RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 24/02/2025.

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

ÁREA DE FÍSICA APLICADA

Desenvolvimento de um sistema automatizado para coleção e classificação de material particulado em suspensão aérea

João Victor Mendes

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

RIO CLARO - SP

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

JOÃO VICTOR MENDES

Desenvolvimento de um sistema automatizado para coleção e classificação de material particulado em suspensão aérea

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física Aplicada.

Orientador: Lucas Fugikawa Santos

Rio Claro - SP

2023

M538d

Mendes, João Victor
Desenvolvimento de um sistema automatizado para coleção e classificação de material particulado em suspensão aérea / João Victor Mendes. -- Rio Claro, 2023
73 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Lucas Fugikawa Santos

1. Material Particulado. 2. Pólen. 3. Microscopia Digital. 4. Aprendizado de Máquina. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

JOÃO VICTOR MENDES

Desenvolvimento de um sistema automatizado para coleção e classificação de material particulado em suspensão aérea

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física Aplicada.

Comissão Examinadora
Prof. Dr. Lucas Fugikawa Santos
Prof. Dr. Daniel Cesar Braz
Dr. David Sotero dos Santos Jr.

Conceito: Aprovado

Rio Claro (SP), 24 de fevereiro de 2023

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.
O presente trabalho também contou com o apoio da Oshctech Inc. em conjunto com a MITACS.
Agradeço a meus pais pelo apoio, incentivo e sempre valorizarem a educação.
Agradeço a meu orientador pelos conselhos e pelos debates de ideias que levaram a construção dessa dissertação.
Agradeço aos membros da Oshtech Inc., Peter, David, Elaine e Jim, que colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho.
Por fim, agradeço aos meus amigos, os quais me suportaram e me suportam por tantos anos.

ECCE HOMO

Sim, eu sei de onde sou!
Insaciável como o fogo
Eu ardo e me consumo.
Tudo o que toco vira flama
E tudo o que deixo, carvão:
Sou fogo, não há dúvida.

Friedrich Nietzsche.

RESUMO

Material particulado em suspensão aérea pode causar diversos problemas de saúde aos seres humanos. Em especial, pólens e fungos são responsáveis por inúmeros casos de alergia ao longo de todo o globo terrestre. Empresas como a Oshtech Inc. (Ontário, Canadá), parceira neste trabalho, realizam o monitoramento do nível destas partículas ao longo das estações, porém a contagem e classificação é feita de maneira manual. Com o objetivo de automatizar esta tarefa, este trabalho disserta sobre questões teóricas e resultados experimentais da construção de um dispositivo capaz de realizar todas as etapas deste processo, compreendendo um sistema de coleção de partículas, um sistema óptico de imageamento microscópico e um sistema de análise e transmissão dos dados obtidos. Já existem dispositivos que realizam tarefas similares, no entanto, são de alto custo e, portanto, pouco acessíveis. O custo de fabricação é levado em conta durante os processos de desenvolvimento, já que a intenção é a comercialização deste dispositivo para pequenas clínicas, ampliando o monitoramento de pólens ao longo de toda américa do norte. A contagem e a classificação destas partículas são feitas por um software de inteligência artificial (IA), o qual ainda está em desenvolvimento e aperfeiçoamento. Características de iluminação foram definidas a partir da comparação com microscópios comerciais e visando sua utilização no software de IA. A caracterização óptica foi feita através da análise da função de transferência de modulação e de análises de contraste em situações específicas, chegando à conclusão da construção de um sistema óptico de qualidade satisfatória para sua aplicação. Para que o sistema dependa o mínimo possível da interação humana e ainda assim forneça dados precisos, um algoritmo de foco automatizado está em desenvolvimento, o qual leva em consideração as intensidades dos pixels e a distribuição acumulativa deles.

Palavras Chaves: Material Particulado, Pólen, Microscopia Digital, Aprendizado de Máquina

ABSTRACT

Airborne particulate material can cause several health issues to humans. Pollens and fungi are responsible for countless cases of allergy across the globe. Companies such as Oshtech Inc. (Ontario, Canda), a partner in this work, monitor the level of these particles throughout the stations, but the counting and classification is done manually. With the objective of automating this task, this work discusses theoretical issues and experimental results of the construction of a device capable of carrying out all the steps of this process, which contains a particle collection system, an optical microscopic imaging system and a system of analysis and transmission of the obtained data. There are already devices which perform similar those tasks, however, they are expensive and therefore not very accessible. The manufacturing cost is considered during the development processes, as the intention is to commercialize this device for small clinics, expanding pollen monitoring throughout North America. The counting and classification of these particles is done by artificial intelligence (AI) software, which is still under development and improvement. Illumination characteristics were defined from the comparison with commercial microscopes and aiming their use in AI software. The optical characterization was carried out through the analysis of the modulation transfer function and contrast analysis in specific situations, reaching the conclusion of the construction of an optical system of satisfactory quality for its application. For the system to depend as little as possible on human interaction and still provide accurate data, an automated focus algorithm is under development, which considers pixel intensities and their cumulative distribution.

Keywords: Particulate Matter, Pollen, Digital Microscopy, Machine Learning

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.A) ESTRUTURA DE UMA MATRIZ DE PIXELS ESTILO BAYERN; B) DIAGRAMA ELETRÔNICO DA COMPOSIÇÃO DO PIXEL EM UM SENSOR CMOS; C) ESQUEMATIZAÇÃO 3D DO DETECTOR DE LUZ NA ARQUITETURA CMOS. 19
FIGURA 2. EXEMPLIFICAÇÃO DE SEPARAÇÃO ANGULAR DE DOIS PONTOS DE LUZ DE ACORDO COM O CRITÉRIO DE RAYLEIGHT. 21
FIGURA 3. ESQUEMATIZAÇÃO DA MAGNIFICAÇÃO ÓPTICA, DIGITAL E TOTAL PARA EXEMPLIFICAR AS DIFERENÇAS NOS PLANOS ÓPTICOS. 22
FIGURA 4. EXEMPLIFICAÇÃO DAS SITUAÇÕES A) E C) DE ALTO CONTRASTE E B) E D) DE BAIXO CONTRASTE. ONDE O PERFIL DE UMA ONDA QUADRADA PASSA A SE COMPORTAR COMO UMA SENÓIDE. 24
FIGURA 5. A COMPOSIÇÃO DO MTF TOTAL DO SISTEMA SE DÁ DE ACORDO COM OS MTFS DE CADA COMPONENTE. 25
FIGURA 6. ALVO IDEAL PARA CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA ÓPTICO. FONTE: EDMUND OPTICS. 26
FIGURA 7. A) REGIÃO DA IMAGEM UTILIZADA PARA B) OBTENÇÃO DO PERFIL DE INTENSIDADE (ESF) DE UM DEGRAU PARA O CÁLCULO DA C) LSF E CONSEQUENTEMENTE O MTF. 27
FIGURA 8. DIAGRAMA DE BLOCOS, INDICANDO A COMPOSIÇÃO DO SISTEMA E AS TAREFAS PRINCIPAIS DE CADA SUBSISTEMA. 29
FIGURA 9. LENTE DE MAGNIFICAÇÃO 10X UTILIZADA NO MICROSCÓPIO CONSTRUÍDO. 30
FIGURA 10. IMAGEM DO SENSOR DE IMAGEM SONY IMX291 E O ESPECTRO DE DETECÇÃO DE CADA COR RGB DOS PIXELS QUE COMPÕE O SENSOR, MOSTRANDO GRANDE SUPERPOSIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA NA REGIÃO DO INFRAVERMELHO NO DETECTOR DA COR VERMELHA. 31
FIGURA 11. DESIGN PARCIAL DO SISTEMA ÓPTICO, MOSTRANDO OS COMPONENTES PRINCIPAIS DE AQUISIÇÃO DE IMAGEM E AJUSTE DE FOCO. 33
FIGURA 12. FOTOGRAFIA DO SISTEMA ÓPTICO REAL COMPLETO. MOSTRANDO OS COMPONENTES CITADOS NA FIGURA ANTERIOR E NOVOS COMPONENTES, RESPONSÁVEIS PELO MOVIMENTO DO EIXO NÃO CONSIDERADO ANTERIORMENTE. 34
FIGURA 13. ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE FOCO AUTOMATIZADO, PARTINDO DE UMA POSIÇÃO INICIAL, ADQUIRINDO IMAGENS E AS ANALISANDO, PARA ENFIM DEFINIR A MELHOR POSIÇÃO DE FOCO. 36
FIGURA 14. EXEMPLIFICAÇÃO DE A) UMA IMAGEM EM PONTO COM FOCO ADEQUADO; B) UMA IMAGEM FORA DE FOCO; C) O HISTOGRAMA DE UMA IMAGEM EM PONTO DE FOCO E; D) O HISTOGRAMA DE UMA IMAGEM FORA DO PONTO DE FOCO. 37
FIGURA 15. ESQUEMATIZAÇÃO DO FLUXÔMETRO, QUE FAZ A LEITURA DO FLUXO A PARTIR DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA ENTRE OS DOIS PONTOS IDENTIFICADOS POR F E W. 39
FIGURA 16. DESENHO DO COLETOR DE PARTÍCULAS **A)** COM TAMPA E **B)** SEM TAMPA. ITENS IDENTIFICADOS NA FIGURA: 1- ENTRADA DE AR E PARTÍCULAS; 2- JANELA PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS; 3- MOTOR DE PASSO PARA GIRAR A BOBINA E ENROLAR A FITA DE SILICONE; 4- FLUXÔMETRO RESPONSÁVEL PELA MEDIÇÃO DO FLUXO DE SAÍDA DE AR; 5- CATRACA CONTRA-RECUO; 6- FITA DE SILICONE PROPÍCIA PARA ADESÃO DE PÓLEN; 7- COLUNAS PARA MANTER A FITA ESTICADA E PARALELA À JANELA; 8- BOBINA LIGADA AO MOTOR DE PASSO. 41
FIGURA 17. SEGUNDO MODELO DO COLETOR DE PARTÍCULAS. FOTO: AUTOR. 42
FIGURA 18. PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO RESPONSÁVEL PELA INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS DE CONTROLE, AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS. 43
FIGURA 19.A) APLICAÇÃO DO MÉTODO TRADICIONAL NA ANÁLISE DE DADOS; B) MÉTODO UTILIZANDO APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA A ANÁLISE DE DADOS. 45
FIGURA 20. ETAPAS DO PROCESSO DE DETECÇÃO, ISOLAMENTO E RECONHECIMENTO DE PARTÍCULAS. 49
FIGURA 21 GRÃOS DE PÓLENS DE PINHEIRO (PINACEAE). **A) E B)** O DISPOSITIVO UTILIZADO FOI O DESENVOLVIDO NESTE TRABALHO, COM MAGNIFICAÇÃO ÓPTICA DE 10X. **C), D), E) E F)** O DISPOSITIVO UTILIZADO FOI O LEICA DM2500 M, COM MAGNIFICAÇÃO ÓPTICA DE 20X E 50X RESPECTIVAMENTE. É IMPOSSÍVEL DE PRECISAR A DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS, JÁ QUE O MODELO DO SENSOR É DESCONHECIDO, ASSIM COMO O TAMANHO DOS PIXELS. JÁ QUE A FINALIDADE DESTA FIGURA NÃO É A COMPARAÇÃO ENTRE AS RESOLUÇÕES, AS IMAGENS DE DIFERENTES MAGNIFICAÇÕES ÓPTICAS FORAM AJUSTADAS DIGITALMENTE PARA FICAREM VISUALMENTE PARECIDAS EM TAMANHO. 51
FIGURA 22. IMAGENS OBTIDAS DE TRÊS DIFERENTES ESPÉCIES DE PÓLEN, A) E B) JOHNSON GRASS, C) E D) PINHEIRO E E) E F) RAGWEED. DUAS DIFERENTES FONTES DE LUZ ESTÃO SENDO COMPARADAS NESTAS

IMAGENS, LED BRANCO E LÂMPADA HALÓGENA. O SENSOR DE IMAGEM, A LENTE OBJETIVA, O SOFTWARE E O COMPUTADOR UTILIZADO PARA AQUISIÇÃO DA IMAGEM SÃO COMUNS EM AMBOS OS CASOS. 53
FIGURA 23. ESPECTRO DE EMISSÃO DE AMBAS AS FONTES DE LUZ UTILIZADAS NO TESTE. EM VERMELHO A LÂMPADA HALÓGENA E EM AZUL O LED BRANCO 54
FIGURA 24. **A) E B)** IMAGENS OBTIDAS COM OS DOIS DIFERENTES SENSORES DE IMAGEM A FIM DE CALCULAR A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO UTILIZADO. AS LINHAS VERMELHAS REPRESENTAM AS REGIÕES ONDE AS MEDIDAS DE INTENSIDADE FORAM REALIZADAS. **C) E D)** MTF OBTIDO APLICANDO A TRANSFORMADA DE FOURIER NA DERIVADA ESPACIAL DA ESF. NA FREQUÊNCIA ESPACIAL DE 10 LPMM, VALOR MÍNIMO PARA RESOLVER UMA PARTÍCULA DE PÓLEN, O MTF É IGUAL A APROXIMADAMENTE 0,36 E 0,45 RESPECTIVAMENTE, MOSTRANDO MELHOR DESEMPENHO ÓPTICO PARA O SENSOR SONY IMX577. 55
FIGURA 25. CORTE DE PERFIL (ESF) NA COLUNA 384 DO SENSOR (SONY IMX577) 57
FIGURA 26. CORTE DE PERFIL (ESF) NA COLUNA 1152 DO SENSOR (SONY IMX577). 58
FIGURA 27. CORTE DE PERFIL (ESF) NA COLUNA 1536 DO SENSOR (SONY IMX577). 59
FIGURA 28. CORTE DE PERFIL (ESF) NA COLUNA 3840 DO SENSOR (SONY IMX577).O CÍRCULO PONTILHADO EM VERMELHO É UM DOS EXEMPLOS DA FALTA DE PRECISÃO NOS DETALHES RESOLVIDOS EM POSIÇÕES FORA DE FOCO... 60
FIGURA 29. HISTOGRAMA DE 20 DIFERENTES IMAGENS. DEMONSTRANDO QUE AO SE DESLOCAR DA POSIÇÃO DE FOCO O NÚMERO DE PIXELS CLAROS E ESCUROS DIMINUI, ENQUANTO HÁ O AUMENTO DE PIXELS CINZAS. A IMAGEM DA MELHOR POSIÇÃO DE FOCO ESTÁ APRESENTADA NA **FIGURA 19.B)**. 61
FIGURA 30. FUNÇÃO ACUMULATIVA DE DISTRIBUIÇÃO DE 20 DIFERENTES IMAGENS, COM AMPLIAÇÃO NA REGIÃO DE CRUZAMENTO DAS LINHAS. A IMAGEM DA MELHOR POSIÇÃO DE FOCO ESTÁ APRESENTADA NA **FIGURA 19.B)**. 62
FIGURA 31. IMAGEM CEDIDA PELA OSHTECH INC. PARA OS TESTES DO SOFTWARE. UTILIZADA PARA COMPARAÇÃO DA CONTAGEM HUMANA X CONTAGEM DA MÁQUINA. CONTAGEM HUMANA: 2X MAPLE, 2X PINHEIRO E 9X BIRCH. CONTAGEM DE MÁQUINA: 11X JOHNSON GRASS, 4X MAPLE, 1X RAGWEED, 5X SAGEBRUSH E 14 RESÍDUOS (NÃO INCLUÍDOS NA CONTAGEM HUMANA). 64
FIGURA 32. CONTAGEM HUMANA: 6X RAGWEED E 3X JOHNSON GRASS. CONTAGEM DE MÁQUINA: 1X CEDRO, 1X JOHNSON GRASS, 3X RAGWEED, 3X SAGEBRUSH E 13X RESÍDUOS. 65
FIGURA 33. CONTAGEM HUMANA: 2X MAPLE, 1X PINHEIRO E 3X BIRCH. CONTAGEM DE MÁQUINA: 2X CEDRO, 2X JOHNSON GRASS, 2X MAPLE, 1X PINHEIRO E 7X RESÍDUOS. 65
FIGURA 34. CONTAGEM HUMANA: 19X RAGWEED, 6X CEDRO E 24X JOHNSON GRASS. CONTAGEM DE MÁQUINA: 1X BIRCH, 1X CEDRO, 7X JOHNSON GRASS, 1X MAPLE, 3X PINHEIRO, 16X RAGWEED, 16X SAGEBRUSH, 1X ERRO E 15X RESÍDUOS. 65

LISTA ABREVIAÇÕES, ACRÔNIMOS E TERMOS EM INGLÊS

AGI – *Artificial General Inteligence*
ANI – *Artificial Narrow Inteligence*
ANN – *Artificial Neural* Net, Redes
ASI – *Artificial Super Inteligence*
bins – unidade binária
CCD – *Charge Coupled Device*
CD – *Conjugated Distance*
CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor*
CNN – *Convulacional Neural Net*
ESF – *Edge Spread Function*
EXIF – *Exchangable Image File Format*
IA – Inteligência Artificial
IEEE – Instituto de Engenheiros Eletrecistas e Eletrônicos
LED – *Light Emitting Diod*
lpmm – *line pairs per milimiter*
LSF – *Line Spread Function*
ML – *Machine Learning*
MOSFET – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*
MTF – *Modulation Transfer Function*
NA – *Numerical Aperture*
$PM_{2.5}$ – *Particulate Matter,* Material Particulado menor que 2.5 µm
PM_{10} – *Particulate Matter,* Material Particulado menor que 10 µm
RGB – *Red, Green and Blue*
SNR – *Signal-Noise Ratio,* diferença entre sinal e ruído
USB – *Universal Serial Bus*
WD – *Working Distance*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA ÓPTICO DIGITAL 17
2.1. ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DE UM SENSOR DE IMAGEM.....17
2.2. CRITÉRIO DE RAYLEIGHT E FREQUÊNCIA NYQUIST 20
2.3. OBJETO E IMAGEM 22
2.4. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO (MTF) 23
2.4.1. CONTRASTE.....24
2.4.2. MÉTODO FIO DE LÂMINA (*KNIFE EDGE*) 26
3. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA 29
3.1. SISTEMA ÓPTICO 29
3.2. SISTEMA AUTOMATIZADO DE FOCO 34
3.3. SISTEMA DE COLEÇÃO DE PARTÍCULAS 38
3.4. COLETA E ANÁLISE DE DADOS 43
3.5. RECONHECIMENTO DE PARTÍCULAS 44
3.5.1. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APRENDIZADO DE MÁQUINA.....44
3.5.2. TREINO E APLICAÇÃO DO MODELO.....47
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS 50
4.1. SISTEMA DE IMAGEAMENTO (IMS) 50
4.1.1. TESTES DE ILUMINAÇÃO 50
4.1.2. QUALIDADE DE IMAGEM 54
4.1.3. SISTEMA AUTOMATIZADO DE FOCO 57
4.2. RECONHECIMENTO E CLASSIFICAÇÃO 62
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS 68
6. REFERÊNCIAS 70

1. INTRODUÇÃO

A exposição a partículas dispersas no ar pode causar diversos problemas de saúde atípicos em seres humanos[1]–[4]. Alergias e problemas respiratórios podem surgir como resultado da exposição a partículas como pólens, fungos, poluição (material particulado menor que 10 µm), fumaça de tabaco, dentre outros. Partículas de pólens contém proteínas não infecciosas, portanto, exposição a esta partícula deveria ser inofensiva aos seres humanos. No entanto, para alguns, pólens causam uma resposta alérgica do sistema imunológico. Em especial, tipos de pólens das espécies *ragweed*, *birch*, carvalho e grama possuem um alto potencial alérgico. Portanto o monitoramento destas partículas dispersas no ar são de interesse da saúde pública.[1],[5]

Pólens e fungos dispersos no ar podem ser coletados e analisados para vários propósitos, tais como previsões e controles agronômicos[6], [7], impactos de mudanças climáticas[8]–[11], fluxo genético[12], conservação de herança cultural[13], [14] ou alertas de saúde.[15]–[20] O monitoramento ambiental do ar para a detecção de poluentes químicos e partículas menores que 10 µm (PM_{10}) é feito por agências governamentais e seus dados são divulgados abertamente. No entanto, o monitoramento de partículas biológicas não o são. Sendo assim, é de interesse de empresas privadas a realização da coleta e comercialização da análise destas partículas.[21] [22]

Devido ao seu tamanho microscópico, o trabalho de análise das amostras coletadas é feito manualmente por um aerobiólogo: onde é necessário um equipamento responsável pela coleta de amostra (adesão das partículas à um substrato), em seguida, é feito o transporte deste substrato ao laboratório e então analisado em um microscópio. Empresas do ramo de tecnologia e aerobiologia estão procurando maneiras de automatizar esta tarefa[23], a fim de aumentar seus lucros e diminuir o tempo entre coleta e análise, o que atualmente pode levar de 1 a 7 dias.

Há diferentes maneiras de obter este objetivo, espectroscopia de fluorescência[24], [25], microscopia[26], holografia[27], espectroscopia Raman[28], espectroscopia de massa[29], espectroscopia de plasma induzido por laser[30], dentre outros mais.[17], [31], [32]

O método de obtenção de imagens por microscopia digital e classificação por inteligência artificial é, em geral, de menor custo, apresenta bons resultados (~80% de precisão) e o tempo entre coleta e análise pode ser reduzido a poucas horas ou até mesmo minutos[33], [34]. Tendo em vista que as três características citadas estão dentre os objetivos deste projeto, este foi o método escolhido para o desenvolvimento do dispositivo contido nesta dissertação.

Apesar da existência de patentes de dispositivos com os mesmos princípios de funcionamento[17], [26], [35] o dispositivo em criação aqui, desenvolvido em parceria com a empresa canadense Oshtech Inc., visa ter custo de produção, aquisição e manutenção relativamente baixos comparado a outros, ampliando assim os pontos de monitoramento, em especial, na américa do norte. Além da não necessidade de um aerobiólogo presente para a contagem e análise, procuramos reduzir ao máximo a necessidade da interação humana, fazendo com que o dispositivo possa atuar por semanas (até meses) sem que seja necessário a intervenção humana, seja para trocar a fita de amostragem, seja para coleta de dados ou seja para manutenção rotineira. [36] Dentre as espécies cujos polens são alergênicos (podem causar reação alérgica) mais presentes na região canadense estão: *ragweed (Ambrosia), alder (Alnus), mugwort (Artemisia), birch (Betula), goosefoots (Chenopodiaceae), hazel (Corylus), grass (Poaceae)* e *oak (Quercus).*[1] Sendo um trabalho feito em parceria com uma empresa canadense, foram escolhidos polens de algumas destas espécies para realizar as análises, já que são de maior interesse para a aplicação e de maior conhecimento dos especialistas (aerobiólogos) da empresa.

O dispositivo Poleno (Swisens AG, Horw, Suíça) utiliza fluorescência (excitação em 280 e 365 nm) e imagens holográficas para a coleta das imagens e rede neural convolucional (métodos de aprendizado de máquina/inteligência artificial) para a identificação das partículas. Também armazena os dados de fluorescência e as imagens para conferência humana, caso desejado, facilitando o trabalho de aerobiólogos que não desejam atualizar seus métodos de análises[37].

Os dispositivos BAA500 (Helmut Hund GmbH, Wetzlar, Alemanhã) [17] e o PollenSense™[35] são alguns dos dispositivos mais semelhantes ao deste trabalho, já que ambos utilizam métodos de microscopia óptica e inteligência artificial para coleta e análise de dados.

Apesar do BAA500 apresentar alta taxa de reconhecimento (>70%) para alguns tipos de pólens, ele necessita manutenção com grande frequência, grandes dimensões (~ 0.8 x 0.5 x 1.80 m) e possui alto custo de aquisição. Por outro lado, o PollenSense, com mecanismos ópticos simples e teoricamente eficientes, foi introduzido a pouco no mercado, com valor mínimo de US$3500 (dispositivo de menor valor dentre os citados neste trabalho), porém sendo necessário a aquisição do *software* de reconhecimento de partículas à parte. E tal *software* de reconhecimento não possui eficiência comprovada em artigos até o momento.[26]

Nesta dissertação serão discutidos o design do sistema de coleção, tecnologia eletrônica embarcada para controle e aquisição de dados, resultados parciais do algoritmo de aprendizado de máquina responsável pelo reconhecimento e classificação das partículas e os aspectos ópticos, tais como funcionamento dos elementos ópticos, caracterização óptica, utilização de imagens e *software* para melhoria, adaptação e calibração do sistema. Como um dos objetivos é a redução do custo de produção e de comercialização, o custo dos itens fora levado em consideração durante decisões executivas no design. Um método automatizado de foco do sistema, não disponível em literatura ou *website*, está sendo desenvolvido pelo autor desta

dissertação e, seus princípios de funcionamento serão detalhados com minúcia, assim como os resultados parciais obtidos.

Este trabalho tem em seu principal escopo a coleção, quantificação e classificação de pólens, no entanto, o sistema desenvolvido aqui pode ser ampliado e ajustado para detecção de outros materiais em suspensão aérea, como por exemplo, fungos e resíduos minerais.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURA

O sistema se mostra promissor, principalmente o subsistema óptico, o qual necessita ajustes, mas se mostra como uma opção viável e mais barata em relação a modelos de microscópios comerciais, como por exemplo o PollenSense, cujo custo do equipamento (sem software de reconhecimento) é de US$ 3500. O objetivo primário deste dispositivo é a captura e classificação de pólens, abundantes na primavera e no verão. Mas desde o início do projeto, havia também a intenção da utilização do dispositivo nas outras duas estações seguintes, para a captura e detecção de fungos, e este objetivo fará parte da etapa seguinte.

Maior estudo necessita ser realizado na parte computacional de inteligência artificial e aprendizado de máquina para a melhoria do software em questão de precisão e otimização do tempo de processamento.

A **tabela 4** contém o valor aproximado de fabricação do protótipo do sistema, o qual se aproxima de 900 dólares. A procura de novos fornecedores e prestadores de serviço se iniciou para que este custo seja reduzido, principalmente na estrutura de alumínio do sistema de imageamento.

Tabela 4. Tabela de valores dos componentes utilizados na construção deste protótipo.

Item	Valor (US$)
Raspberry Pi 4B	47,75
Arduino Nano*	16,35
CMOS Sony IM577	196,00
Lente Objetiva 10x	40,48
Fluxômetro Sensirion SFM3400-D	45,00
Catraca Contra-Recuo CSK20*	45,50

2x Motor de Passo Nema17*	26,45
Caixa Acrílica*	84,50
Bomba Hidráulica 10 L/min*	66,42
Estrutura de Alumínio do IMS	245,46
Itens de Menor Valor(aproximado)**	45,00
Total:	**858,45**

*valor de conversão US$1,00 = R$5,50. **Itens com valor unitário menor que US$10,00.

A otimização do software está sendo trabalhada de maneira intensiva e, para um futuro próximo está previsto, além de melhorias no sistema de iluminação, a fabricação com as correções e melhorias no design do sistema de coleção e testes em campo do sistema como um todo.

O sistema de transmissão por WiFi e possíveis integrações a bancos de dados internacionais[59] ainda não foi iniciada. Por questões práticas, estes recursos foram decididos ser analisados posteriormente, já que primeiramente é necessário estabelecer a capacidade computacional da Raspberry Pi antes de definir quais processos serão feitos nela e quais serão feitos em nuvem.

Propostas de negócios com a parceira Oshtech Inc. ainda estão sendo estudadas. Para a continuidade do trabalho, será necessário financiamento de órgãos governamentais, tais como a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ou investidores anjos. Estas possibilidades estão sendo avaliadas, assim como a criação de uma Startup, tendo como primeiro produto o sistema que está em desenvolvimento neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

[1] C. Sierra-Heredia *et al.*, 'Aeroallergens in Canada: Distribution, public health impacts, and opportunities for prevention', *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 15, no. 8, 2018, doi: 10.3390/ijerph15081577.

[2] R. N. McInnes *et al.*, 'Mapping allergenic pollen vegetation in UK to study environmental exposure and human health', *Sci. Total Environ.*, vol. 599–600, no. May, pp. 483–499, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.136.

[3] K. Bastl, U. Berger, and M. Kmenta, 'Evaluation of Pollen Apps Forecasts:The Need for Quality Control in an eHealth Service', *J. Med. Internet Res.*, vol. 19, no. 5, pp. 1–8, 2017, doi: 10.2196/jmir.7426.

[4] V. Razmovski, T. J. O'Meara, D. J. M. Taylor, and E. R. Tovey, 'A new method for simultaneous immunodetection and morphologic identification of individual sources of pollen allergens', *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 105, no. 4, pp. 725–731, 2000, doi: 10.1067/mai.2000.105222.

[5] C. Geller-Bernstein and J. M. Portnoy, 'The Clinical Utility of Pollen Counts', *Clin. Rev. Allergy Immunol.*, vol. 57, no. 3, pp. 340–349, 2019, doi: 10.1007/s12016-018-8698-8.

[6] H. Garcia-Mozo, 'The use of aerobiological data on agronomical studies', *Ann. Agric. Environ. Med. AAEM*, vol. 18, pp. 1–6, Jun. 2011.

[7] J. Oteros *et al.*, 'Better prediction of Mediterranean olive production using pollen-based models', *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 34, pp. 685–694, Jul. 2014, doi: 10.1007/s13593-013-0198-x.

[8] M. Smith *et al.*, 'Geographic and temporal variations in pollen exposure across Europe', *Allergy*, vol. 69, May 2014, doi: 10.1111/all.12419.

[9] B. Tommaso, F. Orlandi, C. Sgromo, B. Romano, and M. Fornaciari, 'Evidences of olive pollination date variations in relation to spring temperature trends', *Aerobiologia*, vol. 25, pp. 227–237, Dec. 2009, doi: 10.1007/s10453-009-9128-4.

[10] N. Aboulaich *et al.*, 'Effect of meteorological parameters on Poaceae pollen in the atmosphere of Tetouan (NW Morocco)', *Int. J. Biometeorol.*, vol. 57, no. 2, pp. 197–205, 2013, doi: 10.1007/s00484-012-0566-2.

[11] G. D'Amato *et al.*, 'Meteorological conditions, climate change, new emerging factors, and asthma and related allergic disorders. A statement of the World Allergy Organization', *World Allergy Organ. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–2, 2015, doi: 10.1186/s40413-015-0073-0.

[12] Y. Kwon, D.-S. Kim, and K.-O. Yim, 'Herbicide-resistant genetically modified crop: Assessment and management of gene flow', *Weed Biol. Manag. - WEED BIOL MANAG*, vol. 1, pp. 96–107, Jun. 2001, doi: 10.1046/j.1445-6664.2001.00022.x.

[13] L. Ruga, B. Tommaso, F. Orlandi, B. Romano, and M. Fornaciari, 'Analysis of the potential fungal biodeteriogen effects in the "Doctorate Library" of the University of Perugia, Italy', *Grana*, vol. 47, pp. 60–69, May 2008, doi: 10.1080/00173130801916624.

[14] G. M. Volk, 'Chapter 25 : Collecting pollen for genetic resources conservation', *Natl. Cent. Genet. Resour. Preserv.*, pp. 1–10, 2011.

[15] D. Barber *et al.*, 'Understanding patient sensitization profiles in complex pollen areas: A molecular epidemiological study', *Allergy*, vol. 63, pp. 1550–8, Dec. 2008, doi: 10.1111/j.1398-9995.2008.01807.x.

[16] A. Pauling, R. Gehrig, and B. Clot, 'Toward optimized temperature sum parameterizations for forecasting the start of the pollen season', *Aerobiologia*, vol. 30, Mar. 2014, doi: 10.1007/s10453-013-9308-0.

[17] J. Oteros *et al.*, 'Automatic and online pollen monitoring', *Int. Arch. Allergy Immunol.*, vol. 167, no. 3, pp. 158–166, 2015, doi: 10.1159/000436968.

[18] R. García-Almaraz *et al.*, 'Prevalence and risk factors associated with allergic rhinitis in Mexican school children: Global Asthma Network Phase I', *World Allergy Organ. J.*, vol. 14, no. 1, 2021, doi: 10.1016/j.waojou.2020.100492.

[19] T. P. Miller and C. R. Zeiss, ‘Allergic rhinitis’, *Allergy Proc.*, vol. 14, no. 2, p. 116, 1993, doi: 10.2500/108854193778812198.
[20] D. Voukantsis, U. Berger, F. Tzima, K. Karatzas, S. Jaeger, and K. C. Bergmann, ‘Personalized symptoms forecasting for pollen-induced allergic rhinitis sufferers’, *Int. J. Biometeorol.*, vol. 59, no. 7, pp. 889–897, Jul. 2015, doi: 10.1007/s00484-014-0905-6.
[21] J. T. M. Buters *et al.*, ‘Pollen and spore monitoring in the world’, *Clin. Transl. Allergy*, vol. 8, no. 1, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1186/s13601-018-0197-8.
[22] J. M. Maya-Manzano, M. Smith, E. Markey, J. H. Clancy, J. Sodeau, and D. J. O´Connor, ‘Recent developments in monitoring and modelling airborne pollen, a review’, *Grana*, pp. 1–19, 2020, doi: 10.1080/00173134.2020.1769176.
[23] EAS QC Working Group *et al.*, ‘Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis’, *Aerobiologia*, vol. 30, no. 4, pp. 385–395, Dec. 2014, doi: 10.1007/s10453-014-9335-5.
[24] V. Agranovski, Z. Ristovski, M. Hargreaves, P. J. Blackall, and L. Morawska, ‘Performance evaluation of the UVAPS: influence of physiological age of airborne bacteria and bacterial stress’, *J. Aerosol Sci.*, vol. 34, no. 12, pp. 1711–1727, Dec. 2003, doi: 10.1016/S0021-8502(03)00191-5.
[25] B. Crouzy, M. Stella, T. Konzelmann, B. Calpini, and B. Clot, ‘All-optical automatic pollen identification: Towards an operational system’, *Atmos. Environ.*, vol. 140, pp. 202–212, 2016, doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.062.
[26] N. Cao, M. Meyer, L. Thiele, and O. Saukh, ‘Automated Pollen Detection with an Affordable Technology’, *EWSN 20 Proc. 2020 Int. Conf. Embed. Wirel. Syst. Netw. Proc. 2020 Int. Conf. Embed. Wirel. Syst. Netw.*, pp. 108–119, 2020.
[27] E. Sauvageat *et al.*, ‘Real-time pollen monitoring using digital holography’, *Atmospheric Meas. Tech.*, vol. 13, no. 3, pp. 1539–1550, 2020, doi: 10.5194/amt-13-1539-2020.
[28] J. De Gelder, K. De Gussem, P. Vandenabeele, and L. Moens, ‘Reference database of Raman spectra of biological molecules’, *J. Raman Spectrosc.*, vol. 38, no. 9, pp. 1133–1147, Sep. 2007, doi: 10.1002/jrs.1734.
[29] M. Brands *et al.*, ‘Characterization of a Newly Developed Aircraft-Based Laser Ablation Aerosol Mass Spectrometer (ALABAMA) and First Field Deployment in Urban Pollution Plumes over Paris During MEGAPOLI 2009’, *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 46–64, Jan. 2011, doi: 10.1080/02786826.2010.517813.
[30] M. Z. Martin, M.-D. Cheng, and R. C. Martin, ‘Aerosol Measurement by Laser-Induced Plasma Technique: A Review’, *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 31, no. 6, pp. 409–421, Dec. 1999, doi: 10.1080/027868299303968.
[31] J. A. Huffman *et al.*, ‘Real-time sensing of bioaerosols: Review and current perspectives’, *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 54, no. 5, pp. 465–495, 2020, doi: 10.1080/02786826.2019.1664724.
[32] J. Buters, C. Schmidt-Weber, and J. Oteros, ‘Next-generation pollen monitoring and dissemination’, *Allergy Eur. J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 73, no. 10, pp. 1944–1945, 2018, doi: 10.1111/all.13585.
[33] S. Ruske *et al.*, ‘Evaluation of machine learning algorithms for classification of primary biological aerosol using a new UV-LIF spectrometer’, *Atmospheric Meas. Tech.*, vol. 10, no. 2, pp. 695–708, 2017, doi: 10.5194/amt-10-695-2017.
[34] S. Ruske, D. O. Topping, V. E. Foot, A. P. Morse, and M. W. Gallagher, ‘Machine learning for improved data analysis of biological\hack\break aerosol using the WIBS’, *Atmospheric Meas. Tech.*, vol. 11, no. 11, pp. 6203–6230, 2018, doi: 10.5194/amt-11-6203-2018.
[35] ‘Lucas, R., L. Bunderson, N. Allan, and K. Lambson. 2018. Automated airborne particulate matter collection, imaging, identification, and analysis. US Patent WO2016073745A3, filed November 5, 2015, and issued September 29, 2016’.
[36] J. Oteros *et al.*, ‘Building an automatic pollen monitoring network (ePIN): Selection of optimal sites by clustering pollen stations’, *Sci. Total Environ.*, vol. 688, pp. 1263–1274, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.131.

[37] B. E. Swanson and J. A. Huffman, ‘Pollen clustering strategies using a newly developed single-particle fluorescence spectrometer’, *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 54, no. 4, pp. 426–445, 2020, doi: 10.1080/02786826.2019.1711357.
[38] E. Hecht, *Optics*. 2016.
[39] J. A. Als-Nielsen and D. F. McMorrow, *Elements of Modern X-ray Physics*, 2nd ed. Wiley, 2001.
[40] J. M. Geary, *Introduction to lens design : with practical ZEMAX examples*. Willmann-Bell, 2002. [Online]. Available: http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=d3b2f47d75e74ca9f8b42bdbee809e55
[41] K. Harding, *Handbook of optical dimensional metrology*. 2016, p. 506.
[42] T. L. Williams, *Optical transfer function of imaging systems*. in Optics and optoelectronics series. Bristol: Institute of Physics Publ, 1999.
[43] Optikos Corporation, ‘How to Measure MTF and other Properties of Lenses’, *Audubon*, pp. 1–64, 1999.
[44] W. J. Smith, *Modern optical engineering: the design of optical systems*, 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2000.
[45] S. N. Ahmed, ‘7 - Position-sensitive detection and imaging’, in *Physics and Engineering of Radiation Detection (Second Edition)*, S. N. Ahmed, Ed., Elsevier, 2015, pp. 435–475. doi: 10.1016/B978-0-12-801363-2.00007-3.
[46] 3M Industrial Adhesives and T. Division, ‘3M Industrial Adhesives and Tapes - Design and Production Guide’, no. October, 2019, [Online]. Available: www.3M.com/assemblysolutions
[47] J. Oteros *et al.*, ‘An operational robotic pollen monitoring network based on automatic image recognition’, *Environ. Res.*, vol. 191, no. March, 2020, doi: 10.1016/j.envres.2020.110031.
[48] G. K. Zewdie, D. J. Lary, X. Liu, D. Wu, and E. Levetin, ‘Estimating the daily pollen concentration in the atmosphere using machine learning and NEXRAD weather radar data’, *Environ. Monit. Assess.*, vol. 191, no. 7, 2019, doi: 10.1007/s10661-019-7542-9.
[49] J. Boulter, D. Cziczo, A. Middlebrook, D. Thomson, and D. Murphy, ‘Design and performance of a pumped counterflow virtual impactor’, *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 40, no. 11, pp. 969–976, Nov. 2006, doi: 10.1080/02786820600840984.
[50] B. T. Chen and H. C. Yeh, ‘An improved virtual impactor: Design and performance’, *J. Aerosol Sci.*, vol. 18, no. 2, pp. 203–214, 1987, doi: 10.1016/0021-8502(87)90056-5.
[51] V. Razmovski, T. O’meara, M. Hjelmroos, G. Marks, and E. Tovey, ‘Adhesive tapes as capturing surfaces in Burkard sampling’, *Grana*, vol. 37, no. 5, pp. 305–310, 1998, doi: 10.1080/00173139809362683.
[52] A. M. Turing, ‘COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE’, 1950.
[53] A. Géron, *Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow : concepts, tools, and techniques to build intelligent systems*. p. 551.
[54] S. V. Mahadevkar *et al.*, ‘A Review on Machine Learning Styles in Computer Vision—Techniques and Future Directions’, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 107293–107329, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3209825.
[55] M. Polling *et al.*, ‘Neural networks for increased accuracy of allergenic pollen monitoring’, *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 11357, May 2021, doi: 10.1038/s41598-021-90433-x.
[56] J. Friedman, T. Hastie, and R. Tibshirani, ‘The Elements of Statistical Learning Preface to the Second Edition’, 2008.
[57] H. Kaur, H. S. Pannu, and A. K. Malhi, ‘A Systematic Review on Imbalanced Data Challenges in Machine Learning: Applications and Solutions’, *ACM Comput. Surv.*, vol. 52, no. 4, pp. 1–36, Jul. 2020, doi: 10.1145/3343440.
[58] M. Everingham, L. Van Gool, C. K. I. Williams, J. Winn, and A. Zisserman, ‘The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge’, *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 88, no. 2, pp. 303–338, Jun. 2010, doi: 10.1007/s11263-009-0275-4.
[59] A. Kurganskiy *et al.*, ‘Incorporation of pollen data in source maps is vital for pollen dispersion models’, *Atmospheric Chem. Phys.*, vol. 20, no. 4, pp. 2099–2121, 2020, doi: 10.5194/acp-20-2099-2020.