotter(A) e monitor serial(B).....	64
Figura 29: Saída com identificação do fotodiodo e intensidade da REM que chega até ele.....	66
Figura 30: Ambiente de configuração do canal e uma das possibilidades de saída de dados no ThinSpeak.....	68
Figura 31: Visão externa do dispositivo montado.....	69
Figura 32: Sinal indesejado, devido ao aumento do tempo de integração.....	71
Figura 33: Sinal gerado e apresentado em formas distintas nos testes realizados.....	72

Lista de Tabelas

Tabela 1: Breve resumo comparativo entre CCD, CMOS e PDA.....	34
Tabela 2: Relação entre energia de banda e comprimento de onda para alguns elementos semicondutores	37
Tabela 3: Valor médio em Reais (R\$) dos componentes utilizados.....	69

Lista de Abreviaturas

ADC - *Analog to Digital Converter*

ALU - *Arithmetic Logic Unit*

AO - *Analog Output*

CCD - *Charge Coupled Device*

CMOS - *Complementary Metal Oxide Semiconductors*

CPU - *Central Processing Unit*

DAQ - *Data Aquisition*

DAS - *Data acquisition systems*

FBG - *Fiber Bragg Grating*

FI - *Filtro Óptico de Interferência*

FIV - *Filtro de Interferência Variável*

GPS - *Global Positioning System*

HTTP - *Hypertext Transfer Protocol*

HTTPS - *Hyper Text Transfer Protocol Secure*

IDE – *Integrated Development Environment*

IoT - *Internet of Things*

IP - *Internet Protocol*

LED - *Light Emitting Diode*

M2M - *Machine-to-Machine*

MATLAB - *Matrix Laboratory*

MCU - *Microcontroller Unit*

MIT - *Massachusetts Institute of Technology*

MQTT - *Message Queuing Telemetry Transport*

OBJ - *Object File Wavefront 3D*

OSHW - *Open Source Hardware*

PD - *Photodiode*

PDA - *Photodiode Array*

PVD - *Physical Vapor deposition*

RAM - *Random Access Memory*

REM - *Radiação Eletromagnética*

ROM – *Read Only Memory*

RSSF - **Redes de Sensores Sem Fio**

SI – *Start Integration*

SPR - *Surface Plasmon Resonance*

STL - *Standard Tessellation Language*

TDIC - **Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação**

UV - **Ultravioleta**

WLAN - *Wireless Local Area Network*

Lista de Símbolos

R_d	Resolução
λ	Comprimento de onda
$\Delta \lambda$	Diferença entre menor comprimento de onda distinguível e comprimento específico
T	Transmitância
I	Intensidade do sinal incidente
I_0	Intensidade do sinal referência
A	Absorbância
ε	Absortividade do material
l	Caminho óptico
c	Concentração do soluto na solução
Si	Silício
Ge	Germânio
GaAs	Arseneto de gálio
λ_c	Comprimento de onda máximo
E_G	Energia de Gap
SiO ₂	Dióxido de silício
TiO ₂	Dióxido de Titânio
μs	microsegundos
V	volt
λ_0	Comprimento de onda da luz no vácuo

Sumário

1	Introdução.....	14
1.1	Contextualização.....	14
1.1.2	IoT (<i>Internet of Things</i>)	17
1.2	A Detecção da Radiação no Espectro Eletromagnético.....	18
1.3	Visão Geral do Sistema Proposto.....	21
1.4	Objetivos.....	24
1.5	Estrutura da Dissertação.....	25
2	Revisão Bibliográfica.....	26
2.1	Sistema de Espectroscopia – Espectrofotometria.....	26
2.1.1	Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria.....	29
2.1.2	Lei de Beer-Lambert.....	30
2.2	Sensores.....	31
2.2.1	Fotodetecção e Sensores Ópticos.....	32
2.2.2	Fotodiodos.....	35
2.3	O Filtro de Interferência Variável.....	37
2.4	O Sistema de Aquisição de Dados.....	40
2.5	Conceitos de IoT.....	42
2.6	Projeto Arduino.....	43
2.6.1	Conversão Analógico Digital.....	46
2.6.2	O Módulo ESP8266.....	48
2.6.3	Placa de desenvolvimento NodeMCU.....	49
3	Materiais e Métodos.....	50
3.1	O Conjunto Óptico.....	51
3.2	A Matriz de Fotodiodos.....	52
3.2.1	Descrição e Detalhamento do PDA.....	53
3.3	Configurações do FIV e Suporte Utilizado.....	56
3.4	Montagem do Conjunto e Circuito.....	58
3.5	Conjunto Óptico Acoplado ao PDA.....	59
3.6	Acoplamento do FIV e PDA com o Conjunto Óptico.....	60
3.7	Acoplamento da Placa NodeMCU.....	62
3.8	Arquitetura do Sistema Construído.....	63
4	Resultados e Discussão.....	65
4.1	Primeira Aplicação Para Tratamento de Dados.....	65
4.1.1	Aplicação para IoT.....	66
4.2	Análise Geral.....	68

4.3	Análise dos Sinais.....	70
5	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	73
5.1	Conclusões.....	73
5.2	Trabalhos Futuros a Serem Desenvolvidos.....	74
	Referências Bibliográficas.....	75

1 Introdução

1.1 Contextualização

Ao longo da história, nota-se que a evolução tecnológica propiciou Revoluções Industriais, proporcionando mudanças significativa dos processos até então utilizados, abrangendo múltiplas áreas de conhecimento, sendo a Primeira Revolução ocorrida em torno de 1780, com o advento das máquinas a vapor; a Segunda em 1870, com a energia elétrica e a produção em massa; a Terceira Revolução durante a década de 1970, com o início do desenvolvimento da automação industrial, principalmente com o uso de robôs na produção; e hoje em dia, vive-se a Quarta Revolução Industrial, também chamada de Indústria 4.0, que permite uma evolução da até então automação para níveis Ciber-Físicos, muito atrelado a utilização de Big Data e IoT (*Internet of Things*), tornando assim as indústrias locais mais interconectados, auto gerenciáveis, com menos interferência humana (Silveira 2017). A Figura 1 representa um apanhado do contexto acima.

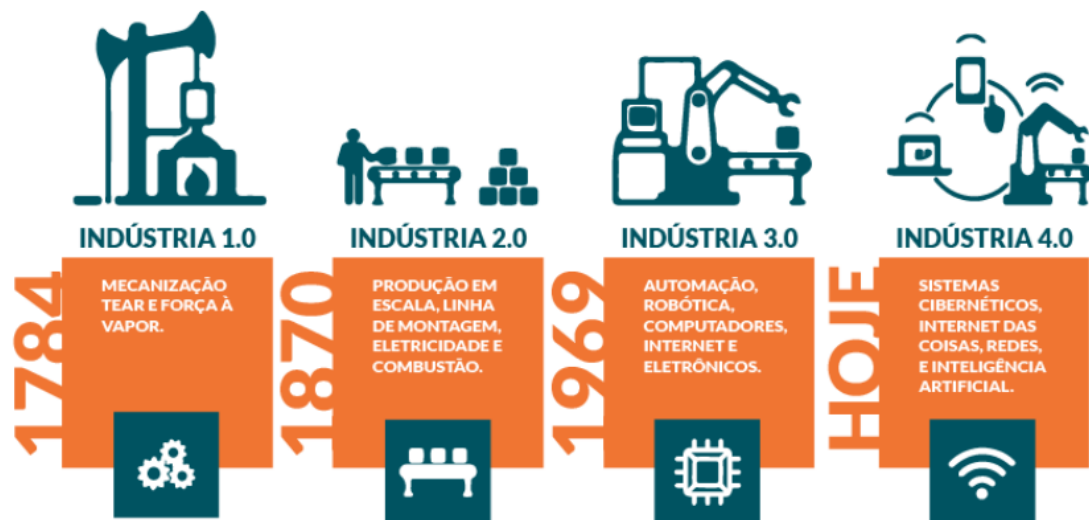


Figura 1: Quadro esquemático das revoluções industriais e suas transformações
Fonte: Silveira 2017

No contexto acima, considerando-se a terceira revolução industrial na década de 70, houve uma grande contribuição no desenvolvimento de dispositivos com poder de

processamento cada vez maior, disponibilizando uma grande variedade de equipamentos capazes de atender soluções em diversas áreas do conhecimento. A confiabilidade e qualidade da solução implementada são analisadas de acordo com requisitos de sistema como capacidade de armazenamento, tipo de processamento e transmissão da informação, proporcionando uma determinada combinação da tecnologia com produção de conhecimento gerado.

Os produtos dessa evolução tecnológica baseiam-se numa variedade de dispositivos eletrônicos, fotônicos, microssistemas e sensores, entre outros. Estes dispositivos são fabricados com semicondutores, com destaque para o silício (Si) como sendo o semicondutor mais importante e difundido na área de microeletrônica (SWART, 2008).

Através do uso dos sensores existe a possibilidade de obter variadas informações de campo, além de prestar informações com as quais se gerencia o funcionamento de algumas máquinas e equipamentos entre outras funcionalidades (ROSÁRIO, 2008).

Segundo Cavalcante, Tavoraro e Molisani (2011, p.1) “A introdução da metodologia experimental de aquisição de dados por computador representa a possibilidade real de uso das técnicas de análise estatística de dados experimentais estudados nos cursos de Física e de Engenharia do primeiro período da graduação”. Esse processo permite ao usuário do sistema de aquisição um acesso rápido e em quantidade de dados que podem ser processados, tabulados e convertidos em gráficos com facilidade a partir de planilhas eletrônicas ou aplicativos dedicados a tal finalidade.

A partir da observação de um fenômeno físico, um sistema pode ser projetado isolando o fenômeno para que ele seja reproduzido em condições de laboratório em que as variáveis possam ser controladas e suas respostas lidas por sensores destinados para determinado fim, como o sensor composto pela matriz de fotodiodos que será aqui proposto. Assim pretende-se com essa proposta de sensores, que seja possível formular hipóteses, gerar dados, explicar e justificar possíveis diferenças entre o previsto e obtido, reformular hipóteses, fazer ajustes e testá-las novamente. Para isso, o princípio do funcionamento dos equipamentos didáticos e de baixo custo para aquisição automática de dados aqui proposto na pesquisa baseia-se em uma placa microcontrolada, um sensor com conjunto óptico e um sistema dedicado para persistência e processamento dos dados adquiridos.

Na análise e desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados são necessários: um fenômeno do mundo real, sensores, processamento de sinais, *hardware* para aquisição de dados

e controle dos sensores, um sistema computacional, interfaces de comunicação e um *software* (SOLOMAN, 2010).

A automação de um sistema de aquisição e processamento de dados permite monitorar e controlar o funcionamento físico de maneira rápida e segura. Esse controle permite monitorar tarefas rotineiras em certas aplicações como por exemplo uma tomada de dados de algum ensaio científico seja em laboratórios ou em um sensoriamento remoto em ambientes. A automação na aquisição de dados tem possibilitado avanços enormes no controle de ambientes, pois permite agilidade e confiabilidade na aquisição, contribuindo para rápida tomada de decisões (DALLY et al., 1993).

Existem diversos exemplos para sistemas de aquisição de dados, com os mais variados tipos de complexidade, e todos eles têm alguns pontos em comuns que os caracterizam. Esses sistemas necessitam de algum parâmetro que lhes permitam avaliar o estado atual do ambiente, que geralmente são sensores que medem características físicas diversas de um ambiente ou sistema, e dependendo do tipo do sensor, apresentará maior ou menor precisão.

Em um passado recente, a obtenção de dados em experimentos era obtida por sistemas analógicos, sendo limitados por tensões de deriva, sendo que o amplificador do integrador deve apresentar uma excelente qualidade para gerar dados com precisão. Com o uso de um sistema digital, ocorre a minimização das tensões de deriva em comparação com sistemas analógicos, embora que no uso de sistemas digitais ainda há necessidade da modificação de variáveis contínuas para discreta. O sistema digital oferece muitas vantagens em relação ao analógico, pois um sinal digital é menos sensível a interferências eletromagnéticas e o protocolo de comunicação estabelece mecanismos que permitem detectar e corrigir erros de transmissão (SILVA, 2000).

Já no contexto da Quarta Revolução Industrial, a tendência foca a personalização do produto final em cada caso, fazendo com que a solução proposta seja adaptável a cada necessidade. Assim, nas soluções propostas, transmissão e disponibilidade dos dados, a evolução das Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC), e das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), o paradigma da IoT vem se consolidando nos últimos anos e já é uma realidade no cotidiano das pessoas. Segundo (Araújo e Valentim, 2019) IoT é um paradigma tecnológico que realiza a interconexão entre os mundos físico e digital, criando um ‘meio informacional’ que aumenta a percepção das pessoas sobre o cenário ao seu redor”.

Assim, o presente trabalho propõe a análise, desenvolvimento de uma proposta e estudo de um sistema para aquisição de dados facilmente programável, utilizando sistema de

plataforma aberta como interface com o usuário, um microcontrolador de baixo custo acoplado a um detector espectral, que irá contribuir em diversas áreas do conhecimento, em especial ao que se propõe esse trabalho que é a área educacional multidisciplinar, destacando aulas de práticas experimentais, em que um evento é transformado em sinais elétricos por sensores, sendo posteriormente esse sinal sendo processado, armazenado e analisado. Assim, o sensoriamento de uma determinada faixa de frequência no espectro eletromagnético e o estudo que envolve conceitos de IoT e microcontroladores são abordados com seus componentes no presente trabalho.

1.1.2 IoT (*Internet of Things*)

Considerando-se um sistema de aquisição de dados, devido ao grande desmembramento da atenção dos seres humanos em diversas tarefas, o tempo ser limitado para cada uma delas e não existir uma grande acurácia na realização das mesmas, existe uma grande perda de dados já que antes da existência da IoT, muitos dados acabavam se perdendo, no entanto, com o imenso avanço tecnológico diversos utensílios vem ganhando a capacidade de se conectar com a internet e o conceito de IoT se torna cada vez mais presente. A partir do momento em que um dispositivo é capaz de gerar dados de seus arredores e transmiti-los para que sejam utilizados de forma inteligente por outros membros da rede a ideia de dispositivo IoT é colocada em prática, dessa forma, além dos aparelhos usuais como computadores, dispositivos móveis, e outros itens comuns passam a ter a capacidade de se comunicar com a internet (ASHTON, 2009).

Segundo MEDINA (2017), o pesquisador britânico do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), Kevin Ashton, foi o primeiro a mencionar o termo *Internet of Things*, no ano de 1999. Na ocasião, ele ponderou sobre a capacidade dos dispositivos armazenarem conhecimento a respeito do ambiente ao seu redor sem necessitar do auxílio ou intervenção de um usuário nesse local, permitindo assim o monitoramento do ambiente remotamente sem a intervenção presencial.

Assim, diversas áreas podem usufruir de vantagens do uso de IoT, como o desenvolvimento de cidades inteligentes e conectadas, e de diversos serviços na área de automação e monitoramento, em fábricas, no comércio e nos transportes, em edifícios, residências ou nas pessoas. Nesse contexto, este trabalho envolve uma proposta de realizar o estudo de um sistema de aquisição de dados para a área educacional. Um sistema que pode ser

utilizado no ensino remoto, realidade em que as escolas foram inseridas rapidamente e sem muita preparação devido à pandemia do coronavírus (Sars-Cov-2). Assim, realizar aquisição e controle de dados remotamente convertendo fenômenos físicos em um sinal elétrico por diversos tipos de sensores e transmiti-los através da internet, usando dispositivos como microcontroladores capazes de realizar comunicação sem fio, conhecida como *Wireless Local Area Network* (WLAN), proporcionando a troca de informações de maneira rápida e eficiente é uma proposta dentro do presente contexto

1.2 A Detecção da Radiação no Espectro Eletromagnético

Estudar os materiais a fim de compreendê-los é uma atividade que há séculos vem sendo feito pelo ser humano. O estudo dos materiais tornou possível o desenvolvimento de inúmeros produtos que vieram a facilitar a vida e proporcionar o bem-estar do homem. Existem diversas maneiras de realizar estudos nos materiais, e uma delas é com a radiação eletromagnética. A radiação eletromagnética estende-se por uma faixa que abrange desde ondas de rádio até raios gama.

A possibilidade de estudar, quantificar, identificar e monitorar a intensidade e o comprimento de onda de um feixe de radiação eletromagnético incidente é de grande interesse em várias áreas do conhecimento. Dentre os estudos que envolvem diretamente o monitoramento da distribuição espectral de um feixe de radiação eletromagnético, pode-se citar como exemplos: a espectroscopia óptica aplicada nas suas diversas especificidades, a fotometria espectral multicanal no sensoriamento remoto da atmosfera, entre outros (ALEXANDROV et al., 2002(a, b); ROSÁRIO et al., 2008; OKAMOTO, 2006; SAYÃO, 2015).

Com isso, uma diversidade de sensores ópticos foram implementados para aplicações cada vez mais complexas, como os sensores espectrais especiais que monitoram uma superfície ou objeto, os *Surface Plasmon Resonance* (SPR). Os SPR monitoram a interação de ondas eletromagnéticas longitudinais, que se propagam na interface entre um metal e um dielétrico e são amplamente utilizados para o rastreamento de interações bioquímicas (Sayao, 2015).

Um grupo de autores, entre eles Amram (2000) relatam que há um século Maurice Paul Auguste Charles Fabry e Jean Baptiste Alfred Perot desenvolveram o interferômetro que leva seu nome e que este dispositivo foi o resultado de dois séculos de trabalho relacionado com a luz e sua interação com a matéria. O seu emprego, por exemplo, possibilitou o surgimento de

um importante ramo da ciência a Astrofísica (AMRAM, 2000; SAYÃO, 2015).

Atualmente, o interferômetro de Fabry-Perot é utilizado em vários sensores ópticos, assim como os sensores de fibra óptica de grade de Bragg FBG (*Fiber Bragg Grating*). Esses sensores de FBG são constituídos por uma modulação periódica do índice de refração ao longo do comprimento de uma fibra óptica, e reflete um determinado espectro de comprimento de onda, determinado pelo período do perfil de índice de refração. O aprimoramento dos sensores ópticos proporcionam um estudo mais detalhado da interação da radiação eletromagnética com a matéria, contribuindo em diversas áreas do conhecimento em pesquisa e aplicações.

Existem diferentes formas de interação da radiação eletromagnética com a matéria como absorção, reflexão, espalhamento, reações fotoquímicas, entre outras. Dentre essas formas, uma área muito usada, é verificar como são as absorções características de uma amostra de material submetida a uma radiação incidente determinada, o que permite obter informações sobre sua composição química.

Já, a radiação incidente pode corresponder a qualquer região do espectro eletromagnético e, de acordo com a região, as moléculas constituintes da amostra responderão de formas distintas. Energias mais baixas, como micro-ondas ou infravermelho, fornecem, respectivamente, informações sobre os modos rotacionais e vibracionais de uma molécula. Quando a energia aumenta é possível verificar as transições eletrônicas das moléculas ou átomos que compõem a amostra (ATKINS, 2006). Os sistemas que realizam esse tipo de medida são chamados de espectrômetros e espectrofotômetros que usam como fonte a radiação eletromagnética do infravermelho ao ultravioleta, passando pelo visível.

A espectroscopia estuda interações da radiação eletromagnética com a matéria. Assim, métodos espectroscópicos de análise fundamentam-se em mensurar a quantidade de radiação emitida ou absorvida por moléculas e espécies atômicas (SKOOG et al., 2006). Um equipamento que destina a fazer tais medidas é chamado espectrofotômetro.

Uma possível configuração para compor um espectrofotômetro consiste em uma fonte luminosa, um monocromador (formado por um prisma, ou rede de difração, e por uma fenda), um porta amostras, um detector capaz de realizar a detecção da radiação incidente e um sistema de aquisição de dados capaz de interpretar esse sinal. O esquema de um espectrofotômetro simplificado pode ser visto na Figura 2.

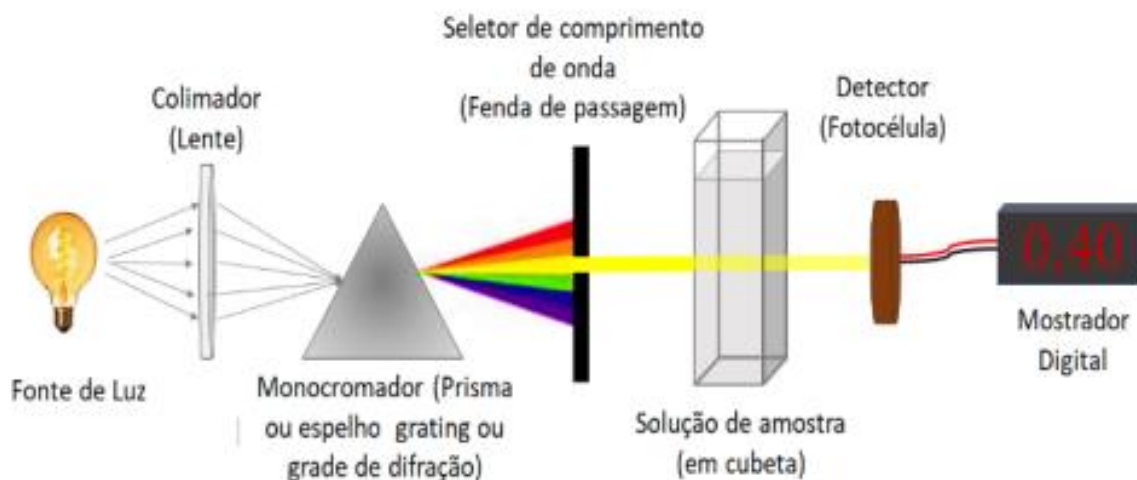


Figura 2: Esquema de funcionamento de um espectrofotômetro.
Fonte: Adaptado de Martinez

Faz parte do escopo do presente trabalho, realizar o estudo e a descrição de um detector espectral acoplado a um sistema de aquisição de dados, permitindo a coleta, monitoramento e análise de dados. Instrumentos como esses propostos, permitem comparar a radiação absorvida ou transmitida por uma solução que contém uma quantidade desconhecida de soluto com uma quantidade conhecida da mesma substância tomada como padrão, gerando resultados que constituirão a persistência de dados e ferramentas para seu processamento e apresentação. Com a transmissão dos dados será possível análise do material e futura catalogação de acordo com essa análise de dados ou padrões de imagem, mesmo remotamente, pois o processamento e armazenamento usará recursos computacionais e de tecnologia da informação para essa finalidade. Considerando essas funcionalidades, apresenta como proposta inicial o desenvolvimento de um sistema computacional baseado em *software* livre de baixo custo para uso em tomada de dados.

Com esse cenário, o estudo de instrumentos relacionados como filtros espectrais, espectrômetros e espectrofotômetros multicanais constitui-se como fundamental nas pesquisas científicas nacionais, constituindo como uma ferramenta versátil que pode ser aplicada em diversas áreas do conhecimento para estudar tanto as propriedades do espectro específico como dos materiais, em especial na área educacional como aqui será proposto. Acrescentando a isso, um estudo detalhado na área de desenvolvimento e sistemas de informações é de fundamental importância para implementação da solução proposta.

1.3 Visão Geral do Sistema Proposto

Para aprimorar a solução, é fundamental implementar um sistema automatizado para adquirir, transmitir e armazenar os dados gerados. Tais funcionalidades são requisitadas em atividades de pesquisa e ensino, pois permite obter dados remotamente para posterior armazenamento, processamento e análise.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias computacionais, a necessidade de explorar novas características de monitorização e controle no desenvolvimento de soluções é altamente desejável, aproveitando soluções atuais como computação ubíqua, IoT, entre outras. Estas características farão parte de uma nova geração em sistemas de aquisição de dados nos laboratórios em diversas áreas do conhecimento.

Sistemas deste tipo podem ser desenvolvidos de maneira simples usando placas de aquisição como microcontroladores e *software* apropriado como por exemplo o *Labview*, *Processing*, entre outros.

O presente projeto tem como objeto de estudo a proposição de um sistema projetado para coletar, processar e armazenar dados obtidos de um sensor que compõe um detector óptico espectral. O objetivo é que tal composição se comporte como uma solução válida para o sistema de baixo consumo de energia e baixo custo.

Para permitir o baixo custo, é desejável o uso de um *hardware* e *software* livre. Além do baixo custo, a filosofia do *software* livre, permite a cópia e adaptação da solução implementada em outras propostas, aproveitando a estrutura desenvolvida na implementação de novas funcionalidades ou aprimoramento da existente. Quanto ao microcontrolador, a plataforma Arduino apresenta-se como excelente opção, devido a inúmeras vantagens, tais como, baixo custo, fácil aquisição, documentação de fácil acesso, inúmeros canais de compartilhamento e colaboração de projetos como suporte a esclarecer eventuais dúvidas que possam surgir e na proposta aqui apresentada a placa que cumpre os requisitos de IoT é o NodeMcu, que usa a IDE (*Integrated Development Environment*) do Arduino para ter o desenvolvimento do *software*.

A proposta inicial é a utilização de um *software* para formatar, mostrar e processar a saída, e analisar a montagem de um possível espectro. O *software* chamado *Processing* se apresenta como boa alternativa por se tratar de *software* livre. Soluções proprietárias como o *Labview*, poderia facilitar o desenvolvimento do sistema uma vez que apresenta suporte ao produto, mas, este apresenta custos mais elevados.

Posteriormente depois de testada a proposta inicial, verificando-se a configuração e formatação dos dados, uma análise de requisitos pode ser aplicada na obtenção de informações para o desenvolvimento de um sistema mais completo, como por exemplo um aplicativo para processar, mostrar e armazenar os dados gerados.

Independentemente da plataforma adotada, para desenvolver um sistema considerando elementos *hardware* e *software*, é preciso obter alguns aspectos, tais como: (OLIVEIRA, 2009)

- Prestação: cumpre os requisitos?
- Tecnologia: alimentação e consumo;
- Custo: dos elementos físicos (sensores, atuadores e controlador);
- Compatibilidade: tanto em *hardware* (por exemplo, compatibilidade com versões anteriores de microprocessador) como *software* (por exemplo possibilidade de reutilizar módulos ou componentes já disponíveis, bem como a sua execução sobre diferentes plataformas);

Assim, o desenvolvimento do projeto computacional apresenta duas estruturas que irão usar protocolos de comunicação. A primeira estrutura que é um microcontrolador, será responsável por automatizar as medidas do sinal a ser analisado, e fazer conversões dos dados desejados, o Arduino foi a plataforma escolhida para essa etapa inicial para programação e depois substituída pelo NodeMCU para etapa de IoT. A segunda estrutura, que é uma aplicação, tem por objetivo receber o sinal obtido e transmitir esses dados para processamento, análise e armazenamento, com a finalidade de facilitar a compreensão e apresentação desses dados e gerar uma formatação para montagem de uma persistência para que eles possam ser analisados por diversas aplicações. O sinal de interesse será gerado pela matriz de fotodiodos e digitalizado pelo microcontrolador, usando o protocolo conhecido como *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), que troca informações de maneira leve e rápida. Um resumo do sistema simplificado pode ser observado na Figura 3.

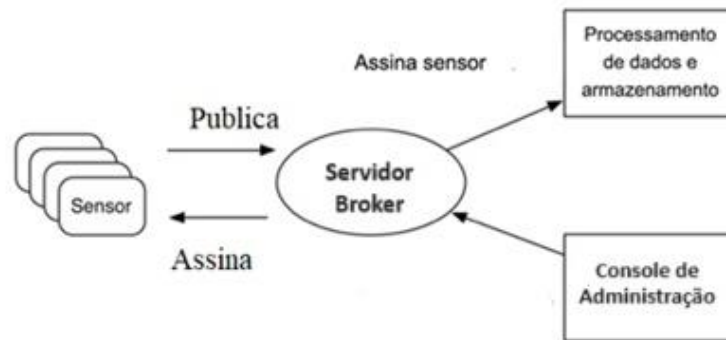


Figura 3: Modelo MQTT de publicação e assinatura para sensores IoT.
Fonte: Traduzido de Yuan (2017).

A aplicação proposta tem como principais funcionalidades visualizar, processar e armazenar os dados obtidos pelo microcontrolador, ou seja, a entrada da aplicação é a saída de dados do microcontrolador. A proposta é que a aplicação seja simples de se usar e adaptável a outros sistemas de aquisição.

Portanto, o desenvolvimento do projeto consiste na construção de um espectrofotômetro multicanal de feixe único na região do visível baseado em soluções de *hardware* e *software*. O estudo na parte de *hardware* é concentrado no uso de instrumentos ópticos, filtros e automação no processo de aquisição de dados. A pesquisa do *software*, envolve análise e desenvolvimento de um *firmware* para controle do *hardware* e a comunicação com o dispositivo que contém a aplicação. E finalmente o desenvolvimento da aplicação em para saída de dados locais e uso de uma ferramenta que pode ser implementada que contempla IoT, com a finalidade de estruturar os dados, mostrar na saída desejada como gráficos e montar uma persistência para que esses dados possam ser usados e manipulados futuramente em ciência dos dados. Um esquema simplificado da proposta pode ser observado na Figura 4.



Figura 4: Esquema das funcionalidades entre o módulo eletrônico e a aplicação.

1.4 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o estudo de um método para projetar e construir um sistema de aquisição e processamento de dados para um detector óptico multiespectral, que quando acoplados possam funcionar como espectrofotômetro, com a finalidade de contribuir no desenvolvimento de soluções autônomas para o monitoramento da radiação eletromagnética, fazendo também parte desse trabalho o estudo dos componentes eletrônicos necessários para a aplicação usando conceitos de IoT. A escolha para esse tipo de detector é que o mesmo pode ser usado multidisciplinarmente em áreas educacionais, contribuindo para a proposta de um instrumento de baixo custo em que seus dados gerados possam ser acessados remotamente.

O estudo tem como foco a análise e desenvolvimento de uma arquitetura de baixo custo, para armazenamento e processamento de dados, desde o projeto da interface adequada para que possa haver conexão do detector espectral (filtro + fotodetectores), microcontrolador e base de dados, verificando as metas a seguir:

- a. Automatizar o processo de aquisição de dados, melhorando a qualidade e diminuindo o tempo gasto na coleta desses dados
- b. Controlar a qualidade de dados para armazenamento, com a finalidade de obter uma base que possa ser utilizada futuramente como consulta, comparação e até mesmo para que sirva de referência para estabelecer padrões no aprendizado de máquinas.
- c. Desenvolver um equipamento que usa técnica analítica que envolve espectroscopia com alta precisão e de baixo custo para uso em laboratórios didáticos e ensino.
- d. Estudar os componentes eletrônicos utilizados.
- e. Estudar e propor as soluções de *software* e *hardware* empregados no sistema.
- f. Desenvolver e analisar uma aplicação de monitoramento acoplado a um detector óptico por meio da integração de diversas plataformas *open source* e da utilização de ferramentas de IoT, permitindo o armazenamento na nuvem e ações baseadas nos dados, bem como a geração de saída dos dados obtidos.

1.5 Estrutura da Dissertação

Este trabalho foi estruturado da seguinte maneira:

- O Capítulo 1 trata da apresentação do trabalho apresentando no início uma contextualização geral do tema, e depois justificando com uma definição e delimitação do escopo a ser abordado, finalizando com os objetivos a serem estudados.
- O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e fundamentação teórica do estudo desenvolvido nas áreas abordadas.
- O Capítulo 3 descreve os procedimentos executados na montagem do detector óptico e seu detalhamento, descrevendo o estudo dos componentes eletrônicos empregados e os artefatos de *software* usados no desenvolvimento da aplicação.
- O Capítulo 4 explana os resultados obtidos os resultados obtidos nas etapas de validação do detector óptico com a aplicação desenvolvida para a tomada de dados.
- O Capítulo 5 mostra conclusão do trabalho em relação as partes estudadas e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Considerando-se tecnologias de leitura e processamento de sinais para laboratórios e automações de diversos tipos em sensoriamento remoto, muito já foi feito, mas com o avanço da microeletrônica e de sistemas computacionais ainda resta uma vasta área para novas soluções, sendo algumas simples e outras complexas e avançadas. Com esse pensamento, tais soluções apresentam grande capacidade de atender uma diversidade de requisitos, como o projeto e desenvolvimento de sistemas com baixo custo, que levaria o estado da arte da tecnologia para um maior número de usuários.

Nesse contexto, a análise de requisitos leva em consideração o intervalo de dados utilizados para a escolha do *software* e *hardware* que podem ser empregados no escopo da solução, considerando-se o custo e sua adaptação que podem ser para uso didático. Com isso é proposta uma solução baseada em um microcontrolador na automação e controle da aquisição de dados e um *software* para supervisão e processamento de saída.

Na sequência, serão introduzidos brevemente os aspectos teóricos iniciais da pesquisa que viabilizaram e direcionaram este trabalho, como os conceitos sobre componentes do conjunto detector, conceitos do microcontrolador envolvendo também componentes eletrônicos do conjunto e soluções de *software* para transmissão de dados, análise e processamento de sinais gerados.

2.1 Sistemas de Espectroscopia – Espectrofotometria

Existem diversas maneiras de se estudar os materiais, e uma delas é interagir a amostra do material com radiação eletromagnética resultando em absorção, espalhamento, reflexão, fluorescência, e outras reações. Um estudo consagrado é verificar a absorção característica de determinado material com uma radiação incidente particular, o que permite determinar a composição química da amostra.

A interação da radiação eletromagnética com o material pode ocorrer em qualquer região do espectro eletromagnético, resultando em distintas formas de resposta, como por exemplo em energias baixas de infravermelho ou micro-ondas fornecem características dos modos vibracionais e rotacionais da molécula. Com aumento da energia, é possível verificar transições eletrônicas das moléculas ou átomos constituintes da amostra (ATKINS, 2006).

A luz visível representada na Figura 5, corresponde a somente uma parte pequena do espectro eletromagnético completo, porém é a única parte que pode ser percebida pelo olho humano. O olho tem três tipos de receptores: vermelho, verde e azul. Baseado na distribuição espectral da intensidade da onda incidente, uma cor primária ou uma mistura dos três estímulos é abstraída mentalmente. Assim, medições mais exatas e seletivas precisam ser executadas pela análise espectral: um processo, em que a faixa inteira da radiação de interesse é separada em seus componentes espectrais e a intensidade de cada componente é medida (VUOLO, 2013).

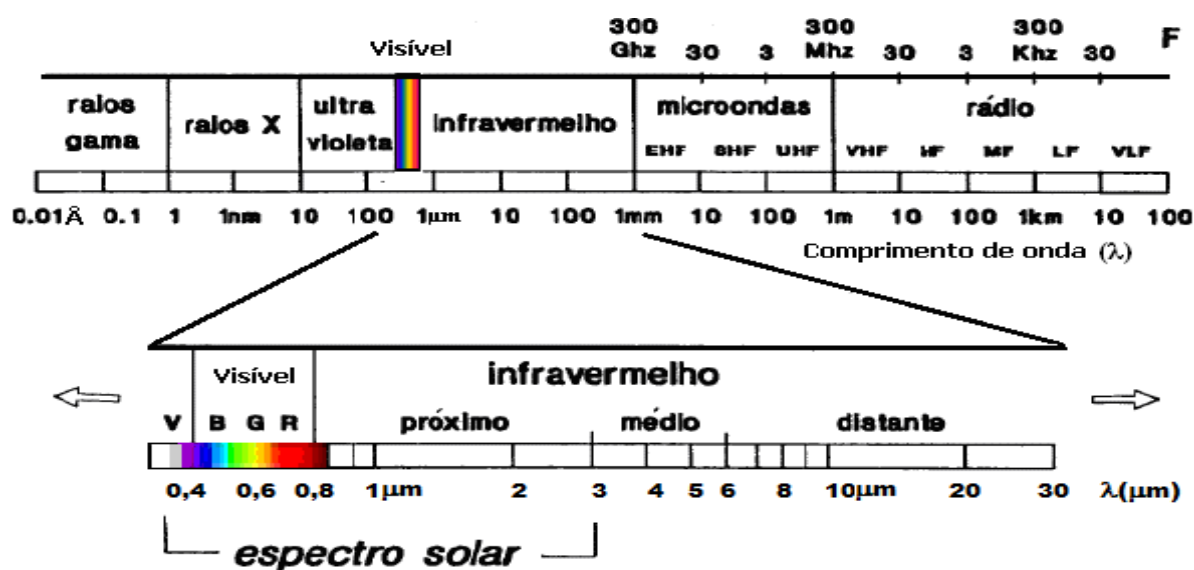


Figura 5: Representação do espectro eletromagnético em função do comprimento de onda e da frequência. Na figura é destacada a faixa de radiação correspondente ao visível entre 0,4 μm a 0,76 μm e o espectro do infravermelho.

Fonte: Apostila de Sensoriamento Remoto – INPE. Disponível em:

[http://www.dpi.inpe.br/Miguel/AlunosPG/Jarvis/SR DPI7.pdf](http://www.dpi.inpe.br/Miguel/AlunosPG/Jarvis/SR_DPI7.pdf) Acesso em 08/04/2021.

A análise do espectro óptico é realizada com frequência para determinar as características químicas dos materiais. Muitas aplicações exigem a análise espectral em comprimentos de onda visíveis (VUOLO, 2013). Se o objeto analisado representar uma fonte ativa de radiação visível, as informações sobre os processos físicos relacionados podem ser extraídas das características espectrais da luz emitida. As aplicações típicas são as análises físico-químicas, tais como a espectroscopia atômica (estudo das linhas espectrais visíveis devido à emissão por isótopos), a astronomia e astrofísica (no estudo de fontes extraterrestres), entre outras.

Por outro lado, alguns objetos não são fontes ativas de radiação visível e, nestes casos, uma fonte luminosa externa calibrada pode ser utilizada. Durante a interação com o objeto, algum dos componentes espectrais da luz incidente são geralmente absorvidos ou refletidos de

maneira diferente em cada material. A análise espectral da luz refletida e transmitida pode revelar informações sobre a composição e sobre os processos específicos aplicados nos objetos envolvidos, como por exemplo a inspeção de defeitos de produtos na indústria por meio da determinação da cor, ou também a análise bioquímica, identificação de nanopartículas, toxinas na água, em aerossóis no ar, em alimentos e dispersão da luz por materiais como líquidos, polímeros, entre outros (VAUGHAN, 1989).

Para executar uma análise espectral, deve-se utilizar um detector seletivo de comprimentos de onda. A parte principal do detector é um elemento que execute temporal ou espacialmente a decomposição da radiação incidente em componentes de banda estreita. Um elemento dispersivo geralmente é usado para esta finalidade. O método é baseado na dependência angular da deflexão dos comprimentos de onda e no resultado específico para um ângulo de refração ou da difração para cada comprimento de onda. Os prismas exibem uma relação não-linear entre o comprimento de onda e o ângulo de refração e não são usados frequentemente em equipamentos avançados. Uma grade de difração consiste em uma placa lisa com muitas linhas ou sulcos paralelos onde um feixe luminoso é difratado. As ondas difratadas interferem entre si e dá forma a um padrão de interferência com uma distribuição angular característica dos componentes espectrais. Em um interferômetro convencional, a seleção do comprimento de onda é executada mudando a diferença do caminho óptico entre dois ou mais feixes que se interferem. De todos os tipos diferentes de interferômetro considerando os Michelson, Fabry-Perot, Fizeau, Mach-Zehnder, entre outros, o filtro de interferência de Fabry-Perot é o mais frequentemente utilizado (HECH, 2002).

Espectrômetros e espectrofotômetros são ferramentas muito utilizada na análise da luz em diversas áreas do conhecimento, como na astronomia, biomedicina e outras. Esses instrumentos medem a quantidade de luz que foi absorvido por uma amostra quando posicionada no caminho de um feixe de luz e um sensor que converte o feixe em sinais elétricos. De uma maneira geral eles basicamente são formados por uma fonte de radiação eletromagnética, dispositivos ópticos, porta amostra, sistema de detecção e sistemas de processamento de sinais. Assim, espectrometria e espectrofotometria são técnicas similares com sutil diferença entre elas que em muitos casos é determinada pela tecnologia dos componentes envolvidos, ou também pela configuração de seus componentes ópticos ou ainda em sua aplicação, sendo exemplo de aplicação mais comum a espectroscopia aplicada para identificar os materiais, em análise espectroscópica. Geralmente uma técnica de espectrometria é feita através da medição da intensidade da luz no seu estado normal, mas a análise é também

muitas vezes feita no estado de polarização. Já a espectrofotometria geralmente usa a comparação de feixe de amostra de luz e de transmissão de referência feixe de luz, a fim de desenvolver um espectro de intensidade resultante.

A fonte de radiação eletromagnética geralmente é uma luz de referência de origem interna ou externa que é projetada sobre a amostra, podendo sofrer interações com absorção ou espalhamento que dará origem a um novo feixe de luz com propriedades diferentes. Esse novo feixe será comparado com o anterior, permitindo a obtenção de informações sobre a estrutura química da amostra.

Em espectrofotômetros com região espectral visível utilizam-se, em grande parte dos casos, lâmpadas de tungstênio-halogênio que emitem radiação na região do vermelho extremo até o ultravioleta próximo (VOGEL, 2008).

O recipiente que contém a amostra a ser analisada é chamado cubeta. Esse recipiente deve ser construído com material que permita a passagem de radiação na região de interesse. Na região do visível, existem diversos materiais que as cubetas podem ser confeccionadas, como o quartzo, de custo elevado, ou materiais de baixo custo como vidro de silicato ou plástico (VOGEL, 2008).

Diversos espectrofotômetros para análise espectral da luz visível estão disponíveis no mercado, e o que irá diferenciar esses equipamentos é a classe de precisão. O parâmetro de comparação para esses dispositivos é o poder de resolução R_d que pode ser definida pela equação (1).

$$R_d = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

Na definição acima, λ representa um comprimento de onda específico e $\Delta\lambda$ é a diferença entre menor comprimento de onda distinguível em o comprimento de onda específico.

2.1.1 Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria

Quando um meio homogêneo é atingido por radiação eletromagnética visível, determinados fenômenos ocorrem. Parte dessa luz sofre reflexão, parte é absorvida pelo meio, parte sofre espalhamento e parte é transmitida. (VOGEL, 2008).

Radiações de determinados comprimentos de onda podem ser absorvidos por uma substância de acordo com sua estrutura molecular. A absorção de radiação ocorre quando um fóton incidente carrega energia equivalente a diferença de energia entre dois estados

eletrônicos, promovendo a transição de um elétron de um estado energético menor para um de maior energia. Os elétrons excitados emitem essa energia na forma de radiação e retornam ao estado inicial (SKOOG et al., 2006). Uma explicação simplificada de um processo sem perdas pode ser vista na Figura 6. Em Figura 6-a uma amostra é incidida por uma radiação com potência P_0 e transmite uma potência P . Para que a absorção ocorra, a energia incidente deve ser equivalente às diferenças mostradas na Figura 6-b. O espectro resultante é mostrado em Figura 6-c.

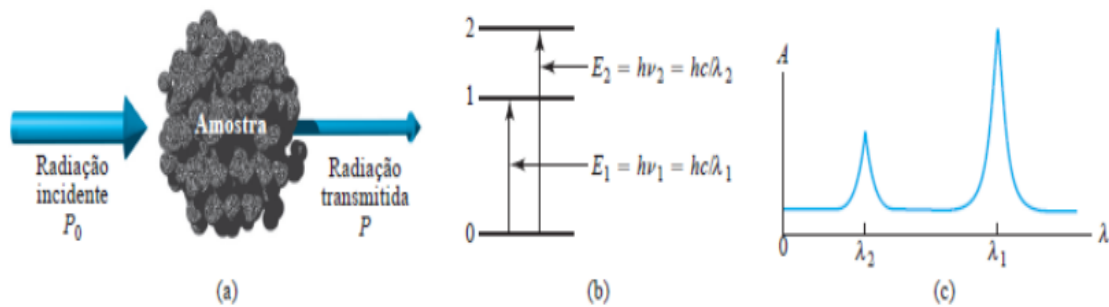


Figura 6: Resumo simplificado de absorção
Fonte: SKOOG, D. A. et al, 2006.

2.1.2 Lei de Beer-Lambert

A lei de Beer-Lambert-Bouguer relaciona quantitativamente a quantidade de radiação que é atenuada devido a concentração das moléculas absorventes e do caminho óptico sobre o qual ocorre a absorção. Conforme a luz atravessa a cubeta contendo a amostra, uma diminuição da intensidade é observada na proporção em que ela é excitada. Quanto maior for o caminho óptico, maior será a atenuação da radiação, pois mais centros absorventes estarão no caminho (HOLLER et al., 2009).

Quando a radiação atravessa determinada amostra de material, então pode-se realizar a razão entre a intensidade do sinal (I) proveniente da amostra sobre a intensidade do sinal referência (I_0). A razão entre esses dois sinais é chamada de transmitância T e representa a quantidade de luz que consegue passar por determinada espessura de um material sem ser absorvida e pode ser escrita pela equação (2).

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

Outra importante informação espectrofotométrica é a absorvância A , que representa o quanto de energia luminosa é absorvida por determinada amostra de material. Pela Lei de Beer-Lambert, a absorvância pode ser escrita conforme equação (3).

$$A = -\log T = -\log \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

A relação entre absorvância A e a concentração de uma determinada amostra pode ser obtida pela Lei de Beer-Lambert, que pode ser escrita conforme equação (4).

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot c \quad (4)$$

Na equação (4), c representa a concentração do soluto na solução analisada, l representa o caminho óptico do feixe dentro da amostra e ε representa a absorvidade molar do material que está sendo analisado.

Os resultados acima são teóricos, podendo a transmitância se calculada pela equação (2) e a absorvância pela equação (3) e (4). Já experimentalmente, para medir a absorvância, o feixe que é transmitido pela solução contendo a amostra deve ser comparado com o feixe que é transmitido pelo solvente, usualmente chamado de branco dos reagentes (HOLLER et al., 2009). Portanto, a relação que corresponde a leitura na prática de absorvância é mostrada na equação (5).

$$A \cong -\log \frac{I_{\text{solução}}}{I_{\text{solvente}}} \quad (5)$$

Na equação (5), $I_{\text{solução}}$ representa o feixe que passa pela solução e I_{solvente} o feixe de Radiação Eletromagnética (REM) que passa pelo solvente.

2.2 Sensores

Sensores são dispositivos que sofrem alterações em suas propriedades quando submetidos a um estímulo físico, gerando um sinal que representa esse estímulo (BASTOS, 2002). Para um bom desempenho é desejável um sensor apresentar características como estabilidade, sensibilidade, precisão e velocidade de resposta (MOREIRA, 2007).

Portanto pelas definições citadas anteriormente, os sensores são dedicados para uma medida específica e cada tipo de sensor responderá a um determinado ou específico estímulo

externo, com a função de transformar esse estímulo do meio externo em algum sinal mensurável. Também nesse contexto, grande parte dos sensores retornam sinais elétricos de corrente ou tensão, que serão lidos por um dispositivo que fazem a conversão do sinal proveniente do sensor, tornando-o interpretável por um *software* ou sistema, que será um dos agentes do estudo no levantamento dos requisitos do sistema proposto.

Um sensor pode ser classificado como ativo e passivo, sendo a principal diferença entre esses dois tipos é de como eles detectam e medem o evento físico em questão. Os sensores passivos não emitem ativamente sua própria energia ou sinal, e sempre irão analisar algum fator do ambiente sem a necessidade de algum tipo de alimentação (WENDLING, 2010). Já os sensores ativos emitem sua energia ou sinal no ambiente, medindo a resposta desse sinal, ou seja, analisam algum tipo de dado que é gerado através de uma fonte externa que utiliza energia.

Quanto aos processos de fabricação e material utilizado, pode-se citar que um dos sensores mais utilizados quanto ao tipo são os sensores semicondutores, em que o material semicondutor mais usado para esse fim é o silício. Grande variedade desses sensores semicondutores são fabricados por processos desenvolvidos para a fabricação de circuitos integrados. O uso dos referidos processos permite a produção de múltiplos sensores de uma única vez, com um único *wafers* de silício, possibilitando que se tenha um custo por produção menor, além de garantir, a princípio, uma certa uniformidade dos dispositivos (SZE, 1994).

2.2.1 Fotodeteção e Sensores Ópticos

No espectro eletromagnético, considerando-se somente o comprimento de onda óptico, então ele é dividido em três faixas: ultravioleta (10 a 390 nanômetro), visível (390 a 760 nanômetro) e infravermelho próximo (760 nanômetros a 1 micrômetro) (HECH, 2002). A luz visível representa uma pequena parte do espectro eletromagnético, sendo a única que pode ser detectada pelo olho humano (SILVA, 2016). Assim, os fotodetectores aqui apresentados serão baseados nessa faixa do espectro.

Os fotodetectores surgiram em 1873 quando Smith estudou a fotocondutividade do selênio, abrindo uma nova perspectiva e, por volta do ano de 1960 em diante, a fotolitografia possibilitou a fabricação de dispositivos para formar imagem de planos focais para o espectro visível, possibilitando uma nova amplitude de aplicações (ROGALSKI, BIELECKI, 2004).

De uma forma ampla, os sensores ópticos transformam a energia da REM (Radiação Eletromagnética) em um sinal elétrico mensurável que pode ser processado por um circuito

associado a ele e posteriormente analisado por um *software*. Existem diferentes processos envolvidos nessa transformação e por esse motivo diferentes montagens e configurações destes fotosensores (TRÄGER, 2012).

A sensibilidade desses dispositivos está relacionada com a menor intensidade de radiação que ele pode detectar. Existem uma diversidade de detectores aplicados na fotodeteção, como os detectores fotocondutores, detectores foto-emissivos, detectores fotovoltaicos como a matriz de fotodiodo *Photodiode Array* (PDA), dispositivos de acoplamento de cargas *Charge Coupled Device* (CCD) e sensores ópticos sensíveis a posição.

Considerando-se a variedade de tipos dos detectores de REM disponíveis, os mais requisitados e empregados são os detectores quânticos. Tais detectores convertem a energia dos fótons incidentes em portadores de carga, por meio de transições eletrônicas em um material semicondutor, como por exemplo os do silício (Si), germânio (Ge), arseneto de gálio (GaAs) e entre outros, produzindo assim um sinal elétrico. (SEDRA & SMITH, 2007; SAYÃO, 2015).

Para um processo de aquisição multicanal, os dispositivos apresentam a vantagem de poder detectar vários comprimentos de onda simultaneamente, tantos quantos forem o seu número de diodos individuais relacionados a uma calibração de acordo com a geometria do dispositivo. Atualmente, a construção dos sensores digitais multicanais de imagem baseia-se nas seguintes tecnologias: dispositivo de carga acoplada CCD, *Complementary Metal Oxide Semiconductors* (CMOS) e PDA.

Na tecnologia CCD, a matriz de fotosensores é confeccionada por uma liga de metal-óxido, similar a um capacitor. Quando iluminados, produzem cargas que são confinadas em poços de potencial. A leitura do arranjo é obtida por meio de transferência destas cargas através dos fotosensores que compõem o sensor. Na saída do CCD, essas cargas são convertidas em valores de tensão que quando processadas podem ser convertidas em unidades ou medidas desejadas. Como vantagem, os CCDs apresentam altíssima sensibilidade, são imunes a ruídos e apresentam alta linearidade, além de apresentar dimensões diminutas, proporcionando a geração de uma imagem de excelente resolução espacial (SKOOG, 2002).

A tecnologia CMOS é semelhante ao CCD, mas com a vantagem de apresentar baixa complexidade tecnológica e menor consumo energético. Como desvantagem, apresenta baixa sensibilidade e menor imunidade a ruído que os CCDs (SKOOG, 2002).

Os PDAs, são arranjos de fotodiodos dispostos de maneira linear. A energia luminosa ao incidir nos fotodiodos gera fotocorrente que é acumulada em capacitores de amostragem. Durante determinado período de leitura, os capacitores de amostragens são conectados a um

circuito integrador e um sinal de tensão proporcional à fotocorrente é gerado. Como vantagens do PDA pode-se citar a alta velocidade de captura de imagem, excelente linearidade, baixo nível de ruído. Como desvantagem, destaca-se a baixa resolução espacial (SKOOG, 2002).

Os CCDs requerem menor quantidade de carga elétrica que o PDA, apresentando maior eficiência na conversão de carga elétrica em tensão, sendo esse dispositivo ideal para detecção de baixos níveis de luz. Já, os PDAs, se torna como dispositivo mais adequado em aplicações em que o nível de luminância é relativamente alto. Além disso, o PDA proporciona um menor ruído quando comparado ao CCD, sendo recomendado o uso do PDA em aplicações onde a precisão de saída é levada em consideração.

Em análise, esses detectores, tanto o CCD quanto o PDA podem ser usados para espectroscopia UV-Visível, podendo ser empregados em variadas aplicações como controle de qualidade, pesquisa e ensino. A Tabela 1 apresenta um breve resumo comparativo dos três detectores: CCD, CMOS e PDA.

Tabela 1: Breve resumo comparativo entre CCD, CMOS e PDA.
Fonte: Autoria própria, após estudo feito em (SKOOG, 2002).

CCD	CMOS	PDA
<p>É formado por uma grade de pixels, sendo que cada pixel possui um fotodiodo que converte luz em carga elétrica, que são então transferidas para um registrador de deslocamento, que lê as cargas e as converte em sinais digitais que podem ser processados em uma imagem.</p> <p>São frequentemente usados em aplicações que exigem alta qualidade de imagem e baixo ruído.</p>	<p>É semelhante a um CCD, pois consiste em uma grade de pixels para capturar a luz, porém usam uma abordagem diferente para converter a luz em sinal elétrico, sendo que cada pixel tem seu próprio amplificador e processador de sinal, o que permite velocidades de leitura mais rápidas e menor consumo de energia do que os CCDs.</p> <p>Geralmente são empregados em aplicações que exigem alta velocidade e baixo consumo de energia.</p>	<p>Usa uma matriz de fotodiodos para converter a luz em um sinal elétrico. Cada fotodiodo detecta luz e produz uma pequena quantidade de corrente, que é então amplificada e processada para produzir uma imagem.</p> <p>Os PDAs são mais simples e baratos em comparação com os CCDs e detectores CMOS, mas podem apresentar uma qualidade de imagem inferior.</p>

A proposta deste trabalho é o uso de um detector que opera usando fotodiodos (PDs) em forma de PDA. A escolha pelo uso do PDA é devido ao seu baixo custo e a possibilidade de adquirir um espectro sem distorções em poucos milissegundos, além da possibilidade de medir comprimentos de onda de alta repetibilidade onde essa repetibilidade é limitada apenas pela

geometria do detector, ou seja, com boa precisão de saída, podendo usar o conjunto todo para obter o espectro e isolar medidas em um ou conjunto de fotodiodos para medir a absorvância em uma medida direta.

2.2.2 Fotodiodos

O tipo de sensor utilizado no presente trabalho é óptico constituído de uma malha de fotodiodos que pode ser formada por um conjunto que variam de 64 até 1024 fotodiodos de acordo com a finalidade assim como o comprimento da radiação de acordo com o modelo escolhido.

Quando uma luz policromática é lançada a uma grade de difração, então se tem o espectro da luz. Com o dispositivo constituído pela matriz de fotodiodos, é possível coletar todo espectro de uma única vez com ajuda de um microcontrolador, que pode facilmente controlar esse processo.

Esses dispositivos podem ser ligados em série ou paralelo de acordo com o tipo de leitura que se quer fazer. O funcionamento do dispositivo se baseia em um pulso de início e uma sequência de pulso de *clock*, que gerará um sinal que será programada como um laço e cada passagem terá um armazenamento em um capacitor. Portanto, com um sinal de luz transformado em corrente elétrica que será armazenado pelo capacitor.

Um fotodiodo funciona como um diodo inversamente polarizado, formado por semicondutores dopados, em geral do mesmo material, formando uma junção do tipo (pn) que é uma zona de transição entre as duas regiões (*p* e *n*). As duas partes do fotodiodo apresentam condutividade elétrica dominada por portadores de carga do tipo-n (elétrons) em uma parte do dispositivo e na outra região dominada por portadores de carga positiva tipo-p (lacunas, cargas positivas) (SEDRA & SMITH, 2007; SAYÃO,2015).

A região de depleção se forma, pois as lacunas que se difundem através da junção para dentro da região tipo-n rapidamente se recombinam com elétrons majoritários ali presentes e, portanto, deixam de atuar. O processo de recombinação resulta no desaparecimento de alguns elétrons livres do material tipo-n. Assim, algumas cargas de ligações positivas na estrutura não serão mais neutralizadas pelos elétrons livres, e se afirma que esta carga está descoberta. Como a recombinação acontece próxima à junção, haverá uma região que estará depletada de elétrons livres e conterá cargas fixas de sinal positivo. Os elétrons que se difundem pela junção para dentro da região tipo-p se recombinam com algumas lacunas ali presentes e, desaparecem

saindo de cena. Isso resulta também no desaparecimento de algumas lacunas majoritárias do material tipo-p, fazendo com que algumas cargas fixas negativas estejam descobertas, isto é não são mais neutralizadas eletricamente por lacunas. Dessa forma no material tipo-p próximo da junção haverá uma região depletada de lacunas contendo cargas fixas negativas descobertas, conforme ilustra a Figura 7 (SEDRA & SMITH, 2007).

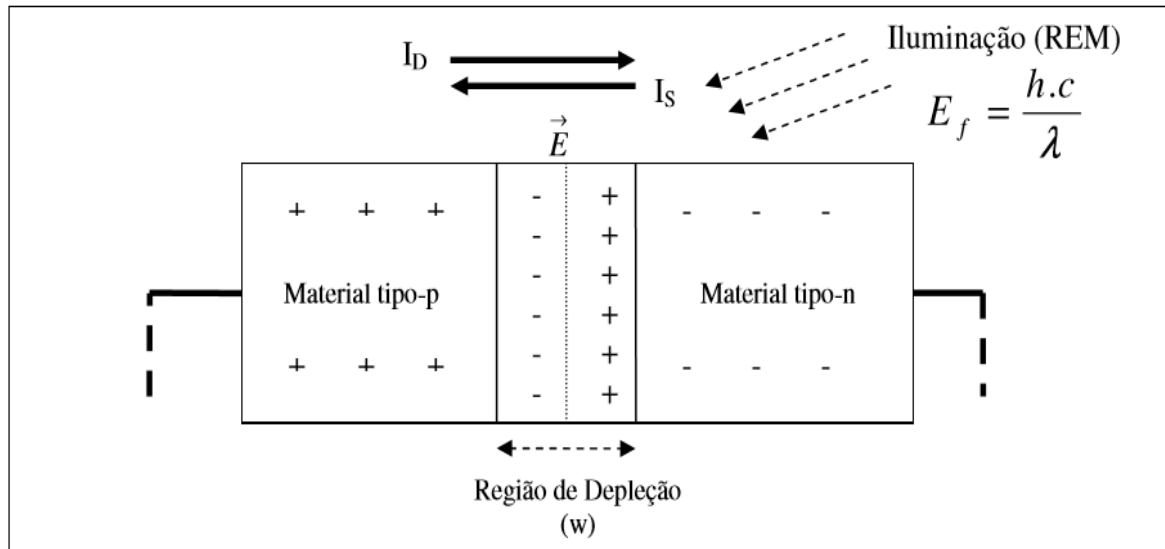


Figura 7: Ilustração de um diodo em polarização inversa. I_D é a corrente de difusão e I_S a corrente de deriva que passa a ser chamada de foto-corrente quando a região w é iluminada

Fonte: SEDRA & SMITH, 2007.

Quando os fótons incidem na região de junção (w) causam a quebra das ligações covalentes, gerando um par elétron (-) lacuna (+) na região de depleção (w). O princípio fundamental da detecção óptica é a absorção, pois quando um feixe de luz incide em um semiconductor, ele pode ser absorvido ou não, dependendo do seu comprimento de onda. Se a energia do fóton for superior à energia de banda do semiconductor então ele é absorvido formando um par elétron-lacuna. Se a (E_G), que é a energia de gap, for a energia de banda do semiconductor, então o comprimento de onda máximo (λ_c) absorvido pelo mesmo pode ser calculado pela equação (6), onde h é a constante de Planck e c a velocidade da luz no vácuo.

$$\lambda_c = \frac{h.c}{E_G} \quad (6)$$

Uma relação útil para se obter λ_c em nanômetros, temos abaixo na equação (7):

$$\lambda_c = \frac{1,24}{E_G(eV)} \quad (7)$$

A Tabela 2 compara alguns comprimentos de onda máximos para alguns elementos semicondutores:

Tabela 2: Relação entre energia de banda e comprimento de onda para alguns semicondutores.
Fonte: Silva (2016).

	Ge	InGaAs	Si	GaAs
E_G (eV)	0,67	0,75	1,11	1,43
λ_c (μm)	1,85	1,65	1,13	0,87

2.3 O Filtro de Interferência Variável

Um filtro óptico de interferência (FI) pode ser descrito como um dispositivo formado por multicamadas periódicas de materiais com índices de refração diferentes intercalados. O objetivo desse dispositivo é decompor o feixe de radiação eletromagnética policromática em feixes monocromáticos. O FI funciona como um ressonador óptico, o qual confina certos comprimentos de onda da REM e opera como um sistema óptico de transmissão com realimentação. Desta forma uma onda pode refletir repetidamente no interior do sistema sem escapar, ou seja, se a onda eletromagnética possuir uma amplitude dentro da faixa do chamado *band-gap* do meio periódico ela será extinta. Um ressonador simples que é composto por dois refletores paralelos entre os quais a onda eletromagnética é refletida e transmitida com pequenas perdas é conhecido como ressonador de Fabry-Perot, que pode ser visto com mais detalhes na Figura 8. (REITZ, *et al.*, 1982; SAYÃO, 2015).

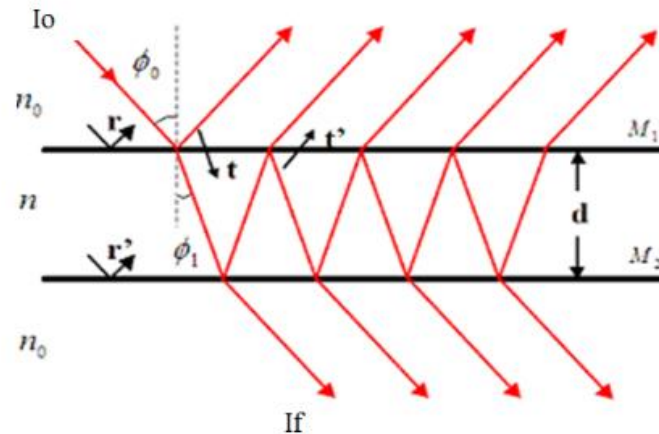


Figura 8: Ilustração de uma onda plana através de um meio periódico que forma um Ressonador de Fabry-Perot com espelhos plano-paralelos, assumindo que não há absorção, onde: (n e n_0) índices de refração de cada meio; (ϕ_0) ângulo de incidência do feixe; (ϕ_1) ângulo do feixe transmitido; (I_o e I_f) amplitude do feixe incidente e transmitido; (r e r') coeficiente de reflexão das interfaces, (d) distância entre os semi-espelhos; (t e t') coeficiente de transmissão da interface.

Fonte: Adaptado Silva (2010).

O projeto para obtenção de um Filtro de Interferência Variável (FIV) que cubra e atenda o espectro do visível (VIS) e ultravioleta (UV), será um filtro que apresente características de um FI espectral ao longo do filtro multicamadas depositado sobre um substrato. Desta forma o FIV será obtido inserindo-se seletivamente um defeito no FI que provocará essa característica óptica desejada em amplo espectro seletivamente, em um único filtro, monoliticamente, como descrito por Silva (2010,2016).

Entre as camadas, o *band-gap* (intervalo de energia) do meio pode ser encarado como um resultado da simetria translacional discreta dos meios periódicos em relação a onda eletromagnética (Silva, 2010). A propagação de determinados comprimentos de onda dentro do *band-gap* do meio periódico, são do tipo evanescentes assim elas são atenuadas exponencialmente em sua amplitude até serem extintas.

Assim, o FIV incorpora uma camada ressonante de Fabry-Perot, inclinada em seu interior, que produz um efeito multicanal, com um valor relativamente alto de canais em um pequeno espaço do filtro, possibilitando diversas funcionalidades.

Com o uso do FIV, será possível a análise da interação simplificada de uma onda monocromática de incidência normal e oblíqua em uma fronteira simples, definida como a interface entre dois meios com índices de refração diferentes. As equações para derivar a refletância, transmitância de um filme fino depositado sobre um substrato já foi demonstrado

nos trabalhos de Silva (2010, 2016) e Sayão (2015), e permite derivar a expressão que descreve a interação entre uma onda monocromática e um conjunto de filmes finos ou películas, uma pilha de filmes ou um sistema multicamadas. Não está no escopo desse trabalho a representação matemática descrita, pois já foi demonstrada pelos pesquisadores citados.

Neste trabalho será usado um filtro óptico que foi previamente projetado e depositado por Silva (2016), em uma evaporadora Balzer PLS 500 por processo de E-Beam, com o uso da máscara mecânica sobre um substrato de vidro comum, com multicamadas de SiO_2 e de TiO_2 . Na deposição de filtro foi usado o processo de fabricação PVD (*Physical Vapor Deposition*) com os métodos de evaporação por elétron e evaporação térmica.

Durante a deposição das camadas de filme na construção do FIV, Silva (2010) propôs em seu trabalho uma metodologia para explorar as características de não homogeneidade em deposições com a evaporadora Balzer PLS 500, explorando a posição do substrato na evaporadora e adaptando na câmara de deposição da evaporadora uma máscara mecânica curva, possibilitando a construção de filtros ópticos não homogêneos com camadas inclinadas. Associado a isso está o uso de uma máscara mecânica curva que permite a construção dos FIVs com uma cavidade ressonante de Fabry-Perot em forma de uma rampa inclinada (Sayão, 2015). A Figura 9 mostra um esquema do FIV com camadas inclinadas.

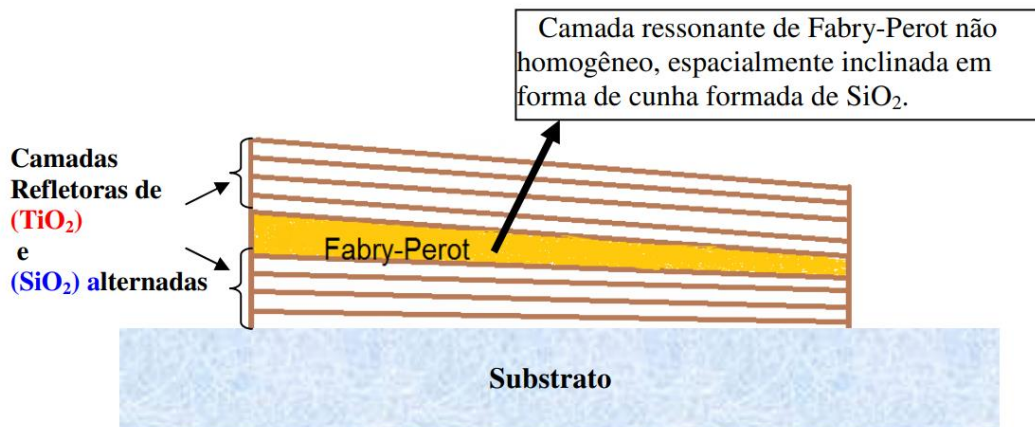


Figura 9: Esquema representativo em corte transversal da estrutura física de um FIV com camadas inclinadas, salientando principalmente a cavidade ressonante de Fabry-Perot em forma de cunha.

Fonte: Sayão (2015).

Com essa nova geometria, o FIV apresentará características ópticas espectrais peculiares que mudam ou variam ao longo de uma de suas dimensões ao longo da inclinação provocada, o que provoca seletividade variável dos picos de transmissão. Estudo dos processos

de fabricação, simulação e caracterização de um FIV foram abordados exhaustivamente nos trabalhos de Silva (2010, 2016) e Sayão (2015). É possível observar na imagem do FIV um gradiente de cores, referente ao processo de reflexão da imagem pela Figura 10. Este gradiente já dá uma indicação variabilidade das propriedades espectrais ao longo do filme.



Figura 10: Imagem do gradiente de cores no FIV.

A resposta espectral dependerá fundamentalmente do *gap* e de características intrínsecas da deposição empregada, da camada ressonante de Fabry-Perot e das outras camadas, determinarão o valor do pico de transmissão do sistema de multicamadas do filtro. Porém a largura espectral a meia altura, a seletividade do feixe transmitido ao sistema detector, dependerá da refletividade do filtro óptico como um todo (Sayão,2015; Silva, 2016). Na impossibilidade de executar o projeto de deposição, o uso de *softwares* simuladores como a versão livre do *software Open Filters* pode ser utilizado para simular o projeto do filtro variando os parâmetros acima em destaque.

2.4 Sistema de Aquisição de Dados

Quando se fala em sistema de aquisição de dados, pode-se entender como a combinação de um elemento sensor, um dispositivo de aquisição de dados e um computador, ou também de maneira mais genérica como um processo que adquire grandezas físicas de objetos em estudo.

A montagem dos sistemas de aquisição de dados depende diretamente da aplicação deles, que será definida na análise de requisitos de sistema. Os sistemas de aquisição de dados também são denominados de *Data Aquisition* (DAQ) ou *Data Acquisition Systems* (DAS). A

Figura 11 nos mostra um possível esquema de um DAQ.



Figura 11: Representação de um possível Sistema de Aquisição de Dados.

Fonte: National Instruments, National Instruments. Disponível em: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>. Acesso em 20 março 2021.

Uma vez que essas grandezas apresentam energia, então torna-se necessário para a sua medição dispositivos como sensores que convertem grandezas físicas em elétricas e microcontroladores para conversão desta energia a um formato digital para posterior visualização, armazenamento, processamento e análise.

Microcontroladores são dispositivos eletrônicos compostos por uma Unidade Central de Processamento-*Central Processing Unit* (CPU), uma Unidade Lógica Aritmética (ALU), dispositivos de entrada e saída, periféricos para comunicação serial e osciladores, ao contrário dos microprocessadores de uso geral, normalmente dedicados a projetos de computadores com periféricos de entrada e saída como teclado, mouse e monitor. As aplicações de microcontroladores, inicialmente incipientes e voltadas para a indústria, começaram a se propagar nas diversas áreas de atividade humana.

As funcionalidades agregadas aos microcontroladores inicialmente se resumiam a interfaces de entrada e saída (I/O) e foram agregando, a cada nova versão ou produto, memória do tipo *Random Access Memory* (RAM), memória (EPROM) para programas e dados e circuito de oscilador (*clock*), interfaces de comunicação (serial, USB) e, mais recentemente, interfaces de rede, *Ethernet*, *WiFi* e *Bluetooth*. A Figura 12 exhibe a arquitetura básica de um microcontrolador.

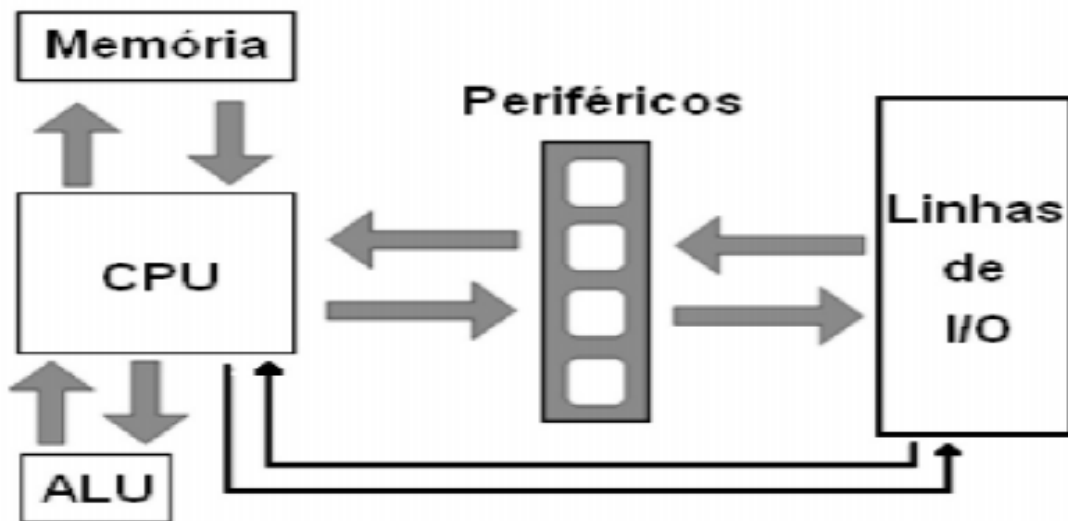


Figura 12: Arquitetura Básica de um Microcontrolador.

O primeiro microcontrolador foi desenvolvido em 1971 pela Texas Instruments e era chamado de TMS 1000, com 4 bits e *Read Only Memory* (ROM) e RAM incorporados. Ele foi utilizado internamente pela empresa em suas calculadoras de 1972 a 1974. A partir de 1974 ele foi disponibilizado para venda as indústrias eletrônicas em diferentes configurações de tamanho de ROM e RAM.

Em 1980 a Intel desenvolveu o 8051, iniciando uma revolução na eletrônica, tornando esse modelo um dos mais populares e um dos projetos eletrônicos mais duradouro da história. Nos anos 90 os microcontroladores já apresentavam memórias ROM voláteis, e programáveis. Assim eles poderiam ser programados, apagados e reprogramados usando sinais elétricos, dispensando uma programação especializada para determinado fim, o que tornava o processo mais caro. Atualmente existem diversos modelos de microcontroladores para aquisição de dados com preços interessantes, sendo a mais conhecida o Arduino.

2.5 Conceitos de IoT

IoT não é só conectar as “coisas” pela Internet, mas também as tornar inteligentes, capazes de gerar dados e processar informações do ambiente, ou das redes às quais estão conectadas. Ela transforma objetos tradicionais em inteligentes explorando suas tecnologias, computação onipresente, dispositivos embarcados, tecnologias de comunicação, redes de sensores, protocolos e aplicação da internet (Oliveira, 2017).

É importante ressaltar que, a *Internet of Things* se refere à integração de objetos físicos e virtuais em redes conectadas à Internet, permitindo que “coisas” colem, troquem e armazenem informações a respeito do meio que estão inseridas, isso implica em uma enorme quantidade de dados gerados, em que uma vez processados e analisados, geram informações e serviços em escala inimaginável. (Jefferson Robert, 2018).

O fluxo de dados nesse contexto pode ser entendido como a lista a seguir na ordem em que é apresentada, que aponta a transformação dos dados de um objeto inteligente para os consumidores finais (MOON, 2016):

- Sensores em máquinas: sensores “sentem” o entorno do ambiente e coletam dados. Ex.: Smartphones, roteadores, sensores e afins;
- Centro de dados: os dados transportados a partir das máquinas conectadas são armazenados e analisados por meio de computação em nuvem;
- Aplicação: aplicações controlam os dados analisado e fornecem serviços ao usuário final;
- Consumidor: Por fim, o usuário compartilha informações úteis com serviços e outras pessoas.

O IoT utiliza a Internet para enviar dados e estabelecer a comunicação dos dispositivos na rede, e para isso, necessita de protocolos para essa troca de dados.

Existem vários protocolos propostos para M2M (*machine-to-machine*), que possibilita a comunicação os dispositivos. Dentre eles, o destaque é o MQTT, muito leve e implementável nos mais diversos dispositivos. *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) e *Hyper Text Transfer Protocol Secure* (HTTPS) que possuem bibliotecas para as principais linguagens de programação do mercado e são similares, sendo que a diferença entre eles está na segurança de acesso e dados, sendo o HTTPS mais adequado. Foi definido inicialmente na RFC 2068 em sua versão HTTP/1.0. É um protocolo utilizado principalmente para navegar entre páginas da web e também usado para comunicação M2M.

2.6 Projeto Arduino

O projeto Arduino é composta de uma placa eletrônica que é o *hardware* e de um ambiente de desenvolvimento considerado o *software*, para criação dos projetos pelos usuários. É também uma plataforma de desenvolvimento *open source hardware* (OSHW), também chamado de *hardware* livre, baseado em uma placa de microcontrolador simples, geralmente

controladores da marca ATmega que pode ser associada ao conceito de *physical computing*, ou seja, ao conceito da criação de sistemas físicos, através de *hardware* e *software* que interagem e respondem às entradas do mundo físico. Foi desenvolvido na Itália em 2005 objetivando oferecer uma plataforma de prototipagem eletrônica de baixo custo e de fácil manuseio por qualquer pessoa interessada em criar projetos com objetos e ambientes interativos (ARDUINO, 2011).

A plataforma basicamente consiste em uma plataforma de microcontrolador de código aberto e linguagem de programação que pode ser dividida em três partes principais: estruturas, valores (variáveis e constantes) e funções, com as seguintes funções básicas e obrigatórias:

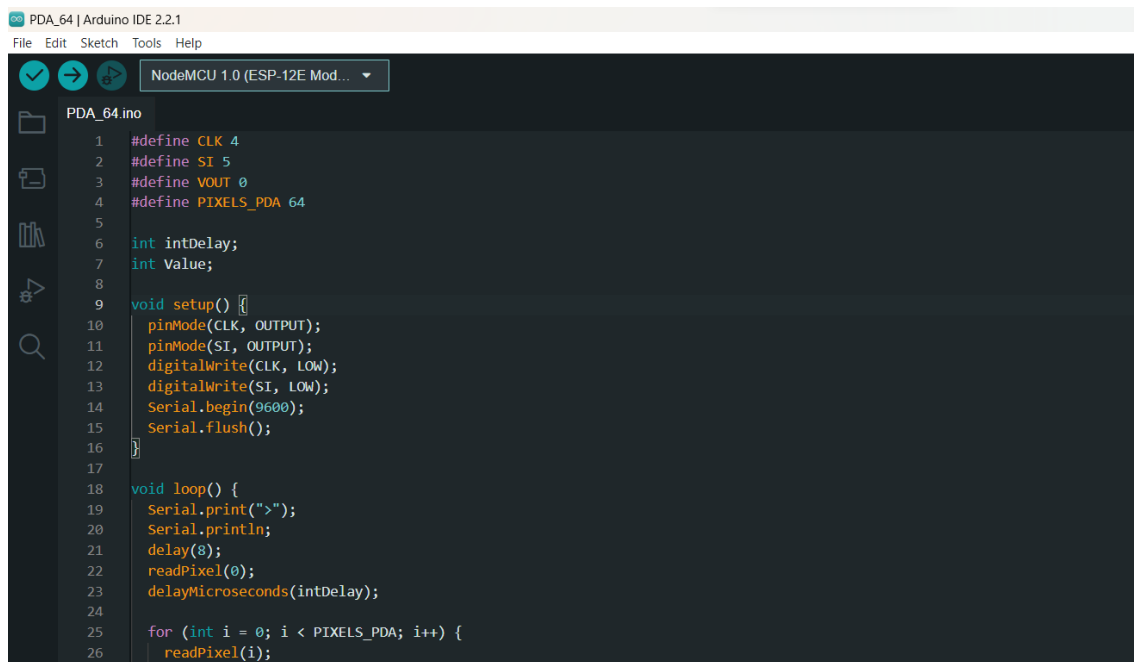
- **setup**, que ocorre uma única vez e é usada, normalmente, para a inicialização das variáveis;
- **loop**, onde ficam toda instrução que irá se repetir indefinidamente;

A plataforma apresenta licença em filosofias de *software* e *hardware* livres, o tornando um excelente dispositivo de baixo custo para o gerenciamento automatizado em sistemas de aquisição de dados para sensores de entradas e saídas de dados. A praticidade e facilidade de adicionar placas de expansão, as *shields* é uma grande vantagem face a outras opções.

Existem vários modelos de placas, tais como: Arduino UNO, Arduino Mega 2560, Arduino Mega ADK, Arduino Leonardo, Arduino Due. O que vai diferenciá-los é o microcontrolador e o número de portas seriais e digitais que são disponibilizadas.

O Arduino pode ser definido como um pequeno computador que pode ser programado para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. (MCROBERTS, 2011). O Arduino pode ser conectado a um ou mais *Light Emitting Diode* (LED), botões, interruptores, motores, sensores de temperatura, sensores de pressão, sensores de distância, receptores *Global Positioning System* (GPS), módulos Ethernet ou algum outro dispositivo que emita dados ou possa ser controlado. A figura 8 representa uma placa Arduino modelo Due.

O espaço para programação da placa Arduino ou *Integrated Development Environment* (IDE) é desenvolvido em Java, o que significa a portabilidade do mesmo código para sistemas operacionais distintos. A Figura 13 representa a IDE básica do Arduino e seu menu de configurações e desenvolvimento.



```

PDA_64.ino
1  #define CLK 4
2  #define SI 5
3  #define VOUT 0
4  #define PIXELS_PDA 64
5
6  int intDelay;
7  int value;
8
9  void setup() {
10     pinMode(CLK, OUTPUT);
11     pinMode(SI, OUTPUT);
12     digitalWrite(CLK, LOW);
13     digitalWrite(SI, LOW);
14     Serial.begin(9600);
15     Serial.flush();
16 }
17
18 void loop() {
19     Serial.print(">");
20     Serial.println();
21     delay(0);
22     readPixel(0);
23     delayMicroseconds(intDelay);
24
25     for (int i = 0; i < PIXELS_PDA; i++) {
26         readPixel(i);

```

Figura 13: Captura de tela com a IDE do Arduino e as duas funções básicas.

Esse ambiente de programação tem como origem os projetos *Processing* e *Wiring* o que permite a visualização gráfica em tempo real e inclui um editor de código fonte livre, com identificação automática proporcionando compilar e fazer o upload do código para a placa com uma única ação. Ela foi projetada para facilitar o aprendizado de programação por pessoas não familiarizadas com desenvolvimento computacional.

A plataforma permite a leitura vários sensores integrados, tanto digitais como analógicos, podendo também de acordo com o conhecimento agregar sensores através da multiplexação. O Arduino por si só não apresenta recursos para apresentação gráfica dos dados processados, usando mais comumente para isso o *software* Processing. Os dados lidos, conforme programações do *software* podem ser tratadas em planilhas eletrônicas ou transmitidos para processamento em sistemas de dispositivos móveis ou outra arquitetura de sistemas computacionais, nas quais pode ser realizada a análise das informações.

Cabe o destaque de alguns componentes que serão mais detalhados devido a sua importância ao projeto, como os pinos digitais e analógicos presentes na plataforma.

Os pinos digitais podem ser configurados como entrada ou saída. Por default, as placas Arduino vêm com os pinos configurados como entradas, porém pode ser alterada pela função `pinMode()`. A sintaxe dessa função é dada por `pinMode` (Arduino, 2011). O uso no modo de entrada, os pinos apresentam alta impedância, sendo possível, portanto, ler sinais provenientes de sensores e outros dispositivos. Para realizar a leitura dos pinos digitais a função `digitalRead()` é utilizada, retornando os valores 1 (high) ou 0 (low).

Também é possível utilizar os pinos digitais para exercer alguns controles quando colocados no modo output. Os pinos conseguem fornecer uma corrente significativa em torno de 40 mA ou mais, podendo controlar alguns dispositivos. A função que permite colocar as saídas dos pinos digitais em high ou low é a `digitalWrite` (pino, valor).

Os pinos analógicos podem fazer a leitura dos sinais usando a função `analogRead()`. Os sinais analógicos são convertidos em digitais por um conversor analógico-digital – *Analog to Digital Converter* (ADC). A maioria das placas têm conversores com 10 bits de resolução, podendo retornar inteiros entre 0 e 1023. Essa conversão é de fundamental importância para o projeto e será descrito com mais detalhes.

2.6.1 Conversão Analógico Digital

A interpretação de sinais analógicos é de fundamental importância em diversas aplicações e soluções de problemas. Muitos sensores geram sinais analógicos e o uso desse sinal nem sempre é possível, sendo necessário converter esse sinal digital usando um conversor ADC. Em uma etapa posterior a instrumentação analógica envolve a digitalização do sinal. A representação da Figura 14 mostra que digitalizar significa transformar o domínio contínuo em discreto. O processamento do sinal digital a partir de um analógico na maioria dos procedimentos é gerado em duas etapas, sendo a transdução do sinal que é a captação do sinal e transdução para forma elétrica e a digitalização.

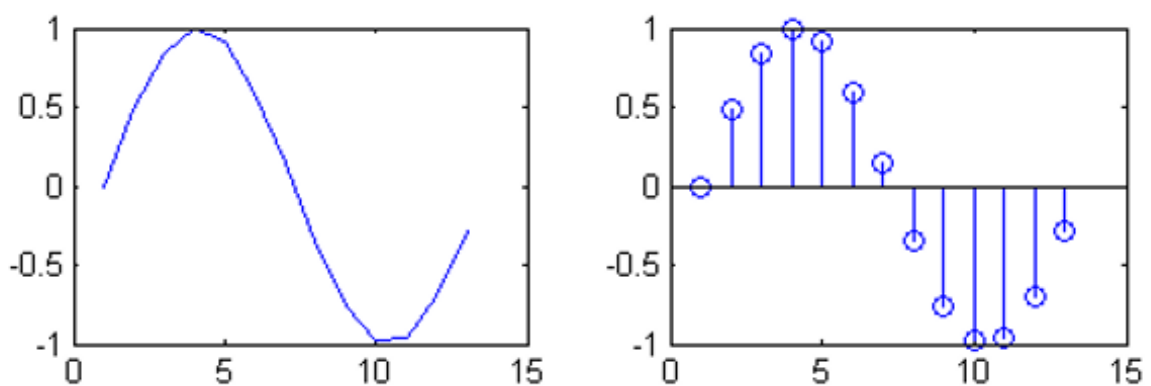


Figura 14: Representação do efeito causado no sinal de digitalização.

O ADC é um dispositivo eletrônico capaz de converter uma grandeza analógica em uma representação digital. Estes conversores são extremamente úteis na interface entre dispositivos

digitais e analógicos, e são muito utilizados na leitura de sensores.

A conversão de um sinal analógico em digital, basicamente consiste em decompor o primeiro em partes, que são números inteiros que representam um intervalo do sinal analógico. A Figura 15 mostra de maneira simplificada o processo de decomposição do sinal analógico em digital.

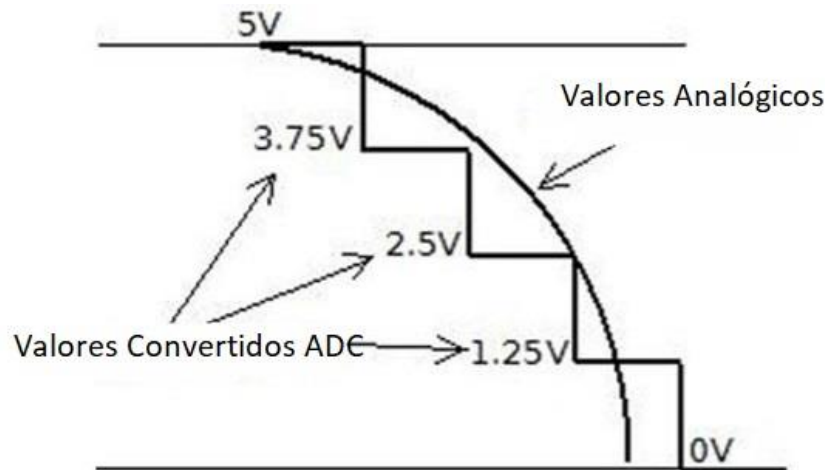


Figura 15: Esquema de conversão de um sinal analógico em digital.

Fonte: Disponível em: <https://tronixstuff.com/2013/12/12/arduino-tutorials-chapter-22-aref-pin/>, acesso em 02/03/2020

O que se tem são dois sinais de referência usados aqui com as nomenclaturas de V_{menor} e V_{maior} . No Arduino, usa-se por default a referência inferior $V_{menor} = 0\text{ V}$ e superior $V_{maior} = 5\text{ V}$. No Arduino o ADC de referência são 10 bits, portanto 1024 intervalos de medida em 5V para modelos mais básicos como o Uno e Mega e podendo chegar 12 bits em 3.3 V para modelos como o Due.

Quanto maior o número de bits de um ADC, maior o número de inteiros que podem ser usados para decompor o sinal original, e, portanto, maior a resolução possível na medida. A equação pode ser mais bem visualizada abaixo:

$$\Delta V = \frac{V_{maior} - V_{menor}}{2^n} \quad (7)$$

No modelo Arduino Mega que será usado no projeto, tem-se, portanto, uma resolução de, aproximadamente, 0,0049 V para $V_{maior} = 5\text{ V}$ e $V_{menor} = 0\text{ V}$. Sinais de tensão que apresentam diferenças menores que 0,0049 V não serão interpretados pelo ADC e, portanto haverá um intervalo de medida no qual o valor de saída permanece constante.

No caso representado pela figura 10, o conversor apresenta $n=2$ bits, portanto 4 valores

numéricos possíveis de saída (0 a 3). Os intervalos de medida serão de 1,25 V, o que significa que todos os valores de tensão entre 0 V e 1,25 V irão retornar o valor numérico 0, todos os valores entre 1,25 V e 2,5 V irão retornar o valor numérico 1, e assim por diante, como representados na Figura.

Para melhorar a resolução de uma medida com o Arduino, é possível utilizar uma função chamada de `analogReference()`. Tal função permite alterar o limite superior de referência V_{ref} para valores contidos entre 1,1 V e 5 V.

Existem algumas opções internas da placa Arduino, como `DEFAULT`, `INTERNAL`, `INTERNAL1V1` e `INTERNAL2V56`. Os modos `INTERNAL` e `INTERNAL1V1` presentes somente no Arduino Mega, permitem que se use a referência de 1,1 V. Já a de `INTERNAL2V56` também do Modelo Mega, permite que a referência superior seja de 2,56 V. O tipo de referência `DEFAULT` é a referência padrão usadas nas placas. Para a maioria delas esse valor é de 5 V, porém, nas placas como o Due e Zero essa tensão é, na verdade, de 3,3 V, já que elas utilizam essa tensão como tensão de operação (Arduino, 2011).

Além disso, pode-se utilizar o modo `EXTERNAL`, no qual se usa o pino de referência `AREF`, sendo possível colocar uma tensão de referência entre 0 V e 5 V que se deseje utilizar. Valores de tensão abaixo de 0 V ou acima de 5 V podem danificar o pino de referência, portanto o usuário precisa tomar muito cuidado com as tensões que for utilizar.

Conforme especificações da plataforma, a conversão do sinal analógico para digital não é instantânea, sendo necessário um tempo de 100 μ s (microsegundos) para efetuar a leitura de um pino analógico, o que corresponde uma taxa máxima de 10000 amostragens por segundo.

2.6.2 O Módulo ESP8266

O módulo ESP8266 é um microcontrolador da empresa Espressif (OLIVEIRA, 2017) que possui a capacidade de se conectar a uma rede WiFi e pode atuar como uma aplicação onde ele não precisa de nenhum outro componente para funcionar ou como um servidor escravo MCU (*Microcontroller Unit*). Na segunda condição ele funciona como um adaptador WiFi para outro microcontrolador, como por exemplo o Arduino.

Ele pode funcionar em duas configurações, são elas: *access point* e *client*. Na primeira, ele funciona basicamente como um roteador, criando uma rede WiFi restrita por login e senha. Neste modo o ESP8266 cria um servidor com IP (Internet Protocol) que pode conter uma aplicação web com informações dos componentes conectados ao ESP8266. Como *client*, ele

estabelece uma conexão com a rede WiFi escolhida, uma vez conectado também cria um servidor e todos os dispositivos conectados na mesma rede WiFi que o ESP8266 têm acesso a este servidor pelo endereço de IP. Este servidor também pode conter uma página web e seu IP também pode ser aleatório ou predefinido na programação. Também é possível uma terceira configuração e fazer o ESP8266 trabalhar simultaneamente como *access point* e *client* (ŠKRABA,A. et al, 2016).

2.6.3 Placa de desenvolvimento NodeMCU

O NodeMCU é uma placa de desenvolvimento baseada no módulo WiFi ESP8266 com *firmware* de código aberto, permitindo que os desenvolvedores o programem facilmente usando a IDE do projeto Arduino. Sua utilização é focada especificamente na conectividade WiFi e é mais adequado para projetos que exigem comunicação sem fio e possui suporte integrado para MQTT, que é um protocolo de mensagens popular usado em aplicativos IoT.

Ele surgiu logo após o lançamento do ESP8266, sendo lançado com o intuito de ser uma placa para desenvolvimento de projetos de caráter IoT. Outra grande vantagem deve-se ao fato de apresentar uma interface USB-serial acoplada, o que facilita tanto a parte de alimentação do microcontrolador, como a parte de transmissão do programa escrito do computador para a placa. O NodeMCU pode ser programado através de scripts escritos na linguagem LUA, ou pode ser programado através da linguagem C++ , pela própria IDE do arduino, como foi realizado no presente trabalho (OLIVEIRA, 2017).

3. Materiais e Métodos

Este trabalho apresenta característica experimental e qualitativa, e foi baseado em uma metodologia dividida em etapas. Em uma primeira etapa, na pesquisa envolvida, foram levantados requisitos necessários para aquisição e tratamento de dados provenientes de sensores que produzem uma tensão elétrica, com a finalidade de estudar parâmetros no desenvolvimento de um espectrofotômetro. Ainda nesta etapa inicial, o objetivo principal é o levantamento de requisitos necessários para a construção do sistema de aquisição de dados proveniente do aparato montado. O foco é desenvolver protótipos para aquisição de sinais provenientes de um detector espectral dedicado a um conjunto óptico para cada uma das funcionalidades, ou seja, ir validando por módulos.

Já em uma etapa posterior, após a construção do sistema para aquisição e envio dos sinais, será desenvolvido um framework de dados constituindo uma imagem captada pelo PDA para visualização de dados e posterior estruturação de dados que servirão como base para a escolha da plataforma para envio e posterior armazenamento e processamento dos sinais.

Na última etapa, serão realizados testes de validação para o detector e testes de sistema, para verificar se o conjunto montado em operação exibe saídas de acordo com padrões estabelecidos pela teoria abordada.

Nesse contexto se faz necessário a análise de requisitos apurada, para avaliar quais componentes são indispensáveis para cumprir as metas como garantindo o baixo custo, adaptação a outros sistemas de aquisição, acurácia e aplicações em ambientes de ensino.

De maneira geral, considerando-se o estado da arte, foram identificados dispositivos disponíveis para a aquisição de dados. Existem no mercado diversas soluções para aquisição dos dados dessa natureza, como os da empresa National Instruments. Porém, são tecnologias proprietárias, com custo relativamente alto.

Buscando uma solução de baixo custo, optou-se inicialmente pelo desenvolvimento da interface para a captura de dados, usando microcontrolador do projeto Arduino, e primeiramente a placa utilizada foi o Arduino Mega acoplada a matriz de fotodiodos e seus elementos ópticos na geração de sinais que serão enviados a plataforma apropriada. Posteriormente a placa Arduino MEGA foi substituída pela NodeMCU para atender a proposta de trabalhar com a plataforma de IoT e validar a proposta de ser um sistema adaptável, independente do *hardware* utilizado, ou seja, o código desenvolvido inicialmente para a leitura do sensor para a placa Arduino MEGA deve ser facilmente adaptado para a NodeMCU.

Para a generalização do caso de estudo, na etapa inicial foi construída uma saída de dados, usando um recurso que mostra saída em unidades arbitrárias por cada fotodiodo e padrões de imagem com o cuidado para que tais dados possam se transformar em uma persistência para que possam ser processados e mostrados em forma de tabela, gráficos e até mesmo em uma saída calculada e específica em outros sistemas. Aqui é uma parte importante, pois a saída arbitrária permitirá que o código desenvolvido possa ser convertido na medida desejada, como absorbância, transmitância ou outro de acordo com a calibração e propósito.

3.1 O Conjunto Óptico

Um dos grandes desafios é configurar o conjunto óptico detector. Neste projeto, o primeiro ajuste mostrará uma geometria muito simplificada somente para estimar um possível campo de atuação para o sensor, como função de espectrofotômetro por exemplo um ajuste aplica um filtro de interferência variável já projetado e estudado que pode transformar o dispositivo em multiespectral.

A Figura 16 mostra os componentes usados na montagem do conjunto óptico e o microcontrolador para automatizar o seu funcionamento.

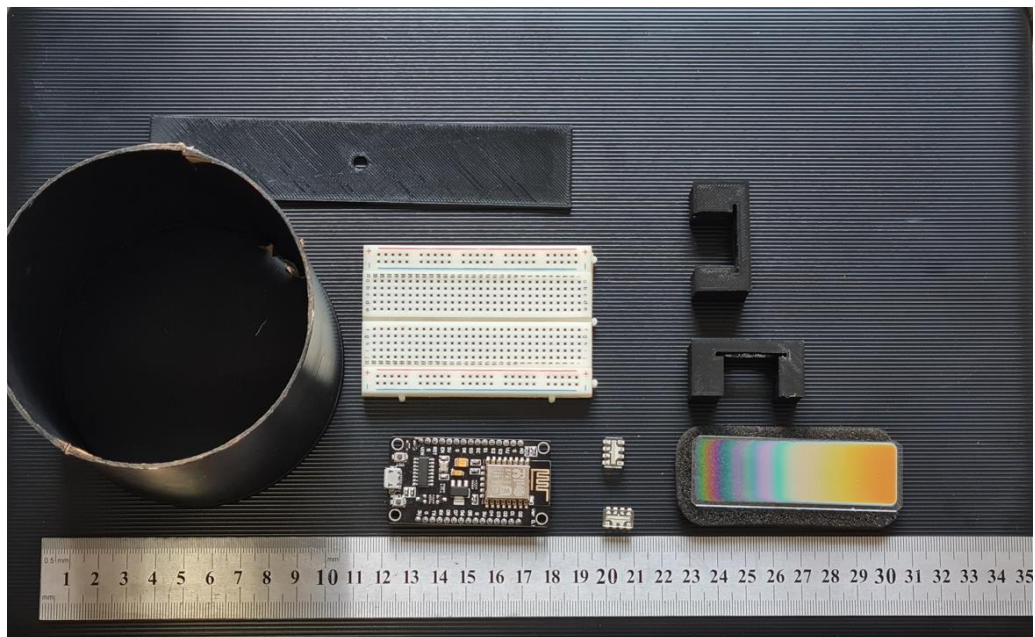


Figura 16: Principais componentes do detector óptico.

Na listagem acima que compõe o conjunto óptico temos: um tubo para montagem, uma protoboard com as medidas do tubo, um PDA de 64px, um filtro de interferência variável, suportes onde serão colocados o filtro e solução para amostra e um microcontrolador. Além desses componentes para o detector óptico, foram utilizados materiais básicos como cabos, jumpers e fita de fixação em todo o dispositivo. As tecnologias de *software* envolvidas são IDE do projeto Arduino, Processing e ThingSpeak. As características desses componentes estão descritas na sequência.

O objetivo do presente estudo é a descrição do projeto e desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para o detector óptico formado pelos componentes acima descritos. Levando-se em consideração os objetivos e justificativa da pesquisa, a configuração desses elementos ópticos devem formar um espectrofotômetro para uso didático de baixo custo.

O detector óptico formado pelos componentes descritos deve ser conectado a um módulo eletrônico dedicado a medir a radiação incidente, gerando dados que podem ser mostrados, processados e armazenados localmente ou remotamente.

3.2 A matriz de fotodiodos

Durante a elaboração do projeto, foram testados os dois modelos de PDA que serão descritos abaixo e um CCD modelo TCD1201D Toshiba. Devido aos requisitos e escopo definidos no início do trabalho, a escolha foi o trabalho com o PDA, devido principalmente às características como custos e simplicidade para adaptação.

O sensor que irá compor o detector óptico na presente etapa é um PDA de 64 fotodiodos colocados em um arranjo linear, sendo que cada um deles está associado a um circuito amplificador de cargas e um multiplexador para leitura de cada pixel. As dimensões de cada foto-elemento ou pixel são de 120 μm por 70 μm , com espaçamento de 125 μm entre os centros de cada pixel e 55 μm de espaçamento entre pixels. O modelo é o TSL201R TAOSinc mostrado na Figura 12(B).

Também será testado o modelo TSL1401CL da MAS (Austria Mikro Systeme) com 128 fotodiodos colocados em arranjo linear com o mesmo mecanismo de funcionamento do TSL101, mas com um número maior de fotodiodos. O objetivo do segundo PDA é comparar resultados para validar algoritmos e parâmetros ópticos para o projeto. Na Figura 17, temos a imagem dos dois detectores citados, sendo que o sensor que está em estudo é o TSL201R.

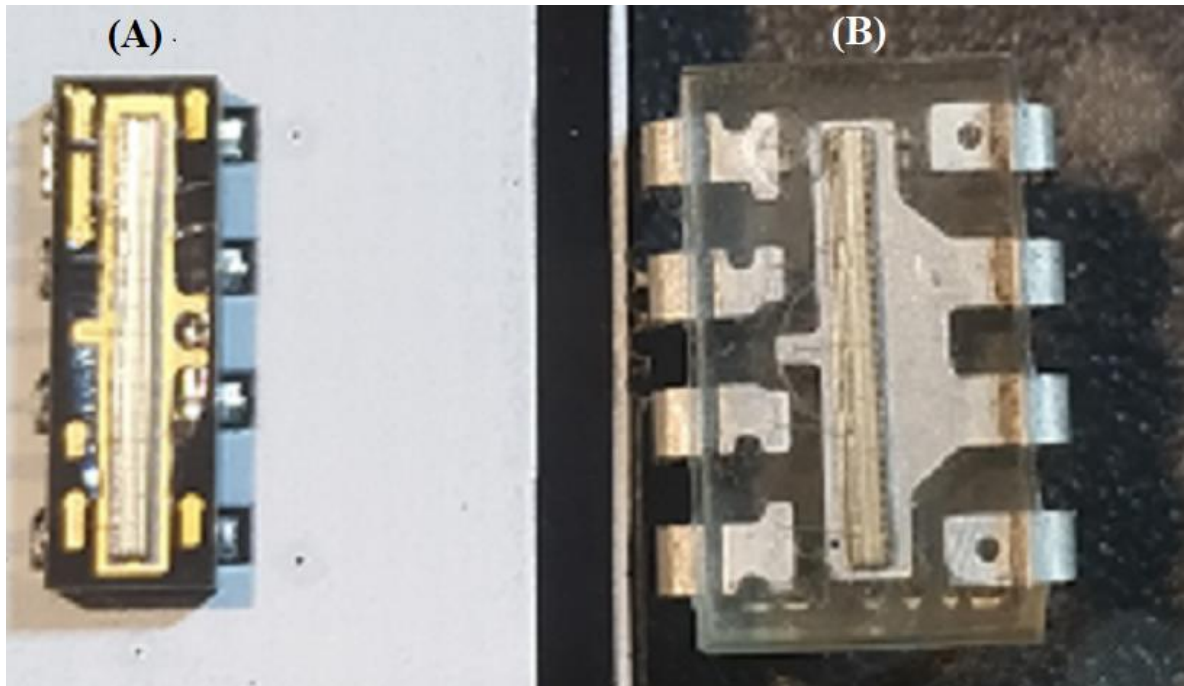


Figura 17: Imagem dos detectores - Em (A), sensor modelo TSL1401CL da MAS. Em (B) o sensor modelo TSL201R da TAOS.

3.2.1 Descrição e Detalhamento do PDA

A descrição apresentada a seguir é uma compilação da folha de dados do modelo TSL201R de 64 fotodiodos, mas pode ser adaptada para os dois modelos no que diz respeito a lógica de funcionamento e mecanismos, diferenciando apenas no diagrama de blocos devido a diferença de fotodiodos, ou seja, a resolução.

Em ambos os modelos, o princípio de funcionamento é o mesmo, que transformará a intensidade da luz incidente em uma tensão proporcional que será lida e interpretada pelo microcontrolador. Nos dois dispositivos, a lógica interna de multiplexação e controle é composta por um simples sinal de “*clock*” e um sinal de inicialização, podendo operar até a frequência de 5 MHz. A energia da luz incidente em determinado fotodiodo gera uma fotocorrente que é integrada pelo circuito associado ao pixel. O diagrama na Figura 18 mostra a descrição funcional do PDA modelo TSL201R. Para o modelo TSL1401CL, o diagrama é idêntico, alterando somente o número de fotodiodos (de 64 para 128). Conforme pode ser visto no esquema do PDA, AO é acionado por um seguidor de fonte e requer um resistor pull down externo de $R=330\Omega$.

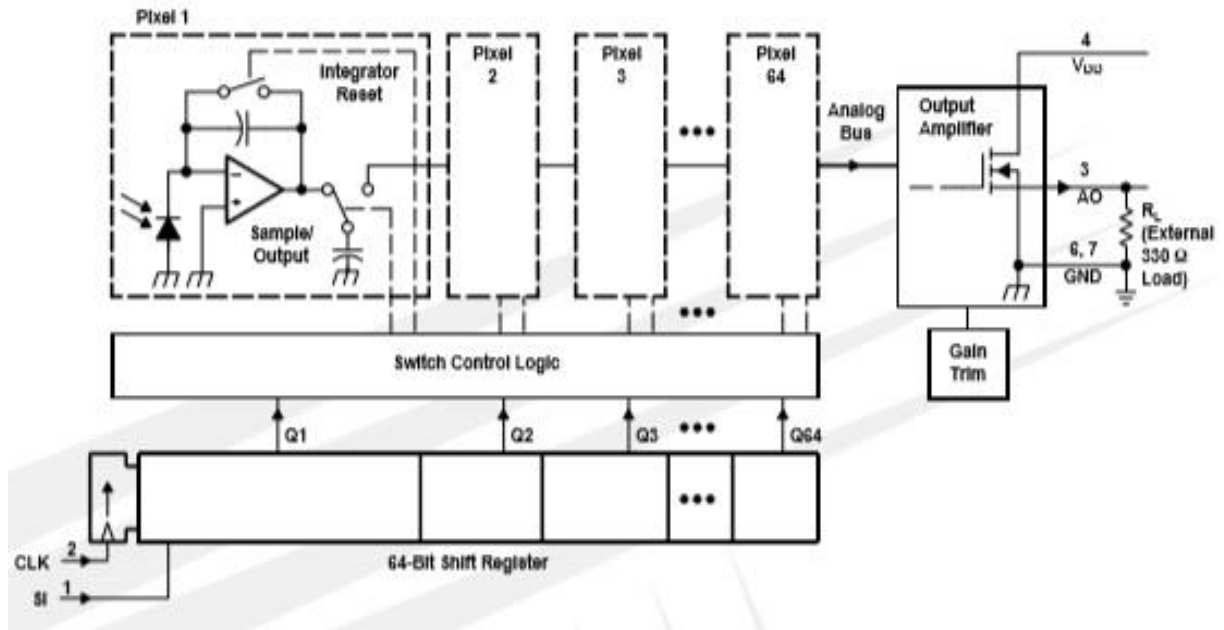


Figura 18: Diagrama de blocos do sensor linear TSL201R.

Fonte: Disponível em: <https://datasheet.octopart.com/TSL201R-LF-TAOS-datasheet-8327114.pdf>
Acessado em 06/11/2020

De acordo com o diagrama acima, durante o período de integração, um capacitor de amostragem conecta-se a saída do integrador analógico através de uma chave analógica. A quantidade de carga acumulada em cada pixel é diretamente proporcional a intensidade da luz incidente e o tempo de integração. O tempo de integração é o intervalo entre dois períodos consecutivos de saída.

A saída e reinicialização dos integradores é controlada por um registrador de deslocamento de 64 bits e uma lógica de reset. Um ciclo de saída é iniciado com um sinal *Start Integration* (SI). Como o pulso SI é sincronizado através do registro de deslocamento, a carga armazenada nos capacitores de amostragem é acoplada sequencialmente ligada a um amplificador que gera uma tensão de saída *Analog Output* (AO). O sinal de entrada SI pode habilitar um novo ciclo depois de completado esses eventos. O próximo ciclo de integração inicia no 66º pulso de clock.

A tensão na saída analógica AO é obtida pela equação 8.

$$V_{out} = V_{drk} + (R_e)(E_e)(t_{int}) \quad (8)$$

Da equação 8 temos:

- V_{out} é a tensão analógica na saída

- V_{drk} é a tensão analógica sem luz
- R_e é a responsividade do PDA para um comprimento de onda em $V/(\mu J/cm^2)$
- E_e é a irradiância incidente em $\mu W/cm^2$
- t_{int} é o tempo de integração em segundos.

A equação 8 é de fundamental importância quando se for montar o detector óptico, pois será a base da calibração para qual medida se queira, como absorvância, transmitância ou até mesmo para espectros.

O resumo do esquema de conexão em montagem do PDA com o microcontrolador pode ser descrito na Figura 19. AO é acionado por um seguidor de fonte e requer um resistor *pull down* externo de $R=330 \Omega$. A saída é normalmente 0 V para nenhuma luz, 2 V para um nível de branco normal e 3,4 V para luz de saturação.

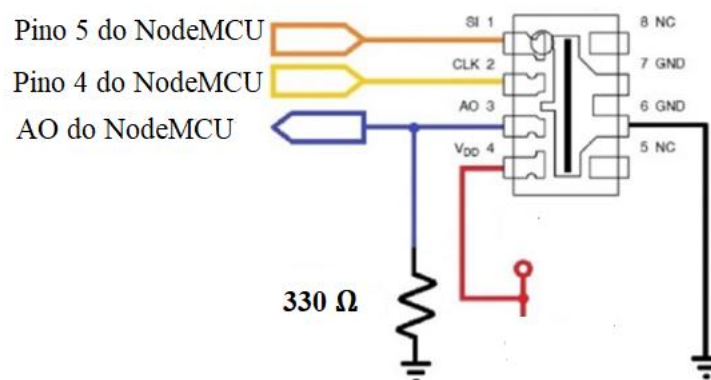


Figura 19: Esquema básico de ligações do PDA TSL201.

As características foram obtidas pela folha de dados e orientou o desenvolvimento do código na IDE do Arduino, que foi compilado e descarregado na placa para o controle do microcontrolador. Essa codificação utilizada é o primeiro *firmware* para automação da aquisição de dados do dispositivo, e os dados brutos gerados servem como base para a calibração do detector óptico do referido dispositivo.

O código desenvolvido para leitura do modelo específico de PDA com 64 fotodiodos pode ser adaptado com facilidade para os modelos lineares com mais de 64 fotodiodos como os de 128, 256 e 512, desde que utilizem o mesmo mecanismo descrito na folha de dados. Nesta etapa foram desenvolvidas várias versões pois ainda eram gerados dados para ausência de luz,

e esse detalhe será explanado nas conclusões. A Figura 20 mostra o ambiente de desenvolvimento em que foi compilado o código.

```

sketch_PDA_Mestrado_POLI | Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

sketch_PDA_Mestrado_POLI
/* Daniel Augusto de Castro Spegiorin      */
/*Sketch para leitura do PDA TSL201R da TAOS */
/*Desenvolvido para o NodeMCU ESP8266 v3   */

/*constantes */
#define AJUSTE 1 //ajuste arbitrário do tempo
#define SI 5
#define CLK 4
#define VOUT 0 //Intensidade
#define PIXELS 64 //Definição da constante do número de fotodiodos do PDA

/*variáveis inteiras*/
int valor_px; //inteiro para guardar valor intensidade do pixel pixel
int tempo; //tempo de integração

void setup(){
  pinMode(CLK, OUTPUT);
  pinMode(SI, OUTPUT);
  digitalWrite(CLK, LOW);
  digitalWrite(SI, LOW);
  Serial.begin(115200);
  Serial.flush();
}

void loop(){
  Compilação terminada.

```

Figura 20: Compilação do sketch para funcionamento do PDA TSL201R.

3.3 Configurações do FIV e Suporte Utilizado

O filtro de interferência variável utilizado teve seu detalhamento quanto aos processos de fabricação descrito sucintamente em 2.3 e nos trabalhos citados de Silva (2010, 2016) e Sayão (2015). O modelo aqui utilizado foi devidamente caracterizado no trabalho de Silva (2010), com resposta espectral de $\lambda_0 = 671$ nm.

Em uma primeira configuração do FIV no detector óptico, ele foi combinado com uma grade de difração, sendo colocado antes dela, permitindo a determinação de linhas espectrais, sendo que cada uma dessas linhas selecionadas pelo FIV seria decomposta pelo detector. Essa configuração de espectrofotômetro aparece em artigos e manuais de dispositivos para essa finalidade, porém dentro da proposta para uso didático e de baixo custo aqui proposta não é viável, principalmente por envolver mais componentes e ser de difícil calibração e configuração até mesmo para usos mais simples.

A configuração estudada é colocar o FIV rente ao detector, para decompor o feixe e tornar o dispositivo multiespectral, pois a radiação incidente após passar pela amostra é decomposto em seus comprimentos de onda pelo FIV e analisada pelo detector. A configuração dessa montagem pode ser vista na Figura 21, onde o FIV é acoplado em um suporte bem rente ao detector.

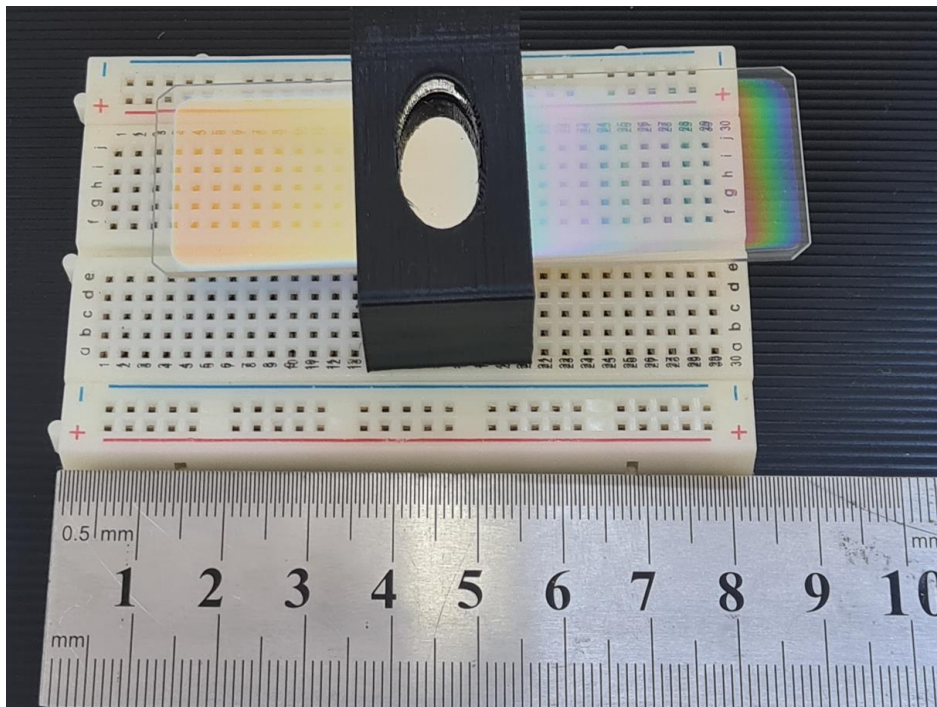


Figura 21: FIV no suporte colocado bem rente ao detector.

Como não existe um suporte dedicado ao FIV, foi desenvolvido a um suporte composto de 3 peças que é uma base e duas torres, que pode ser usado em conjunto para um equipamento de dois feixes ou como uma torre individual que aqui será mostrado.

O projeto do suporte foi desenvolvido pelo *software* 3D Builder, que é um aplicativo gratuito desenvolvido pela Microsoft que permite aos usuários criar, visualizar, editar e imprimir modelos 3D. Ele suporta uma variedade de formatos de arquivo, incluindo STL (*Standard Tessellation Language*) e OBJ (*Object File Wavefront 3D*), e inclui uma variedade de ferramentas básicas de modelagem 3D, como extrusão, rotação e dimensionamento. Após o desenvolvimento do suporte no *software*, as peças foram produzidas na impressora.

Durante o projeto do suporte, se ele for usado como torre única, o par de alças que prende o filtro foi desenvolvido com precisão para mantê-lo firme na porção central em que

existe a abertura para incidência da radiação e ao mesmo tempo permitir a mobilidade horizontal do mesmo para contemplar determinada região. Essa modalidade é de fundamental importância, pois o filtro pode ser colocado na região de interesse da seleção do comprimento de onda de acordo com a geometria espacial do detector, o que facilita a calibração do instrumento. Também na estrutura do suporte, existe o espaço para anexar o filtro ou uma lâmina e uma área para a amostra da solução a ser analisada. A Figura 22 mostra nas duas primeiras ilustrações o suporte sendo projetado no 3D Builder e na última ilustração a peça produzida.

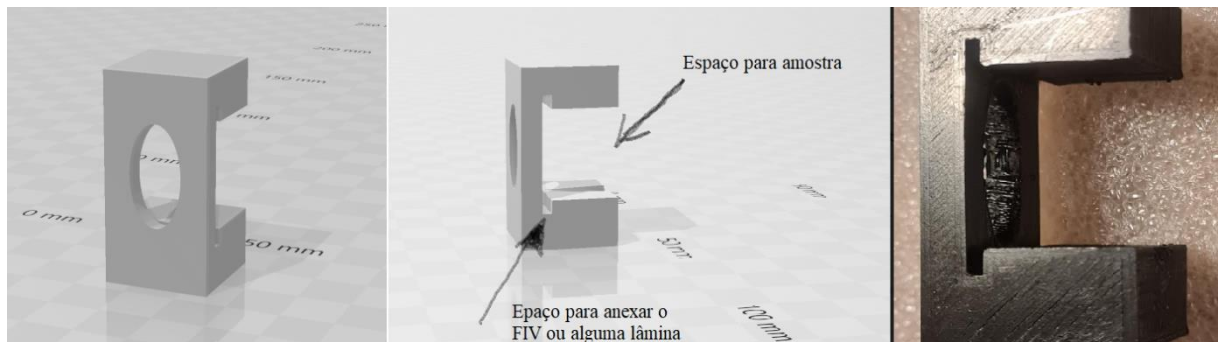


Figura 22: Projeto do suporte nas duas primeiras ilustrações e o suporte produzido.

3.4 Montagem do Conjunto e Circuito

O primeiro ajuste para verificar o funcionamento do PDA foi de forma bem simples, sem o acoplamento do FIV, usando apenas as informações da folha de dados para montagem. Como o microcontrolador NodeMCU ESP8266 é relativamente lento para varredura do sensor, então o tempo de integração é aumentado reduzindo a luz recebida. Uma solução simples é implementar uma pequena câmara escura para adaptar a geometria apropriada, que devido ao pequeno orifício é necessário um maior tempo de integração. As medidas da caixa preta adaptada são de acordo com o modelo do sensor utilizado e com isso o campo de visão da imagem projetada pode ser estimado. A escolha da geometria apropriada será de acordo com a calibração do que se quer medir.

Neste momento foi adaptado um tubo, que servirá de suporte para o conjunto e resolver o problema do excesso de luz. Na tampa do tubo deseja-se uma mobilidade para trabalhar com a fonte de luz que irá incidir na amostra. A Figura 23 mostra o início da montagem no tubo adaptado, com o PDA TSL201R montado em uma protoboard.

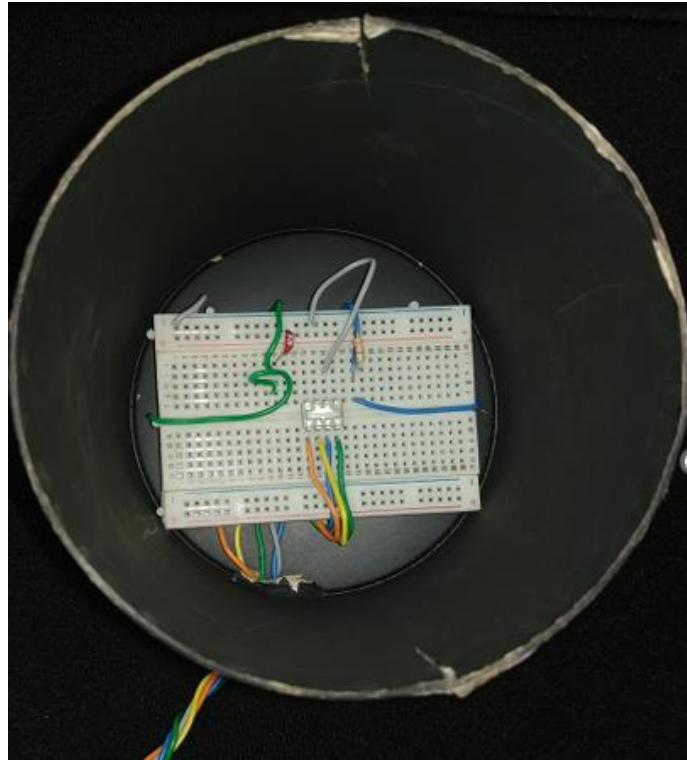


Figura 23: Início da montagem em um tubo adaptável.

Esta etapa descrita é de fundamental importância para gerar saída de dados, pois nortearão os requisitos necessários do sistema para estruturação deles para determinado fim. Também em conjunto com um FIV proposto na terceira etapa pode se configurar como um detector multiespectral.

Essa primeira configuração permite que o estudo da incidência da luz no detector se torna um bom guia, pois abrirá o caminho para o desenvolvimento de algumas aplicações e estudos como:

- Sensor de fluxo para detectar movimentos autônomos.
- Sensores de Posição.
- Analisar espectro de luz.

Aqui como descrito nos relatos iniciais, será explorado a aplicação de análise da incidência da luz em uma amostra.

3.5 Conjunto Óptico Acoplado ao PDA

Esta etapa estabelece uma possível montagem trivial para compor o detector óptico, acoplado o suporte para o FIV, deixando o espaço para colocar a amostra compatível com a

descrição anterior da geometria aproximada, mantendo a estrutura com certa mobilidade para posterior calibração e ajustes do instrumento, conforme a necessidade.

A mobilidade inicial dos instrumentos deve ser obedecida e partindo de uma fenda de entrada para a luz, a primeira lente deve ser fixada a uma distância da referida fenda para produzir feixes paralelos ou pode-se usar um difusor ou uma lente, dependendo do que se pretende medir. Para o posicionamento dos elementos descritos anteriormente, foi determinado por tentativa e erros, sempre mantendo a fenda iluminada por uma fonte de luz determinada e constante. Esse conjunto pode ser observado na Figura 24.

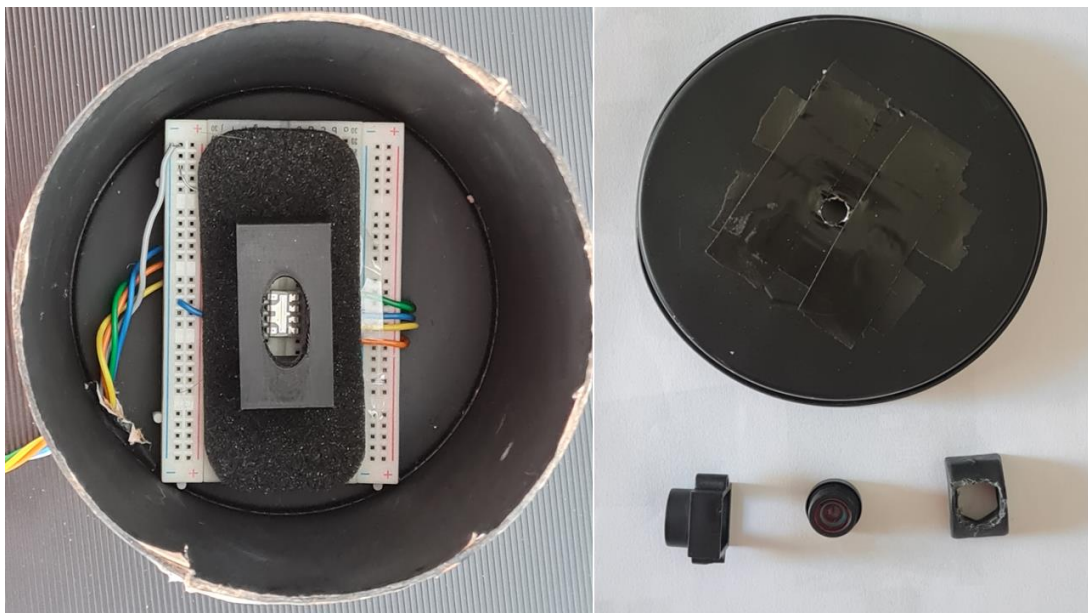


Figura 24: Imagem do conjunto detector, detalhando o PDA, o suporte para o FIV, difusor e lente.

Nesta etapa do projeto, já são gerados dados pela saída serial na IDE do Arduino, pois mesmo programando para a placa NodeMCU, é essa a plataforma usada na elaboração do código fonte para controle do PDA.

3.6 Acoplamento do FIV e PDA com o Conjunto Óptico

Em uma etapa final, será proposto o uso de um filtro de interferência variável FIV proposto e estudado por Silva (2010,2016). O conjunto óptico propõe a possibilidade de monitorar um feixe de radiação eletromagnética RE policromático, permitindo que uma

pequena faixa dessa RE seja transmitida ao sensor. Assim, o feixe é decomposto por comprimento de onda, sendo transmitido sobre os fotodiodos (PD) detectores, possibilitando a detecção da intensidade do feixe com maior precisão e acurácia.

A faixa permitida é escolhida previamente ao caracterizar o projeto, como descreve Silva (2010, 1025) em seus trabalhos. No presente projeto o filtro utilizado foi previamente depositado e caracterizado.

Com base no estudo de caracterização será descrita as propriedades do filtro e sua possível aplicação e um provável caminho para a partir desse estudo simular as condições iniciais para previamente escolhidas em processos de fabricação em microeletrônica. Esta etapa permitirá muitos canais no mesmo instrumento, constituindo um detector multiespectral dependendo apenas do número de PD ativos no PDA e de sua área de detecção. Uma possível representação da descrição pode ser observada na Figura 25.

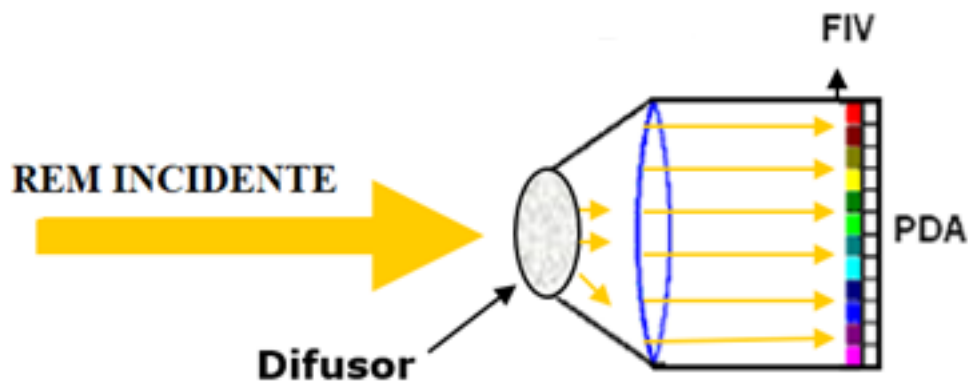


Figura 25: Esquema simplificado do conjunto detector, detalhando o PDA, FIV, difusor e o feixe eletromagnético incidente. Fonte: Sayão (2015).

O FIV também pode ser acoplado em posicionamento distinto do apresentado acima, e neste caso, dentro do conjunto óptico ele poderia funcionar como um monocromador para uma pequena região de interesse do PDA. A Figura 26 mostra o posicionamento do FIV no conjunto montado, com a devida mobilidade para casos distintos e eventual calibração.

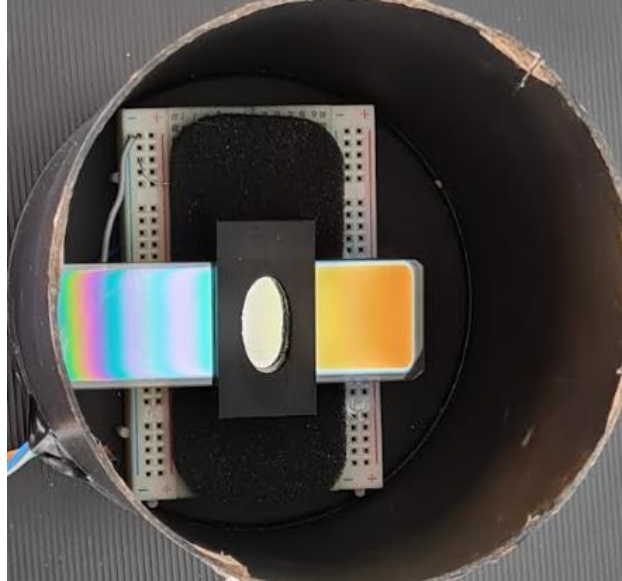


Figura 26: Acoplamento do FIV ao conjunto óptico.

3.7 Acoplamento da Placa NodeMCU

O microcontrolador constitui o principal componente do módulo eletrônico responsável pela aquisição e gerenciamento de dados provenientes da REM detectada pelo PDA. Assim, ele será o responsável pelo armazenamento inicial das leituras eletrônicas obtidas do sinal do PDA. Para essa função, será utilizado o algoritmo devidamente codificado com requisitos obtidos da folha de dados do fabricante.

A placa utilizada no projeto é a NodeMCU ESP8266 v3. O modelo escolhido contempla aplicações em IoT, de uma maneira prática e eficiente de acordo com as características, além de apresentar um baixo custo financeiro em comparação com modelos similares com mesmo poder de processamento e apresenta dimensões espaciais menores que as similares. Placas como os modelos básicos de Arduino, além da placa, adicionalmente teria que ser anexado o módulo ESP826 para contemplar aplicações em plataformas IoT. A Figura 27 mostra a imagem de frente e verso da placa NodeMCU.

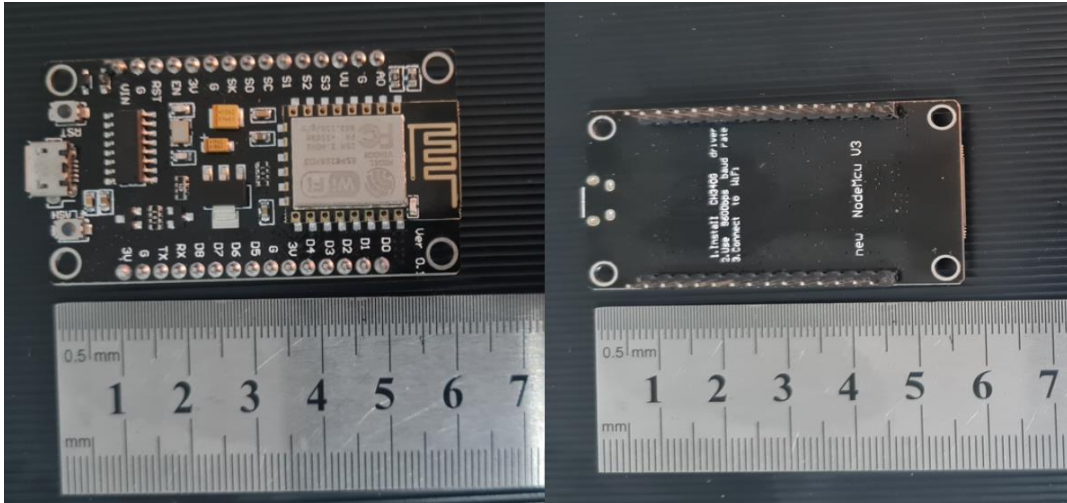


Figura 27: Frente e verso da placa NodeMCU Esp8266 v3.

Algumas características principais que merecem destaque no modelo são:

- Microcontrolador Tensilica 32-bit RISC CPU Xtensa LX106;
- Tensão de operação: 5V-9V;
- Corrente de operação: em média 70 mA;
- Chip WIFI ESP8266: 12E com conexão WIFI padrão 802.11 b/g/n e antena embutida;
- Memória flash: 4MB;
- 10 GPIO com funções PWM, I2C, RX, TX;
- 1 porta ADC: 10 bits de resolução;
- Modos de programação: IDE Arduino, Python e outros;
- Programação e alimentação via micro USB;

Analisando a folha de dados e as características da placa NodeMCU e comparando com outros modelos, nota-se que se trata de uma placa de desenvolvimento poderosa e versátil que pode ser usada para ampla gama de projetos IoT. Além da ampla gama de recursos listados acima, o modelo vem com um interpretador Lua embutido, que permite uma fácil programação, além de possuir uma variedade de bibliotecas disponíveis para sensores e periféricos, o que facilita a interface com outro *hardware*.

3.8 Arquitetura do Sistema Construído

A análise de requisitos norteadora do escopo é desenvolver um sistema de aquisição de dados dedicado a um detector óptico, automatizando a coleta de dados e o envio dos sinais para

uma plataforma com o intuito de sincronizar e exibir os sinais coletados para monitoramento, análise e exibição dos dados inclusive remotamente.

Para o desenvolvimento do protótipo responsável por coletar e converter REM em sinal elétrico e conversão de sinais de formato analógico para digital serão destacados os seguintes materiais principais: uma matriz de fotodiodos dispostos linearmente cujo modelo foi descrito anteriormente, um microcontrolador NodeMCU para condicionamento dos sinais coletados e transmissão para a plataforma para armazenamento e processamento de dados.

A primeira implementação foi o código fonte para controle do PDA, pois não existe uma biblioteca pronta na plataforma para matriz de fotodiodos. No presente estágio é possível obter dados brutos provenientes do PDA pelas saídas *Monitor serial e Plotter serial* da IDE, mostradas na tela do computador ao qual está conectado o microcontrolador. Nesta etapa é recomendável gerar um sinal para outra saída e comparar com o sinal gerado pelo PDA para verificar a linearidade do sinal gerado. Anexar um potenciômetro de 10 k Ω , ajuda ajustar o sinal nesta etapa. A Figura 28 apresenta um exemplo dessa saída.

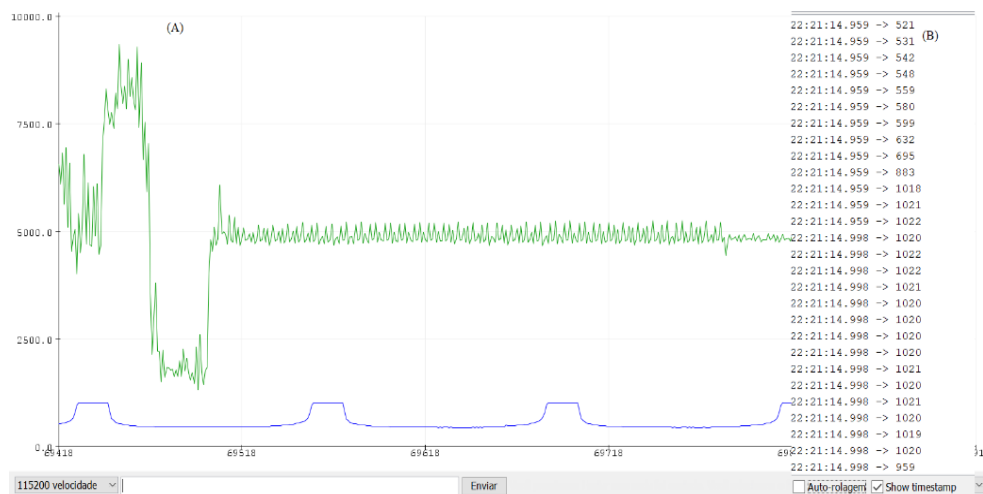


Figura 28: Saída de dados pelo serial plotter(A) e monitor serial(B).

Nesta etapa, já é possível ajustar os componentes ópticos de acordo com a saída gerada, possibilitando possíveis calibrações e análises para o que se pretende utilizar, direcionando a pesquisa das plataformas a serem utilizadas no desenvolvimento da aplicação. Existem vários métodos para calibração, mas o que é importante nessa etapa é verificar se para a mesma intensidade e comprimento de onda da REM incidente, deve-se observar a mesma resposta para cada fotodiodo percorrido.

4 Resultados e Discussão

4.1 Primeira Aplicação Para Tratamento de Dados

A primeira aplicação para o tratamento dos dados gerados pelo PDA acoplado microcontrolador foi desenvolvida em *Processing*, que uma linguagem de programação de código aberto com um IDE integrado, usado principalmente para criar arte visual e aplicativos interativos, baseada na linguagem de programação Java. O projeto surgiu em 2001 no MIT *Media Lab*, e hoje tem uma grande comunidade de usuários e desenvolvedores que contribuíram para o seu desenvolvimento e criaram uma ampla gama de bibliotecas e ferramentas para estender suas capacidades.

Essa aplicação usa os dados gerados pela saída serial da IDE do Arduino e com eles é possível criar uma demonstração visual ou numérica desses dados, permitindo mostrar a imagem individual de cada fotodiodo ou pelo conjunto dele. Também é possível na aplicação isolar o valor numérico individual ou do conjunto gerado pelo PDA.

Os valores processados aqui podem ser manipulados com facilidade, podendo ser realizado um estudo de todo o conjunto do PDA ou somente de uma determinada região de interesse.

Tanto nesta etapa do *Processing*, como a saída na primeira etapa pela leitura do NodeMCU o valor numérico pode ser manipulado de acordo com a calibração e realizar medidas como absorbância ou transmitância por exemplo.

A figura 29 mostra uma saída de dados típica do ambiente devidamente programado para o presente trabalho, que foi escolhido para demonstrar dados na forma de barras para cada fotodiodo e também a saída numérica.

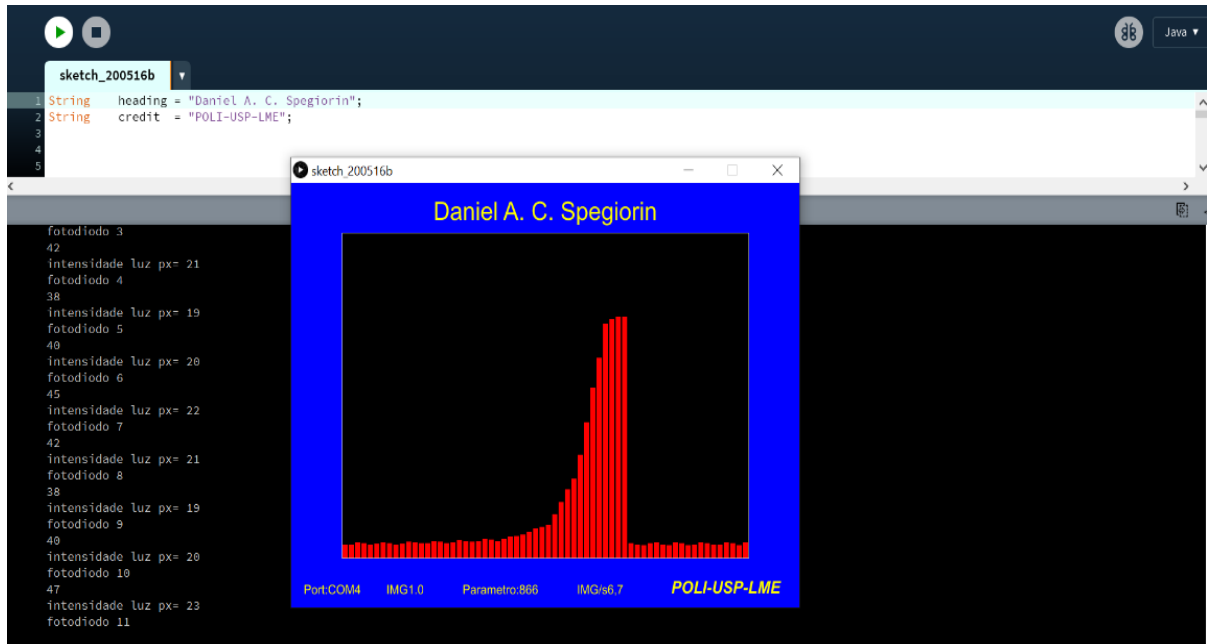


Figura 29: Saída com identificação do fotodiodo e intensidade da REM que chega até ele.

A aplicação aqui tratada recebe os dados do serial da IDE da etapa anterior, e separa a intensidade por cada fotodiodo, que resulta na montagem de uma composição formada pelo conjunto desses 64 fotodiodos. Assim, é permitido a realização da análise de requisitos para uso local do sistema, o que permite também a calibração do conjunto óptico para determinada finalidade.

A saída na forma de pequenas barras pode ser interessante para simular um espectro, dada as devidas calibrações e comparações, quando se exportam esses dados para *softwares* mais apropriados para essas saídas como por exemplo, o MATLAB (*Mstrix Laboratory*). Mas durante essa etapa, testes arbitrários foram realizados por tentativas e erros, para verificar a resposta da interação do REM com determinada matéria e sua captura pelo PDA, podendo ser verificada visualmente, caso existam pequenas flutuações, pois a resposta apresenta uma velocidade satisfatória para tal finalidade.

4.1.1 Aplicação Para IoT

Plataformas IoT são sistemas de *software* rodando em servidores e visam conectar dispositivos e seres humanos usando a Internet como canal de comunicação comum, passando pela conexão do mundo físico com o digital. Existem diversas opções como Thingspeak, Amazon Web Service, Azure IoT Hub, IBM BlueMix, entre outras.

A escolha de uma plataforma, deve ser de acordo com a análise de requisitos da solução de *software* a ser implantada e na área de pesquisa, deve ser levada em consideração a solução que mais se adapta aos objetivos e justificativa da mesma. Assim, de acordo com o presente estudo, após análise das ferramentas disponíveis, a mais adequada para os objetivos desse estudo é a plataforma ThingSpeak.

O Thingspeak é uma plataforma gratuita voltada para a implementação de projetos IoT, que permite aos usuários coletar, armazenar e analisar dados de dispositivos conectados remotamente. Foi criado pela MathWorks, e possui integração com o MATLAB, que pode ser utilizado para análise dos dados. Possui ferramentas em que os usuários podem facilmente coletar, visualizar e analisar dados em tempo real de vários dispositivos IoT, como sensores, câmeras e outros *hardwares*. Ele oferece um conjunto simples, porém poderoso, de ferramentas para gerenciamento de dados, incluindo visualizações personalizáveis e ferramentas de análise nativas e pode processar solicitações HTTP.

O funcionamento da plataforma é bem simples, basta fazer o cadastro, criar um canal que pode ter até 8 campos e após criado, associar um dispositivo a ele, que será o PDA. Feito isso, será gerado uma chave, cujo código possibilita enviar e receber dados no canal, que após alimentado pode gerar saídas como gráficos e análises com uso do MATLAB ou simplesmente armazenar os dados medidos. A visualização dos dados poder se feitas em tempo real ou posteriormente, com uso de um computador pessoal ou smartphone conectados na internet.

Na área de desenvolvimento, o Thingspeak é uma plataforma de código aberto que suporta várias linguagens de programação, e oferece APIs para desenvolvedores criarem aplicativos personalizados e integrações com outras plataformas, especialmente com o uso do Matlab. Os principais recursos da plataforma de dados abertos incluem coleta de dados em tempo real, dados de geolocalização, processamento e visualização de dados, mensagens de status do dispositivo e plugins. A Figura 30 mostra o ambiente de criação e configuração do canal juntamente com uma das possibilidades de saída de dados.

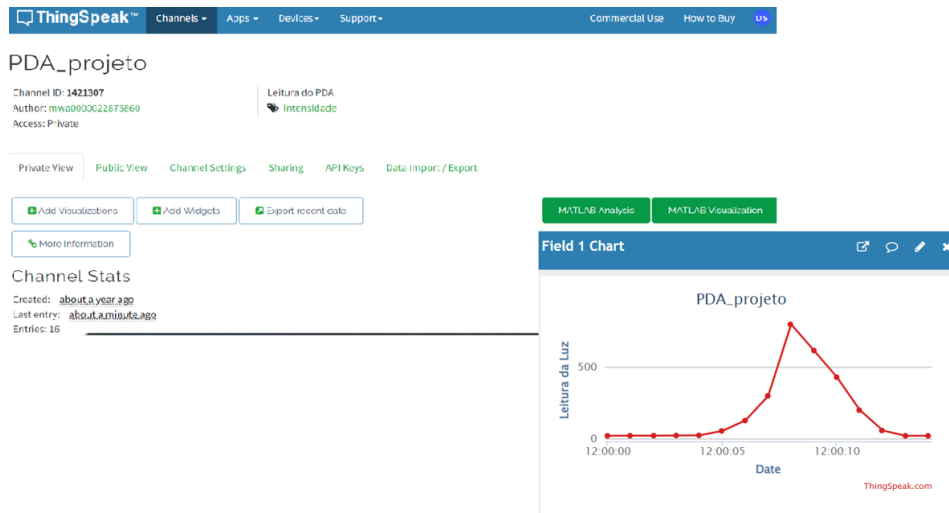


Figura 30: Ambiente de configuração do canal e uma das possibilidades de saída de dados no ThingSpeak.

Durante os testes, com o NodeMCU conectado na rede em que deve ser colocado na programação os parâmetros de usuário e senha, os dados obtidos pelo PDA conectado foram enviados e recebidos pelo ThingSpeak, mantendo sua integridade.

Assim, temos uma arquitetura completa IoT, formada pelo dispositivo que é o NodeMCU ESP8266 com a função de microcontrolador e transmissão de dados na rede, o canal de comunicação que é a internet e a plataforma IoT que é o ThingSpeak

4.2 Análise Geral

Com o dispositivo pronto foi possível captar a radiação da lâmpada e verificar a linearidade do detector, que com os mesmos dados foram processados pela aplicação desenvolvida no ambiente Processing mostrando a saída visual em barras do conjunto ou por fotodiodos individualmente. Os mesmos dados também foram transmitidos em tempo real para a o canal criado na plataforma ThingSpeak, que apresenta diversas formas de análise e processamento.

A lâmpada usada para gerar a REM e o recipiente para a amostra foram arbitrários, pois suas características só têm sua importância em uma calibração particular para o espectrofotômetro, o que não estava no escopo desse trabalho. Foram usadas no caso uma lâmpada LED e um recipiente de vidraria de laboratório de ensino médio para referência. A Figura 31 mostra externamente o dispositivo montado.



Figura 31: Visão externa do dispositivo montado.

Com o dispositivo em funcionamento temos uma visão geral do mesmo e podemos estimar o seu custo aproximado, pois uma das premissas na pesquisa é desenvolver um equipamento de baixo custo. Na presente pesquisa não foi feito um levantamento de custo da configuração de *hardware*, porém é possível encontrar valores médios para os preços dos componentes mínimos para o funcionamento que são: um tubo com tampa, uma placa protoboard, um PDA, sete cabos e jumpers, um resistor de $R=330\Omega$, dois suportes para filtro e amostra, um FIV, um recipiente para amostra, uma lâmpada led para gerar a REM, um microcontrolador NodeMCU ESP8266 v3, elementos e plataformas de *software*: IDE do Arduino, Processing e ThingSpeak. A Tabela 3 mostra os valores médios.

Tabela 3: Valor médio em Reais (R\$) dos componentes utilizados

Componente	Preço em R\$
1 Tubo	10,00
1 protoboard	5,00
1 PDA modelo TSL201R	40,00
7 cabos e jumpers	10,00
1 resistor 330Ω	0,10
1 cubeta em vidro óptico	15,00
1 NodeMCU ESP8266 v3	30,00
1 lâmpada especial	20,00
Total	130,10

As plataformas de *software* utilizadas não têm custos. A IDE do Arduino e o Processing são *software* livre e para o ThigSpeak foi usado a versão gratuita que apresenta quase todas as funcionalidades que a versão paga. Também não foram cotados os suportes e filtros, pois foram produzidos no laboratório a partir de projetos e pesquisas. A tomada média dos preços foi feita no dia 20 de abril de 2023 em que a cotação do dólar era de R\$ 5,058 para cada dólar.

4.3 Análise dos Sinais

Partindo dos testes iniciais, pode-se observar que a utilização do microcontrolador NodeMCU ESP8266, juntamente com o conjunto formado pelo principalmente pelo PDA, possibilita a coleta de dados de boa qualidade a partir da utilização de objetos e conceitos físicos, validando uma pequena e importante parte da pesquisa proposta. Existem limitações, quanto ao uso, no que se refere à precisão de leitura feita pelo sistema devido ao tempo de integração, pois os microcontroladores usados na proposta são lentos, e para o tratamento dessa limitação foram necessários dois ajustes, sendo o primeiro aumentar o tempo de integração no código fonte e o segundo reduzir a entrada de luz no detector óptico.

Uma consequência do aumento do tempo de integração é que qualquer luz mínima vinda das laterais ou por trás do sensor afeta a medida, portanto é necessário um cuidado especial para esse detalhe. A Figura 32 mostra a captura dessa “luz indesejada”, após todos os tratamentos na geometria proposta. Em uma possível calibração, esses parâmetros necessitam desse tratamento. Anexar um potenciômetro para verificar um ponto ideal é recomendável.

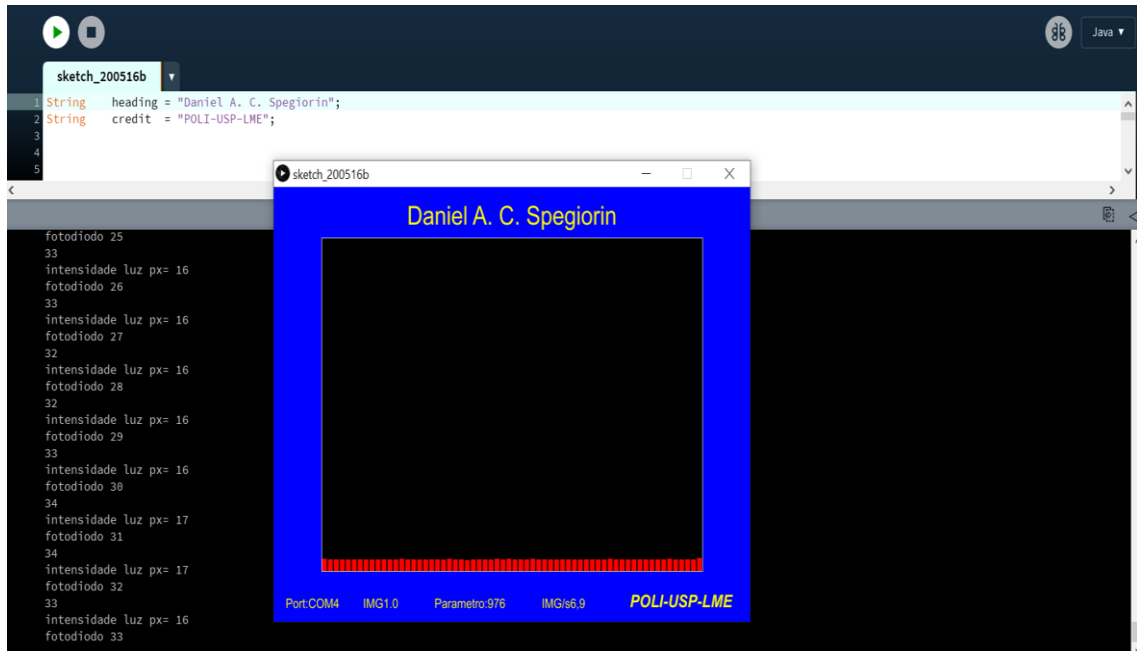


Figura 32: Sinal indesejado, devido ao aumento do tempo de integração.

Uma limitação do microcontrolador também está na questão do conversor analógico-digital, mas ela pode ser resolvida usando um modelo superior de microcontrolador ou até mesmo um conversor analógico-digital externo. A análise de requisitos apontará o tipo do *hardware* a ser utilizado de acordo com a aplicação, mas na presente proposta que é para finalidade educacional e de baixo custo, essa questão aparece como fator limitante do dispositivo.

Na etapa inicial, é possível observar que para aquisição e automação de dados usando o NodeMCU ESP8266, os códigos são bastante simples e práticos, podendo ser modificados com facilidade de acordo com a interface a ser desenvolvida e até mesmo no processamento explorando suas potencialidades dentro do escopo da pesquisa, se transformando em um firmware para automação da placa. A plataforma Arduino, tanto em *software* quanto em *hardware*, é de código aberto e de baixo custo, o que possibilita muito o seu uso e divulgação, que por isso gera um número extenso de bibliotecas e tutoriais disponíveis em meios digitais de divulgação científica consagrados. Esses fatores consolidam o uso dessa plataforma na aquisição de dados, gerando bons resultados, contribuindo de maneira significativa em seu uso na arquitetura de um sistema de aquisição de dados para ambientes de investigação científica e ensino.

O presente trabalho teve como proposta o estudo dos parâmetros como requisitos de sistema, componentes e suas tecnologias em um projeto de desenvolvimento de um sistema de

aquisição de dados, não fazendo parte desse processo a calibração deste instrumento em operação, pois dependerá da finalidade de uso do instrumento. Os resultados gerados em tempo real pelo sistema proposto, podem ser apresentados em gráficos ou saídas formatadas arbitrariamente, que após a calibração desejada, essa saída arbitrária pode se tornar uma unidade de medida, como absorvância ou transmitância, somente convertendo o valor arbitrário por uma equação que usará a mesma ou outra alocação de memória e comparando com o valor apropriado.

Foram tomadas medidas de diversas formas, como só incidência de REM no detector, para verificar a linearidade dele, incidência de REM no detector com o filtro para verificar o comprimento de onda estava de acordo com as características do filtro, e no final colocando uma solução em um recipiente adaptado para verificar a diferença do feixe com a solução e uma referência, o que foi realmente constatado.

Assim, esse sinal gerado, pode ser transformado em uma medida espectrofotométrica com a devida calibração, onde deve ser levado em consideração as dimensões do recipiente da amostra (cubeta) e características das REM incidente, em relação ao comprimento de onda. A Figura 33 mostra algumas dessas saídas, destacando a saída gráfica e a saída por fotodiodo. Os dados mostrados nesta figura foram transmitidos remotamente sem perdas para um canal do ThingSpeak.

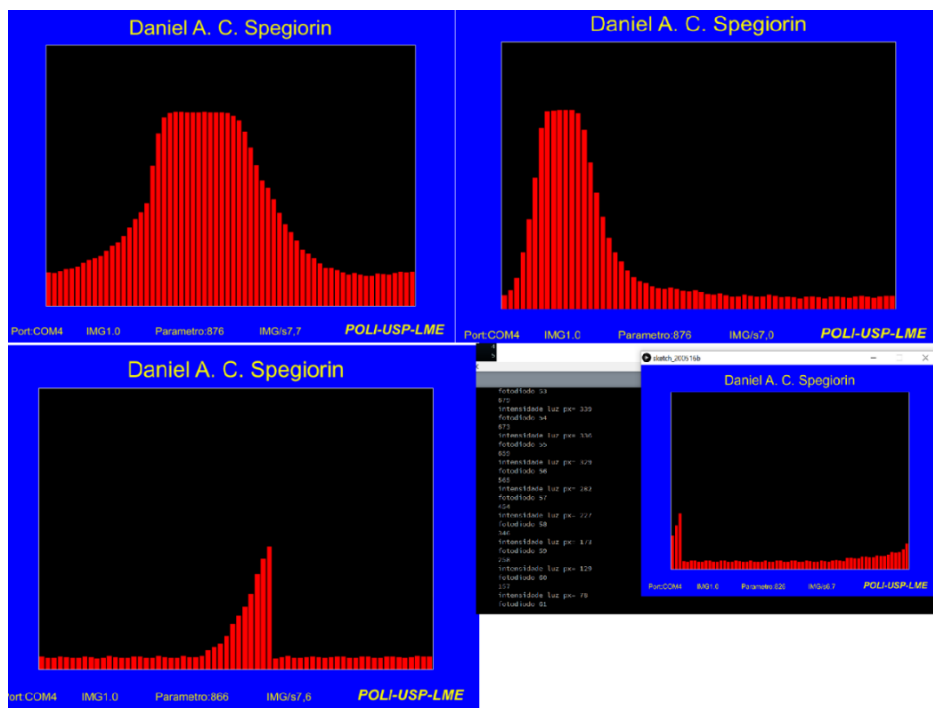


Figura 33: Sinal gerado e apresentado em formas distintas nos testes realizados.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

A aplicação projetada e construída contemplou instrumentos precisos e acurados, em que foram gerados sinais homogêneos como os aqui mostrados, em que foi contemplado a automação do processo de aquisição de dados proposta em um dos objetivos norteadores.

A revisão bibliográfica visou à elaboração de um sistema de espectrofotometria e espectroscopia com uma matriz de fotodiodos e elementos ópticos que formam o elemento detector, usando microcontrolador. Durante o processo de estudos, foram concluídas algumas etapas, como a definição de qual tipo de sensor a ser utilizado e o projeto e desenvolvimento do firmware para aquisição de dados no microcontrolador para aquisição e processamento de sinais da matriz de fotodiodos, que permitiu a caracterização óptica e posteriores medidas. Tais medidas foram importantes para validar o dispositivo montado dentro das especificações do projeto a que se destina.

Foi desenvolvido um dispositivo de alta precisão e baixo custo, demonstrado tanto na programação feita para o microcontrolador NodeMCU na IDE do Arduino quanto na realizada no Processing para geração de dados podem ser exportadas ou transmitidas remotamente para armazenamento, processamento e amostragem. O dispositivo projetado e construído pode ser calibrado para uso em medidas espectrofotométricas, trabalhando numericamente os dados gerados.

Durante toda a pesquisa foi realizado o estudo e pesquisa dos componentes eletrônicos utilizados, assim como as plataformas de *software* e *hardware utilizados*, colaborando para a grande ampliação do conhecimento nessas áreas.

O dispositivo desenvolvido e apresentado no final agrega conhecimentos de integração de artefatos de *software* e *hardware* com plataformas de programação e IoT, sugerindo a tendência de se usar processamento em nuvem ao invés de local, contemplando o controle e a qualidade dos dados gerados.

Ao final, foi desenvolvido uma aplicação com base na análise dos requisitos para monitoramento acoplada ao detector óptico, em que foram utilizadas plataformas *open source* e ferramenta IoT, o que permitiu dados gerados e seu armazenamento e processamento em nuvem, contemplando um grande estudo que de difusão científica.

Muitas dificuldades apareceram, como as cargas indesejadas tanto no detector utilizado, como em outros testados como os CCDs. Essa carga é um tratamento difícil, pois é proveniente de um tempo de integração aumentado, devido aos microcontroladores. Em um possível desenvolvimento de um equipamento de alta precisão, essa anomalia deve ser considerada na calibração ou usar equipamentos com poder de processamento superior aos microcontroladores aqui destacados. Quanto ao uso do CCD, a temperatura também tem certa influência na geração de dados, um dos motivos também para a troca com o PDA.

Na proposta inicial do trabalho era a construção de um aplicativo dedicado ao detector localmente, mas durante a pandemia aceleraram os processos de computação em nuvem para trabalhar com os dados remotamente, o que norteou a pesquisa para o uso de uma plataforma IoT.

5.2 Trabalhos Futuros a Serem Desenvolvidos

O presente trabalho de pesquisa apresentou um dispositivo que pode ser acessado e gerar dados remotamente quando configurado em um ambiente que tenha Internet disponível com o uso dos protocolos de comunicação descrito ao longo do estudo. Os dados gerados envolvem uma técnica analítica relacionada a espectrofotometria, contemplando muitas áreas do conhecimento científico, como química, física, biologia, bioquímica, materiais, engenharia química, assim como em aplicações clínicas e industriais.

Assim como proposta para trabalhos futuros é relacionar IoT e inteligência artificial, com a finalidade de projetar um dispositivo inteligente e autônomo, usando algoritmos que permitem a análise e interpretação desses dados em tempo real, ou seja, o sistema toma decisões relevantes diante de uma situação, como por exemplo reconhecer uma solução quando ela for submetida as técnicas de espectrofotometria. Assim, é desejável um instrumento bem acurado para gerar uma base de dados consistente, para que a máquina possa ter seu aprendizado com essa base e tomar decisões.

Referências Bibliográficas

ALEXANDROV, M. D.; LACIS, A. A.; CARLSON, B. E. & CAIRNS, B. *Remote sensing of atmospheric aerosols and trace gases by means of Multifilter Rotating Shadowband Radiometer. Part I: retrieval algorithm. Journal of the Atmospheric Sciences*, v.59, n3, p. 524-543, 2002 a.

ALEXANDROV, M.D.; LACIS, A.A.; CARLSON, B.E.; CAIRNS, B. *Remote sensing of atmospheric aerosols and trace gases by means of Multifilter Rotating Shadowband Radiometer. Part II: climatological applications. Journal of the Atmospheric Sciences*, v.59, n.3, p.544-566, 2002 b.

AMRAM, P.; GEORGELIN, Y. A Taste of Fabry and Perot's Discoveries. In: *Physica Scripta*, Marseille, France v.T86, p.76-82, 2000.

Apostila de Sensoriamento Remoto – INPE. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Miguel/AlunosPG/Jarvis/SR_DPI7.pdf> Acesso em 08 de abril de 2021.

ARAÚJO, C. A. Á.; Valentim, M. L. P. A Ciência da Informação no Brasil: mapeamento da pesquisa e cenário institucional. *Bibliotecas. Anales de Investigación*, v. 15, n. 2, p. 232– 259, 2019.

Arduino, Página oficial da Plataforma Arduino: Arduino/Genuino - pinMode(). Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Reference/PinMode>. Acesso em 05 de janeiro de 2020.

Arduino, Página oficial da Plataforma Arduino: Arduini - What is Arduino? Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em 01 Dezembro de 2019.

ASHTON, K. *That 'Internet of Things' Thing. 2009. RFID Journal*. Disponível em: <<https://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>. Acesso em: 05 de maio de 2022.

ATKINS, P. W.; PAULA, J. *Físico-química*. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006, 2v.

BASTOS, A. *Instrumentação, Eletrônica Analógica e Digital*. Rio de Janeiro RJ, 2002, 360p.

BOXALL, J. Arduino Tutorials – Chapter 22 – the AREF pin,”. Disponível em: <<http://tronixstuff.com/2013/12/12/arduino-tutorials-chapter-22-aref-pin/>>. Acesso em: 2 de março de 2020.

CAVALCANTE, M. A., TAVOLARO, C. R. C. e MOLISANI, E. Física com Arduino para iniciantes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, n. 4, 4503 (2011). Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n4/18.pdf>. Acesso em: 5 de fevereiro de 2020.

DALLY, J.W.; WILLIAM, F.R.; McCONNELL, K.G. *Instrumentation for engineering measurements*. 2.ed. New York: John Wiley, 1993.

HECH, Eugene. *Optics*. 4.ed. New York: Addison-Wesley, 2002.

HOLLER, F. J. et al. Princípios de Análise Instrumental. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

MARTINEZ, M. Espectrofotômetro. 2014. Infoescola [Periódicos na Internet]. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/materiais-de-laboratorio/espectrofotometro/>>. Acesso em 20 de abril de 2023.

MCROBERTS, M. Arduíno Básico. Novatec Editora. São Paulo: Novatec, 2011.

MEDINA, Bruno Eduardo. Internet das coisas em edifícios inteligentes: Desenvolvimento de uma rede de sensores e atuadores sem fio para o controle de sistemas de climatização. Campinas, SP: 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

MOON, B. Internet of Things & Hardware Industry Overview 2016. SparkLabs Global Ventures, 2016.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. 3.ed. Viçosa: UFV. 2007, 307p.

National Instruments. Available: <<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>>. Acesso em 14 de março 2020.

OKAMOTO, K. Fundamentals of Optical Waveguides. 2006, 2.ed. Japan: Academic Press, 2006, 561p.

OLIVEIRA, D.P.R. Sistemas de Informações Gerenciais: estratégicas, táticas e operacionais. 13ª edição. São Paulo: Alas, 2009.

OLIVEIRA, S. Internet das Coisas com ESP8266, ARDUINO E RASPBERRY PI. São Paulo: Novatec, 2017.

REITZ, J.; MILFORD, F.; CHRISTY, R. Fundamentos da Teoria Eletromagnética. Tradução de Renê Balduino Sander. 19.ed. Rio de Janeiro: Campus, 1982, 516p.

ROGALSKI, A; BIELECKI, Z. Detection of Optical Radiation. Bulletin of the polish academy of sciences vol. 52, Nº 1, p 43-66, 2004.

ROSÁRIO, J.M. Princípios de Mecatrônica. São Paulo, SP. Editora Pearson Prentice Hall, 2008.

SAYÃO, A.C. Estudo e desenvolvimento dos parâmetros de projeto de um radiômetro solar multiespectral baseado em filtro de interferência variável aplicável ao sensoriamento ambiental e de aerossóis. Tese de Doutorado apresentada a Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

SEDRA, A.S.; SMITH, K.C. Microeletrônica. Pearson Prentice Hall do Brasil, 5a edição - 848p. São Paulo, 2007.

SILVA, C.M. Desenvolvimento e caracterização do filtro óptico de interferência variável para detectores de alta resolução espectral e biosensores. Tese de Doutorado apresentada a Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

SILVA, C.M. da. Filtro interferência variável e descrição de uma aplicação: dispositivo multicanal espectral para análise ambiental. 2010, 152p. Dissertação de Mestrado apresentada a Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

SILVA, K.O. Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para aquisição de dados de umidade e temperatura do ar. 2000. 70 f. Dissertação de Mestrado em Física do Ambiente Agrícola apresentada a Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

SILVEIRA, Cristiano B. O Que é Indústria 4.0 e Como Ela Vai Impactar o Mundo. Disponível em <https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>. Acesso em 23/03/2023

ŠKRABA, A. et al. Streaming pulse data to the cloud with bluetooth LE or NODEMCU ESP8266. In: MEDITERRANEAN CONFERENCE ON EMBEDDED COMPUTING, 2016, Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7525798>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2023.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A.; Princípios de análise instrumental, 5.ed., Bookman: Porto Alegre, 2002.

SKOOG, D. A. et al. Fundamentos de Química Analítica. 8.ed.: Thomson, 2006.

SOLOMAN, S. Sensors Handbook. 2.ed. Nova Iorque, EUA: McGrawHill, 2009.

TRÄGER, F. Springer Handbook of Laser and Optics, Heidelberg: Springer, 2012.

SWART, J. W. Semicondutores: fundamentos, técnicas e aplicações. Campinas, SP: Editora UNICAMP, 2008.

SZE, S. M. Semiconductor Sensors, New York, USA: John Wiley & Sons Inc. 1994.

VAUGHAN, J. M. Fabry-Perot interferometer: history, theory, practice and applications, 2.ed., Adam Hilger, 1989, 583p.

VOGEL, A. I. Análise Química Quantitativa. 6a . ed.: LTC, 2008.

VUOLO, J. H. Visão Humana. Apostila. 4.ed. 2013. Disponível em : <http://fap.if.usp.br/~vvuolo/APOSTILAS/visao_humana.pdf>. Acesso em 10/01/2020.

WENDLING, M. Sensores. 8 jan. 2016. Disponível em: <<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: 16 de novembro de 2022.

YUAN, M. *Getting to know MQTT*. 2017. IBM Developer. Disponível em: <<https://developer.ibm.com/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2023.