

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Renato Luiz Faraco Filho

**Uso de sensores a fibra óptica como ferramenta para predição de odor durante
o processo de fermentação do café**

Juiz de Fora

2024

Renato Luiz Faraco Filho

**Uso de sensores a fibra óptica como ferramenta para predição de odor durante
o processo de fermentação do café**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Engenharia Elétrica - Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Faraco Filho, Renato Luiz.

Uso de sensores a fibra óptica como ferramenta para predição de odor durante o processo de fermentação do café / Renato Luiz Faraco Filho. – 2024.

104 f. : il.

Orientador: Alexandre Bessa dos Santos

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2024.

1. Fermentação de café 2. Sensores ópticos 3. Interferômetros Mach-Zehnder 4. Controle de qualidade I. Bessa dos Santos, Alexandre, orient. II. Doutor.

Renato Luiz Faraco Filho

Uso de sensores a fibra óptica como ferramenta para predição de odor durante o processo de fermentação do café

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Engenharia Elétrica - Sistemas Eletrônicos

Aprovada em 20 de agosto de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Jonas Henrique Osório
Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. André Luís Marques Marcato
Universidade Federal de Juiz de Fora



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Bessa dos Santos, Professor(a)**, em 20/08/2024, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andre Luis Marques Marcato, Professor(a)**, em 20/08/2024, às 16:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonas Henrique Osório, Usuário Externo**, em 20/08/2024, às 16:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-UFJF (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1856211** e o código CRC **4BD9E853**.

À Renato Luiz Faraco, meu amado pai, e à Hilmara Edwiges Vieira Faraco, minha amada mãe, com todo meu amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta jornada acadêmica representa não apenas o fim de um ciclo, mas também o início de uma profunda gratidão que vai além das páginas desta dissertação. Ao expressar meus sinceros agradecimentos, desejo reconhecer as muitas pessoas e instituições que possibilitaram este capítulo enriquecedor da minha vida acadêmica.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me guiar e fortalecer ao longo desta caminhada. Sua presença foi essencial para superar os desafios e celebrar as conquistas.

Expresso minha imensa gratidão ao meu orientador, Alexandre Bessa dos Santos, pela orientação excepcional e pela paciência durante todo o processo. Sua expertise e dedicação foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço por sempre estar disponível para discutir ideias e por seus valiosos conselhos que enriqueceram este projeto. Sua confiança em mim foi uma grande fonte de motivação.

Aos meus pais, Renato e Hilmara, à minha irmã Letícia, e à minha namorada Carina, pela infinita paciência, apoio incondicional e amor inabalável. Vocês são minha base e meu alicerce, e sem vocês, nada disso seria possível. Agradeço por sempre acreditarem em mim e me incentivarem a perseguir meus sonhos.

Aos meus amigos e colegas de pesquisa, Italo, Deivid, João e Felipe, que auxiliaram na execução dos experimentos realizados neste trabalho. A colaboração e o companheirismo de vocês foram essenciais para o sucesso desta pesquisa. Agradeço pelos momentos de aprendizado e pelas discussões construtivas que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, não poderia deixar de agradecer à Universidade Federal de Juiz de Fora e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela infraestrutura e formação acadêmica. Também expresso minha gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 - pelo suporte financeiro.

"A única maneira de fazer um excelente trabalho é amar o que você faz." (Steve Jobs, 2011)

RESUMO

Este estudo explora o uso de interferômetros Mach-Zehnder em fibra óptica (MZIs) para monitorar o processo de fermentação de grãos de café, com ênfase na identificação de variações nos padrões de odor. A análise dos dados coletados de CO₂ e temperatura ao longo do processo de fermentação, juntamente com os perfis de aroma, revelou correlações significativas que permitem a detecção de pontos críticos de transição entre diferentes aromas. A aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) reduziu a complexidade dos dados, preservando uma grande parte da variabilidade original e permitindo uma diferenciação clara entre os aromas. Os resultados indicam que a integração de dados de sensores ópticos e eletrônicos pode otimizar o monitoramento do processo de fermentação, oferecendo uma alternativa eficiente e precisa aos métodos tradicionais de controle de qualidade. O estudo sugere a necessidade de futuras pesquisas para integrar sensores adicionais e algoritmos de aprendizado de máquina mais avançados, visando melhorar a classificação de aromas e a repetibilidade dos sensores.

Palavras-chave: Fermentação de café; Sensores ópticos; Interferômetros Mach-Zehnder; Controle de qualidade

ABSTRACT

This study explores the use of fiber optic Mach-Zehnder interferometers (MZIs) to monitor the coffee bean fermentation process, with an emphasis on identifying variations in odor patterns. The analysis of CO₂ and temperature data collected throughout the fermentation process, along with aroma profiles, revealed significant correlations that allow the detection of critical transition points between different aromas. The application of Principal Component Analysis (PCA) effectively reduced the complexity of the data, preserving a large portion of the original variability and enabling a clear differentiation between aromas. The results indicate that integrating data from optical and electronic sensors can optimize the monitoring of the fermentation process, offering an efficient and precise alternative to traditional quality control methods. The study suggests the need for future research to integrate additional sensors and more advanced machine learning algorithms to improve aroma classification and sensor repeatability.

Keywords: Coffee fermentation; Optical sensors; Mach-Zehnder interferometers; Quality control

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1–Diferentes métodos empregados para o processo de fermentação do café.	29
Figura 2.2–Esquema simplificado de uma reação de Maillard envolvendo um aminoácido e um açúcar redutor, destacando as principais etapas químicas responsáveis pela formação de compostos de aroma durante a torrefação do café.	30
Figura 3.1–Sensor à fibra óptica extrínseco	34
Figura 3.2–Sensor à fibra óptica intrínseco	34
Figura 3.3–Espectro transmitido de uma LPG	35
Figura 3.4–Diagrama esquemático de uma LPG	35
Figura 3.5–Curvas de correspondência de fase	36
Figura 3.6–Diagrama de fabricação para o método do arco elétrico	41
Figura 3.7–LPG fabricada pelo método arco elétrico	42
Figura 3.8–Interferômetros de Michelson: (a) clássico, (b) fibra óptica, (c) com uso de LPG	43
Figura 3.9–Interferômetros de Mach-Zehnder: (a) clássico, (b) fibra óptica, (c) com uso de duas LPG em série	46
Figura 5.1–LPG utilizadas para a fabricação dos interferômetros	55
Figura 5.2–Interferômetro MZI fabricado 1	55
Figura 5.3–Interferômetro MZI fabricado 2	55
Figura 5.4–Diagrama esquemático do encapsulamento para a sonda óptica projetada	56
Figura 5.5–Conceito do encapsulamento para a sonda óptica projetada	57
Figura 5.6–Sonda óptica desenvolvida	57
Figura 5.7–Sonda eletrônica desenvolvida	58
Figura 5.8–Posicionamento dos sensores ópticos no biorreator	60
Figura 5.9–espectro dos dois interferômetros após a aplicação do método de filtragem	62
Figura 5.10–Seleção da ordem do filtro para extração de franjas, sensor meio	63
Figura 5.11–Seleção da ordem do filtro para extração de franjas, sensor topo	63
Figura 5.12–Espectro após processamento, sensor meio	64
Figura 5.13–Espectro após processamento, sensor topo	64
Figura 5.14–Comparação entre espectros após processamento	64
Figura 5.15–Processamento dados originais	65
Figura 5.16–Processamento dados originais	66
Figura 6.1–Variação do espectro óptico ao longo do processo de fermentação (sensor meio)	67
Figura 6.2–Variação do espectro óptico ao longo do processo de fermentação (sensor topo)	68
Figura 6.3–Espectrograma do sensor do meio durante o processo de fermentação.	68
Figura 6.4–Espectrograma do sensor do topo durante o processo de fermentação.	69

Figura 6.5–Variação dos comprimentos de onda das franjas ao longo do tempo . . .	69
Figura 6.6–Variação das componentes principais ao longo do tempo	70
Figura 6.7–Regressão linear feita entre PC1 e o tempo de fermentação	71
Figura 6.8–Percepção de odor distribuída ao longo dos componentes principais do sensor e sua classificação/predição via regressão logística	72
Figura 6.9–Descritores de odor distribuídos ao longo dos principais componentes do sensor e sua classificação/predição via Naive-Bayes.	73
Figura 6.10–Resumo dos dados adquiridos durante o processo de fermentação. . . .	74
Figura 6.11–Série temporal para as variações de CO ₂ e temperatura	75
Figura 6.12–Espectrograma do sensor óptico posicionado no topo associado ao processo de fermentação	76
Figura 6.13–Dados de CO ₂ e temperaturas associadas ao PCA	77
Figura .1 – Esquemático do circuito principal.	98
Figura .2 – Placa de circuito principal e secundária do sistema prontas.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela .1 – Tabela de dados do sensor MH-Z19B	97
Tabela .2 – Tabela de dados do sensor SCD30	97
Tabela .3 – Tabela de dados do sensor DS18B20	98
Tabela .4 – Componentes utilizados, contendo a quantidade e modelo de cada um.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DBSCAN	(<i>Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise</i>)
FDM	Modelagem por deposição fundida (<i>Fused deposition modelling</i>)
FOS	Sensor à fibra óptica (<i>Fiber Optic Sensor</i>)
GC-MS	Cromatografia gasosa/espectrometria de massas (<i>gas chromatography/mass spectrometry</i>)
GC-O	Cromatografia gasosa/olfatometria (<i>gas chromatography/olfactometry</i>)
HSSE	Extração sorptiva do espaço de cabeça (<i>headspace sorptive extraction</i>)
HS-SPME	Micro-extração em fase sólida do espaço de livre (<i>headspace solid-phase microextraction</i>)
LPG	Redes de período longo (<i>Long Period Gratings</i>)
LPFG	Redes de período longo em fibra (<i>Long Period Fiber Gratings</i>)
VOC	Composto orgânico volátil (<i>Volatile organic compounds</i>)
NB	Classificador Naive-Bayes
MI	Interferômetro Michelson (<i>Michelson Interferometer</i>)
MT-LPFG	Redes de período longo em fibra micro afunilada (<i>Micro Tapered - Long Period Fiber Gratings</i>)
FID	Detector de ionização de chama (<i>flame ionization detector</i>)
FD	Diluição de sabor (<i>flavor dilution</i>)
MS	Espectrometria de massa (<i>mass spectrometry</i>)
MZI	Interferômetro Mach-Zehnder (<i>Mach-Zehnder Interferometer</i>)
MM	Multi modo (<i>Multi mode</i>)
NMR	Ressonância magnética nuclear (<i>nuclear magnetic resonance</i>)
NTD	Dispositivo de captura por agulha (<i>needle trap device</i>)
OPD	Diferença de caminho óptico (<i>Optical path difference</i>)
OSA	Analisador de espectro óptico (<i>Optical spectrum analyzer</i>)
PCA	Análise de componentes principais (<i>Principal component analysis</i>)
PLA	Ácido polilático (<i>Polylactic acid</i>)
SBSE	Extração sorptiva por barra de agitação (<i>stir bar sorptive extraction</i>)
SM	Mono modo (<i>Single mode</i>)
SMF	Fibra monomodo (<i>Single mode fiber</i>)
SPME	Microextração em fase sólida (<i>solid-phase microextraction</i>)
SVD	Decomposição em valor singular (<i>singular value decomposition</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{dB}^m	Mínima amplitude entre cada vale de atenuação
A	Amplitude da onda recombinação
A_r	Amplitude do braço de referência
A_s	Amplitude do braço de sinal
a_i	Coefficientes do filtro de Savitzky-Golay
C	Fator de normalização
C	Número de classes de Y
d	Comprimento do meio
D	Largura da franja
$\text{Dist}()$	Função de distância
F	Matriz de escores fatoriais
I	Intensidade da luz
I_{MI}	Intensidade da luz no interferômetro de Michelson
I_{MZI}	Intensidade da luz no interferômetro de Mach-Zehnder
I_r	Intensidade da luz no braço de referência
I_s	Intensidade da luz no braço de detecção
T	Temperatura do mensurado
T_i	Transmissão mínima do vale de atenuação
ϵ	Deformação sob carga axial
k	Coefficiente de acoplamento
k_m	Coefficiente de acoplamento para o m -ésimo modo de casca
L	Comprimento da rede de longo período
L_{cav}	Comprimento da cavidade ressonante
Λ	Período das redes de longo período
λ	Comprimento de onda
λ_{ca}	comprimento de onda de acoplamento
λ_{res}^m	Comprimento de onda central
β_0	Intercepto da regressão logística, ou seja, o valor esperado da transformação logit quando $X_1 = 0$.
β_1	Coefficiente de regressão do preditor X_1 , que quantifica a mudança na transformação logit por unidade de mudança em X_1 .
δ	Parâmetro de desafinação
δ_p	Métrica de diferença do ponto de dados P
$\delta\lambda_{(m,m+1)}$	Largura de banda entre dois vales ressonantes
δn_{eff}^m	Diferença entre os índices de refração núcleo-casca
Δ	Matriz diagonal vetores singulares
Δk	Diferença de caminho óptico
$\Delta\lambda_{3dB}^m$	Largura de banda a meia altura
$\Delta\phi$	Mudanças no caminho óptico relativo entre duas ondas
ω_L	Frequência angular da luz

ρ_p	Densidade local do ponto de dados
n	Relação entre o índice de refração e o comprimento do meio
n_2	Índice de refração da casca
n_{ext}	Índice de refração do meio externo
$n_{eff,co}$	Índice de refração do núcleo
$n_{eff,cl}^m$	Índice de refração da casca
m	Modo de acoplamento
minPts	Número mínimo de pontos em um "cluster"
N	Número total de pontos em λ
N_p	Vizinhança em um "cluster"
P	Centro da vizinhança do ponto de dados em um "cluster"
P	Matriz de vetores singulares à esquerda
$P(Y = 1 X_1)$	Probabilidade do evento $Y = 1$ dado o preditor X_1 .
$P(Y = y X = x)$	Probabilidade posterior da classe Y dada a instância x
$P(Y = y)$	Probabilidade a priori da classe Y
$P(X = x Y = y)$	Probabilidade condicional das variáveis X dadas a classe Y
$P(y_i, X = x)$	Probabilidade conjunta de uma classe y_i e uma instância x
Q	Matriz de vetores singulares à direita
r_2	Raio da casca
R_{ef}	Quantidade de luz emitida para o braço de referência
S_{ens}	Quantidade de luz emitida para o braço de detecção
x_{k+i}	Valores originais do sinal para pontos ao redor de k
x_i	Valores individuais correspondentes a diferentes pontos em λ
x_r	Comprimento do braço de referência
x_s	Comprimento do braço de sinal
X	Tabela de dados
$\bar{x}(\lambda)$	Média em relação ao comprimento de onda central
y_k	Valor suavizado na posição k
y_i	Valor alvo estimado de Y para uma instância dada x_i de X
Y	Variável aleatória não observada do domínio $D_Y = 0, 1$
$\phi(t)$	Variação de fase
$\phi(t)_{MI}$	Variação de fase no interferômetro de Michelson
$\phi(t)_{MZI}$	Variação de fase no interferômetro de Mach-Zehnder
ϕ_r	Fase do braço de referência
ϕ_s	Fase do braço de detecção
ϕ_o	Diferença de fase quase estática entre dois feixes
T_{core}	Fator de transmissão pelo núcleo
T_{clad}	Fator de transmissão pelo casca

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contexto geral e motivação para o estudo	17
1.2	Importância da Pesquisa	18
1.3	Objetivos, Justificativa e contribuições	19
1.3.1	Artigos Publicados	19
1.4	Estrutura da dissertação	20
2	O PROCESSO DE FERMENTAÇÃO DO CAFÉ	22
2.1	O processo de fermentação natural (a seco)	23
2.2	O processo de fermentação úmido	24
2.3	O processo de fermentação despulpado natural (semi-seco)	25
2.4	Uma breve comparação entre os métodos pós colheita	28
2.5	A formação do aroma no café, e métodos de análise	28
2.6	Atividade microbiológica durante o processo de fermentação	31
2.7	Métodos para determinação do aroma	32
3	SENSORES À FIBRA ÓPTICA	34
3.1	Princípios básicos dos sensores à fibra óptica	34
3.2	Redes de período longo	34
3.3	O uso de redes de período longo como sensores	38
3.4	O método arco elétrico	41
3.5	Interferômetros a fibra óptica	42
4	TÉCNICAS DE RECONHECIMENTO DE PADRÕES	48
4.1	A técnica DBSCAN	48
4.2	Análise de componentes principais	50
4.3	Regressão logística	51
4.4	O classificador Naive-Bayes	52
5	METODOLOGIA	54
5.1	Fabricação dos interferômetros	54
5.2	Desenvolvimento das sondas	56
5.3	Desenvolvimento do sistema eletrônico	57
5.4	Preparo do café	58
5.5	Aquisição de dados dos sensores	60
5.6	Processamento dos dados coletados	61
5.6.1	Processamento dos sensores ópticos	61
5.6.2	Processamento dos sensores eletrônicos	65
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
6.1	Resultados obtidos	67
6.2	O uso de classificadores para a predição dos aromas	71

6.3	Integração entre os sensores ópticos e eletrônicos	74
6.4	Discussão dos Resultados	77
7	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	81
	ANEXO A – Projeto e montagem do sistema de medição e aquisição de parâmetros com sensores eletrônicos	95
.1	Projeto da caixa e impressão 3D	99
	ANEXO B – Códigos utilizados para o desenvolvimento do sistema de aquisição eletrônico	101

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto geral e motivação para o estudo

A 4^a revolução industrial está profundamente envolvida com a coleta e processamento de informações para operar as empresas da maneira mais eficiente possível. A coleta de dados associada a essa nova perspectiva industrial está relacionada ao aprendizado de máquina, internet das coisas, mineração de dados e instrumentação em massa. Pode-se notar um ciclo de *feedback* entre esse novo modelo industrial e a instrumentação; enquanto a necessidade de dados impulsiona o desenvolvimento de sensores, novos sensores permitem novos modelos de processamento.

Em (108), os autores discutem a implementação dos paradigmas da indústria 4.0 na indústria agrícola e apontam que a pesquisa em sensores agrícolas é crucial. Nesse cenário, um tipo novo e promissor de sensor para a 4^a geração da agricultura e da indústria alimentícia é o sensor eletrônico de odor (*e-nose*) (5), pois eles fornecem avaliação não destrutiva e rápida de produtos agrícolas e alimentícios, melhorando assim a produção em termos de qualidade e velocidade.

A relação entre padrões que descrevem características e intensidade de cheiros é desafiadora. Um conjunto padrão de palavras é frequentemente usado, os chamados descritores de odores (93). Do ponto de vista sensorial, vários estudos mostraram correlações entre propriedades químicas e descritores de odores (22, 97, 49).

E-noses são tipicamente fabricados por uma matriz de sensores de gás usando polímeros condutores, semicondutores de óxido metálico, microbalança de cristal de quartzo e sensores de onda acústica de superfície, projetados para detectar uma ampla variedade de compostos orgânicos voláteis (VOCs) (157). Esses dispositivos têm sido usados para auxiliar no monitoramento de vários produtos alimentícios, como grãos de café (53), chá (162), cacau (147) e carne (33).

No entanto, esses sensores apresentam algumas desvantagens. Eles são altamente sensíveis à temperatura, umidade, pressão e velocidade do gás; além de necessitarem de tratamento especial do sensor e da amostra para atingir um estado de equilíbrio antes da medição, e atualmente podem ter um tamanho impraticável (148). Sensores de fibra óptica (FOS), por outro lado, apresentam vantagens que podem superar algumas dessas desvantagens. Por exemplo, eles são menos suscetíveis a ruídos, inertes (vidro) e pequenos. Além disso, sensores baseados em dispositivos como grades de fibra de longo período (LPFGs) apresentam um espectro de transmissão complexo, o que favorece medições multiparamétricas e de autocompensação (103, 60, 77).

De fato, LPFGs têm sido usadas para variáveis ambientais, como umidade (109, 161, 156), proporção molar de metano (143), gás sulfeto de hidrogênio (128) e gás óxido

nítrico (160), por exemplo. Neste trabalho, apresentamos um nariz óptico usando dois interferômetros de Mach-Zehnder em fibra (MZIs), construídos em torno de um afinamento de fibra em cascata por uma LPFG micro-afinada (MT-LPFG). Esses dispositivos ópticos foram usados para coletar dados sobre o processo de fermentação de grãos de café.

O café é uma das commodities mais comercializadas globalmente, com o consumo de café atingindo 175,6 milhões de sacas em 2022 (119). Além disso, o consumo global de café aumentou consistentemente, com uma média anual de 1,9% nos últimos 50 anos (102). Esse cenário destaca a importância da inovação tecnológica não apenas na agricultura em geral, mas também em setores chave como o café, onde a busca por melhorias na produção é constante e essencial para a economia global. Além disso, o café desempenha um papel importante na economia brasileira, pois o país é o maior produtor e exportador de café (119). Ademais, a relação entre a fermentação dos grãos e o perfil de aroma do café é delicada e importante, uma vez que o processo pode aumentar a diversidade de aroma e sabor do café (86), e, portanto, seu valor. No entanto, um dos principais desafios em relação à fermentação do café é a falta de controle, com tempo de fermentação, temperatura e pH desempenhando um papel importante (102).

1.2 Importância da Pesquisa

Atualmente, as principais técnicas utilizadas no processo de fermentação do café dependem de métodos sensoriais humanos. Por exemplo, um estudo envolvendo seis degustadores de café certificados como "*Q-Graders*" mostra que a avaliação ocorre após a conclusão dos processos de fermentação e torrefação. As amostras de café correspondentes a cada tratamento são avaliadas seguindo o protocolo "*Fine Robusta Cupping*". Cada degustador avalia a bebida cinco vezes, atribuindo pontuações para características como fragrância/aroma, sabor, retrogosto, acidez, amargor/doçura e sensação na boca, em uma escala de 6 a 10 pontos (44, 31).

Além dos métodos sensoriais, (85) Gonzalez-Rios et al. propuseram o uso de micro-extração em fase sólida do espaço de cabeça/cromatografia gasosa-espectrometria de massa (HS-SPME/GC-MS) e microextração em fase sólida do espaço de cabeça/cromatografia gasosa-olfatometria (HS-SPME/GC-O) para a caracterização de aromas durante o processo de fermentação do café. No entanto, além da expertise analítica necessária e dos custos relativamente altos de preparação das amostras, a aplicabilidade dessas metodologias para monitoramento contínuo na indústria alimentícia é limitada (81, 82).

Esses métodos apresentam várias desvantagens e controvérsias (121). A análise sensorial, embora essencial, é subjetiva e pode variar entre diferentes degustadores, mesmo que sejam altamente treinados. Além disso, a avaliação sensorial é realizada somente após a conclusão dos processos de fermentação e torrefação, não permitindo um monitoramento contínuo e em tempo real do processo.

Por outro lado, os métodos de cromatografia, embora forneçam uma caracterização detalhada dos compostos aromáticos, são tecnicamente complexos e dispendiosos (28). A necessidade de preparo das amostras e a utilização de equipamentos laboratoriais dificultam sua implementação como ferramentas de monitoramento contínuo em ambientes industriais.

Nesse contexto, os sensores ópticos, especialmente quando combinados com sensores eletrônicos, mostram-se promissores. Os sensores ópticos, como os interferômetros de Mach-Zehnder em fibra, oferecem medições multiparamétricas e de autocompensação (95, 159, 78, 32), são menos suscetíveis a ruídos e apresentam alta precisão (69). Quando aliados a sensores eletrônicos, como os sensores de gás, é possível obter uma caracterização mais abrangente durante a fermentação (65).

1.3 Objetivos, Justificativa e contribuições

O objetivo deste estudo é desenvolver um dispositivo utilizando sensores à fibra óptica, capaz de determinar o aroma do café durante o seu processo de fermentação. A pesquisa busca integrar sensores ópticos e eletrônicos para proporcionar um monitoramento contínuo e preciso das mudanças aromáticas que ocorrem ao longo da fermentação, destacando a relação entre os parâmetros ambientais (como CO₂ e temperatura) e os perfis de aroma do café.

Os métodos tradicionais de cromatografia, apesar de fornecerem uma caracterização detalhada dos compostos aromáticos, apresentam limitações significativas para aplicação em ambientes industriais. Esses métodos são tecnicamente complexos, caros e requerem preparação de amostras e equipamentos laboratoriais sofisticados, dificultando a implementação de um monitoramento contínuo.

Nesse contexto, a combinação de sensores ópticos, especialmente os interferômetros de Mach-Zehnder em fibra, com sensores eletrônicos se mostra uma solução promissora. Este estudo contribui significativamente para a área de monitoramento de processos de fermentação, especialmente na produção de café, ao introduzir uma metodologia inovadora que utiliza interferômetros MZI em fibra óptica. Sendo elas:

- Eficiência na identificação de aromas
- Potencial para monitoramento em tempo real
- Aplicações industriais

1.3.1 Artigos Publicados

Para suportar as contribuições e resultados discutidos nesta dissertação, foram publicados os seguintes artigos:

- Faraco Filho, R. L., de Castro, J. V., Barino, F. O., Campos, D., & dos Santos, A. B. (2024). Enhanced aroma prediction in coffee fermentation through optical fiber sensor data fusion. *Sensors and Actuators A: Physical*, 369, 115223. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115223> (65)
- Faraco Filho, R. L., Oliveira Barino, F., Calderano, J., Valle Alvarenga, Í. F., Campos, D., & dos Santos, A. B. (2023). In-fiber Mach–Zehnder interferometer as a promising tool for optical nose and odor prediction during the fermentation process. *Optics Letters*, 48(15), 3905. <https://doi.org/10.1364/OL.486742> (70)
- Faraco-Filho, R., de Castro, J. v., Barino, F. O., Campos, D. E., & Santos, A. B. dos. (2024). Monitoring and Characterization Technology for Coffee Fermentation Aromas: A Data-Driven Approach. *IEEE Sensors Journal*, 24(6), 8371–8378. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3357294> (64)

As contribuições do autor foram fundamentais para o desenvolvimento dos trabalhos apresentados nos artigos publicados. Como primeiro autor e autor correspondente em todos, o autor liderou a concepção das ideias, a elaboração das metodologias e a execução dos experimentos descritos. No artigo "Enhanced aroma prediction in coffee fermentation through optical fiber sensor data fusion", o autor foi responsável pela integração dos dados dos sensores ópticos para melhorar a predição dos aromas durante a fermentação do café, uma inovação significativa no campo. No estudo "In-fiber Mach–Zehnder interferometer as a promising tool for optical nose and odor prediction during the fermentation process", o autor desenvolveu e implementou um interferômetro de Mach-Zehnder em fibra óptica como ferramenta para previsão de odores, contribuindo para avanços na tecnologia de "nariz óptico". Por fim, no artigo "Monitoring and Characterization Technology for Coffee Fermentation Aromas: A Data-Driven Approach", o autor liderou a aplicação de abordagens orientadas a dados para monitorar e caracterizar aromas de fermentação, explorando o potencial de tecnologias sensoriais de ponta para a indústria do café.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em quatro capítulos principais, cada um abordando aspectos fundamentais da pesquisa sobre a tecnologia de monitoramento e caracterização de aromas na fermentação de café utilizando sensores ópticos. A seguir, apresenta-se uma visão geral dos capítulos que compõem esta dissertação:

O primeiro capítulo estabelece o contexto e a motivação para o estudo, destacando a importância do monitoramento da fermentação do café e a relevância dos sensores ópticos. São apresentados os principais problemas de pesquisa e os objetivos gerais e específicos do estudo. Além disso, é realizada uma revisão bibliográfica, abordando o processo bioquímico

da fermentação do café e métodos de análise de dados e predição de aromas. Este capítulo também discute a justificativa e as contribuições esperadas do estudo.

No segundo capítulo, detalha-se a metodologia adotada para a realização da pesquisa. Inicialmente, são descritos os sensores ópticos utilizados, incluindo suas características técnicas e o processo de fabricação e encapsulamento. Em seguida, é apresentado o procedimento experimental, abrangendo a configuração experimental para o monitoramento da fermentação do café, a coleta de dados e os parâmetros monitorados, como CO₂, temperatura. Por fim, são discutidos os métodos de análise de dados, incluindo o processamento espectral, a extração de padrões de interferência e as técnicas de classificação utilizadas.

O terceiro capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados. Os dados coletados durante o processo de fermentação são apresentados e analisados, com foco nos padrões de interferência e nas mudanças espectrais observadas ao longo do tempo. A discussão dos resultados interpreta os achados com base nos objetivos definidos, comparando-os com a literatura existente e avaliando a eficácia dos sensores ópticos no monitoramento da fermentação e predição de aromas. Este capítulo também aborda as implicações práticas dos resultados para a indústria de produção de café e o potencial para melhorias no processo de fermentação.

O capítulo final resume os principais resultados da pesquisa, avaliando o cumprimento dos objetivos da dissertação. São discutidas as contribuições significativas do estudo para a tecnologia de sensores ópticos e para a indústria do café. Além disso, são identificadas as limitações do estudo e apresentadas sugestões para futuras pesquisas e aprimoramentos no uso de sensores ópticos para monitoramento de fermentação.

2 O PROCESSO DE FERMENTAÇÃO DO CAFÉ

No mercado de café, o termo “café especial” refere-se a uma bebida que possui uma qualidade superior àquelas disponíveis por preços de commodities, além de um sabor e características únicos (112). Essa qualidade da bebida de café é considerada um critério consolidado para alcançar os mercados que melhor remuneram pelo valor agregado do produto (31).

Tendo em vista um mercado que procura produtos com diferentes perfis sensoriais, os produtores têm tentado desenvolver novas práticas pós-colheita, visando aumentar a qualidade de seus cafés e a diferenciação sensorial. Aumentos nas pontuações finais, mesmo que pequenos, são relatados como uma melhoria na qualidade. Além disso, a pontuação final é complementar à análise descritiva do sabor, portanto, não é considerada isoladamente (94). Os processos pós-colheita têm evoluído ao longo dos anos e a necessidade de realizar a etapa de fermentação de maneira controlada, principalmente vinculada ao uso de culturas iniciadoras, já foi apontada como promissora para o desenvolvimento do sabor, criação de compostos voláteis e uniformidade do produto (26, 112).

A fermentação tem sido realizada para desenvolver novos perfis sensoriais e aumentar a pontuação final em cafés processados por diferentes métodos, visando alcançar uma melhor posição no mercado e uma maior valorização do produto final. Na literatura, já existem patentes publicadas sobre a fermentação do café. A maioria delas propõe o desenvolvimento de equipamentos para uso na fermentação induzida de frutos de café sob diferentes condições de disponibilidade de oxigênio, temperatura, agitação e uso de microrganismos inoculantes (31).

De acordo com Bressani *et al.* em (26) as técnicas pós-colheita adotadas nas fazendas incluem muitas fases até a secagem dos grãos, com um teor de umidade de 11-12%, e podem passar por diferentes métodos de processamento. Além disso, o armazenamento dos frutos não deve durar mais que 8 horas, caso contrário os frutos (grão cereja) podem fermentar naturalmente de forma descontrolada, prejudicando a qualidade do produto (10). Apesar da extensa variedade e complexidade dos processos, (66) resumiu o processo de fermentação do café em 3 métodos: o método de fermentação natural ou a seco, o método de fermentação úmida, e o método de fermentação despulpado natural ou semi-seco. Sendo que, o método natural, os frutos inteiros recém-colhidos são transferidos para uma plataforma de secagem, onde são fermentados e secos até atingirem níveis de 11% a 12% de umidade (87). No método úmido, o exocarpo e parte do mesocarpo são removidos mecanicamente. No método de fermentação despulpado natural ou semi-seco, a casca, a polpa e parte ou toda a mucilagem do café são removidas mecanicamente, os grãos são fermentados e, em seguida, secos (43, 63). Cada uma das técnicas tem suas peculiaridades nos perfis sensoriais e são essenciais para determinar a qualidade final do produto (41, 27).

Cada um desses processos será descrito detalhadamente nas subseções a seguir.

2.1 O processo de fermentação natural (a seco)

O processo natural implica que o fruto inteiro é seco junto (polpa, invólucro e grão). O processo a seco é usado para a maioria dos cafés Arábica no Brasil, Etiópia e Iêmen, e para quase todos os cafés Robusta no mundo (142).

Geralmente, o processo a seco é empregado após a colheita não seletiva, como o arranque manual ou a colheita mecânica. No pior cenário, quando o café chega à linha de processamento, é uma mistura de frutos verdes, maduros, sobre maduros e parcialmente secos, juntamente com folhas, galhos, terra e pedras, especialmente quando o café é colhido diretamente do solo. Os frutos em diferentes estágios de maturação devem ser separados e processados utilizando técnicas distintas para manter a máxima qualidade possível (25).

Os cafés naturais devidamente processados podem ser produtos de alta qualidade com mercado próprio. Esses cafés são ingredientes essenciais nas misturas de expresso, e como tal, desfrutam de uma demanda crescente, especialmente para produtos de alta qualidade (89, 129).

A limpeza dos frutos de café é realizada por meio de ventilação e peneiramento antes da fermentação e secagem (40), seu objetivo é separar os frutos recém-colhidos de impurezas leves, como poeira, folhas e galhos, com a ajuda de um fluxo de ar (149).

A separação baseada no teor de umidade é feita pela densidade, utilizando a flotação em água. A flotação também é empregada para separar pedras dos frutos (55).

De acordo com Ortega-Rivas (120), a flotação é utilizada para separar pedras e frutos com diferentes teores de umidade. Diversos sistemas são empregados para a separação por flotação em água: tanques de água estática, tanques de sifão, canais com armadilhas e separadores mecânicos que também são chamados de sifões mecânicos. Todos os sistemas são baseados na diferença de densidade entre os frutos maduros e verdes que são mais densos e afundam e os frutos parcialmente secos que são menos densos e flutuam (134).

O processo a seco envolve a fermentação do fruto inteiro no solo. Ao longo de 10 a 25 dias de secagem ao sol, ocorre a fermentação microbiana natural, que produz etanol e ácidos acético, láctico, butírico e carboxílicos superiores (8). Em geral, a microbiota envolvida na fermentação a seco (abrangendo bactérias, leveduras e fungos filamentosos) é muito mais variada e complexa do que aquela encontrada durante a fermentação úmida (142, 141).

A qualidade geral do café é melhorada apenas pela separação dos frutos flutuantes e afundadores, que podem então ser secos, armazenados, processados e vendidos separadamente, pois possuem qualidades diferentes (68, 4). Como dito por Knopp *et al.* em (99), o

produto final possui um teor de umidade uniforme, o que leva a uma aparência melhorada e uma torra mais uniforme.

2.2 O processo de fermentação úmido

Durante o processamento úmido, a polpa (o exocarpo e parte do mesocarpo) é removida mecanicamente (48). O mesocarpo restante, chamado de mucilagem, adere ao pergaminho e também é removido antes da secagem. A mucilagem está localizada entre a casca e o grão de café, representando em média 5% do peso seco do fruto (24). Segundo van der Vossen *et al.* em (151), Freitas (76), o processo úmido é utilizado para todos os cafés Arábica, exceto a maioria dos Arábica brasileiros, etíopes e iemenitas, e apenas para uma pequena porcentagem de Robusta, embora a tendência de processar Robusta pelo método úmido esteja aumentando.

Para processar apenas frutos maduros e frescos, é necessário colher apenas esses frutos ou separar os produtos indesejáveis antes da remoção da polpa e da mucilagem (98). A separação mecânica de frutos verdes ou não também depende do tipo de produto colhido (59). Mesmo que a colheita seja seletiva, os tipos de produtos colhidos devem ser considerados ao decidir quais etapas de limpeza e sistemas de despulpamento usar (86).

O objetivo do despulpamento é separar a polpa do grão de café (122), a polpa, que consiste na pele externa e na maior parte do mesocarpo, é arrancada espremendo os frutos de uma das seguintes maneiras: entre uma placa fixa e um tambor rotativo (despulpador de tambor); enquanto passam pelas fendas de uma tela (despulpador de tela/separador de frutos verdes); entre uma barra de despulpamento e um disco rotativo (despulpador de disco); entre um tambor rotativo e uma caixa de tela estacionária (despulpador Raoeng).

Após o despulpamento, a remoção da mucilagem visa eliminar a parte residual do mesocarpo, chamada mucilagem, que permanece presa ao endocarpo. A mucilagem é insolúvel em água e adere ao endocarpo com muita força para ser removida por simples lavagem (12). A mucilagem pode ser removida por fermentação seguida de lavagem ou por forte fricção em máquinas chamadas removedores de mucilagem (56).

Depois disso, os grãos são submetidos a 24–48 horas de fermentação em tanques submersos para permitir a degradação microbiana da camada de mesocarpo restante aderida ao endocarpo (48). Um sistema prático consiste em tanques retangulares com fundo inclinado, usados tanto como tanque quanto como meio de transporte para o café (56), cujo tamanho pode variar dependendo da capacidade do equipamento de despulpamento, uma vez que o tanque deve ser cheio rapidamente, garantindo um tempo de fermentação parecido entre os primeiros e últimos grãos que entram no tanque (25). A partir daí, os tanques são completamente drenados e o processo de fermentação pode variar, de modo que o processo de fermentação continuar naturalmente, ou o tanque pode ser reenchido com água potável. A fermentação a seco é mais rápida, mas mais difícil de controlar.

Os tempos de fermentação podem variar substancialmente, de 6 a 72 horas, dependendo da temperatura ambiente. Temperaturas mais altas e camadas de mucilagem mais espessas aceleram a fermentação. Durante o processo de fermentação, aproximadamente 60% dos açúcares são utilizados como substrato para o crescimento microbiano, que produz quantidades significativas de etanol e ácidos acético e lático, resultando em uma redução do pH (de 5.5–6.0 para 3.5–4.0) (12). Em geral, o processo de fermentação úmida pode ser caracterizado pela ação de bactérias e espécies de leveduras, enquanto fungos filamentosos são raramente encontrados (12, 46).

2.3 O processo de fermentação despulpado natural (semi-seco)

O processamento semi-seco, também chamado de método despulpado natural, combina etapas dos métodos seco e úmido. Este processo foi desenvolvido para resolver o problema da mistura de frutos verdes e maduros encontrado no processo seco, após a utilização da flotação para separar os frutos excessivamente maduros e parcialmente secos. O sistema despulpado natural visa separar os frutos imaturos dos maduros quando a colheita não seletiva é utilizada (152).

No método despulpado natural, a casca do café e parte ou toda a mucilagem são removidas mecanicamente, e o café é transferido para uma plataforma de secagem onde os grãos são fermentados e secos até atingir um teor de umidade de 11% (43). No processo semi-seco, a mucilagem não é completamente removida após a despulpa, e o pergaminho é seco junto com a maior parte ou toda a mucilagem.

O objetivo do método despulpado natural é tratar os frutos maduros separadamente e melhorar o café indo além do processo seco, separando mecanicamente os frutos maduros dos imaturos (11). Quando os frutos maduros são separados, eles são despulpados, mas a mucilagem permanece no pergaminho, que é seco com parte ou toda a mucilagem (133).

Os frutos de café são divididos em duas categorias: "flutuadores", ou frutos excessivamente maduros e parcialmente secos, e "afundadores", que são uma mistura de frutos maduros e imaturos, após serem limpos e as pedras removidas. A polpa, os frutos maduros despulpados e os frutos imaturos (verdes) são os três produtos que são separados da mistura de frutos maduros e imaturos usando pressão mecânica (51). Os frutos em pergaminho podem ter sua mucilagem deixada no lugar ou parcialmente removida fisicamente com removedores de mucilagem. Em alguns tipos de secadores, especialmente os rotativos, os frutos em pergaminho podem ser secos mecanicamente com base na quantidade de mucilagem remanescente (23). Somente quando a mucilagem está suficientemente seca para se separar das paredes do secador é que os frutos em pergaminho com toda a sua mucilagem podem ser secos mecanicamente; caso contrário, devem ser secos ao sol utilizando métodos especializados por pelo menos um dia inteiro (83).

O uso do método despulpado natural tem um impacto considerável na qualidade do

café colhido por colheita de arrasto, conforme relatado por (86, 7). A técnica despulpada natural permite o processamento único de cada produto: frutos maduros, frutos imaturos (verdes) e flutuadores (frutos excessivamente maduros e parcialmente secos). Todas as fases de maturação dos frutos são colhidas simultaneamente. Mais significativamente, possibilita o processamento separado dos melhores frutos maduros, resultando nos melhores cafés despulpados naturais. Em termos de qualidade, o método despulpado natural é uma melhoria significativa em relação ao método seco convencional e uma excelente abordagem para produzir café premium em situações onde a colheita seletiva não é prática.

Segundo McLoy (114), Sfredo *et al.* em (136), o objetivo da secagem é reduzir o teor de umidade do café em pergaminho ou em fruto para aproximadamente 12% para armazenar os grãos com segurança. Quando a umidade do ar no armazenamento está entre 60% e 65%, o teor de umidade do café permanece em 12% (24). O café é tipicamente seco para 10% ou 11% em locais úmidos para estender sua vida útil antes que absorva umidade do ar circundante. Em algumas regiões, a secagem é interrompida em 13% ou 14% para compensar as perdas de umidade durante a descascagem. Teores de umidade inferiores a 10% ou 11% aumentam a chance de grãos quebrados durante a descascagem, particularmente com os cafés Robusta mais frágeis. Teores de umidade acima de 12% aumentam a possibilidade de degradação da qualidade e perda de peso durante o armazenamento (24).

De acordo com Soeswanto *et al.* em (144), para evaporar a água do grão, o café é seco elevando sua temperatura. Os grãos são aquecidos durante o processo de secagem ao sol tanto pela exposição direta ao sol quanto pela radiação de uma superfície aquecida (no caso dos terreiros de secagem). O vento e a convecção carregam o ar saturado de umidade para longe.

As temperaturas durante a secagem mecânica e natural precisam ser monitoradas. As temperaturas do café não devem ultrapassar 45°C para frutos e 40°C para pergaminho. Um equívoco comum é que o superaquecimento só acontece em secadores mecânicos. A realidade indica o contrário. Se os grãos não forem rotacionados regularmente ou, no caso de grãos finos de Arábica, não forem protegidos do sol durante as partes mais quentes do dia com lonas plásticas, uma lona ou um telhado, as temperaturas máximas permitidas durante a secagem ao sol podem facilmente ser excedidas (24).

Ao girar o café regularmente, a temperatura pode ser controlada durante a secagem ao sol (83). Antes que aqueça demais, cubra o pergaminho. Alimentação de combustível, fluxos de ar e outros fatores regulam a temperatura durante a secagem mecânica. Quando os níveis de umidade estão baixos, o controle da temperatura torna-se ainda mais importante nas fases finais do processo de secagem (55).

Porque os frutos de café têm um alto teor de umidade (50–55% ou mais) no início do processo de secagem, temperaturas elevadas do ar em um secador podem ser usadas

sem o risco de queimar o café. Embora a temperatura do ar possa ultrapassar 90°C, o café na maioria dos tipos de secadores não aquecerá acima de 30°C quando o nível de umidade estiver alto. Reduzir a temperatura do ar é necessário à medida que a secagem prossegue. À medida que o processo de secagem chega ao fim, manter o controle sobre a temperatura do ar é essencial porque o café começa a aquecer rapidamente.

A quantidade de umidade no café, a temperatura e o tempo que o café é submetido ao superaquecimento afetam o grau de dano causado (42). Tais danos aos grãos podem assumir muitas formas diferentes, todas resultando em perdas de qualidade: grãos queimados, rachaduras no pergaminho, curvatura, lixiviação, alargamento desnecessário do corte central e assim por diante. Romper o pergaminho deixa os grãos vulneráveis a ataques microbianos durante o armazenamento. Uma xícara "plana" e sabores ácidos às vezes são atribuídos ao aquecimento extremo, que é indicado por grãos curvados em vez de normalmente planos. Quando o café é superaquecido durante as fases iniciais de secagem e não há fluxo de ar suficiente para remover a umidade, o café pode "cozinhar", o que pode conferir um sabor cozido. Grãos superaquecidos podem experimentar "cristalização", ou uma superfície impenetrável que impede a penetração de umidade no interior do grão. Quando a umidade evapora lentamente dessa casca impermeável, o grão pode branquear durante o armazenamento (62).

Quando os frutos despulpados são expostos à temperatura local e a outros fatores ambientais (umidade relativa, luz solar, chuva), a fermentação ocorre durante o processamento semi-seco. A diversidade microbiana é comparável ao processamento seco (141), exceto que a presença de fungos filamentosos é raramente observada (12). Para isso, os terreiros de secagem são áreas niveladas construídas com uma inclinação de 0,5–1% para permitir o escoamento da água da chuva. Para drenar a água da chuva, telas com furos menores que os grãos de café são posicionadas nos pontos baixos. Tipicamente, os terreiros de secagem são compostos de asfalto, azulejos ou concreto.

Usando um ancinho plano, o café úmido é espalhado em camadas finas (10 cm) e virado de oito a dez vezes por dia (23). Para protegê-lo da chuva e do orvalho, a camada de café é espessada, empilhada e coberta com lona ou plástico assim que estiver parcialmente seca (2). A frequência de rastelamento permanece constante ou diminui conforme as condições climáticas locais. O rastelamento pode ser automatizado em situações onde os terreiros de secagem são grandes. O café nos pátios requer fermentação ao sol e secagem por 7 a 15 dias para o pergaminho e 12 a 21 dias para os frutos, dependendo do clima (83).

Segundo Brando & Brando em (25), é melhor cobrir o café em pergaminho que está secando em estantes durante as partes mais quentes do dia para proteger os grãos do calor excessivo que poderia danificá-los. Durante os estágios iniciais de secagem, o café pode fermentar nas estantes em regiões onde há uma combinação desfavorável de umidade excessiva acima do solo e ausência de vento. Em estantes elevadas, o pergaminho leva de

cinco a dez dias para secar, dependendo do clima (83).

2.4 Uma breve comparação entre os métodos pós colheita

É amplamente conhecido que os cafés verdes produzidos pelo método úmido geram grãos de café torrados e bebidas de café que diferem significativamente daqueles produzidos pelo método seco. Cafés processados pelo método úmido são reconhecidos por terem qualidade superior, menos corpo, mais acidez e mais aroma do que os cafés "não lavados" (87, 113). A principal razão para essas variações sensoriais é que, enquanto frutos de vários níveis de maturidade são utilizados para o processamento seco, apenas cerejas de café totalmente maduras são usadas para o processamento úmido (99).

Além disso, Bytof *et al.* em (30) demonstraram que uma variedade de atividades metabólicas ocorrem dentro das sementes de café durante o tratamento pós-colheita, o que muda significativamente a composição química dos grãos verdes. Esse metabolismo é demonstrado pelo processo enzimático de α -decarboxilação, que transforma o ácido glutâmico em ácido γ -aminobutírico. A resposta é particular ao modo de processamento utilizado e está conectada a um cenário de estresse fisiológico, incluindo seca (30). Certas diferenças no pool de aminoácidos livres, que são considerados cruciais para o sabor e a cor da bebida de café (39), poderiam explicar algumas das variações sensoriais entre os cafés "lavados" e "não lavados".

Por fim, foi proposto que a forte sensação de aromas "frutados" e "florais", bem como a alta acidez no café preparado pelo método úmido, podem ser devido aos metabólitos microbianos gerados durante a etapa de fermentação (117, 46, 47).

Segundo de Melo Pereira *et al.* em (48), cafés que passaram pelo processamento semi-seco oferecem um meio-termo entre as variedades "lavadas" e "não lavadas". Em comparação com o café processado pelo método úmido, ele é frequentemente mais doce, preserva parte da acidez do café processado pelo método úmido e possui parte do corpo do café processado pelo método seco. Cafés naturais despulpados são, portanto, altamente valorizados em misturas para café expresso (6). A figura 2.1 apresenta uma comparação entre os principais métodos empregados para a fermentação de café.

2.5 A formação do aroma no café, e métodos de análise

O aroma é um componente crucial que determina o grau de aceitabilidade do consumidor e a qualidade do produto para o café (45). O estabelecimento de reações de Maillard e outros processos catalisados termicamente, que ocorrem durante a torrefação a temperaturas tipicamente acima de 200 °C, são responsáveis pelo aroma desejado do café.

Como resultado, usando uma variedade de técnicas de amostragem do espaço de cabeça, incluindo extração estática do espaço de cabeça, centenas de produtos químicos

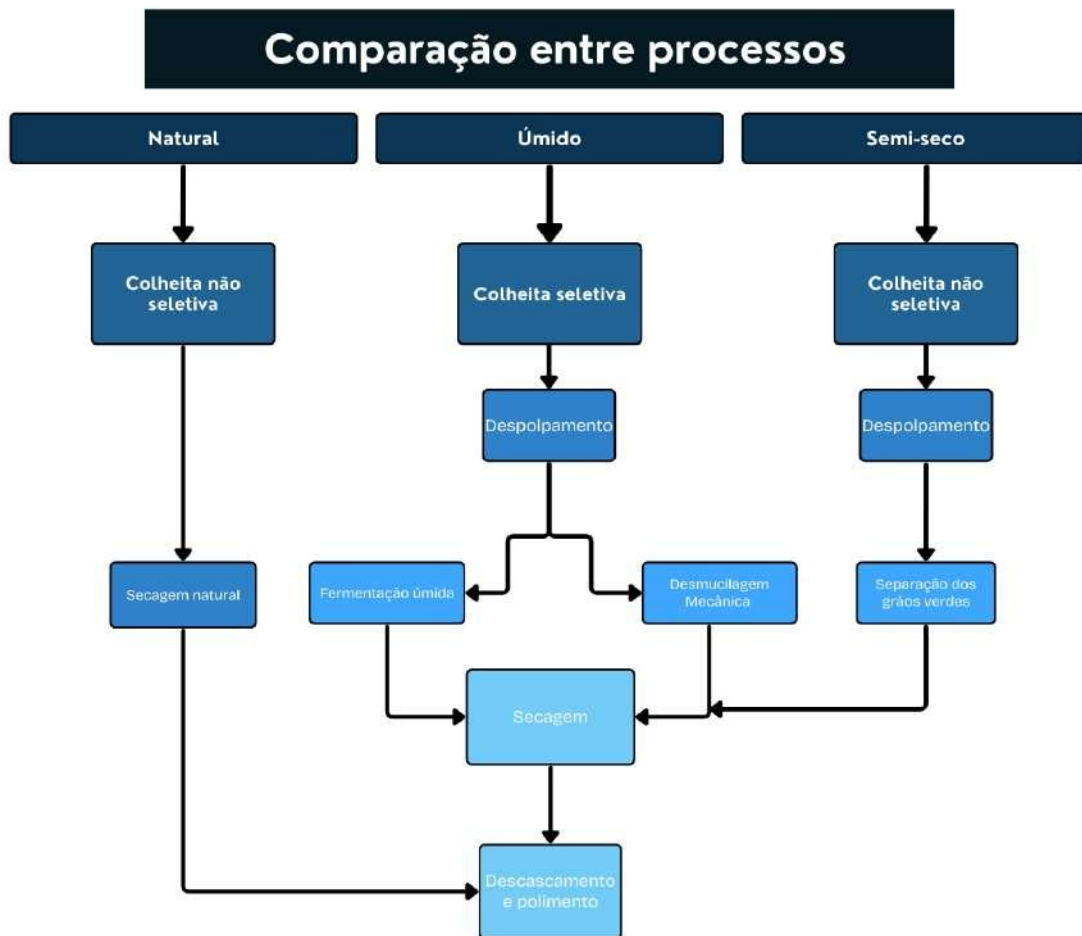


Figura 2.1 – Diferentes métodos empregados para o processo de fermentação do café.

voláteis gerados termicamente foram encontrados na fragrância do café (111).

Nos grãos de café verde, açúcares, proteínas, aminoácidos e compostos fenólicos são indicadores significativos do aroma, cruciais para o desenvolvimento do aroma do café. Durante a torrefação, os produtos de caramelização são criados como resultado da decomposição térmica de açúcares simples e polissacarídeos. Da mesma forma, derivados de ácido hidroxicinâmico são facilmente produzidos pela hidrólise de ácidos clorogênicos e outros derivados fenólicos não voláteis, como o ácido 5-feruloilquínico. Além disso, ácidos hidroxicinâmicos, como o ácido ferúlico, sofrem decarboxilação adicional e outras reações químicas, formando compostos fenólicos voláteis fortes, como guaiacol, p-vinilguaiacol e fenóis, de acordo com técnicas de monitoramento por espectrometria de massa em tempo real (54).

O principal processo de formação do aroma do café ocorre por meio das reações de Maillard, que produzem uma variedade de classes de compostos que impactam o aroma do café, incluindo pirazinas, pirróis, tióis, furanonas, piridinas e tiofenos. Conseqüentemente, muitos esforços de pesquisa têm sido dedicados a compreender os mecanismos subjacentes à síntese de moléculas de aroma derivadas de Maillard, considerando seu papel fundamental

na geração do aroma do café. Diversos estudos demonstraram que importantes sinais de sabor envolvidos nas reações de Maillard são os aminoácidos e açúcares redutores produzidos pela quebra prolongada de proteínas e sacarose durante a torrefação.

A figura 2.2, observa-se um exemplo típico de uma reação de Maillard, que é central na formação dos compostos de aroma durante a torrefação do café. A reação ocorre entre um aminoácido e um açúcar redutor, resultando na formação de uma base de Schiff que, subseqüentemente, passa por rearranjos Amadori para gerar produtos intermediários. Esses intermediários podem levar à formação de compostos altamente reativos que, ao longo de uma série de reações complexas, resultam na geração de compostos voláteis e pigmentos, como as melanoidinas, que conferem aroma e cor característicos ao café torrado.

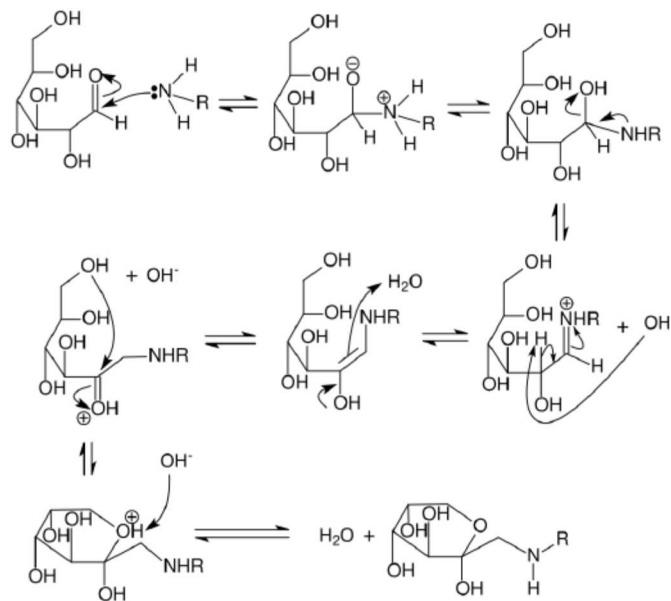


Figura 2.2 – Esquema simplificado de uma reação de Maillard envolvendo um aminoácido e um açúcar redutor, destacando as principais etapas químicas responsáveis pela formação de compostos de aroma durante a torrefação do café.

Fonte: Nursten (118)

De acordo com um estudo de Wong *et al.* em (158), as reações de Maillard de uma combinação específica de aminoácidos e glicose realizadas em sistemas-modelo produziram um perfil sensorial com características de odor típicas dos aminoácidos presentes no sistema. Isso pode ser explicado por pesquisas que demonstram uma forte correlação entre a composição de aminoácidos presente no sistema e a criação de odorantes poderosos específicos (9).

É importante ressaltar que, os perfis de fragrância e características de degustação do café torrado são majoritariamente influenciados pela composição dos formadores de aroma presentes nos grãos de café verde antes da torrefação. Pesquisas apoiaram essa ideia ao demonstrar que variações nas concentrações de proteínas, carboidratos e ácido clorogênico, considerados indicadores de aroma nos grãos de café verde, correlacionam-se

com características distintas de degustação após a torrefação (73). Um estudo de Farah *et al.* em (67) encontrou que a qualidade da degustação (cupping) estava negativamente correlacionada com as concentrações de monoésteres de constituintes fenólicos, como o ácido 3,4-dicafeoilquínico, presentes nos grãos de café verde antes da torrefação. No entanto, a qualidade da degustação foi positivamente correlacionada com os níveis de geradores de aroma, como a trigonelina.

Conseqüentemente, as variações nas concentrações de precursores de aroma estarão indiretamente correlacionadas com variações nos perfis voláteis e de aroma do café torrado, uma vez que os sinais de aroma nos grãos de café verde são cruciais para a formação de compostos voláteis associados ao aroma do café durante a torrefação. A ideia de que as modificações na composição não volátil dos grãos de café verde, provocadas por processos ao longo da cadeia de processamento, como a fermentação, podem eventualmente ter um efeito no sabor do café é apoiada pela relação interdependente entre os constituintes não voláteis dos grãos de café verde e o perfil de aroma correspondente do café torrado (102).

No entanto, os efeitos da fermentação nos perfis de aroma do café são às vezes negligenciados, pois uma de suas principais funções no processamento do café é facilitar a remoção da camada mucilaginosa. A camada mucilaginosa dos grãos de café despulpados é composta por 84,2% de água, 8,9% de proteínas, 4,1% de açúcares, 0,91% de compostos pecticos e 0,7% de cinzas (18). A análise mais detalhada de sua composição de polissacarídeos mostrou que o componente insolúvel em álcool consistia em 18% de polissacarídeos neutros não celulósicos, 8% de celulose e 30% de pectinas. Entre esses monossacarídeos, estavam presentes galactose, xilose e arabinose, entre outros açúcares simples (14).

Independentemente do método utilizado para remover a camada mucilaginosa, as pectinas eram compostas principalmente por ácidos galacturônicos, que apresentavam graus moderados de acetilação e uma alta quantidade de metilação. Após a despolpa mecânica das cerejas de café, essas substâncias sofrem uma certa degradação e metabolização durante o processo de processamento úmido conhecido como fermentação. De acordo com Avallone *et al.* em (13), esperava-se que tal metabolismo durante a fermentação pudesse levar à criação de um gradiente osmótico que se origina do exterior para o interior da camada mucilaginosa, perturbando sua aderência ao pergaminho do café. Os grãos de café restantes são então secos e descascados.

2.6 Atividade microbiológica durante o processo de fermentação

A fermentação dos grãos de café é realizada de maneira convencional na fazenda. Durante a fermentação, o material da polpa ao redor das sementes é dissolvido pela ação microbiana, o que também produz uma variedade de produtos metabólicos finais (como ácidos orgânicos e álcoois). Portanto, embora o sabor principal do café venha da composição química do grão, a microbiota que fermenta o grão pode também contribuir

para outros aspectos da bebida, como suas qualidades sensoriais, ao liberar metabólitos durante o processo e permitir que eles se difundam nos grãos (46).

A microbiota das instalações de processamento de café foi estudada, e os resultados apontam para processos que permitem que bactérias atinjam a fase de fermentação. Frank *et al.* em (74) mostraram que espécies específicas de enterobactérias associadas à fermentação dos grãos de café originavam-se do solo das plantações de café e das superfícies das cerejas, enquanto (12) descobriram que a microflora mesofílica aeróbia, composta principalmente de enterobactérias, frequentemente poluía pesadamente a água usada para despolpar. Além disso, cerejas de café frescas foram principalmente associadas a bactérias do ácido lático (90, 52).

Em relação às origens do habitat das leveduras, (3) observaram a existência de certas espécies nas superfícies das cerejas e forneceram evidências de que a fermentação espontânea do café era causada pela ação da microflora na superfície das cerejas, e não pelo oxigênio ou pela água.

Portanto, a maioria dessas pesquisas sugere que a principal fonte de contaminação microbiana durante o processo de fermentação é a superfície das cerejas de café. A ecologia microbiana dessa superfície pode ser influenciada por uma ampla variedade de circunstâncias, incluindo o nível de desenvolvimento do fruto, condições ambientais e aplicações agroquímicas. Como resultado, a porcentagem de danos à matéria-prima tem um impacto significativo na ecologia microbiana total do processo de fermentação (15, 71, 72).

2.7 Métodos para determinação do aroma

A fermentação é mais do que apenas uma etapa técnica no processo de produção; é uma experiência sensorial que eleva os grãos de café crus a um sabor excepcional. Como demonstrado por uma pesquisa envolvendo seis provadores certificados "*Q-Grader*" (44), abordagens sensoriais humanas são atualmente as principais técnicas utilizadas no processo de fermentação do café (125, 104). Amostras de bebidas de café correspondentes a cada tratamento são avaliadas usando o procedimento "*Fine Robusta Cupping*" após a conclusão das operações de fermentação e torrefação. Cada provador avalia a bebida de café cinco vezes, atribuindo notas em uma escala de seis a dez para atributos como sabor, acidez, retrogosto, amargor/doçura e textura.

Além disso, Gonzalez et al. (84) propuseram o uso de extração em fase sólida no espaço livre/gas com cromatografia-espectrometria de massas, do inglês, "*headspace solid-phase microextraction/gas chromatography-mass spectroscopy*" (HS-SPME/GC-MS) e extração em fase sólida no espaço livre/gas com cromatografia-olfatometria, do inglês, "*headspace solid-phase microextraction/gas chromatography-olfactometry*" (HS-SPME/GC-O) para a caracterização dos aromas durante o processo de fermentação do café. Além da

expertise analítica requerida e dos custos relativamente altos associados à preparação das amostras, a aplicabilidade dessas metodologias para monitoramento contínuo na indústria alimentícia é restrita (79, 80).

Tipicamente, a cromatografia gasosa/espectrometria de massas, do inglês "*gas chromatography/mass spectrometry*" (GC-MS) é utilizada em conjunto com a microextração em fase sólida, do inglês "*solid-phase microextraction*" (SPME) (35), dispositivo de captura por agulha, do inglês "*needle trap device*" (NTD) (57), extração sorptiva do espaço de cabeça, do inglês "*headspace sorptive extraction*" (HSSE) e extração sorptiva por barra de agitação, do inglês "*stir bar sorptive extraction*" (SBSE) (21). Atualmente, o método SPME é amplamente empregado, pois oferece uma forma simples, sem solventes, confiável e geralmente reprodutível de analisar a fragrância do café. Além disso, fibras SPME com vários tipos de sorventes estão disponíveis para venda. No entanto, sua sensibilidade é baixa devido à partição inadequada entre a fase da amostra e o sorvente. Por outro lado, o HSSE e o SBSE oferecem maior sensibilidade do que o SPME, mas necessitam de uma unidade de dessorção separada anexada ao aparelho de GC.

À medida que as tecnologias analíticas avançaram, a análise de espaço livre e a análise composicional do aroma do café torrado foram alcançadas por meio do uso de técnicas analíticas como espectroscopia de ressonância magnética nuclear, do inglês "*nuclear magnetic resonance*" (NMR) (38) e cromatografia gasosa bidimensional acoplada a espectrometria de massa, do inglês "*mass spectrometry*" (MS) ou detector de ionização de chama, do inglês "*flame ionization detector*" (FID) (36). No entanto, foi demonstrado que odorantes de impacto característico, com valores de diluição de sabor, do inglês "*flavor dilution*" (FD) entre 16 e 2048, representaram apenas uma pequena parte dos odorantes identificados no aroma do café.

3 SENSORES À FIBRA ÓPTICA

3.1 Princípios básicos dos sensores à fibra óptica

De acordo com (165), os sensores de fibra óptica são comumente agrupados em duas classes, referidas como extrínseca e intrínseca. Sensores à fibra óptica extrínsecos consistem em um segmento de fibra compreendidos por uma caixa sensora, muitas vezes referidas como "caixa preta", que por sua vez, é responsável por modular o feixe de luz passante em resposta aos efeitos sofridos pelo meio (165).

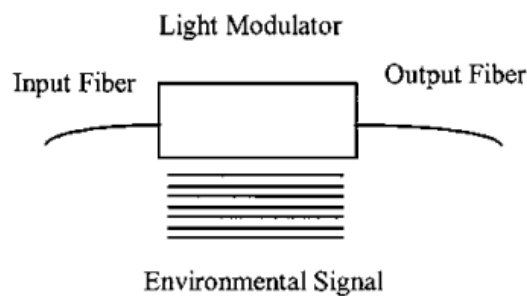


Figura 3.1 – Sensor à fibra óptica extrínseco
Fonte: Yu (165)

Em contrapartida, os sensores intrínsecos utiliza toda a secção de fibra óptica como portadora da fonte luminosa, e todos os efeitos sofridos pelo meio deixam a informação no feixe de luz passante (150). Ou seja, o feixe de luz que propaga pela fibra óptica é modulado pelo meio em que esta inserido, seja por um efeito direto, ou através de mudanças no comprimento de caminho óptico.

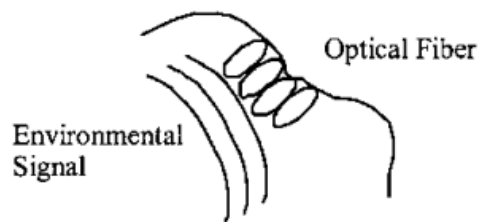


Figura 3.2 – Sensor à fibra óptica intrínseco
Fonte: Yu (165)

3.2 Redes de período longo

As Redes de período longo em fibra, do inglês "*long period gratings*" (LPG) são dispositivos que acoplam os modos de núcleo aos modo de casca em uma fibra óptica monomodo co-propagante (153). A significativa redução no modo de propagação da casca provoca uma alteração no espectro transmitido, que passa a possuir uma série de bandas de

atenuação, cada uma concentrada em um comprimento de onda específico, mostrado pela figura 3.3. É importante ressaltar que cada vale presente no espectro óptico corresponde ao acoplamento de um diferente modo de casca (145).

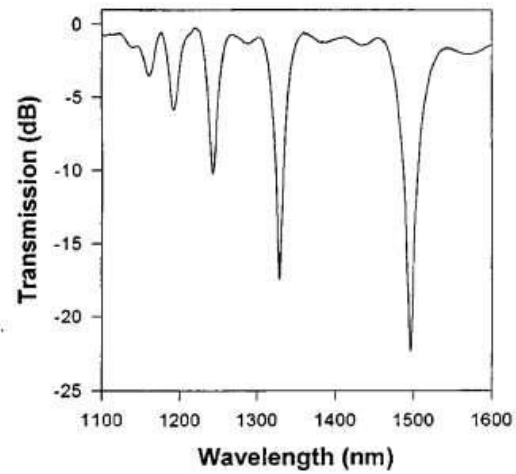


Figura 3.3 – Espectro transmitido de uma LPG
Fonte: Vikram (154)

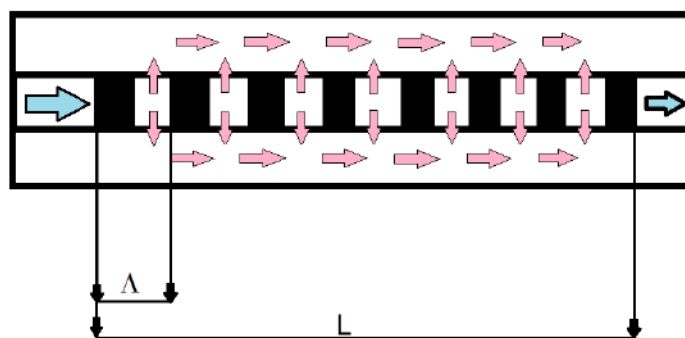


Figura 3.4 – Diagrama esquemático de uma LPG
Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, conforme dito por (75) este acoplamento direto é obtido a partir de uma modulação periódica do índice de refração na ordem de centenas de micrômetros ao longo do núcleo da fibra óptica.

Seu uso como sensor ocorre, pois o comprimento de onda central, denotado por λ_{res}^m é função de parâmetros que variam com o ambiente. Esses parâmetros são: o índice de refração efetivo do núcleo ($n_{eff,co}$), o índice de refração efetivo da casca ($n_{eff,cl}^m$) e também o período Λ da LPG (58)(139). Essa relação é dada pela equação 3.1:

$$\lambda_{res}^m = (n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m) \cdot \Lambda \quad (3.1)$$

Por meio da diferença entre os índices de refração envolvidos (δn_{eff}^m), é possível simplificar a equação 3.1 para:

$$\lambda_{res}^m = (\delta n_{eff}^m) \cdot \Lambda \quad (3.2)$$

A figura 3.5 expõe as curvas que representam a relação entre o período da LPG e o comprimento de onda central para os modos de acoplamento (m) 1 ao 20. apresenta as curvas que ilustram a relação entre o período da Grade de Período Longo (Long-Period Grating, LPG) e o comprimento de onda central para diferentes modos de acoplamento (m) variando de 1 a 20. A subfigura (a) exibe essa relação para os modos $m = 1$ a $m = 10$, enquanto a subfigura (b) cobre os modos $m = 11$ a $m = 20$. Essas curvas explicam como o acoplamento entre os modos núcleo e casca depende tanto do período da grade quanto do comprimento de onda central. Conforme o período da grade aumenta, o comprimento de onda de acoplamento para um modo específico também aumenta, o que é demonstrado pelas curvas ascendentes. Isso ocorre porque um período maior de LPG permite o acoplamento de modos de ordem superior a comprimentos de onda mais longos.

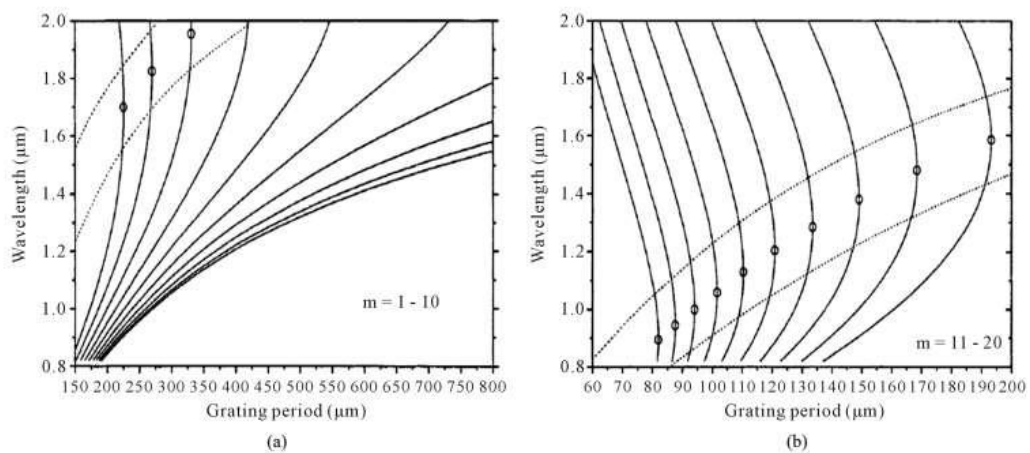


Figura 3.5 – Curvas de correspondência de fase
Fonte: Monika (116)

Salienta-se ainda que, outros parâmetros do espectro transmitido por uma LPG podem ser calculados. Desta forma, existem relações para a amplitude em cada vale de atenuação (A_{dB}^m), conforme as equações 3.3:

$$A_{dB}^m = \cos^2(k_m \times L) \quad (3.3)$$

Onde o coeficiente de acoplamento (k_m) é dado por 3.4, sendo que I é a intensidade da luz:

$$k_m = \frac{\pi \cdot \delta n_{eff}^m \cdot I}{\lambda_{res}^m} \quad (3.4)$$

Também, partindo das equações propostas por (153, 58, 139) é possível calcular a largura de banda entre dois vales ressonante, como modelados pelas equações 3.5, 3.6 e 3.7, onde λ_{ca} é o comprimento de onda de acoplamento entre o modo do núcleo e um modo da casca e um modo do núcleo:

$$\delta\lambda_{(m,m+1)} = |\lambda^m - \lambda^{m+1}| \quad (3.5)$$

$$\delta\lambda_{(m,m+1)} = [(2m + 1) \cdot \lambda_{ca}^2 \cdot \Lambda] \times (8 \cdot n_2 \cdot r_2^2)^{-1} \quad (3.6)$$

$$\delta\lambda_{(m,m+1)} = [(2m + 1) \cdot \lambda_{ca}^3] \times (8 \cdot n_2 \cdot r_2^2 \cdot \delta n_{eff}^m)^{-1} \quad (3.7)$$

Ademais, é possível encontrar a largura de banda de meia altura para cada banda de atenuação de acordo com 3.8 e 3.9, assim como dito por (139):

$$\Delta\lambda_{3dB}^m = 0,8 \cdot \lambda^m \cdot \Lambda \cdot L^{-1} \quad (3.8)$$

$$\Delta\lambda_{3dB}^m = 0,8 \cdot (\lambda^m)^2 \cdot (L \cdot \delta n_{eff}^m)^{-1} \quad (3.9)$$

E também, a transmissão mínima do vale de atenuação é dada pela expressão 3.10

$$T_i = 1 - \text{sen}^2(k_m L) \quad (3.10)$$

3.3 O uso de redes de período longo como sensores

Conforme mencionado no início desta seção, além de filtros rejeita banda como foi proposto por (153), as redes de período longo podem ser utilizadas como sensores extrínsecos.

De acordo com (20) a sensibilidade das redes de período longo é influenciada pelo período, parâmetros do meio em que está inserida, e a ordem do modo de acoplamento da casca. Ademais, os materiais presentes na composição da fibra óptica também influenciam nos parâmetros de sensibilidade (138). Dessa forma, muitos parâmetros físicos, químicos e biológicos podem apresentar excitações em redes de período longo. Alguns dos parâmetros mais estudados serão expostos nas seções seguintes.

Segundo (154) a sensibilidade de uma LPG à uma determinada temperatura (T) é modelada pela equação 3.11:

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff}^m)} \left(\frac{dn_{eff,co}}{dT} - \frac{dn_{eff,cl}^m}{dT} \right) + \Lambda \frac{d\lambda}{d\Lambda} \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (3.11)$$

Por meio de uma análise da equação 3.11 é possível averiguar que o primeiro termo apresentado ao lado direito da equação está relacionado à variação dos índices de refração do núcleo e da casca, ou seja, à composição do material, geometria do guia de onda, ordem do modo, coeficientes termo-ópticos. E também, é possível verificar que o segundo termo está relacionado à periodicidade da rede, ou seja, aos efeitos do guia de onda, e principalmente aos efeitos da dilatação térmica. É importante ressaltar que a contribuição do guia de onda pode ser positiva ou negativa, e este fator pode ser verificado de acordo com a derivada $\frac{d\lambda}{d\Lambda}$.

Desta forma, é possível concluir que a análise correta do período da uma LPG é de extrema importância para definir se o dispositivo é mais ou menos sensível aos efeitos da variação de temperatura. Em conformidade com (145) para os modos de acoplamento de casca de ordem mais baixa $\frac{d\lambda}{d\Lambda}$ é positiva, ao passo que este termo é negativo em ordem mais altas.

Além disso, segundo os estudos de (154) (146) a resposta dos comprimentos de onda dos vales de atenuação possuem um comportamento linear em temperatura próximas a faixa de temperatura ambiente. No entanto, a variação de λ_{res} passa a apresentar um comportamento não linear em temperaturas criogênicas, abaixo de $77K$.

A sensibilidade de uma LPG à uma determinada deformação sob carga axial (ϵ) é modelada pela equação 3.12 (20):

$$\frac{d\lambda}{d\epsilon} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff}^m)} \left(\frac{dn_{eff,co}}{d\epsilon} - \frac{dn_{eff,cl}^m}{d\epsilon} \right) + \Lambda \frac{d\lambda}{d\Lambda} \quad (3.12)$$

De forma análoga aos parâmetros de sensibilidade definido para a variação de temperatura, existem, para a equação 3.12 termos relacionados à composição do material, e termos relacionados aos efeitos do guia de onda. Analisando a parcela da direita da equação 3.12, é possível verificar que a sensibilidade do sensor pode ser elaborada a partir da combinação apropriada das inclinações $\frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff}^m)}$, $\frac{d\lambda}{d\Lambda}$. Dessa forma, é possível projetar um sensor mais sensível à deformação axial, e também, caso esses fatores sejam semelhantes em módulo e opostos em polaridade, uma LPG insensível à deformação axial.

Ademais, comparando as equações 3.11 e 3.12 fica visível a presença do termo $\frac{d\lambda}{d\Lambda}$ nos dois modelos. Dessa forma, é possível concluir que existe uma sensibilidade cruzada entre deformação e temperatura em redes de período longo. Isto posto, foi mostrado

por (20) que é possível se confeccionar uma LPG para o sensoriamento simultâneo de temperatura e deformação axial.

Uma vez que a variação dos parâmetros do meio influenciam no comprimento de onda ressonante dos vales de atenuação das redes de período longo, o estudo da sensibilidade ao índice de refração neste dispositivo é de extrema importância. A equação 3.13 expõe a influência da variação do índice de refração externo (n_{ext}), que envolve uma LPG (20):

$$\frac{d\lambda}{dn_{ext}} = \frac{d\lambda}{dn_{eff,cl}^m} \frac{dn_{eff,cl}^m}{dn_{ext}} \quad (3.13)$$

Analisando a equação 3.13 verifica-se que o termo $\frac{dn_{eff,cl}^m}{dn_{ext}}$ é distinto para cada modo de acoplamento. Logo, existe uma forte dependência entre a sensibilidade ao índice de refração e a ordem do modo de acoplamento da casca. Dito isto, deve-se destacar que quanto maior a ordem do modo de acoplamento, maior a sensibilidade do dispositivo (88).

Além disso, a relação existente entre $n_{eff,cl}^m$ e n_{ext} mostra que a sensibilidade da LPG pode ser definida de acordo com a relação entre a magnitude dos índices de refração da casca e do meio externo, na maioria dos casos, o índice de refração da casca é maior que o índice de refração do meio. Além disso, a maior sensibilidade acontece quando o índice de refração do meio é menor, mas está o mais próximo possível do índice de refração da casca (88).

Quando o índice de refração do meio se iguala ao índice de refração da casca, os vales de atenuação presentes no espectro óptico tendem a desaparecer, uma vez que os modos de acoplamento da casca são convertidos em modos de radiação de banda larga (145). Na ocasião em que n_{ext} for maior que $n_{eff,cl}^m$ os vales de atenuação apresentam uma sensibilidade reduzida (88), (101).

De acordo com Qi *et al.* em (127) as bandas deslocam-se em resposta a mudanças no índice de refração externo, do inglês, "*surrounding refractive index*" (SRI), permitindo que o sensor meça o SRI do meio circundante. Quando materiais que absorvem luz em comprimentos de onda específicos são aplicados à fibra, eles alteram as características de transmissão, possibilitando medições de absorbância (29). Naturalmente, a eq. 3.14 mostra que deve ser sensível ao SRI (140), de fato:

$$\frac{d\lambda_{res}}{dn_{sur}} = -\lambda_{res} \frac{\frac{d\lambda_{res}}{d\Lambda}}{n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m} \frac{u_m^2 \lambda_{res}^3 n_{sur}}{8\pi r_{cl}^3 (n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m) (n_{cl}^2 - n_{sur}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.14)$$

onde u_m é a função de Bessel de ordem zero $m - th$ ordem, r_{cl} e n_{cl} são, respectivamente, o raio e o índice de refração do revestimento. E por essa razão, sondas LPFG baseadas em SRI têm sido extensivamente relatadas na literatura (34, 106, 127, 137).

3.4 O método arco elétrico

Existem diversos métodos de fabricação de redes de período longo, entre eles o método arco elétrico. Este método, se comparado com as técnicas de fabricação tradicionais como radiação ultravioleta e laser CO_2 apresenta alguns atributos, uma vez que é mais econômico e versátil.

A flexibilidade desta técnica se deve ao fato de ser baseada em marcações ponto a ponto. Isto agiliza, na produção em pequena escala, manufatura de redes de período longo em diversas aplicações, uma vez que não há a necessidade do uso de máscaras em diferentes amplitudes.

Este processo utiliza descargas elétricas periódicas, realizadas múltiplas vezes ao longo da fibra óptica. O aquecimento pontual gerado pelos arcos origina a deformação local, e conseqüentemente, provoca alterações pontuais no índice de refração da fibra, e também origina as perturbações responsáveis por acoplar os guias de modo de propagação direta do núcleo com os guias de modo de propagação direta da casca.

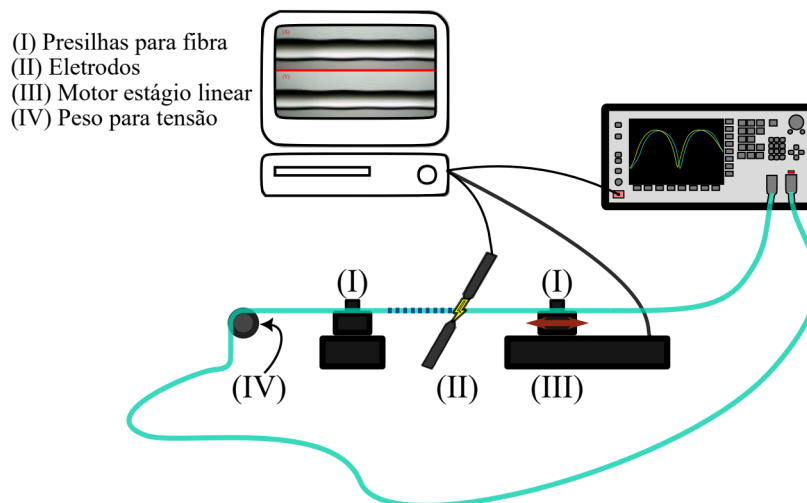


Figura 3.6 – Diagrama de fabricação para o método do arco elétrico

Para a elaboração apropriada da LPG, o fio de fibra deve ser mantido sob uma tensão longitudinal constante, o que garante o afunilamento apropriado no ponto em que o arco foi descarregado. A figura 3.6 representa um diagrama esquemático para a criação dos sensores a partir desta técnica.

De acordo com (145) o método de fabricação por arco elétrico de uma LPG depende de quatro efeitos para gerar a modulação periódica das propriedades na fibra. São eles: indução de micro deformações, marcações periódicas, a difusão dos dopantes, e o abrandamento do estresse interno.

É importante ressaltar que, apesar de existirem alguns equipamentos específicos para a fabricação de sensores a partir de arcos elétricos, o uso de máquinas de emendas adaptadas é ordinário. Para isso, é feita a alteração em múltiplos parâmetros de controle

das máquinas de fusão, o que garante uma descarga elétrica apropriada para a confecção das rede. Dessa forma, os sensores feitos pela técnica de manufatura via arco elétrico podem apresentar algumas irregularidades, como variações no afundamento em cada ponto e a distância da cintura. A figura 3.7 expõe as marcações em uma fibra óptica feita a partir de uma máquina de emendas adaptadas para a fabricação de LPG.

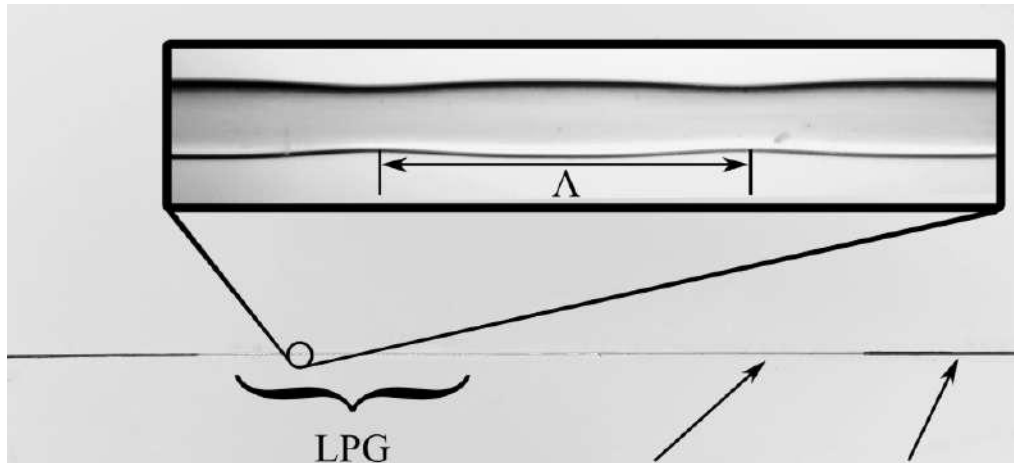


Figura 3.7 – LPG fabricada pelo método arco elétrico

3.5 Interferômetros a fibra óptica

Interferômetros são dispositivos que adquirem informação por meio do fenômeno de interferência. O princípio de funcionamento da maioria destes dispositivos é baseado na divisão de uma única fonte luminosa em dois feixes de luz que se propagam em caminhos ópticos diferentes e posteriormente são recombinados para gerar interferência (132).

É importante ressaltar que, o efeito da interferência indica a superposição de duas ou mais ondas na mesma região do espaço (164).

Interferômetros baseados em dispositivos de fibra óptica são plataformas que proporcionam elevada sensibilidade em diversas aplicações. Vale destacar que a performance em sensores interferométricos, de uma maneira generalizada, dependem da interferência entre os modos de ordem mais elevada com os modos fundamentais, o que leva a variações nos comprimentos de onda ressonantes (19). É importante ressaltar que, explorar interferências entre modos de diferentes ordens é somente uma entre muitas possibilidades para obter medidas interferométricas.

Os principais componentes desses dispositivos são seus braços de referência e de detecção (123). De forma análoga aos interferômetros tradicionais, os interferômetros em fibra possui componentes que dividem o feixe de luz em dois caminhos distintos, de modo que uma parcela passa a propagar pelo braço de detecção, que está exposto ao meio, e a outra parcela percorre o braço de referência, que está isolado. A partir daí, as mudanças que ocorrem no ambiente a ser medido proporcionam uma diferença de fase e

intensidade no espectro, o que garante o funcionamento do dispositivo para aplicações de sensoriamento.

Existem diversas técnicas para se implementar dispositivos que expõe as alterações de parâmetros do meio através da variação de fase no espectro, dentre elas os interferômetros do tipo Mach-Zehnder (105), Michelson (37), Fabry-perot (155), e o interferômetro de Sagnac (163). No entanto, as topologias mais comuns são as configurações conhecidas como interferômetros de dois feixes, são eles os interferômetros de Michelson e Mach-Zehnder (123). Isso acontece pois nos arranjos de dois feixes a luz é simplesmente dividida e recombinada, tornando mais simples a implementação do processo.

O interferômetro de Michelson (MI) é um importante dispositivo experimental que aplica o efeito da interferência (164). Estes aparelhos são muito utilizados na determinação precisa de comprimentos de onda e de distâncias muito curtas. Um interferômetro de Michelson recebe um feixe de luz monocromática proveniente de uma única fonte e o divide, por meio de um dispositivo chamado divisor de feixes em dois feixes que seguem caminhos diferentes, demonstrado pela figura 3.8 (a).

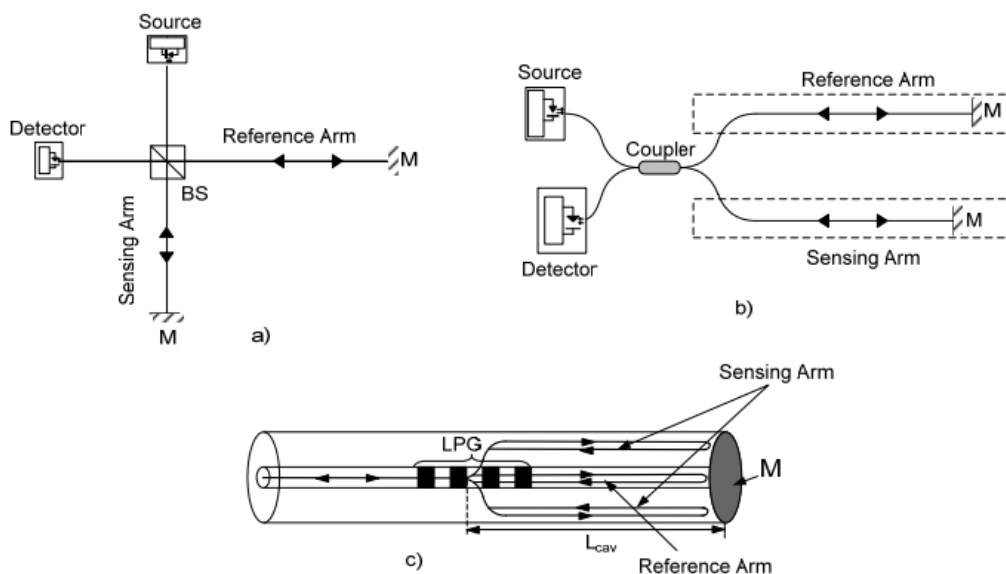


Figura 3.8 – Interferômetros de Michelson: (a) clássico, (b) fibra óptica, (c) com uso de LPG

Fonte: Paulo Caldas (123)

O divisor de feixes presente no dispositivo é responsável por guiar os feixes resultantes nos dois braços, que são definidos como braços de detecção e referência. A partir daí, o mesurando é responsável por modificar a fase do feixe luminoso, enquanto o feixe proveniente do braço de referência permanece constante. Posteriormente, os feixes são refletidos por espelhos e recombinados pelo divisor de feixes. É importante enfatizar que a passagem dupla do feixe de sinal dobra a sensibilidade do interferômetro.

De acordo com (123) o interferômetro de Michelson pode ser representados em outros arranjos. Um arranjo é o uso de fibra óptica monomodo e um acoplador direcional. Nesta topologia, o acoplador é responsável por realizar a função do divisor de feixes, e são posicionados espelhos na ponta de cada braço de fibra. Além disso, existe a configuração do interferômetro "*in-fiber*". Neste arranjo o divisor de feixes é substituído por uma LPG.

Neste dispositivo é possível analisar o sinal de saída a partir de uma descrição de duas ondas uma vez que o divisor de feixes separa os guias de onda que vão para os braços de detecção e referência. A luz que vai para cada braço pode ser descrita pelas equações 3.15, 3.16,. Em que, R_{ef} é quantidade de luz emitida para o braço de referência S_{ens} é a quantidade de luz emitida para o braço de detecção A_r é a amplitude para o braço de referência e A_s é a amplitude para o braço de detecção

$$R_{ef} = A_r e^{i(\omega_L t + 2kx_r)} \quad (3.15)$$

$$S_{ens} = A_s e^{i(\omega_L t + 2kx_s)} \quad (3.16)$$

A variação de fase $\phi(t)$ entre dois braços do interferômetro é dada por 3.17, 3.18

$$\phi(t) = \phi_r - \phi_s = \phi_o + \Delta\phi \quad (3.17)$$

$$\phi(t)_{MI} = \frac{4\pi\delta n_{eff}^m L_{cav}}{\lambda} \quad (3.18)$$

Onde, de acordo com as equações 3.19, 3.20

$$\phi_r = 2kx_r \quad (3.19)$$

$$\phi_s = 2kx_s \quad (3.20)$$

Também é possível calcular a amplitude (A) da onda recombinada pela equação 3.21

$$A = A_r e^{i(\omega_L t)} + A_s e^{i(\omega_L t + \phi(t))} \quad (3.21)$$

No caso específico do arranjo com LPG, é possível calcular o fator de transmissão para o núcleo T_{core} e para a casca T_{clad} conforme as equações 3.22, 3.23, Onde $\gamma = \sqrt{k^2 + \delta^2}$.

$$T_{core} = \cos^2(\gamma L) + \frac{\delta^2}{\gamma^2} \sin^2(\gamma L) \quad (3.22)$$

$$T_{clad} = \frac{k^2 \text{sen}^2(\gamma L)}{\gamma^2} \quad (3.23)$$

Além disso, é possível de se analisar o sinal de saída pela intensidade da luz (I), conforme as equações 3.24, 3.25, 3.26, 3.27:

$$I \propto |A^2| = A.A^* \quad (3.24)$$

$$I = A_r^2 + A_s^2 + 2A_r A_s \cos[\phi(t)] \quad (3.25)$$

$$I = I_r + I_s + 2\sqrt{I_r I_s} \cos[\phi(t)] \quad (3.26)$$

$$I_{MI} = 1 - 4T_{core} T_{clad} \text{sen}^2 \left(\frac{2\pi \cdot \delta n_{eff}^m \cdot L_{cav}}{\lambda} \right) \quad (3.27)$$

O interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) é um dispositivo que gera interferência óptica ao dividir o feixe de luz em dois caminhos distintos e, em seguida, recombiná-los. Este aparato foi proposto por (166) com o intuito de investigar variações de pressão sobre o índice de refração, e posteriormente, foi proposto, de forma independente por (110) para estudar a dinâmica de gases.

A diferença mais importante entre os interferômetros de Michelson e Mach-Zehnder está nos divisores de feixe (123). Isso ocorre pois na configuração MZI as ondas que atravessam os braços de referência e detecção são recombinadas por um segundo divisor de feixes, ao passo que na configuração MI um único divisor de feixes é utilizado para separar e recombinar a luz.

De forma análoga ao interferômetro de Michelson, existem diversos arranjos para os interferômetros de Mach-Zehnder. Além da topologia tradicional proposta por (166) e (110), é possível confeccionar este aparato a partir da configuração apropriada de fibra óptica monomodo e acopladores, ou até mesmo com o uso de LPG e "tapers". A figura 3.9 apresenta algumas configurações possíveis para os interferômetros MZI.

Ademais, de acordo com (19) os interferômetros MZI são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações devido à sua configuração flexível. Além das topologias para os interferômetros "in-fiber" feitas com o uso de redes de período longo cascadeadas, também é possível utilizar arranjos com o uso de "taper". Um arranjo muito comum é a combinação de uma LPG com um "taper" em série. Seu princípio de funcionamento se baseia no fato do "taper" acoplar uma fração da luz do núcleo nos modos da casca, e posteriormente a LPG, posicionada em uma distância mínima, acoplar novamente a luz dos modos de casca novamente no núcleo (75). Além disso, (69) afirma que a topologia

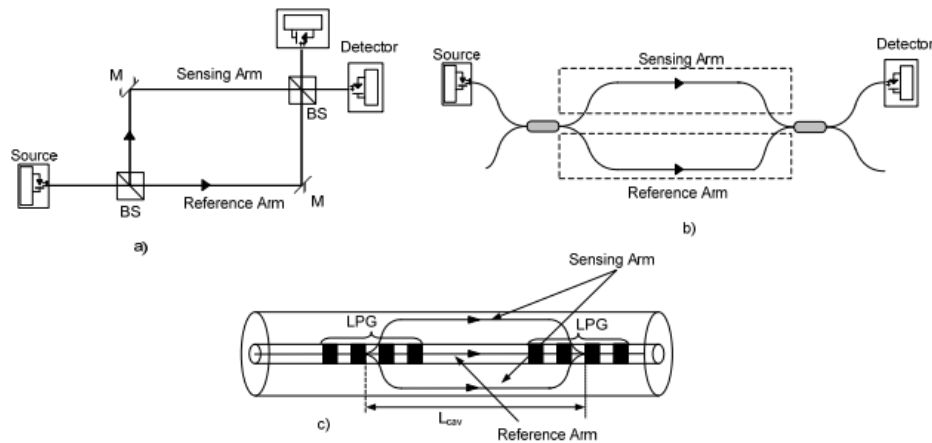


Figura 3.9 – Interferômetros de Mach-Zehnder: (a) clássico, (b) fibra óptica, (c) com uso de duas LPG em série
Fonte: Paulo Caldas (123)

"LPG-taper" em série permite a realização de ensaios mais versáteis, uma vez que o "taper" no sistema proporciona uma flexibilidade pontual que não é encontrada em outras configurações.

As análises dos sinais de saída dos interferômetros MZI são muito semelhantes às análises realizadas para os interferômetros de Michelson, mudando somente os modelos para a variação de fase e a intensidade do sinal de saída. De modo que, para os interferômetros de Mach-Zehnder, as equações 3.28 e 3.29 definem estes parâmetros respectivamente.

$$\phi(t)_{MZI} = \frac{2\pi\delta n_{eff}^m L_{cav}}{\lambda} \quad (3.28)$$

$$I_{MZI} = 1 - 4T_{core}T_{clad}sen^2\left(\frac{\pi\cdot\delta n_{eff}^m\cdot L_{cav}}{\lambda}\right) \quad (3.29)$$

Comparando as equações 3.18 e 3.28 é possível afirmar que a diferença de fase no arranjo MI é duas vezes mais sensível que no arranjo MZI, ou seja $\phi(t)_{MI} = 2\phi(t)_{MZI}$, para um mesmo δn_{eff} e L_{cav} . Segundo (123) se dá pela diferença do número de divisores de feixes presentes em cada configuração.

De acordo com Liu *et al.* em (107) no sistema interferômetro de Mach-Zehnder, em espaço livre, a relação entre o índice de refração do meio e o comprimento do meio pode ser deduzida da equação 3.30:

$$n = \frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi d} \quad (3.30)$$

onde $\Delta\phi$ é a diferença de fase entre os dois padrões de interferência, e d é o comprimento do meio. É difícil obter o valor de $\Delta\phi$, mas a amplitude de variação das franjas pode ser medida diretamente e com precisão. De acordo com a relação física entre

a diferença de caminho óptico e a largura da franja, a diferença de caminho óptico δ pode ser calculada como, conforme modelado por (107):

$$\delta = \frac{\lambda s(r)}{D} \quad (3.31)$$

onde $s(r)$ é a variação da franja, D é a largura da franja. Então, a diferença de fase da franja $\Delta\phi$ causada pela variação da franja pode ser expressa como:

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \quad (3.32)$$

a partir das equações 3.31 e 3.32 podemos deduzir 3.33:

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\lambda s(r)}{dD} \quad (3.33)$$

de acordo com a equação 3.30 e 3.33, o índice de refração n pode ser expresso conforme a equação 3.34. Logo, se o comprimento de onda λ da luz incidente e a espessura medida d do meio forem conhecidos, o índice de refração n do cristal de cintilação pode ser obtido a partir dos valores medidos da largura da franja D e da variação da franja $s(r)$.

$$n = 2\pi \frac{\lambda s(r)}{dD} \quad (3.34)$$

4 TÉCNICAS DE RECONHECIMENTO DE PADRÕES

O reconhecimento de padrões é o processo de identificar estruturas ou regularidades em um conjunto de dados, permitindo a classificação e interpretação de informações complexas. Em análise de dados, essa técnica é crucial para extrair informações de grandes volumes de dados, revelando tendências e anomalias. No contexto de machine learning, o reconhecimento de padrões fundamenta a criação de modelos que aprendem a partir de exemplos para fazer previsões e tomar decisões automatizadas. No processamento de sinais, ele é essencial para detectar características específicas em sinais contínuos, como na identificação de voz, imagens ou sinais biológicos, facilitando aplicações que vão desde a biometria até o monitoramento de saúde. Assim, as técnicas de reconhecimento de padrões podem ser utilizadas como uma ferramenta poderosa na transformação de dados brutos em conhecimento acionável.

4.1 A técnica DBSCAN

"*Clustering*" é o termo geral para o comportamento de classificar objetos de dados relacionados em uma coleção na mesma classe. Uma maneira de pensar sobre a compressão de dados é reunir um conjunto de elementos de dados. Entre suas qualidades está sua natureza não supervisionada, o que o distingue da categorização, que requer uma sobrecarga significativa na modelagem de objetos. Outra característica é a capacidade do "*clustering*" de se ajustar a mudanças nos dados. As regiões esparsas e densas do conjunto de dados dos objetos, bem como qualquer possível associação entre a distribuição global e as propriedades dos dados, podem ser automaticamente encontradas e identificadas pelo "*clustering*". No mundo dos negócios, a análise de "*clusters*" ajuda analistas de mercado a examinar e caracterizar as características de grupos de clientes para entender a direção, capacidade, disposição e outros aspectos do consumo de vários grupos de clientes. A análise de dados geográficos também se beneficia do uso da análise de "*clusters*". A previsão oportuna de desastres naturais está fortemente associada à análise de dados de chuva, geologia e outros (50).

Os algoritmos de agrupamento baseado em densidade (DBSCAN) do inglês "*density-based clustering algorithms with noise*" são úteis para identificar "*clusters*" em grandes conjuntos de dados de formas arbitrárias. No espaço de dados, essas técnicas geralmente agrupam como "*clusters*" densos de pontos separados por regiões de baixa densidade (131). De acordo com Ester *et al.* em (61), o DBSCAN é o primeiro método de agrupamento baseado em densidade. Ele forma "*clusters*" com base em uma análise de conexões baseada na densidade.

O método DBSCAN, um típico representante de algoritmo de densidade, exhibe bons resultados de *clustering* na aplicação. Uma característica dessa técnica é sua capacidade

de localizar qualquer forma de classe dentro do conjunto de dados. Antes de ser executado, o algoritmo DBSCAN solicita ao usuário que defina os parâmetros constantes globais de distância de vizinhança e limiar. O raio da faixa de vizinhança do ponto de amostra é determinado pela distância de vizinhança. Para determinar o limiar, deve-se ajustar o número mínimo de pontos de amostra que caem dentro do raio da faixa de vizinhança e são designados como pontos centrais. Vale destacar que o limiar e a distância de vizinhança são parâmetros fixos que foram estabelecidos antes do início do programa e não se alteram uma vez que são definidos. O método DBSCAN pode ser aplicado a conjuntos de dados que contêm pontos de ruído, pois não é sensível a eles. Ele é capaz de localizar pontos de ruído e removê-los dos resultados de *clustering*. A densidade dentro de cada classe no resultado do *clustering* é maior do que a densidade na fronteira da classe. Em comparação com a borda, o ponto de ruído tem uma densidade menor. O método utiliza a diferença de densidade para identificar várias zonas de densidade com base nas características da distribuição dos dados e marca os resultados do *clustering*.

Deng (50) resumiu o algoritmo da seguinte forma:

- Insira o raio mínimo e e o limiar de densidade mínima $minp$.
- Os dados são lidos sequencialmente em um arquivo de texto que contém as coordenadas originais bidimensionais X e Y dos pontos, e armazenados em uma *pointList* que contém a estrutura *Point*.
- Leia um ponto da *pointList* (leitura em ordem), se o ponto não estiver marcado (não faz parte de um cluster), então calcule a distância entre o ponto e todos os outros pontos. Se a distância entre os dois pontos for menor ou igual ao raio mínimo e , coloque os dois pontos (eliminando os pontos repetidos) no array *tmpLst* e faça a contagem; Se a distância entre os dois pontos for maior que o raio mínimo e , então pule esse ponto e prossiga para o próximo ponto.
- Faça a fusão dos *clusters* e dos elementos na *resultList*.
- Exiba o resultado do *clustering* e dos pontos de ruído.

A vizinhança de um ponto de dados. Dado um número mínimo de pontos ($minPts$), o centro da vizinhança do ponto de dados P é definido como um conjunto de Np pontos de dados mais próximos de P . A densidade local de um ponto de dados. Dado um número mínimo de pontos ($minPts$), a densidade local ρ_p do ponto de dados P é definida como 4.1:

$$\rho_p = \frac{minPts}{\max_{x \in N_p} Dist(p, x)} \quad (4.1)$$

Onde, N_p é a vizinhança de P que contém minPts pontos de dados mais próximos de P , e $\text{Dist}()$ é a função de distância. A distância entre os pontos de dados é a distância euclidiana, de acordo com a fórmula $\max_{x \in N_p} \text{Dist}(p, x)$. A equação 4.1 é o raio local de P . Quanto maior a densidade local de P , menor é o raio local, e mais pontos mínimos podem ser encontrados. Para medir a diferença entre o ponto de densidade de pico e outros pontos centrais, a métrica de diferença δ_p do ponto de dados (P) é definida como 4.2:

$$\delta_p = \min_{\rho_x > \rho_p} \text{Dist}(p, x) \quad (4.2)$$

Ou seja, δ_p é a distância mínima de todos os pontos N_p com uma densidade local maior do que a do ponto P . Quando a densidade local de P é a maior, P é mais provável de ser um ponto central de densidade, e então δ_p é definido como 4.3:

$$\delta_p = \max_{x \in D} \text{Dist}(p, x) \quad (4.3)$$

4.2 Análise de componentes principais

Quase todas as áreas científicas utilizam a análise de componentes principais (PCA, do inglês "*Principal Component Analysis*"), que é, indiscutivelmente, o método estatístico multivariado mais amplamente utilizado. É também, talvez, o método multivariado mais tradicional. Suas origens estão, na verdade, em (124). No entanto, (92) é creditado por formalizar sua instância contemporânea e cunhar o termo componente principal. Uma tabela de dados contendo observações que, em sua maioria, são intercorrelacionadas é analisada utilizando PCA com várias variáveis dependentes. Seu objetivo é identificar as principais informações na tabela de dados e traduzi-las em um conjunto de novas variáveis ortogonais conhecidas como componentes principais. Ao representar as variáveis e observações como pontos em mapas, a PCA também ilustra o padrão de similaridade entre elas. Em outras palavras, PCA é uma técnica multivariada que examina uma tabela de dados onde as observações são caracterizadas por muitas variáveis dependentes quantitativas que são intercorrelacionadas.

De acordo com (1), os objetivos de se usar PCA são:

- Extrair as informações mais importantes da tabela de dados
- Comprimir o tamanho do conjunto de dados, mantendo apenas essas informações importantes
- Simplificar a descrição do conjunto de dados
- Analisar a estrutura das observações e das variáveis.

A PCA calcula novas variáveis, conhecidas como componentes principais, que são derivadas como combinações lineares das variáveis originais, a fim de atingir esses objetivos. É necessário que o primeiro componente principal tenha a maior variância—ou seja, inércia—para que ele possa "explicar" ou "extrair" a maior parte da inércia da tabela de dados. Com os requisitos de ter a maior inércia possível e ser ortogonal ao primeiro componente, o segundo componente é calculado. Os outros componentes são calculados da mesma maneira. Os valores dessas novas variáveis para os dados são conhecidos como escores fatoriais; geometricamente falando, esses escores fatoriais são as projeções das observações nos componentes principais.

Na PCA, os componentes são obtidos a partir da decomposição em valor singular (SVD, do inglês "*singular value decomposition*") SVD da tabela de dados X . Especificamente, com $X = P\Delta Q^T$, a matriz $I \times L$ de escores fatoriais, denotada por F , é obtida como 4.4:

$$F = P\Delta \quad (4.4)$$

A matriz Q fornece os coeficientes das combinações lineares utilizadas para calcular os escores fatoriais. Esta matriz também pode ser interpretada como uma matriz de projeção, pois multiplicar X por Q fornece os valores das projeções das observações nos componentes principais. Isso pode ser demonstrado por 4.5

$$F = P\Delta = P\Delta Q^T Q = XQ \quad (4.5)$$

A rotação dos eixos originais também pode ser usada como uma representação geométrica dos componentes. A PCA descreve esses dados por meio de dois fatores ortogonais, por exemplo, se X representar duas variáveis, o comprimento de uma palavra e o número de linhas de sua descrição no dicionário, como os dados exibidos na Tabela 1. Como Q é ortonormal, entende-se que ela é uma matriz de cossenos diretores nesse contexto. Outro nome para a matriz Q é matriz de cargas. Nesse caso, a matriz X pode ser vista como a matriz de cargas multiplicada pela matriz de escores fatoriais, ou 4.6:

$$X = FQ^T \quad (4.6)$$

4.3 Regressão logística

A análise de resultados binários ou dicotômicos com dois níveis mutuamente exclusivos é possível com regressão logística (91). No entanto, a regressão logística tem a capacidade de considerar vários fatores e permite o uso de preditores contínuos ou categóricos. Por causa disso, a regressão logística é particularmente útil para analisar

dados observacionais onde é necessário ajustar o viés decorrente de diferenças entre os grupos.

Para um resultado de 2 níveis, utilizar a regressão linear padrão pode levar a resultados muito insatisfatórios. Certos valores de covariáveis podem ter valores preditivos que caem abaixo do nível inferior do resultado (geralmente 0) ou acima do nível superior (geralmente 1). Além disso, para que uma regressão linear seja válida, todos os valores dos preditores devem ter a mesma variabilidade no resultado. O comportamento de um resultado de 2 níveis não se conforma a essa premissa de variabilidade contínua. A regressão logística foi criada para preencher essa lacuna, pois a regressão linear é insuficiente para certos tipos de dados.

De acordo com LaValley (100), o modelo de regressão logística tem sua base nas chances de um resultado de 2 níveis de interesse. Para simplificar, assumo que designamos um dos níveis do resultado como o evento de interesse e, no texto a seguir, o chamaremos simplesmente de evento. As chances do evento são a razão entre a probabilidade do evento ocorrer e a probabilidade do evento não ocorrer. As chances são frequentemente usadas em jogos de azar, e “chances pares” (chances 1) correspondem ao evento ocorrendo metade das vezes. Esse seria o caso de rolar um número par em um único dado. As chances de rolar um número 5 seriam 2 porque rolar um número 5 é duas vezes mais provável do que rolar um 5 ou 6. A simetria nas chances é encontrada ao tomar o recíproco, e as chances de rolar pelo menos um 5 seriam 0,5 (1/2).

Para a formulação do modelo, a suposição fundamental é que o logaritmo das chances de que $Y = 1$ ocorra é linearmente relacionado à variável preditora. As chances abaixo são definidas como as chances do evento ou doença ocorrer ($Y = 1$) dado a variável preditora, X_1 . Isso pode ser escrito como 4.7:

$$\log \text{odds}[Y = 1|X_1] = \log \left(\frac{P(Y = 1|X_1)}{1 - P(Y = 1|X_1)} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad (4.7)$$

Onde β_0 é o intercepto e β_1 é o coeficiente de regressão de X_1 . Os coeficientes estão em uma escala logarítmica, e o logaritmo das chances é conhecido como a transformação logit. A partir de 4.7, o modelo é um modelo de regressão linear nas log-chances de que $Y = 1$. A função de probabilidade logística pode então ser expressa como 4.8

$$P(Y = 1|X_1) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1)}} = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_1}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_1}} \quad (4.8)$$

4.4 O classificador Naive-Bayes

Um algoritmo de classificação probabilística bem conhecido é o Naive Bayes (NB). Simples, mas eficaz, este algoritmo encontra muitas aplicações práticas no mundo real, desde recomendar produtos até diagnosticar doenças e gerenciar carros autônomos. Devido

à incapacidade dos dados reais de atender às suposições do NB, variantes do NB estão disponíveis para acomodar dados mais amplos. Cada tipo de NB tem aplicações específicas que permitem alcançar diferentes graus de precisão.

Um classificador Naive Bayes é um classificador probabilístico básico que se baseia na aplicação do teorema de Bayes com fortes (ingênuas) suposições de independência, como encontrado na estatística bayesiana (17). O classificador Naive Bayes tem a vantagem de exigir menos dados de treinamento para estimar os parâmetros necessários para a classificação.

Seja X_1, X_2, \dots, X_n um vetor de variáveis aleatórias (features) de dimensão n do domínio D_X e x_1, x_2, \dots, x_n suas instâncias correspondentes. Seja Y uma variável aleatória não observada do domínio $D_Y = 0, 1$. Embora seja desconhecido, assumimos que há uma função de D_X para D_Y . O objetivo é estimar o valor alvo y_i de Y para uma instância dada x_i de X . Em outras palavras, o objetivo é selecionar a classe Y que maximiza a probabilidade posterior, $P(Y = y|X = x)$. Aqui, $P(Y = y)$ e $P(X = x|Y = y)$ são as probabilidades a priori e as probabilidades condicionais de classe. Como o NB assume independência condicional, $P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n|Y = y) = \prod_{i=1}^n P(X_i = x_i|Y = y)$. Seja C o número de classes de Y . De acordo com o teorema de Bayes, temos o modelo 4.9, 4.10, 4.11:

$$P(Y = y|X = x) = \frac{P(Y = y, X = x)}{P(X = x)} = \frac{P(Y = y)P(X = x | Y = y)}{P(X = x)} \quad (4.9)$$

$$P(Y = y|X = x) = \frac{P(Y = y)P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n | Y = y)}{\sum_{i=1}^C P(y_i, X = x)} \quad (4.10)$$

$$P(Y = y|X = x) = \frac{P(Y = y) \sum_{i=1}^n P(X = x_i | Y = y)}{\sum_{i=1}^C P(y_i, X = x)} \quad (4.11)$$

Na prática, não é de interesse estimar $P(X = x)$. Em vez de estimar $P(X = x)$, ele é normalizado para que $P(Y = y|X = x) = 1$. Normalmente, do ponto de vista prático, $P(X = x|Y = y)$ é assumida como seguindo uma distribuição Gaussiana, embora a literatura mostre algumas exceções.

5 METODOLOGIA

5.1 Fabricação dos interferômetros

Para a fabricação da sonda utilizada, foi desenvolvido dois interferômetros Mach-Zehnder, composto por duas MT-LPFGs em cascata fabricadas a partir do método arco elétrico. A escolha da topologia de duas LPG's cascadeadas se deve ao fato de apresentar uma maior estabilidade e menor sensibilidade à deformações mecânicas. Isso fica nítido ao analisarmos os estudos de Frazão *et al.* em (75) e Filho *et al.* em (69), que mostraram a eficiência dos interferômetros da topologia "*Taper-LPG*" para inclinação.

De modo geral, as grades induzidas por arco são fabricadas colocando-se uma fibra não revestida, sob tensão, entre os eletrodos. Para isso, foi utilizada uma máquina de emenda óptica adaptada para a produção de sensores LPFG. Uma representação esquemática do processo de fabricação é ilustrada na Fig. 3.6. Este processo segue de perto a técnica de fabricação descrita em (130). O processo é feito posicionando extremidade da fibra, que por sua vez é fixada em um suporte de fibra no topo de um estágio de translação, garantindo controle ao longo do eixo z. Simultaneamente, uma massa é presa à outra extremidade para manter a fibra sob tensão axial constante. Em seguida, a descarga elétrica é iniciada. Posteriormente, a fibra é movida incrementalmente sobre o período da grade. Esses dois últimos passos são repetidos iterativamente, com todo o processo.

Os arcos elétricos foram gerados usando uma máquina pré-configurada. Esta máquina foi configurada de acordo com os padrões discutidos em (69), onde as configurações dos arcos elétricos foram cuidadosamente ajustadas por meio de experimentação iterativa. Vale ressaltar que as configurações particulares adotadas de (69) foram instrumentais para alcançar uma qualidade espectral superior nos sensores, garantindo atributos como baixa atenuação durante a fabricação. Simultaneamente, a escolha do período para as Grades de Fibra de Longo Período Micro-Afinadas, do inglês "*micro-tapered Long Period fiber gratings*" (MT-LPFGs) em $500\mu\text{m}$ foi informada por experimentos detalhados em (16). Este período específico foi selecionado por resultar em um comprimento de onda ressonante de aproximadamente 1480nm . Este comprimento de onda é próximo ao comprimento de onda de pico da fonte SLED utilizada em nosso estudo (1550nm), alinhando nosso sensor com as características da fonte de luz. Além disso, é importante ressaltar que o comprimento da cavidade escolhido foi de 15mm .

A figura 5.1 apresenta o espectro de uma das LPG utilizadas para a fabricação dos interferômetros, ao passo que, as figuras 5.2 e 5.3 apresentam os espectros dos sensores fabricados para este trabalho. É importante ressaltar que os espectros foram coletados em uma temperatura de 22°C e expostos ao ar.

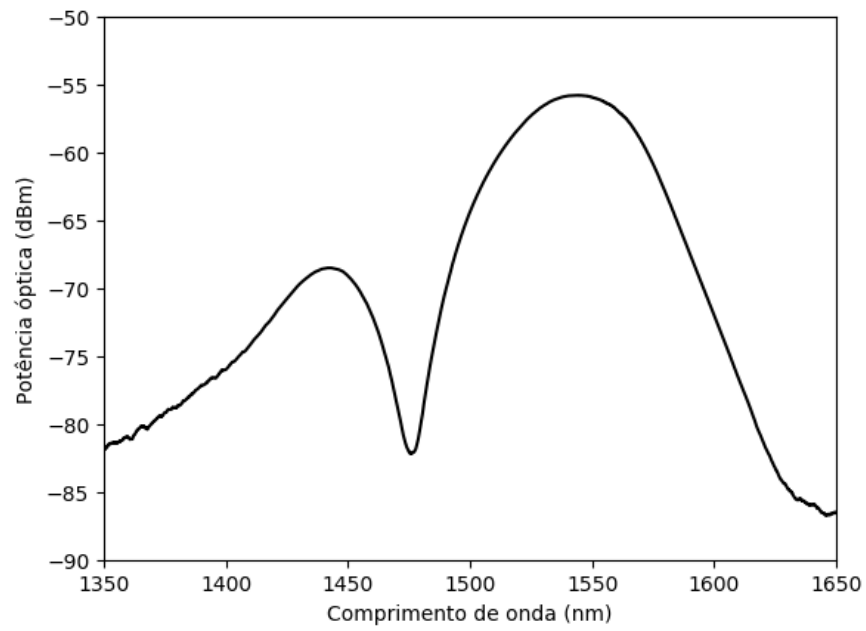


Figura 5.1 – LPG utilizadas para a fabricação dos interferômetros

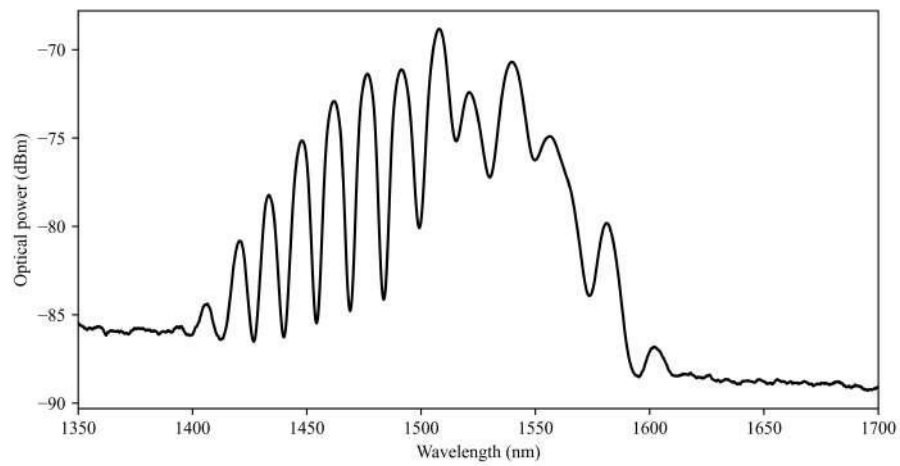


Figura 5.2 – Interferômetro MZI fabricado 1

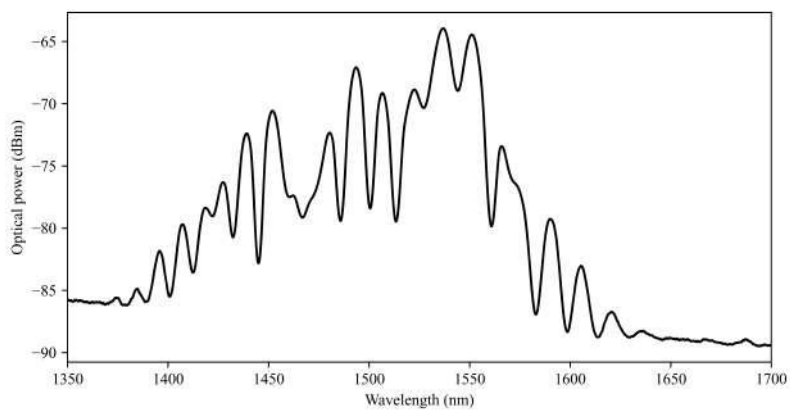


Figura 5.3 – Interferômetro MZI fabricado 2

5.2 Desenvolvimento das sondas

Com o objetivo de proteger e isolar a seção de fibra óptica do contato com os grãos, resíduos e qualquer material presente nas bombonas de café durante o processo de fermentação que possam danificar os sensores, foi desenvolvida uma sonda para encapsular os dispositivos. Dessa forma, duas cápsulas de proteção para os sensores foram projetadas para manter os sensores estáveis no barril, evitando quaisquer interferências mecânicas potenciais. Uma cápsula é dedicada à acomodação do dispositivo óptico, enquanto a outra encapsula os sensores responsáveis por medições auxiliares.

Ambas as cápsulas foram confeccionadas em ácido polilático (PLA) por meio de modelagem por deposição fundida (FDM). O diagrama esquemático e o conceito da sonda óptica pode ser visto nas figuras 5.4 e 5.5.

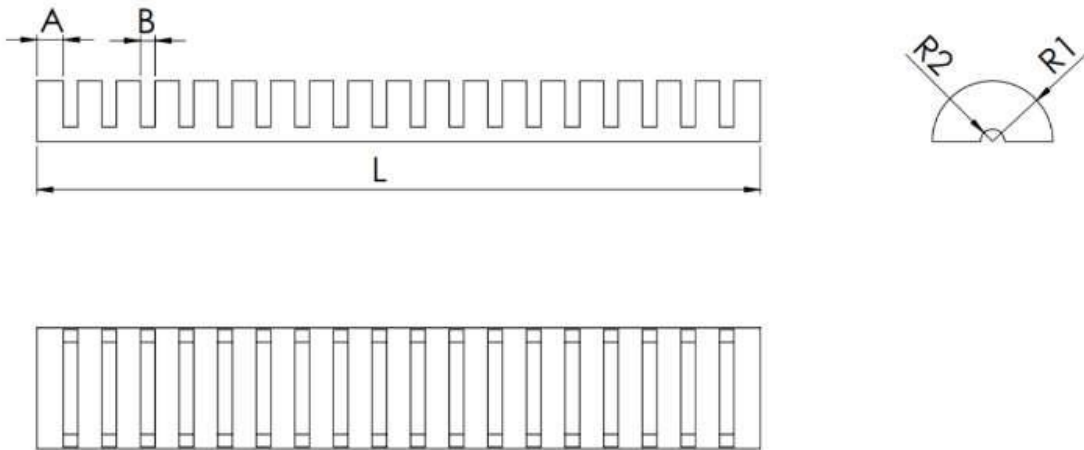


Figura 5.4 – Diagrama esquemático do encapsulamento para a sonda óptica projetada

A cápsula protetora projetada para o dispositivo óptico é exibida na figura 5.6. Enquanto a cápsula para os sensores eletrônicos responsáveis por medições auxiliares é detalhada na figura 5.7. O design das aberturas nessas cápsulas permite a entrada de gases, ao mesmo tempo que protege os sensores do contato direto com os grãos de café.

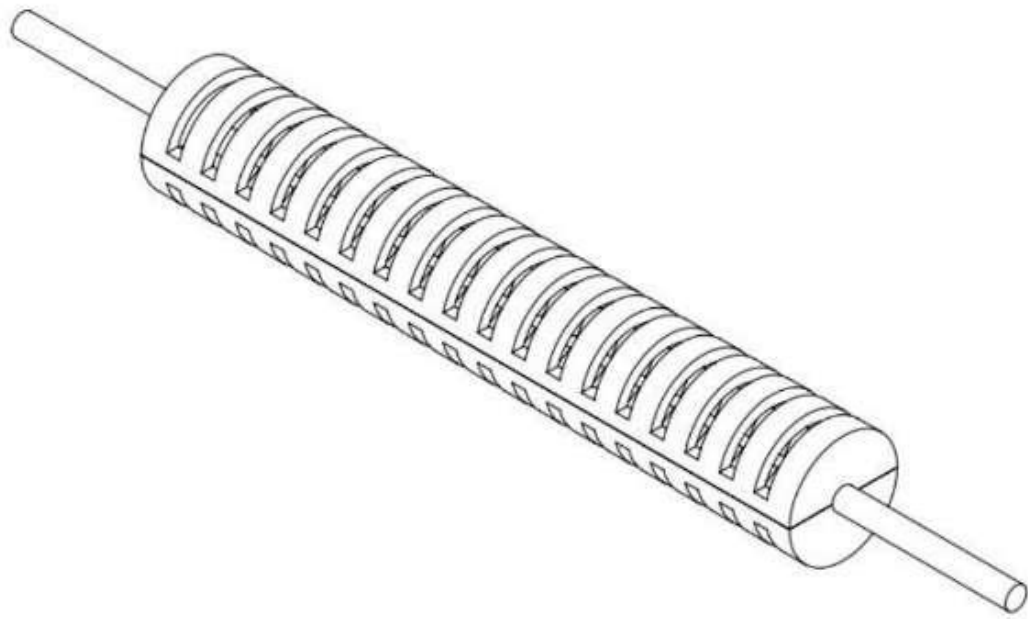


Figura 5.5 – Conceito do encapsulamento para a sonda óptica projetada

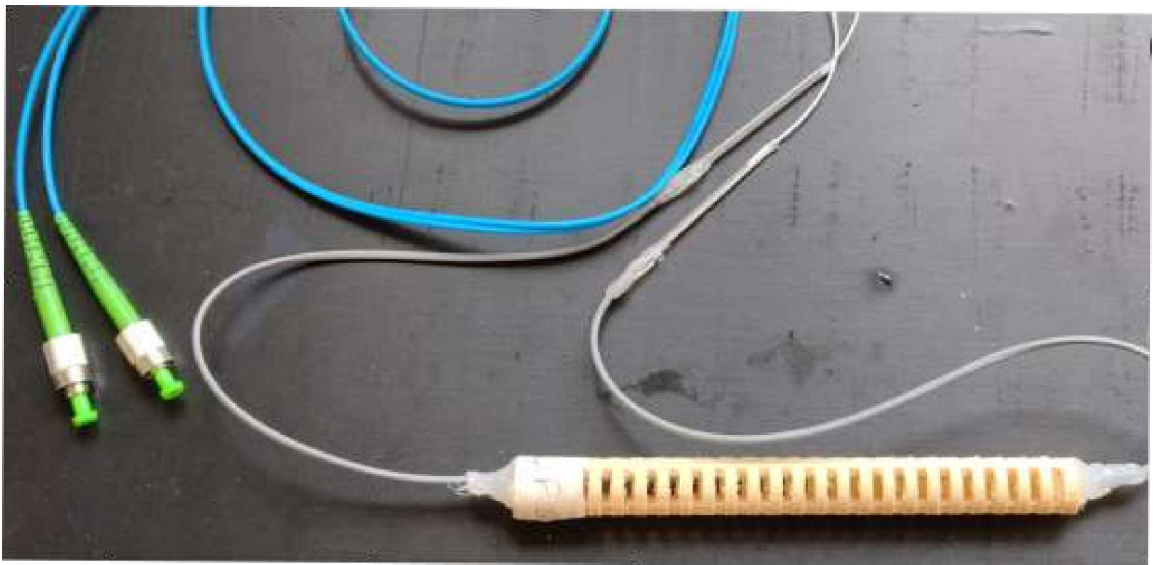


Figura 5.6 – Sonda óptica desenvolvida

5.3 Desenvolvimento do sistema eletrônico

Com o objetivo de adquirir e salvar os dados obtidos dos sensores auxiliares, foi projetado um sistema de hardware para interagir com a sonda, capturando sinais dos sensores de temperatura e CO_2 e armazenando-os em um banco de dados para análises futuras. Mais detalhes do dispositivo desenvolvido podem ser vistos nos anexos, que contém o diagrama esquemático da placa mãe que interagem com a sonda, e os códigos

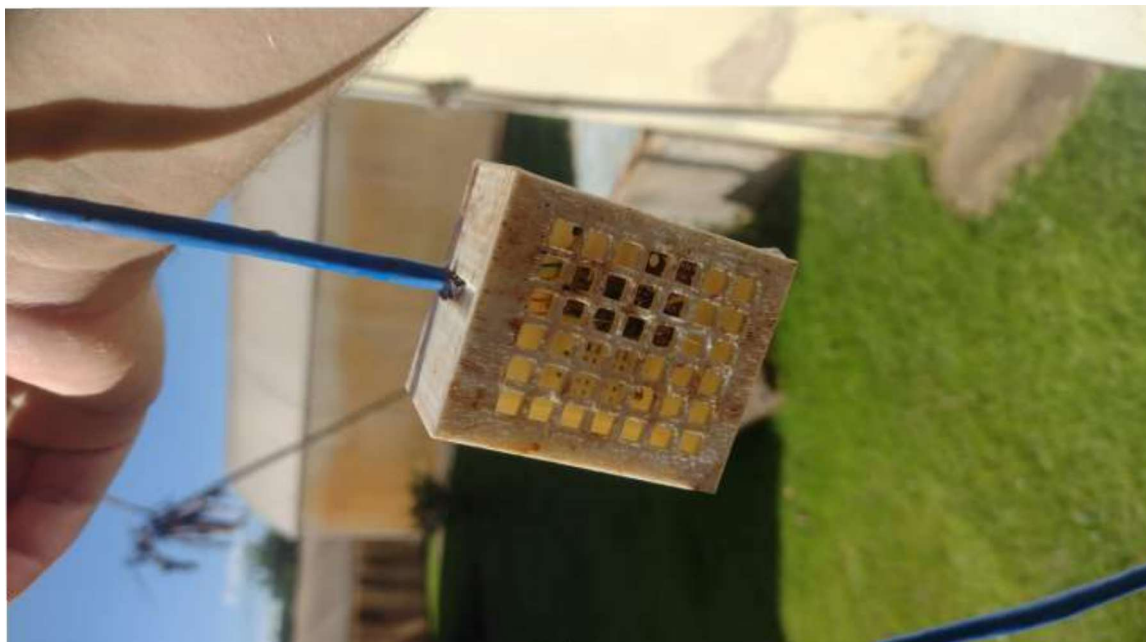


Figura 5.7 – Sonda eletrônica desenvolvida

desenvolvidos durante a execução do projeto.

5.4 Preparo do café

Para a realização do processo de fermentação, os frutos foram selecionados no estado máximo de maturação (100% maduros). Os frutos, de um modo geral, foram coletados a partir de diversos talhões, sendo, no mínimo, 5 plantas por talhão, e 5 frutos por planta. É importante ressaltar que cada talhão atendia as especificações de BRIX mínimo necessário de 15 graus, que foram verificados por meio da averiguação do grau BRIX da mucilagem dos frutos depolpados.

Os frutos recém colhidos foram recebidos em local limpo e seco, e não foram processados pelo lavador ou descascados. A dose das leveduras selecionadas para café foram diluídas em 5 litros de água limpa, em temperatura ambiente, livre de contaminantes químicos e/ou biológicos. Em seguida, a solução passou por agitação até ficarem totalmente dissolvidas (sem a presença de grumos) e pronta para ser adicionada sobre o café, respeitando a relação (Levedura/Café).

Daí, a levedura diluída foi adicionada ao café dentro de biorreatores (Bombonas com capacidades de 50L. É importante ressaltar que, como a mucilagem do café é elemento essencial, o processo foi feito com o mínimo de água e com o máximo de mucilagem preservada.

Além disso, para garantir que o processo de fermentação controlada ocorra na condição ideal de anaerobiose (sem a presença de Oxigênio), foi utilizada, como biorreatores, bombonas de polietileno de alta densidade novas, com tampa de vedação que suporta

pressão e atóxica. Um "airlock" do tipo "S" foi instalado na tampa da bombona. Para isso, foi feito um orifício com o mesmo "airlock" diâmetro da parte inferior do que ficou inserido no interior da bombona, um anel de vedação foi instalado, e água foi adicionada no interior do "airlock", e a tampa foi lacrada. Isso permitiu a saída de CO_2 produzido no processo sem entrada de O_2 , Dando início no processo de fermentação

Além disso, também foram posicionados, nos biorreatores as sondas óptica e eletrônica, para isso, foi feito um furo que permitiu a passagem dos cabos. Para a vedação do furo, foi aplicado silicone após a passagem dos cabos das sondas. Os interferômetros foram posicionados no topo da bombona, acima dos frutos, e no meio, em conjunto com os frutos e mosto, ao passo que o sensor eletrônico foi posicionado no topo da bombona ao lado da sonda óptica do topo. A figura 5.8 apresenta o processo de posicionamento dos dispositivos antes da vedação da caixa.

É importante ressaltar que, para a coleta dos aromas, três testadores que averiguaram os grãos de café em fermentação. Eles foram questionadas se percebiam o odor como agradável ou não e classificadas em 5 descritores de odor: frutado, alcoólico, vinagre, azedo e pútrido.



Figura 5.8 – Posicionamento dos sensores ópticos no biorreator

5.5 Aquisição de dados dos sensores

Para a coleta de dados dos dispositivos ópticos utilizados nesse trabalho, foram utilizados uma fonte SLED de 1550nm da Opto-Link para fornecer o sinal de entrada dos MZIs, e para a aquisição de dados foi utilizado o Analisador de Espectro Óptico, do inglês "*optical spectrum analyzer*" (OSA) modelo OSA203 da Thorlabs. A configuração do OSA foi ajustada para maximizar as variações de comprimento de onda e minimizar o ruído. Dessa forma, a sensibilidade do equipamento foi configurada como Alta, aumentando o ganho eletrônico, ou seja, permitindo mais potência luminosa na entrada do equipamento. Adicionalmente, a resolução foi definida como alta, aprimorando a distinção entre os comprimentos de onda. A Equação 5.1 apresenta a equação utilizada para determinar a resolução do dispositivo:

$$\Delta\lambda = \Delta k \times 100 \times \lambda^2 \quad (5.1)$$

onde $\Delta\lambda$ é a resolução em (pm), Δk é a diferença de caminho óptico, do inglês "*optical path difference*" (OPD), e λ^2 é o comprimento de onda em (μm). Além disso, foi utilizada uma escala logarítmica, permitindo uma melhor visualização das franjas de interferência.

Para os sensores eletrônicos, foi implementada uma estratégia de monitoramento duplo, coletando dados de temperatura interna e CO_2 contínuo usando sensores tanto pela manhã quanto pela tarde. Cada sessão de aquisição durou aproximadamente 3 horas, abrangendo uma duração total de 96 horas, no caso da bombona contendo os sensores eletrônicos, não foi possível estender o processo de fermentação até o ponto onde odores acéticos e pútridos tipicamente se desenvolvem, devido à natureza comercial do biorreator utilizado.

5.6 Processamento dos dados coletados

5.6.1 Processamento dos sensores ópticos

Inicialmente, o sinal obtido dos interferômetros foram submetidos a um processo de extração das franjas de interferência. Cada espectro coletado passou por uma etapa de filtragem utilizando o filtro de Savitzky-Golay (135). O filtro empregado é uma ferramenta eficaz para suavização de espectros interferométricos, proporcionando uma redução no ruído indesejado sem sacrificar informações relevantes (167). O filtro utiliza um método de ajuste polinomial local para estimar valores suavizados em cada ponto do sinal. Neste estudo, escolhemos empregar o filtro de Savitzky-Golay com um tamanho de janela de 41 e ordem 10, configurando os coeficientes do filtro para alcançar uma suavização otimizada. A Eq. 5.2 apresenta o filtro utilizado:

$$y_k = \frac{1}{C} \sum_{i=-\frac{41}{2}}^{\frac{41}{2}} a_i \cdot x_{k+i} \quad (5.2)$$

Onde y_k é o valor suavizado na posição k , C é um fator de normalização, a_i são os coeficientes do filtro de Savitzky-Golay, e x_{k+i} são os valores originais do sinal para pontos ao redor de k . A figura 5.9 apresenta o espectro dos dois interferômetros após a aplicação do método de filtragem.

Durante a aquisição das leituras de espectro com o interferômetro, foi identificado que essas leituras eram suscetíveis a interferências da fonte, uma vez que o sensor registra flutuações na potência do sinal em diferentes comprimentos de onda. Conseqüentemente, as variações oscilavam em relação a uma "referência", que é o sinal original da fonte. Essa referência pode ser aproximada como o valor médio do sinal. Portanto, podemos conceituar o sinal como composto por dois componentes distintos. O primeiro é o valor médio, que corresponde ao sinal emitido pela fonte original. O segundo é o valor oscilante, resultante

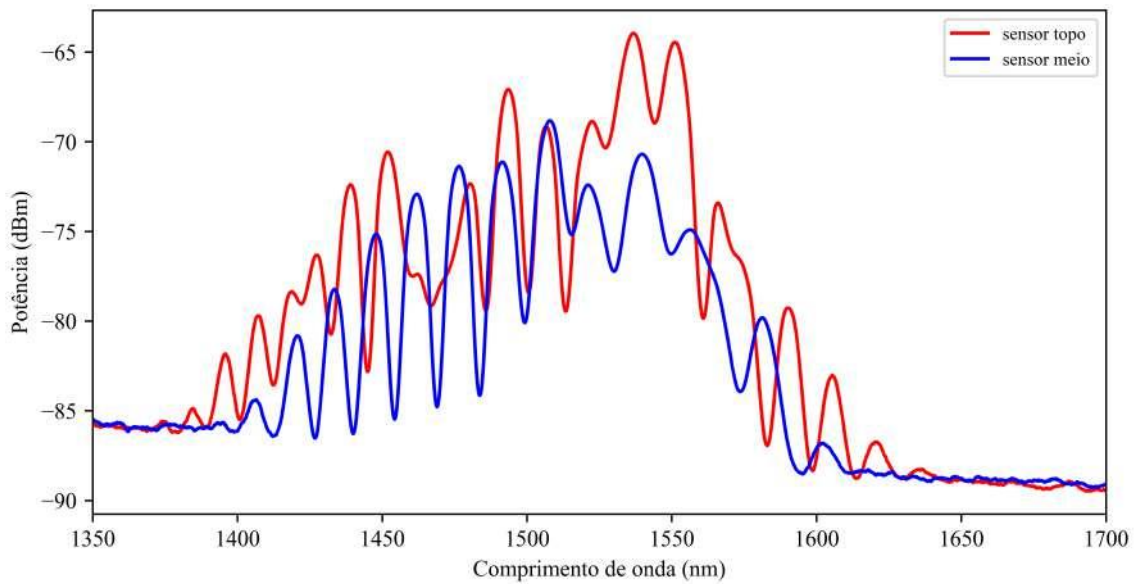


Figura 5.9 – espectro dos dois interferômetros após a aplicação do método de filtragem

da interação entre o sensor e a amostra em análise. Essa interação gera oscilações que se sobrepõem ao valor médio, contribuindo para a forma e os padrões observados nas leituras do espectro.

Para resolver esse problema, foi realizada uma aproximação da fonte, possibilitando a correção do espectro para discernir claramente o componente oscilante do sinal de seu valor médio. Essa correção é realizada criando um terceiro sinal, que é o espectro adquirido pelo interferômetro após subtrair o sinal da fonte aproximada ($\bar{x}(\lambda)$), conforme descrito na Eq. 5.3:

$$\bar{x}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5.3)$$

onde $\bar{x}(\lambda)$ representa a média em relação a λ , N é o número total de pontos em λ , e x_i são os valores individuais de x correspondentes a diferentes pontos em λ . Ao realizar essa separação, obtém-se um sinal que representa exclusivamente a resposta da interação sensor-amostra. As figuras 5.10 e 5.11 ilustram o procedimento de extração das franjas, expondo também, a seleção adequada da ordem do filtro M.A. (N). Foi escolhido $N=100$ devido ao bom compromisso entre atenuações amplas e rápidas mudanças nos vales.

A figura 5.12 e 5.13 mostra as franjas dos sensores no meio e no topo do biorreator, respectivamente. Além disso, podemos verificar a comparação entre os dois espectros na figura 5.14

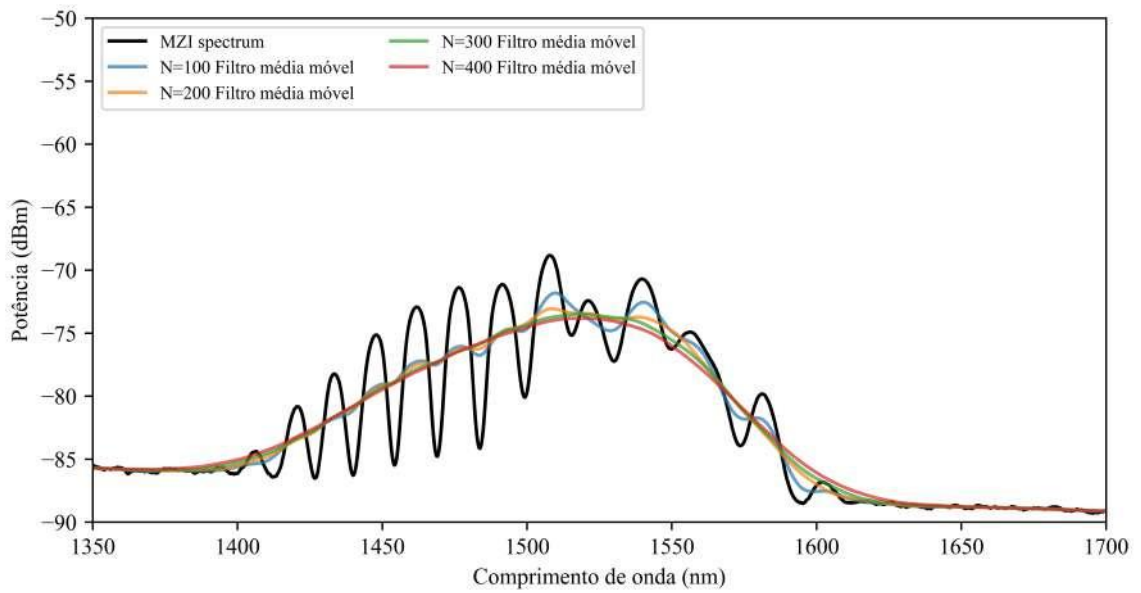


Figura 5.10 – Seleção da ordem do filtro para extração de franjas, sensor meio

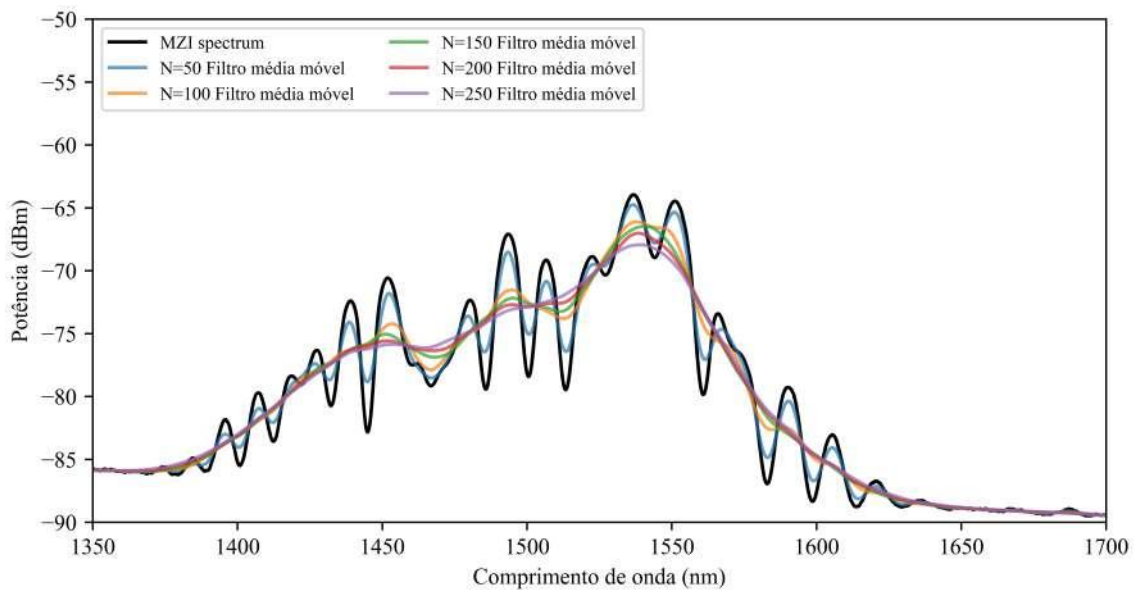


Figura 5.11 – Seleção da ordem do filtro para extração de franjas, sensor topo

As franjas dos sensores foram processadas por análise de componentes principais (PCA) para reduzir a dimensionalidade. Para isso, os espectros de ambos os sensores (para cada amostra) foram concatenados e processados.

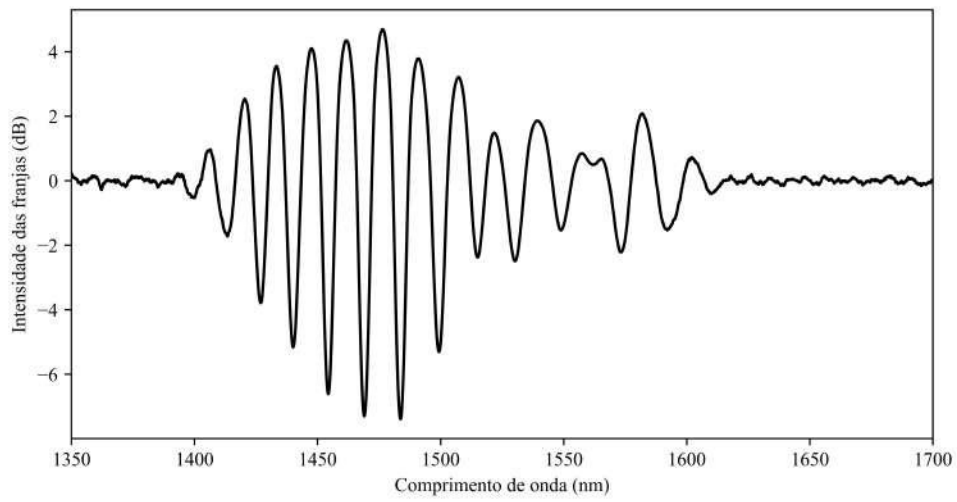


Figura 5.12 – Espectro após processamento, sensor meio

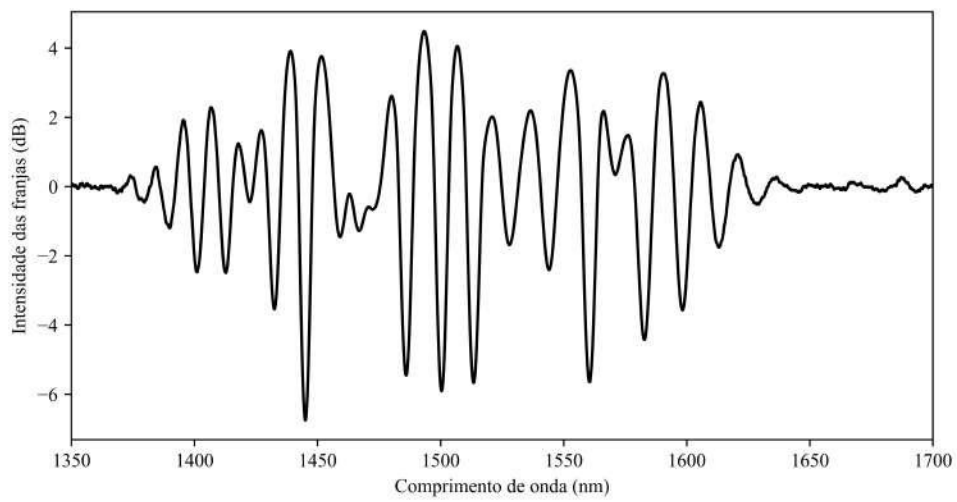


Figura 5.13 – Espectro após processamento, sensor topo

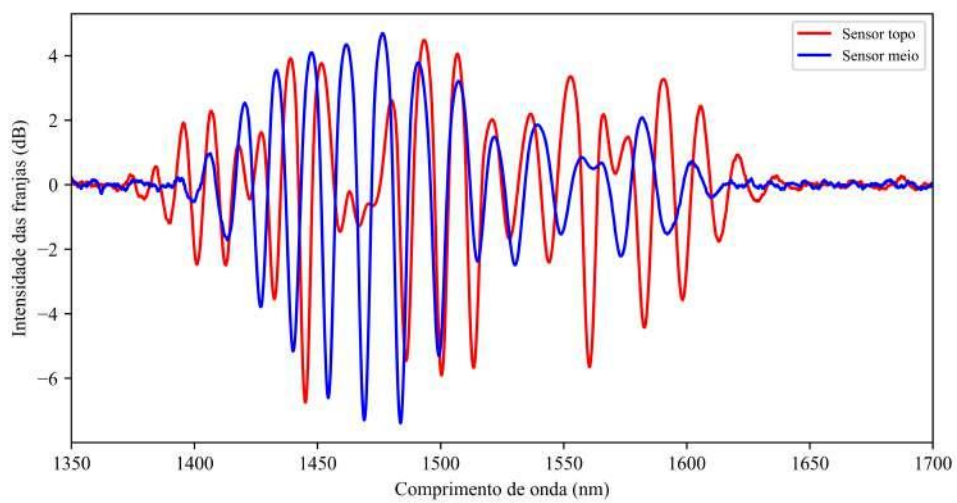


Figura 5.14 – Comparação entre espectros após processamento

5.6.2 Processamento dos sensores eletrônicos

Os dados brutos dos sensores eletrônicos foram lidos a partir de um arquivo CSV e organizados em um dataframe com colunas para tempo, concentração de CO_2 e temperatura. Subsequentemente, para melhorar a qualidade dos dados coletados durante o monitoramento do processo de fermentação do café, a técnica de *clustering* DBSCAN ("*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*") proposta por (126) foi empregada para realizar uma filtragem do sinal inicial. Dados ruidosos e corrompidos, que podem ocorrer em situações específicas, representam um desafio para obter informações precisas. Para esse fim, parâmetros como uma distância mínima de amostra de 300 e um mínimo de duas amostras por vizinhança foram utilizados. É importante notar que a coleta contínua de dados não foi viável, e o sensor de CO_2 possui um tempo de resposta. Os dados foram agrupados e filtrados para obter medições após o estabelecimento do estado estacionário do sensor. Diferentes *clusters*, usando os mesmos parâmetros, foram criados para vários segmentos dos dados de temperatura e CO_2 . Subsequentemente, os dados filtrados foram unificados em uma única série temporal. A figura 5.16 apresenta uma parcela do processamento dados originais e a figura 5.15 apresenta a série temporal obtida.

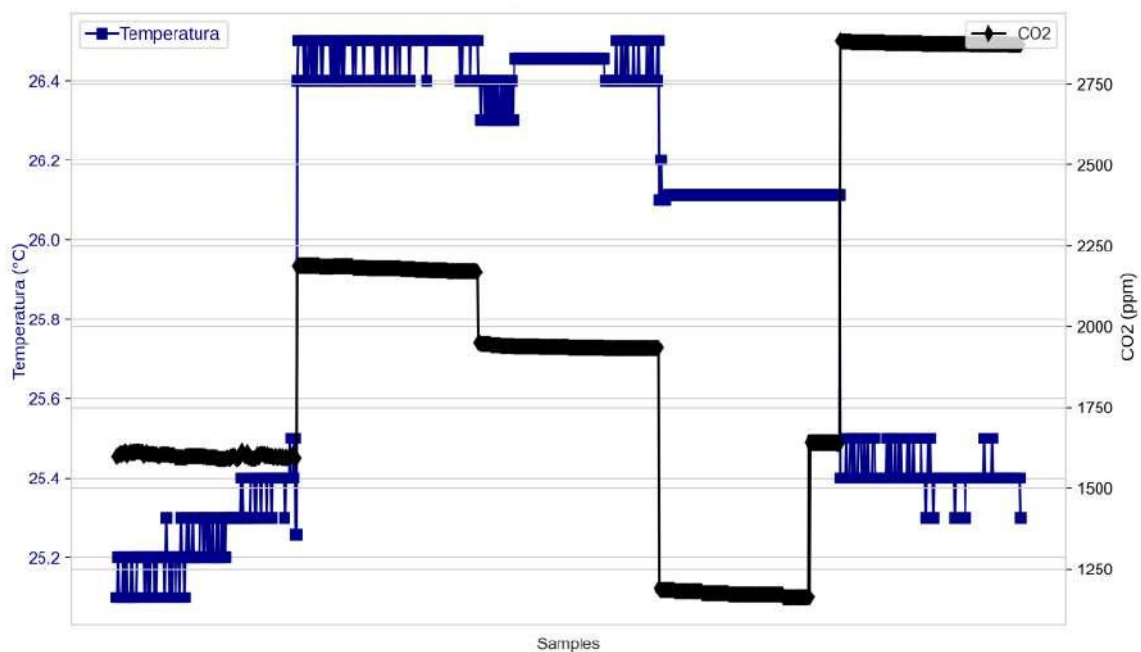


Figura 5.15 – Processamento dados originais

A figura 5.16 ilustra a aplicação da técnica de *clustering* DBSCAN nos dados de concentração de CO_2 ao longo do tempo. Cada gráfico representa um segmento de dados, onde os pontos em vermelho indicam os *clusters* identificados e os pontos em cinza representam os dados originais. No *Cluster 0*, observamos uma concentração inicial de CO_2 estável que decresce com o tempo. No *Cluster 3*, há um aumento gradual na concentração

de CO_2 seguido por uma estabilização. No *Cluster 6*, a concentração de CO_2 apresenta variações significativas até alcançar um novo estado estável. Essas análises são cruciais para entender as mudanças no ambiente de fermentação e garantir a precisão das medições.

A figura 5.15 apresenta a série temporal obtida após a aplicação do *clustering* DBSCAN nos dados brutos de concentração de CO_2 . A série temporal unificada mostra as medições filtradas ao longo do tempo, evidenciando períodos de variação e estabilidade na concentração de CO_2 durante o processo de fermentação do café. As zonas de maior densidade de pontos indicam intervalos com menor ruído e maior consistência nos dados, enquanto as transições entre *clusters* refletem mudanças significativas nas condições de fermentação. Essa visualização facilita a interpretação dos dados processados e a identificação dos momentos críticos no monitoramento do processo.

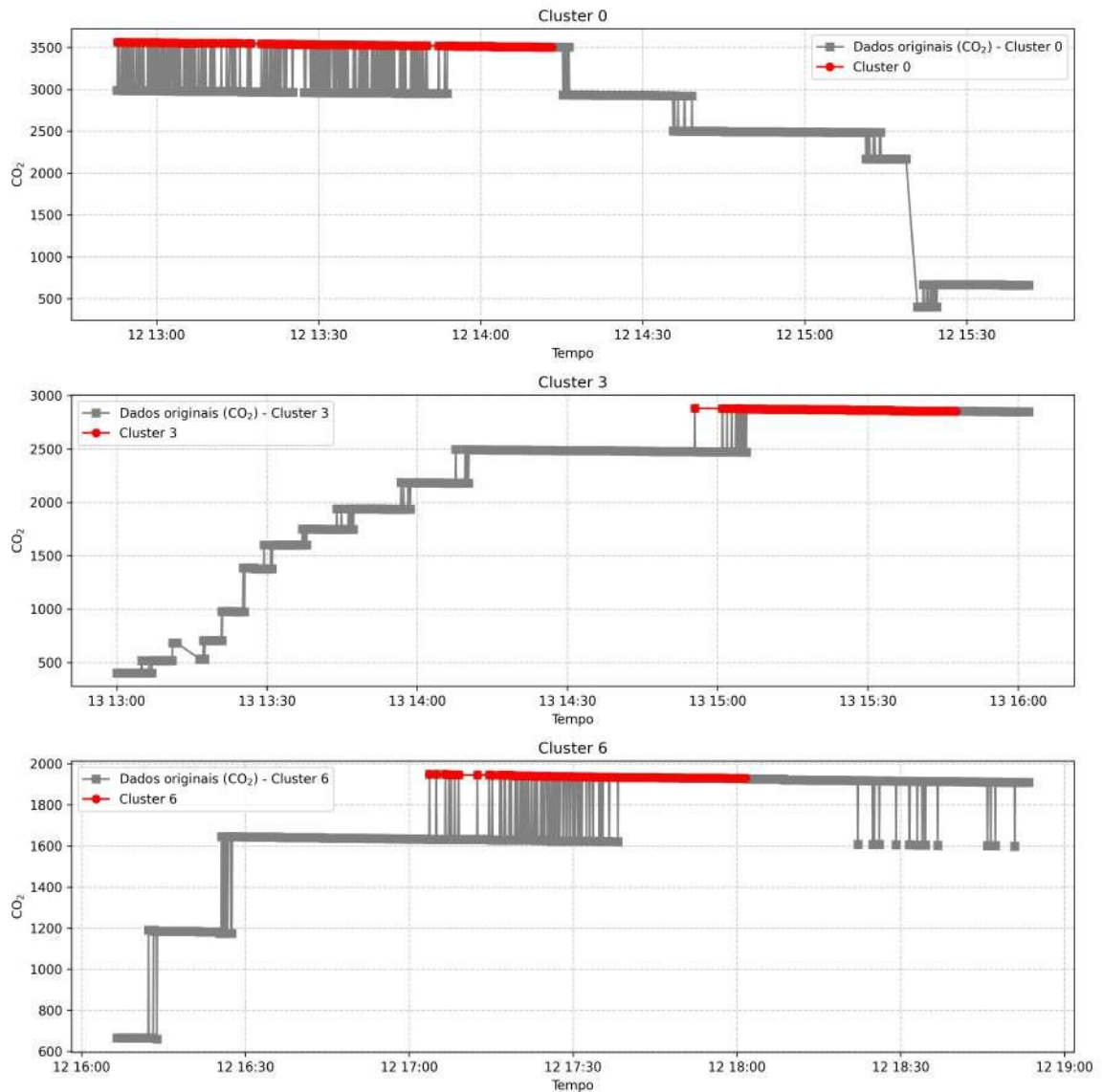


Figura 5.16 – Processamento dados originais

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Resultados obtidos

Inicialmente, os espectros dos sensores ópticos foram coletados ao longo do tempo. As figuras 6.1 e 6.2 apresentam o espectro de interferência obtido após a aplicação das técnicas de processamento, para os sensores posicionados no meio e no topo do biorreator respectivamente. No eixo X, temos o comprimento de onda da luz incidente (em nm), enquanto o eixo Y representa a intensidade das franjas de interferência (em dB). As figuras destacam alterações significativas no espectro óptico ao longo do tempo de fermentação, permitindo a visualização da variação das franjas ao longo do tempo em diferentes comprimentos de onda. Podemos observar a transição de traços mais escuros para mais claros, indicando a sensibilidade do dispositivo óptico às mudanças nas características do café durante o processo de fermentação.

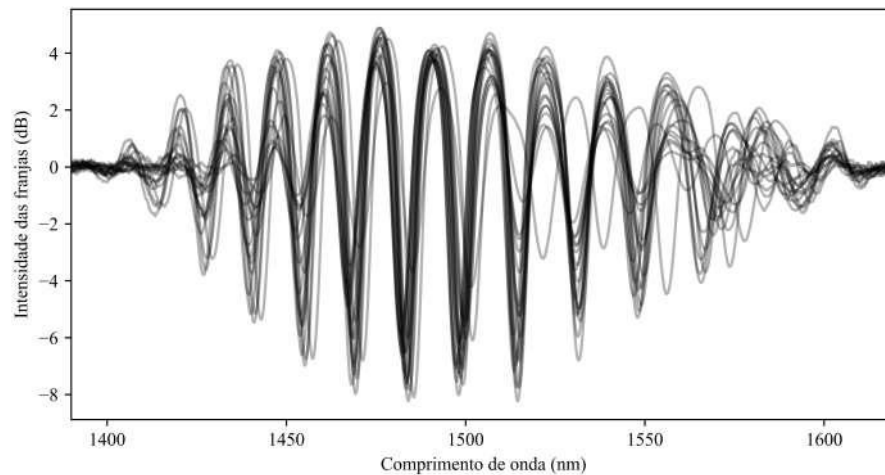


Figura 6.1 – Variação do espectro óptico ao longo do processo de fermentação (sensor meio)

Além disso, através da coleta espectral, foi possível obter o espectrograma dos sensores, as figuras 6.3 e 6.4 mostram a intensidade das franjas durante todo o processo de fermentação. Para o sensor superior, podemos observar um deslocamento para o azul em comprimentos de onda menores e um deslocamento para o vermelho em comprimentos de onda maiores no início do processo de fermentação (0 a 48 horas). Também podemos notar uma diminuição no contraste (amplitude entre as franjas superiores e inferiores) no meio do processo de fermentação (cerca de 96 horas). Por outro lado, para o sensor do meio, o deslocamento para o roxo foi predominante e a variação de contraste foi mais localizada. Em termos práticos, essas observações podem ser utilizadas para monitorar e analisar as mudanças nas propriedades do café durante a fermentação.

Uma abordagem interessante para o processamento do espectro óptico envolve a extração dos comprimentos de onda ressonantes de cada franja de interferência. No

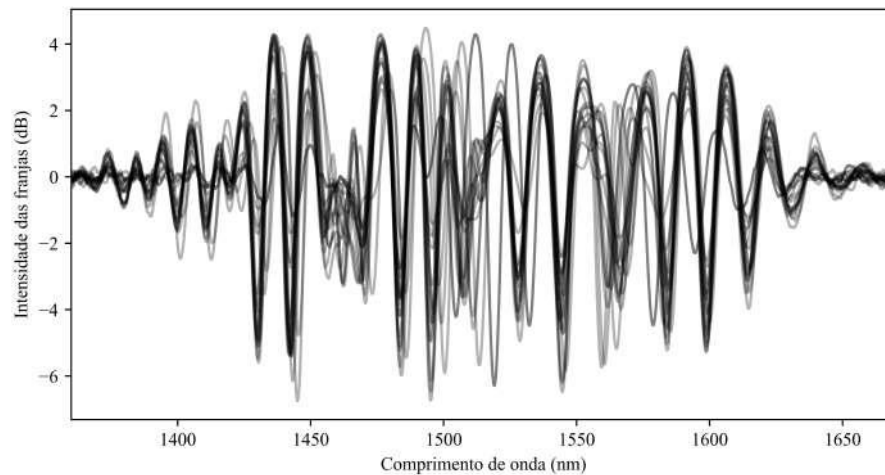


Figura 6.2 – Variação do espectro óptico ao longo do processo de fermentação (sensor topo)

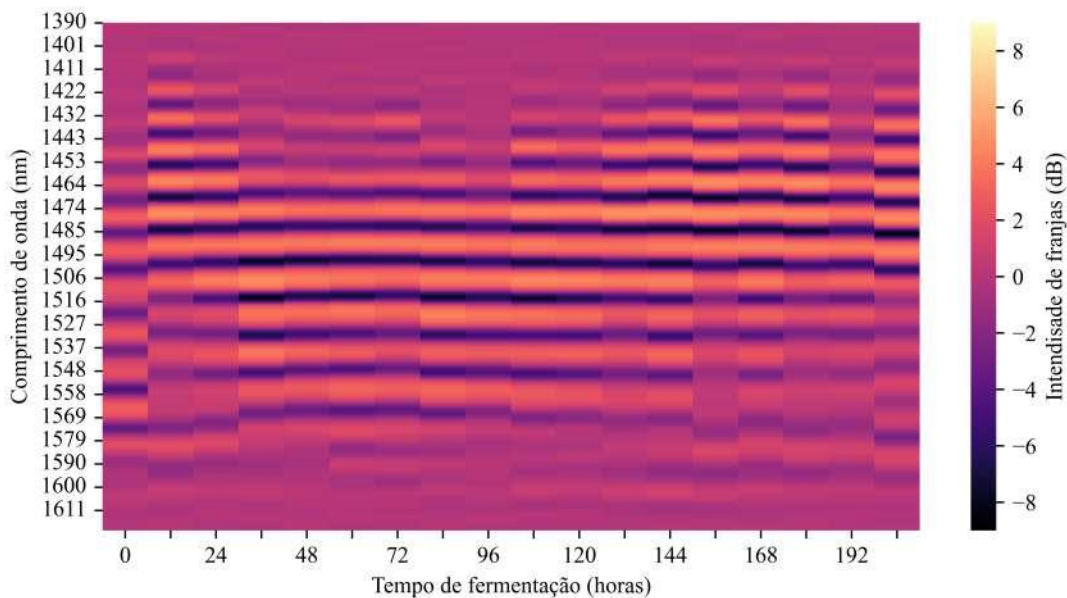


Figura 6.3 – Espectrograma do sensor do meio durante o processo de fermentação.

entanto, devido à complexidade do processo analisado, juntamente com a não-linearidade na variação espectral ao longo do experimento, esse método se mostrou pouco atrativo. A figura 6.5 apresenta o comportamento das diversas franjas de interferência presentes no sensor do topo, ao longo de todo o processo. Nesta imagem, assim como os espectrogramas apresentados, podemos verificar o aspecto não linear das franjas de interferência.

Dessa forma, foi feita uma análise de componentes principais, do inglês "*Principal Component Analysis*" (PCA), com o objetivo de encontrar uma relação entre os espectros ópticos coletados e o processo de fermentação do café. Devido ao grande número de variáveis de entrada, essa técnica se torna atraente, pois pode encapsular todo o conjunto de dados. Assim, os espectros coletados foram concatenados e processados, maximizando a utilização dos dados disponíveis. A PCA é uma técnica estatística útil e é um método comum para

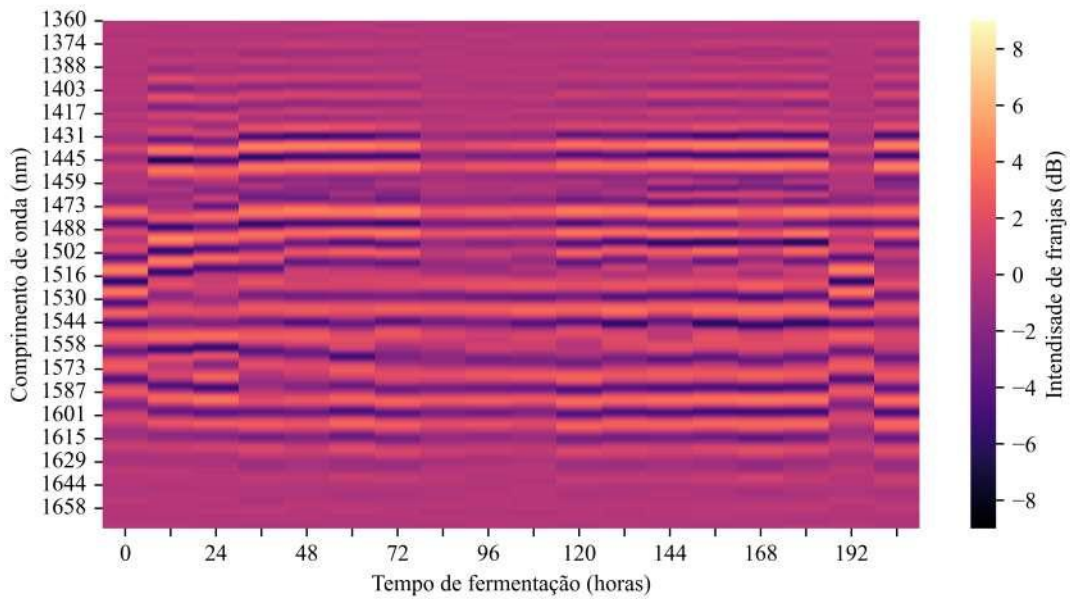


Figura 6.4 – Espectrograma do sensor do topo durante o processo de fermentação.

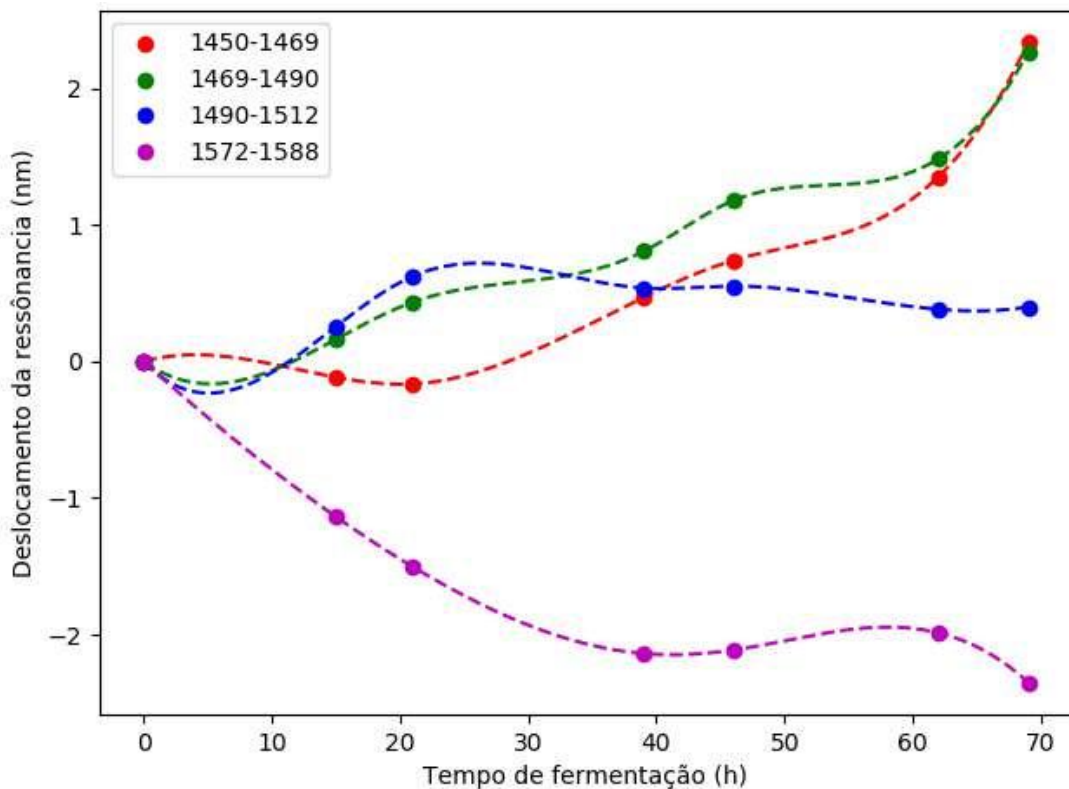


Figura 6.5 – Variação dos comprimentos de onda das franjas ao longo do tempo

encontrar padrões em dados de alta dimensão (115, 96). No contexto do nosso estudo, a PCA identificou os componentes principais, que são combinações lineares das variáveis de entrada originais. Esses componentes principais capturam a variabilidade mais significativa no conjunto de dados. Os dois primeiros componentes principais, denominados PC1 e PC2, foram selecionados por representarem as direções de máxima variância e exibirem a

maior correlação com os dados principais. Além disso, o uso do espectro completo previne a perda de características de entrada causada por atenuação, acoplamento ou perda de comprimento de onda ressonante devido à alta sensibilidade dos dispositivos ópticos. Daí, ao aplicar a PCA, reduzimos o número de dimensões de 4724 para 2, com os primeiros e segundos componentes explicando, respectivamente, 33,24% e 24,14% da variância total. Como verificação inicial, foi possível verificar uma variação nas coordenadas das duas componentes principais ao longo do tempo (PC1 e PC2). A figura 6.6 apresenta a decomposição das componentes principais

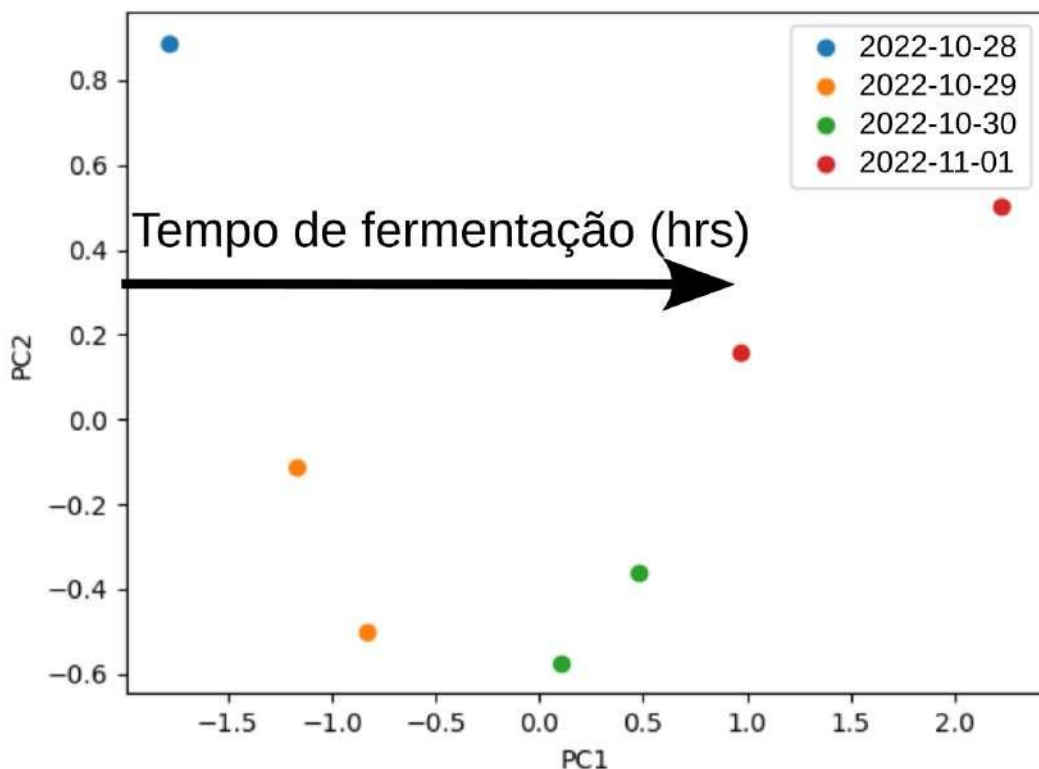


Figura 6.6 – Variação das componentes principais ao longo do tempo

Para entender melhor a relação entre o tempo de fermentação e a componente principal 1 (PC1) obtida pela análise de componentes principais, foi realizada uma regressão linear. A equação ajustada foi $PC_1 = 0.0542t - 2.0833$ onde PC_1 representa a componente principal e t o tempo de fermentação em horas. A curva apresentou um parâmetro **R-squared**, $(R^2) = 0.9883$. Este valor indica que 98.83% da variação na componente principal pode ser explicada pelo tempo de fermentação, o que sugere uma forte correlação linear entre essas duas variáveis. A figura 6.7 apresenta a regressão linear realizada.

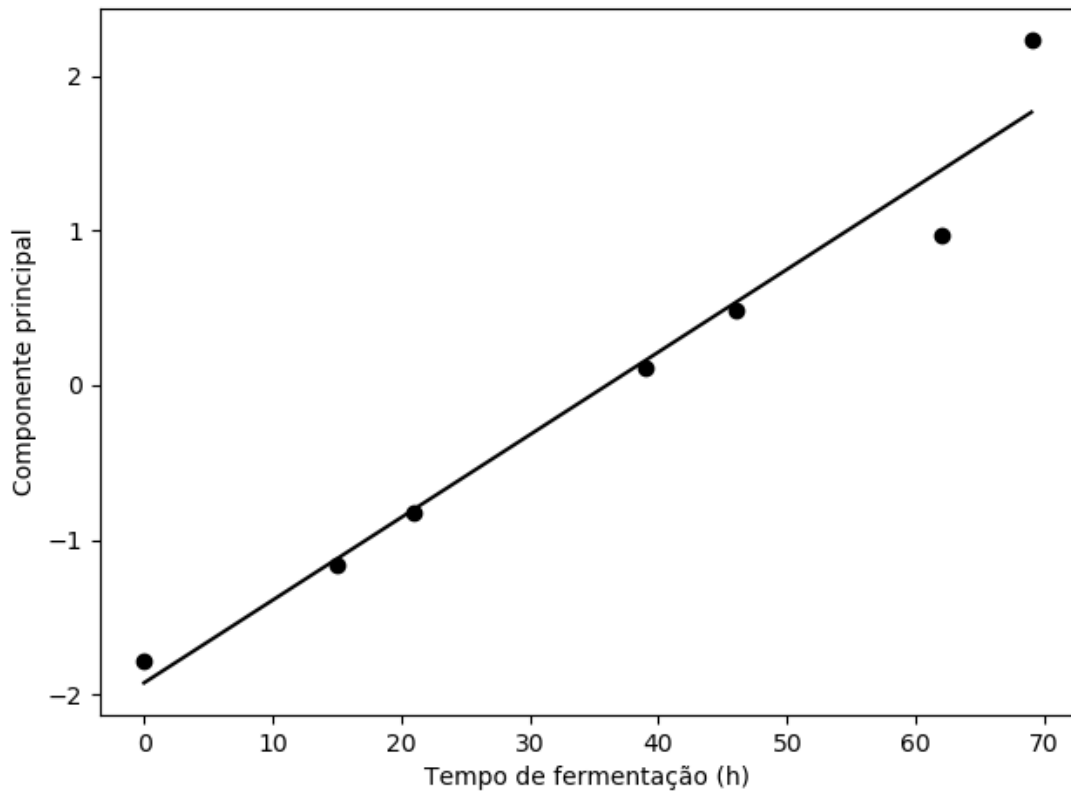


Figura 6.7 – Regressão linear feita entre PC1 e o tempo de fermentação

6.2 O uso de classificadores para a predição dos aromas

Após realizada a decomposição PCA, foi feita aplicação de dois algoritmos distintos para essa tarefa: a regressão logística e o classificador Naive Bayes. A regressão logística foi empregada para categorizar os aromas em duas classes principais, sendo elas agradável e desagradável, oferecendo uma visão geral sobre a percepção sensorial básica dos aromas. Em um nível mais detalhado, utilizamos o classificador Naive Bayes para uma distinção mais refinada entre os aromas, categorizando-os em frutado, alcoólico, pútrido e acético.

As figuras 6.8 e 6.9 mostram os padrões de franjas projetados no plano 2D pela PCA. Na Fig. 6.8, ilustra a classificação de odores baseada na percepção subjetiva de três participantes, que julgaram o aroma como "agradável" ou "desagradável". A análise foi realizada utilizando regressão logística para separar linearmente essas duas classes de julgamento de odor. No gráfico, os dados são representados em termos das duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2), que foram extraídas dos dados originais para facilitar a visualização.

Os círculos azuis indicam os pontos onde o aroma foi considerado "agradável", enquanto os círculos laranjas indicam os pontos onde o aroma foi considerado "desagradável". Além disso, cada ponto possui um contorno quadrado que corresponde à classe real do aroma, enquanto os círculos preenchidos representam a classe prevista pela regressão logística.

A linha preta sólida que atravessa o gráfico representa a curva de decisão gerada pelo modelo de regressão logística. Esta linha separa as duas classes de forma linear, mostrando que os dados são linearmente separáveis. Os pontos que caem acima dessa linha são classificados como "desagradáveis" e os que caem abaixo como "agradáveis". As classes e a superfície de decisão podem ser vistas na Fig. 6.8.

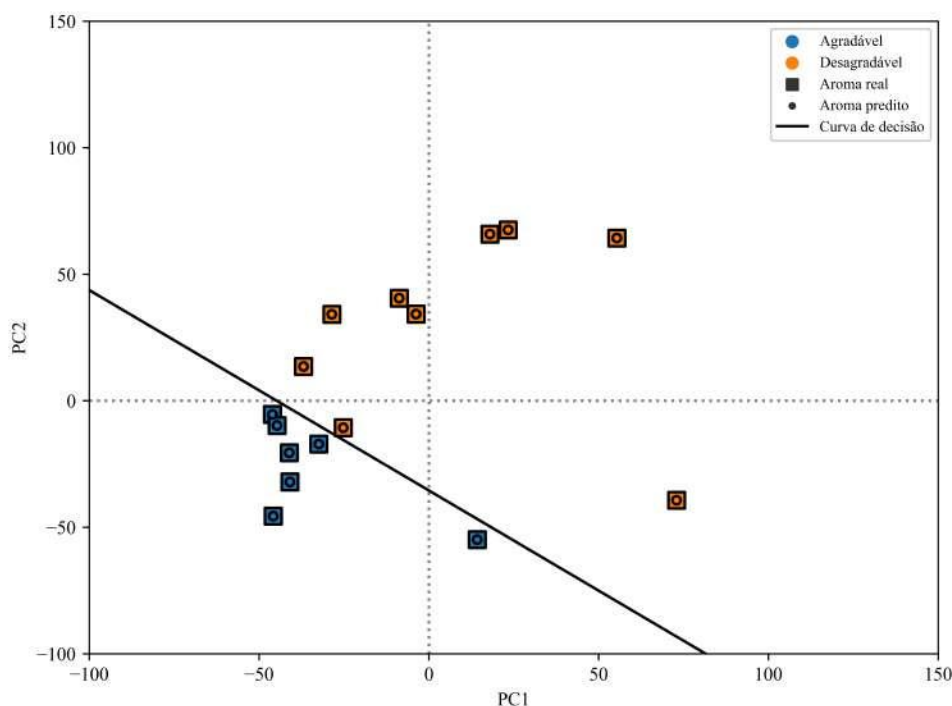


Figura 6.8 – Percepção de odor distribuída ao longo dos componentes principais do sensor e sua classificação/predição via regressão logística

De maneira similar, a figura 6.9 apresenta a visualização dos descritores de odor no espaço das duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2). Esses descritores foram classificados como "Frutado", "Alcoólico", "Acético", e "Pútrido". O modelo de classificação Naive-Bayes foi aplicado aos dados, resultando em uma separação completa 100% das classes para este conjunto de treinamento, indicando que cada descritor de odor foi corretamente identificado e separado.

No gráfico, cada descritor de odor é representado por um círculo colorido, conforme a legenda. As cores indicam a categoria do odor: azul para "Frutado", amarelo para "Alcoólico", verde para "Acético", e vermelho para "Pútrido". Os quadrados ao redor dos círculos indicam as classes reais dos aromas, enquanto os círculos preenchidos indicam as classes previstas pelo modelo Naive-Bayes.

A separação clara entre os diferentes grupos de descritores, conforme visualizada nas componentes principais, confirma a eficácia do modelo Naive-Bayes em distinguir entre os diferentes tipos de aromas. A ausência de sobreposição entre os grupos de dados no plano de PC1 e PC2 reafirma que as classes de descritores de odor são linearmente separáveis no espaço dessas componentes.

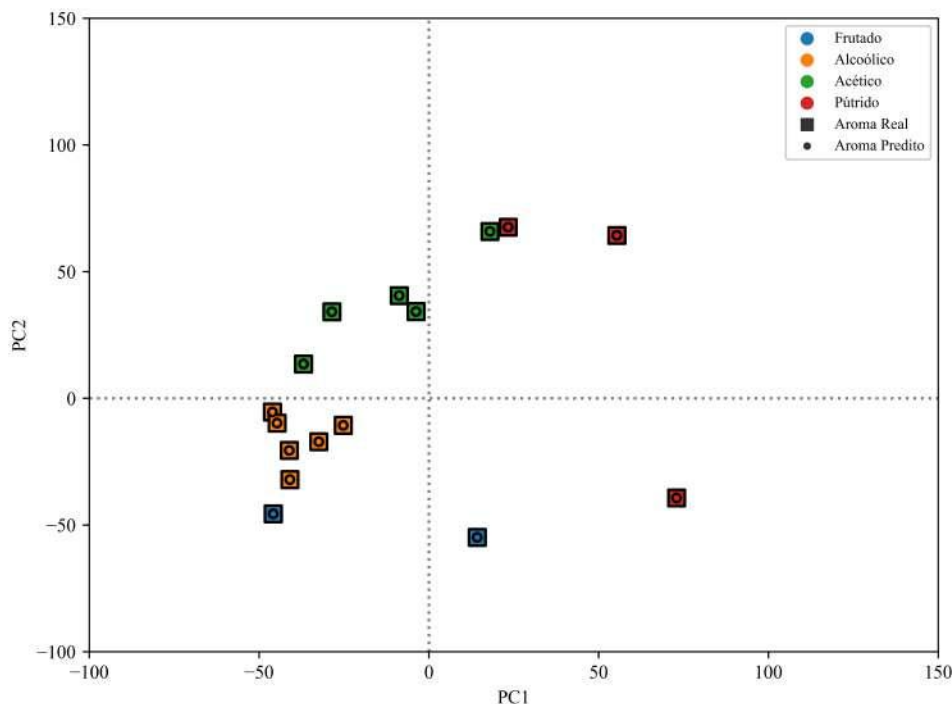


Figura 6.9 – Descritores de odor distribuídos ao longo dos principais componentes do sensor e sua classificação/predição via Naive-Bayes.

Por outro lado, a figura 6.10 apresenta os dados de uma forma mais atraente para o monitoramento do processo, onde os componentes principais e os odores classificados são mostrados em função do tempo. O gráfico mostra a evolução de diferentes descritores de aroma (Putrido, Acético, Alcoólico, Frutado) ao longo de 200 horas de fermentação, com os valores reais dos odores representados por quadrados verdes e as previsões feitas pelo modelo pelo modelo MZI integradas à fibra óptica representadas por linhas laranjas.

Os resultados indicam que, ao longo do tempo de fermentação, os odores evoluem em estágios distintos, passando de um perfil mais frutado nas primeiras horas, para alcoólico, e finalmente chegando a uma predominância de odores putridos após cerca de 200 horas. A precisão do modelo preditivo é destacada pela proximidade entre os valores reais e os preditos, sugerindo que o dispositivo MZI pode ser uma ferramenta promissora para a percepção de odores e o monitoramento em tempo real do processo de fermentação.

Embora a análise tenha sido realizada offline, os resultados indicam o potencial de utilização do MZI para monitoramento em tempo real, especialmente quando integrados a sensores de fibra óptica. Isso abre perspectivas interessantes para o controle e a otimização do processo de fermentação, incluindo a criação de sistemas de alarme para evitar a deterioração do produto e melhorar tanto a qualidade quanto a produtividade.

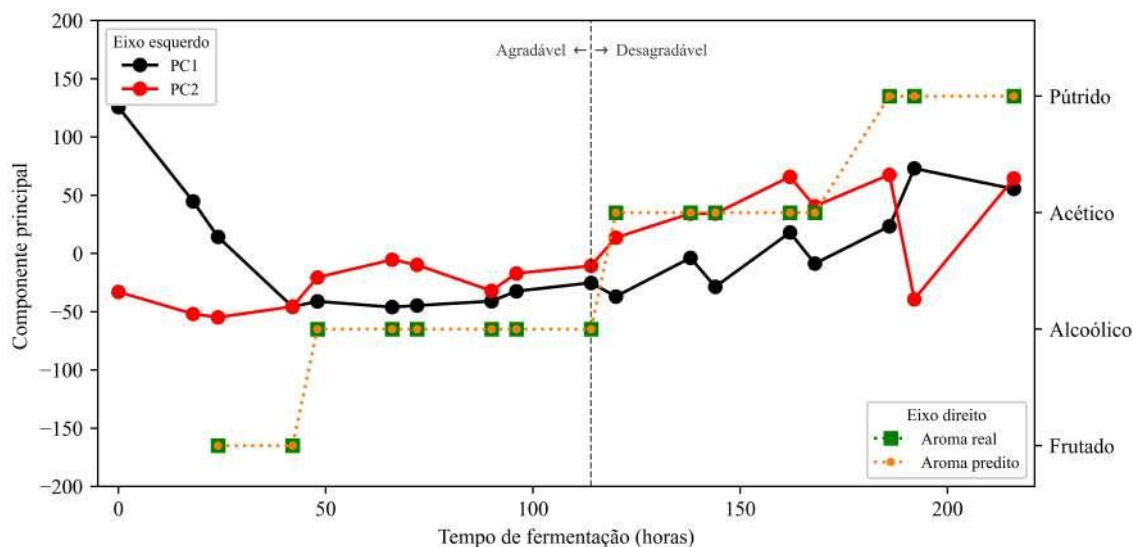


Figura 6.10 – Resumo dos dados adquiridos durante o processo de fermentação.

6.3 Integração entre os sensores ópticos e eletrônicos

A integração dos dados obtidos dos sensores ópticos e eletrônicos serve como um importante auxílio na compreensão do comportamento do processo de fermentação do café e das mudanças nos aromas ao longo do tempo. Inicialmente, a verificação das medições de CO_2 e temperatura ao longo do processo de fermentação foi realizada e associada ao aroma do café. Observou-se que durante a transição entre os aromas frutado e alcoólico, houve um aumento significativo nos níveis de CO_2 e temperatura, que então diminuiram até alcançar o aroma alcoólico ideal. É importante notar que os níveis de CO_2 reduziram de forma mais abrupta ao longo do processo. A figura 6.11 apresenta a série temporal para a análise preliminar de CO_2 e temperatura durante o experimento, mostrando a transição entre os aromas e o momento em que os grãos atingiram o aroma ideal.

Aproveitando a classificação sensorial humana, onde os especialistas definiram o aroma ideal, foi possível determinar o momento ótimo quando os grãos apresentaram um aroma alcoólico, semelhante ao conhaque, mas mantendo o aroma característico do café. Em seguida, as medições de CO_2 e temperatura foram associadas à classificação do aroma e concatenadas na série temporal apresentada na figura 6.11. Esta imagem revela um aumento significativo nos níveis de temperatura e CO_2 durante a transição dos aromas frutado para o alcoólico. Também demonstra uma queda nessas medidas quando o aroma ideal foi alcançado. É essencial notar que o processo dura aproximadamente 96 horas, e cada ponto no gráfico representa a média diária de cada medida, considerando que esses índices podem variar consideravelmente ao longo do dia. Para garantir que as variações observadas, especialmente de temperatura, fossem genuinamente decorrentes do processo de fermentação, foram adotadas precauções rigorosas.

Os grãos de café foram colocados em biorreatores vedados, equipados com silicone

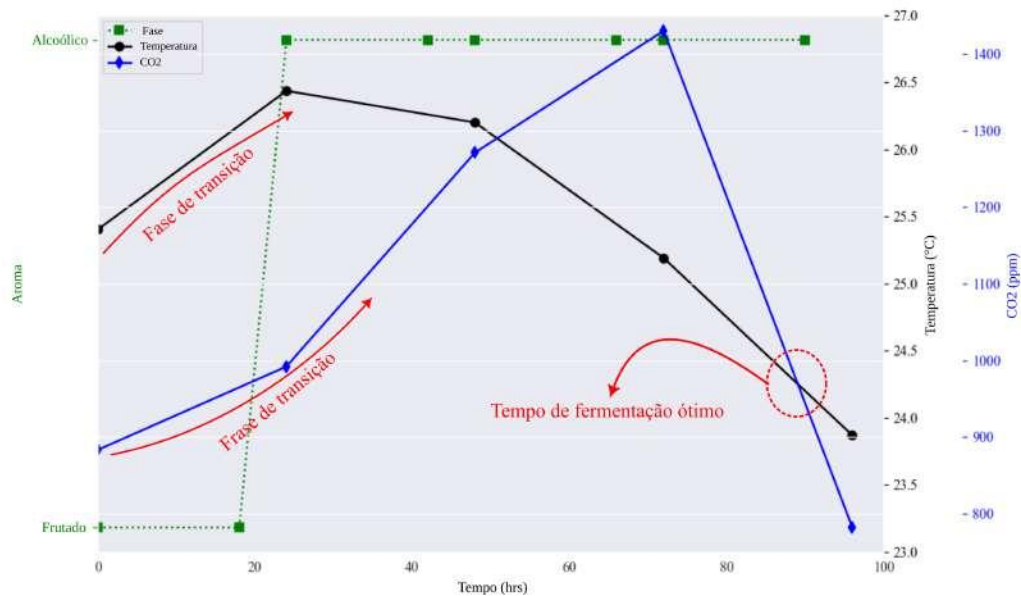


Figura 6.11 – Série temporal para as variações de CO₂ e temperatura

e um "air-lock" que permitia a saída controlada de CO₂ e a entrada mínima de oxigênio, garantindo que o processo se mantivesse anaeróbico. Além disso, os biorreatores foram armazenados em um laboratório com temperatura controlada, assegurando que qualquer variação térmica detectada fosse intrínseca ao processo de fermentação do café e não causada por flutuações externas no ambiente.

Ademais, é possível comparar com o espectrograma do sensor óptico posicionado no topo do biorreator, uma vez que a sonda eletrônica também foi colocada no topo do barril. A figura 6.12 mostra o espectrograma que revela variações nas comprimentos de onda e intensidade das franjas interferométricas ao longo do tempo. No eixo y, estão apresentados os comprimentos de onda da luz incidente em nanômetros, enquanto o eixo x representa o tempo de fermentação em horas. As cores dentro do gráfico correspondem à intensidade das franjas, oferecendo uma indicação visual das mudanças ao longo do tempo.

O espectrograma mostra um deslocamento significativo nos comprimentos de onda dos vales de atenuação durante a variação dos aromas, permitindo a identificação do surgimento do aroma frutado após o início do processo. No entanto, apesar de apresentar variações, distinguir entre os aromas frutado e alcoólico apenas através do espectrograma provou ser uma tarefa mais complexa, uma vez que as variações na intensidade e no comprimento de onda precisam de uma análise visual detalhada. Além disso, houve uma variação na intensidade das franjas durante o período de fermentação ideal.

Os resultados da Análise de Componentes Principais (PCA) indicaram que, ao empregar essa técnica, a complexidade do conjunto de dados foi reduzida. A variância total explicada pelos componentes principais PC1 e PC2 é de 57,37%, indicando que uma porcentagem significativa da variabilidade original nos dados dos sensores ópticos foi retida.

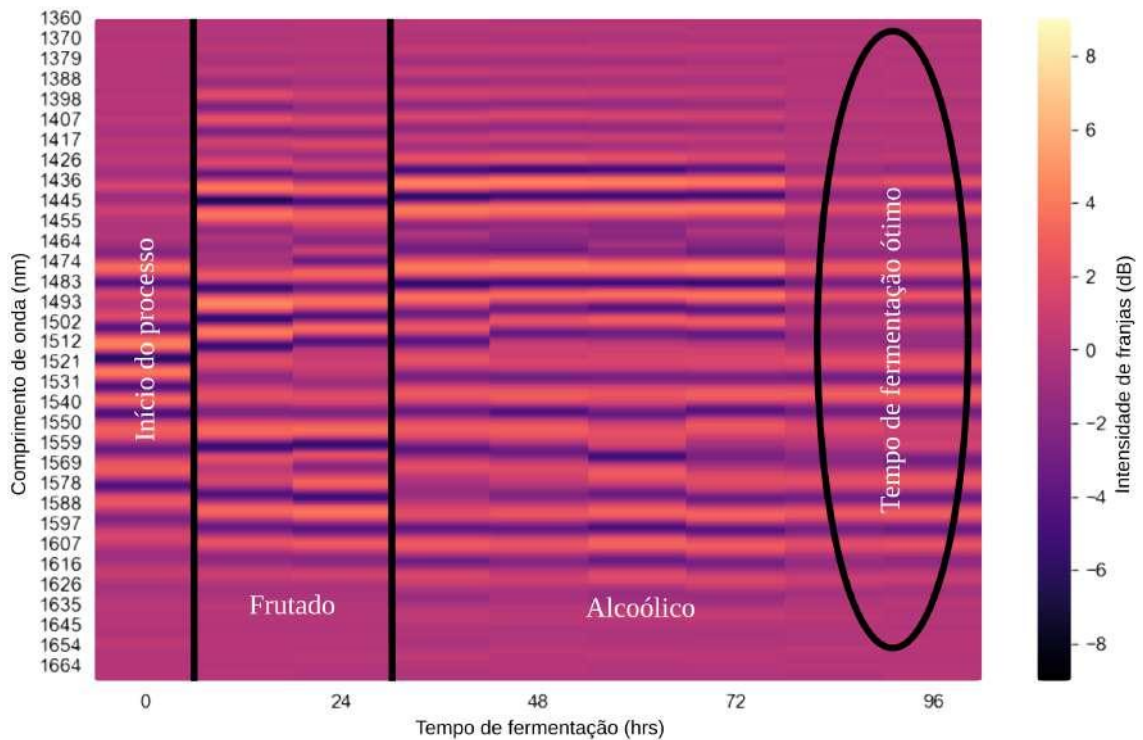


Figura 6.12 – Espectrograma do sensor óptico posicionado no topo associado ao processo de fermentação

Neste caso, apenas um componente principal seria necessário para alcançar 95% da variabilidade total. Isso sugere que usar apenas o PC1 simplificaria significativamente o conjunto de dados, mantendo uma quantidade substancial das informações originais, o que pode ser útil em contextos onde simplicidade e eficiência são prioridades.

A figura 6.13 ilustra os resultados da Análise de Componentes Principais (PCA) obtidos pelo processamento espectral em relação aos níveis associados de temperatura e CO_2 . As formas distintas, cruces e círculos representam diferentes perfis de aroma, com as cruces indicando aromas predominantemente alcoólicos e os círculos indicando aromas frutados. As cores dentro dessas formas transmitem variações de temperatura (em $^{\circ}\text{C}$), enquanto os tamanhos indicam concentrações de CO_2 (em ppm), onde tamanhos maiores denotam níveis mais altos. Essa representação visual demonstra efetivamente a capacidade do sensor óptico de distinguir entre vários aromas com base na integração dos resultados da PCA com dados auxiliares. Além disso, essa integração permite a identificação do momento ideal de fermentação ao associar temperatura e CO_2 com os resultados da PCA, facilitando o reconhecimento das variações nos índices logo após as mudanças nos padrões de odor.

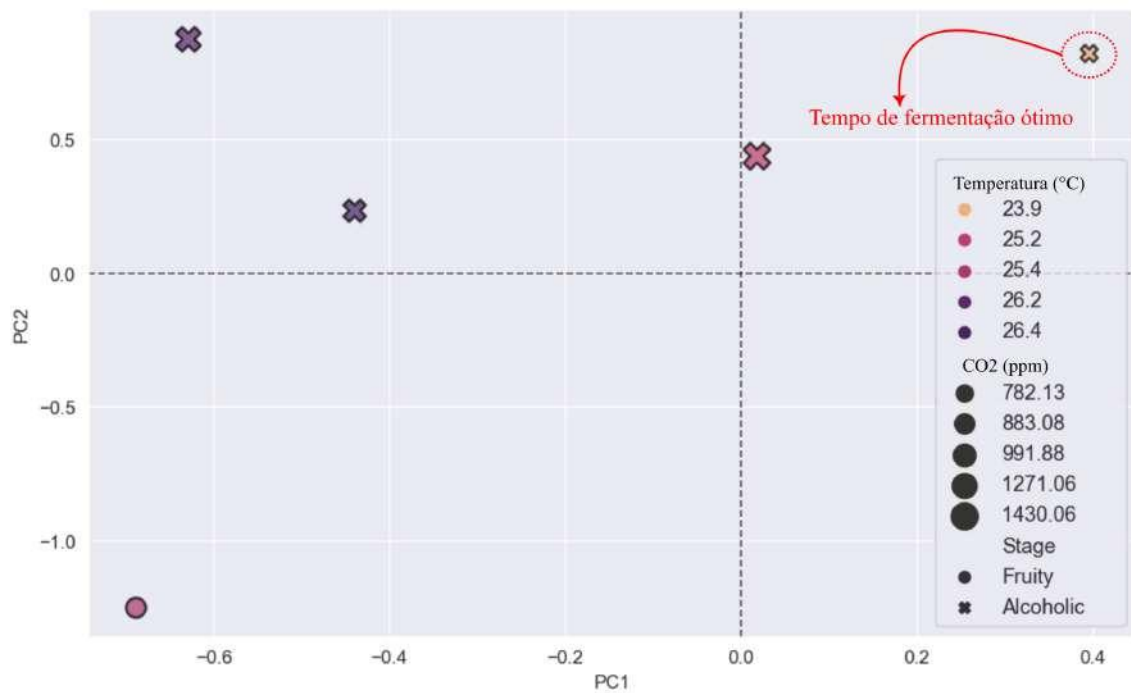


Figura 6.13 – Dados de CO₂ e temperaturas associadas ao PCA

6.4 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos nesta pesquisa destacam a eficácia dos sensores ópticos e eletrônicos no monitoramento do processo de fermentação do café. A análise espectral dos sensores ópticos posicionados no meio e no topo do biorreator apresentou variações significativas nas franjas de interferência ao longo do tempo. As figuras apresentadas ilustram claramente a transição de traços mais escuros para mais claros, indicando a sensibilidade dos dispositivos às alterações nas características do café.

A aplicação da PCA foi crucial para reduzir a complexidade dos dados espectrais e identificar padrões relevantes. A PCA conseguiu encapsular a variabilidade significativa dos dados, reduzindo o número de dimensões de 4724 para 2, com os componentes principais PC1 e PC2 explicando uma porção substancial da variância total. A correlação linear forte entre PC1 e o tempo de fermentação indicou que essa técnica é uma ferramenta para prever e controlar a evolução do processo fermentativo.

Além disso, os classificadores de regressão logística e Naive Bayes aplicados aos dados da PCA demonstraram alto desempenho na predição dos aromas. A regressão logística foi eficaz em categorizar os aromas em agradáveis e desagradáveis, enquanto o Naive Bayes proporcionou uma classificação mais detalhada entre os aromas frutado, alcoólico, pútrido e acético. Esses resultados confirmam a potencialidade dos algoritmos de aprendizado de máquina na análise e predição de características sensoriais complexas.

A integração dos dados de sensores ópticos e eletrônicos destacou as informações sobre o comportamento do processo de fermentação. A associação das medições de CO₂ e

temperatura com os dados espectrais e sensoriais permitiu uma compreensão das mudanças nos aromas ao longo do tempo. As variações nos níveis de CO₂ e temperatura, observadas durante a transição entre os aromas frutado e alcoólico, destacam a interdependência desses parâmetros no desenvolvimento do aroma ideal. É importante comentar que os sensores eletrônicos apresentam muito ruído e baixa durabilidade, quando submetido em um biorreator. Logo, em campo seriam inviáveis, pois os dados coletados a partir desses sensores necessitam de um processamento intenso e, o que inviabiliza seu uso em tempo real, para essa aplicação. No entanto, esses dispositivos se mostraram como uma excelente ferramenta auxiliar, mesmo sem a necessidade de seu uso.

Os espectrogramas dos sensores ópticos, aliados aos dados eletrônicos, mostraram-se ferramentas promissoras para o monitoramento contínuo do processo fermentativo. A capacidade de identificar padrões específicos nos dados espectrais e associá-los a mudanças nos parâmetros de temperatura e CO₂ sugere que a integração desses métodos pode ser utilizada para criar sistemas de alarme e controle em tempo real, melhorando a qualidade e a produtividade do produto final.

Em resumo, os resultados deste estudo demonstram a viabilidade e a eficácia da combinação de sensores ópticos e eletrônicos para o monitoramento e análise do processo de fermentação do café. As técnicas aplicadas permitiram uma caracterização das mudanças sensoriais e físico-químicas, oferecendo uma base sólida para futuras investigações e otimizações no campo da fermentação controlada.

7 CONCLUSÃO

A pesquisa apresentada neste estudo demonstra que o uso de interferômetros MZI em fibra óptica é altamente eficiente na identificação de no processo de fermentação do café. A análise das medições de CO₂ e temperatura ao longo do processo de fermentação, juntamente com os padrões de odor do café, revelou correlações significativas. Durante a transição entre os aromas frutado e alcoólico, observou-se um aumento substancial nos níveis de CO₂ e temperatura, seguido por uma diminuição até atingir o ponto ideal para o aroma alcoólico ideal. A mudança significativa no comprimento de onda dos vales de atenuação coincide com as mudanças de aroma, notavelmente a transição para o aroma frutado. No entanto, distinguir nuances específicas apenas através do espectrograma pode ser desafiador devido à complexidade das variações.

A aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) reduziu efetivamente a complexidade do conjunto de dados, preservando 57,37% da variabilidade original com apenas dois componentes principais. Assim, o potencial discriminatório da PCA em relação aos níveis de temperatura e CO₂, permitindo uma diferenciação clara entre diferentes aromas, é notável. A integração de dados auxiliares com o dispositivo óptico mostra-se promissora na definição do momento ideal de fermentação, pois a associação de temperatura e CO₂ com os resultados da PCA permite a identificação de mudanças nos índices após alterações nos padrões de odor.

Coletivamente, essas conclusões fortalecem a compreensão do processo de fermentação do café, enfatizando a importância das variáveis ambientais e o potencial das técnicas analíticas utilizadas para monitorar e otimizar a produção, contribuindo para a qualidade sensorial desejada.

Esses resultados abrem caminho para o desenvolvimento de produtos de monitoramento em tempo real que substituiriam os processos laboratoriais tradicionais, tornando o controle de qualidade do processo de fermentação do café mais eficiente e preciso.

Uma extensão prevista deste trabalho envolve a integração de sensores suplementares para medir compostos voláteis adicionais pertinentes no café. Deve-se também focar na potencial instabilidade na repetibilidade do sensor apresentado.

Uma extensão prevista deste trabalho envolve a integração de sensores suplementares para medir compostos voláteis adicionais pertinentes no café. Essa ampliação facilitaria uma análise mais detalhada dos aromas durante a fermentação, oferecendo uma compreensão abrangente do processo.

Além disso, propõe-se a exploração de algoritmos de aprendizado de máquina mais avançados para aprimorar a capacidade de classificação de aromas. Esse avanço tem o potencial de refinar e ampliar o escopo de nossas descobertas, proporcionando uma interpretação mais sutil e precisa dos complexos perfis de aroma na fermentação do café.

A integração de tais melhorias em futuras pesquisas pode contribuir significativamente para o avanço de nossa compreensão neste domínio.

Este trabalho abre perspectivas para a aplicação de sensores e técnicas de monitoramento em processos industriais, especialmente no setor de produção de alimentos. O desenvolvimento de sistemas de monitoramento em tempo real e controle de qualidade baseados em dados sensoriais pode contribuir significativamente para melhorar a qualidade e a eficiência dos processos industriais.

REFERÊNCIAS

- 1 Hervé Abdi & Lynne J Williams. Principal component analysis. Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics, 2(4):433–459, 2010.
- 2 Zenaba Kadir Abdissa, Yetenayet B Tola, Addisalem Hailu Taye, & Hayat Hassen Mohammed. Harmonizing drying time, layer thickness, and drier zones for drying kinetics: Quality and safety of solar tunnel-dried wet-processed parchment coffee (*coffea arabica* l.). International Journal of Food Science, 2023(1):6677592, 2023.
- 3 A. D. Agate & J. V. Bhat. Role of pectinolytic yeasts in the degradation of mucilage layer of *coffea robusta* cherries. Applied Microbiology, 14:256–260, 3 1966. ISSN 0003-6919. doi: 10.1128/am.14.2.256-260.1966.
- 4 Mario Roberto Fernandez Alduenda. Quality of the final product and classification of green coffee. In Drying and Roasting of Cocoa and Coffee, pages 311–342. CRC Press, 2019.
- 5 Maimunah Mohd Ali, Norhashila Hashim, Samsuzana Abd Aziz, & Ola Lasekan. Principles and recent advances in electronic nose for quality inspection of agricultural and food products. Trends in Food Science & Technology, 99:1–10, 5 2020. ISSN 09242244. doi: 10.1016/j.tifs.2020.02.028.
- 6 Rita C Alves, Francisca Rodrigues, Maria Antónia Nunes, Ana F Vinha, & M Beatriz PP Oliveira. State of the art in coffee processing by-products. Handbook of coffee processing by-products, pages 1–26, 2017.
- 7 Mohammedsani Amin Ameyu. Influence of harvesting and postharvest processing methods on the quality of arabica coffee (*coffea arabica* l.) in eastern ethiopia. ISABB Journal of Food and Agricultural Sciences, 7(1):1–9, 2017.
- 8 HENRIQUE V. AMORIM & VERA L. AMORIM. Coffee Enzymes and Coffee Quality, pages 27–56. 'ACSPublications', 6 1977. doi: 10.1021/bk-1977-0047.ch003.
- 9 Miriam Amrani-Hemaimi, Christoph Cerny, & Laurent B Fay. Mechanisms of formation of alkylpyrazines in the maillard reaction. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 43(11):2818–2822, 1995.
- 10 Caroline Lima Angélico, Carlos José Pimenta, Sára Maria Chalfoun, Sílvio Júlio de Resende Chagas, Marcelo Cláudio Pereira, & Yasmin Chalfoun. Diferentes estádios de maturação e tempos de ensacamento sobre a qualidade do café. Coffee Science, 6(1):8–19, 2011.
- 11 Bipin Aryal. STUDY OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF COFFEE BEANS FROM DIFFERENT PROCESSING METHODS. PhD thesis, Department of Food Technology Central Campus of Technology Institute of . . . , 2023.
- 12 S. Avallone, J.-P. Guiraud, B. Guyot, E. Olguin, & J.-M. Brillouet. Fate of mucilage cell wall polysaccharides during coffee fermentation. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 49:5556–5559, 11 2001. ISSN 0021-8561. doi: 10.1021/jf010510s.

- 13 Sylvie Avallone, Bernard Guyot, Nicole Michaux-Ferrière, Joseph-Pierre Guiraud, E Olguin Palacios, & Jean-Marc Brillouet. Cell wall polysaccharides of coffee bean mucilage. histological characterisation during fermentation. In Colloque Scientifique International sur le café, volume 18, pages 463–470, 1999.
- 14 Sylvie Avallone, J-P Guiraud, Bernard Guyot, E Olguin, & J-M Brillouet. Polysaccharide constituents of coffee-bean mucilage. Journal of food science, 65(8): 1308–1311, 2000.
- 15 Andre Barata, Manuel Malfeito-Ferreira, & Virgilio Loureiro. Changes in sour rotten grape berry microbiota during ripening and wine fermentation. International Journal of Food Microbiology, 154:152–161, 3 2012. ISSN 01681605. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.12.029.
- 16 Felipe Oliveira Barino, Renato Luiz Faraco-Filho, Deivid Campos, & Alexandre Bessa dos Santos. 3d-printed force sensitive structure using embedded long-period fiber grating. Optics & Laser Technology, 148:107697, 4 2022. ISSN 00303992. doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107697.
- 17 Thomas Bayes. Naive bayes classifier. Article Sources and Contributors, pages 1–9, 1968.
- 18 Hans-Dieter Belitz, Werner Grosch, & Peter Schieberle. Food additives. Food chemistry, pages 429–466, 2009.
- 19 Sharma Avinash C. Bhardwaj Vanita, Kishor Kamal. Tapered optical fiber geometries and sensing applications based on mach zehnder interferometer: A review. Optical Fiber Technology, 58:102302, 2020.
- 20 Vikram Bhatia. Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing. Optics Express, 4(11):457, 466, 1999.
- 21 Carlo Bicchi, Cristina Iori, Patrizia Rubiolo, & Pat Sandra. Headspace sorptive extraction (hsse), stir bar sorptive extraction (sbse), and solid phase microextraction (spme) applied to the analysis of roasted arabica coffee and coffee brew. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50(3):449–459, 2002.
- 22 Sanne Boesveldt, Mats J. Olsson, & Johan N. Lundström. Carbon chain length and the stimulus problem in olfaction. Behavioural Brain Research, 215:110–113, 12 2010. ISSN 01664328. doi: 10.1016/j.bbr.2010.07.007.
- 23 Flávio Meira Borém & Ednilton Tavares de Andrade. Processing and drying of coffee. In Drying and Roasting of Cocoa and Coffee, pages 141–170. CRC Press, 2019.
- 24 F.M. Borem, E.R. Marques, & E. Alves. Ultrastructural analysis of drying damage in parchment arabica coffee endosperm cells. Biosystems Engineering, 99:62–66, 1 2008. ISSN 15375110. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.09.027.
- 25 CARLOS HJ Brando & MF Brando. Methods of coffee fermentation and drying. Cocoa and coffee fermentations, pages 367–396, 2014.

- 26 Ana Paula Pereira Bressani, Silvia Juliana Martinez, Andreia Braga Inacio Sarmento, Flavio Meira Borem, & Rosane Freitas Schwan. Influence of yeast inoculation on the quality of fermented coffee (*coffea arabica* var. mundo novo) processed by natural and pulped natural processes. International Journal of Food Microbiology, 343:109107, 2021. ISSN 0168-1605. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109107>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168160521000660>.
- 27 Florac De Bruyn, Sophia Jiyuan Zhang, Vasileios Pothakos, Julio Torres, Charles Lambot, Alice V. Moroni, Michael Callanan, Wilbert Sybesma, Stefan Weckx, & Luc De Vuyst. Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. Applied and Environmental Microbiology, 83(1):e02398–16, 2017. doi: 10.1128/AEM.02398-16. URL <https://journals.asm.org/doi/abs/10.1128/aem.02398-16>.
- 28 Franz Bucar, Abraham Wube, & Martin Schmid. Natural product isolation—how to get from biological material to pure compounds. Natural product reports, 30(4): 525–545, 2013.
- 29 Lloyd W. Burgess. Absorption-based sensors. Sensors and Actuators B: Chemical, 29:10–15, 10 1995. ISSN 09254005. doi: 10.1016/0925-4005(95)01657-0.
- 30 Gerhard Bytof, Sven-Erik Knopp, Peter Schieberle, Ingo Teutsch, & Dirk Selmar. Influence of processing on the generation of γ -aminobutyric acid in green coffee beans. European Food Research and Technology, 220:245–250, 2005.
- 31 Wilton Soares Cardoso, Bárbara Zani Agnoletti, Rosângela de Freitas, Flávia de Abreu Pinheiro, & Lucas Louzada Pereira. Biochemical Aspects of Coffee Fermentation, pages 149–208. Springer International Publishing, Cham, 2021. ISBN 978-3-030-54437-9. doi: 10.1007/978-3-030-54437-9_4. URL https://doi.org/10.1007/978-3-030-54437-9_4.
- 32 Carlos E. S. Castellani, Hoziana C. B. Ximenes, Rodolpho L. Silva, Anselmo Frizera-Neto, Moises R. N. Ribeiro, & Maria J. Pontes. Multi-parameter interferometric sensor based on a reduced diameter core axial offsetted fiber. IEEE Photonics Technology Letters, 29(2):239–242, 2017. doi: 10.1109/LPT.2016.2637870.
- 33 Jun Chen, Juanhong Gu, Rong Zhang, Yuezhong Mao, & Shiyi Tian. Freshness evaluation of three kinds of meats based on the electronic nose. Sensors, 19:605, 1 2019. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s19030605.
- 34 Yizheng Chen, Fujian Tang, Yi Bao, Yan Tang, & Genda Chen. A fe-c coated long-period fiber grating sensor for corrosion-induced mass loss measurement. Optics Letters, 41:2306, 5 2016. ISSN 0146-9592. doi: 10.1364/OL.41.002306.
- 35 Mun Wai Cheong, Kau Hin Tong, Jeremy Jian Ming Ong, Shao Quan Liu, Phillip Curran, & Bin Yu. Volatile composition and antioxidant capacity of arabica coffee. Food Research International, 51(1):388–396, 2013.
- 36 Sung-Tong Chin, Graham T Eyres, & Philip J Marriott. Identification of potent odourants in wine and brewed coffee using gas chromatography-olfactometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography. Journal of Chromatography A, 1218(42):7487–7498, 2011.

- 37 Rang Chu, Chunying Guan, Yutao Bo, Jinhui Shi, Zheng Zhu, Ping Li, Jun Yang, & Libo Yuan. All-optical graphene-oxide humidity sensor based on a side-polished symmetrical twin-core fiber michelson interferometer. Sensors and Actuators B: Chemical, 284:623, 627, 2019.
- 38 A Ciampa, G Renzi, A Taglienti, P Sequi, & M Valentini. Studies on coffee roasting process by means of nuclear magnetic resonance spectroscopy. Journal of food quality, 33(2):199–211, 2010.
- 39 Ronald Clarke & OG Vitzthum. Coffee: recent developments. John Wiley & Sons, 2008.
- 40 Ronald James Clarke. Coffee: Volume 2: Technology, volume 2. Springer Science & Business Media, 2012.
- 41 NANCY Córdoba-Castro & JESÚS ESTEBAN GUERRERO-FAJARDO. Caracterización de los procesos tradicionales de fermentación de café en el departamento de nariño. Biotecnología en el Sector agropecuario y agroindustrial, 14(2):75–83, 2016.
- 42 David Silva da Costa, Tânia Gonçalves Albuquerque, Helena Soares Costa, & Adriana Pavesi Ariseto Bragotto. Thermal contaminants in coffee induced by roasting: a review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(8):5586, 2023.
- 43 Marcela Caroline Batista da Mota, Nadia Nara Batista, Mariane Helena Sances Rabelo, Diego Egidio Ribeiro, Flavio Meira Borem, & Rosane Freitas Schwan. Influence of fermentation conditions on the sensorial quality of coffee inoculated with yeast. Food Research International, 136:109482, 2020. ISSN 0963-9969. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109482>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096399692030507X>.
- 44 Debora Mara de Jesus Cassimiro, Nadia Nara Batista, Hugo Calixto Fonseca, Jose Augusto Oliveira Naves, Jussara Moreira Coelho, Patricia Campos Bernardes, Disney Ribeiro Dias, & Rosane Freitas Schwan. Wet fermentation of coffea canephora by lactic acid bacteria and yeasts using the self-induced anaerobic fermentation (siaf) method enhances the coffee quality. Food Microbiology, 110:104161, 4 2023. ISSN 07400020. doi: 10.1016/j.fm.2022.104161.
- 45 C.A.B De Maria, L.C Trugo, F.R.Aquino Neto, R.F.A Moreira, & C.S Alviano. Composition of green coffee water-soluble fractions and identification of volatiles formed during roasting. Food Chemistry, 55(3):203–207, 1996. ISSN 0308-8146. doi: [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00104-2](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)00104-2). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0308814695001042>.
- 46 Gilberto Vinicius de Melo Pereira, Vanete Thomaz Soccol, Ashok Pandey, Adriane Bianchi Pedroni Medeiros, João Marcos Rodrigues Andrade Lara, Andre Luiz Gollo, & Carlos Ricardo Soccol. Isolation, selection and evaluation of yeasts for use in fermentation of coffee beans by the wet process. International Journal of Food Microbiology, 188:60–66, 10 2014. ISSN 01681605. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2014.07.008.

- 47 Gilberto Vinícius de Melo Pereira, Ensei Neto, Vanete Thomaz Soccol, Adriane Bianchi Pedroni Medeiros, Adenise Lorenci Woiciechowski, & Carlos Ricardo Soccol. Conducting starter culture-controlled fermentations of coffee beans during on-farm wet processing: Growth, metabolic analyses and sensorial effects. Food Research International, 75:348–356, 2015.
- 48 Gilberto Vinicius de Melo Pereira, Vanete Thomaz Soccol, Satinder Kaur Brar, Ensei Neto, & Carlos Ricardo Soccol. Microbial ecology and starter culture technology in coffee processing. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 57:2775–2788, 9 2017. ISSN 1040-8398. doi: 10.1080/10408398.2015.1067759.
- 49 Tanoy Debnath & Takamichi Nakamoto. Predicting human odor perception represented by continuous values from mass spectra of essential oils resembling chemical mixtures. PLOS ONE, 15:e0234688, 6 2020. ISSN 1932-6203. doi: 10.1371/journal.pone.0234688.
- 50 Dingsheng Deng. Dbscan clustering algorithm based on density. pages 949–953. IEEE, 9 2020. ISBN 978-1-7281-9627-5. doi: 10.1109/IFEEA51475.2020.00199.
- 51 Eduardo C Dias, Rosemary GFA Pereira, Flavio M Borem, Eulalia Mendes, Renato R de Lima, Jose O Fernandes, & Susana Casal. Biogenic amine profile in unripe arabica coffee beans processed according to dry and wet methods. Journal of agricultural and food chemistry, 60(16):4120–4125, 2012.
- 52 Olga Djossou, Isabelle Perraud-Gaime, Fatma Lakhhal Mirleau, Gabriela Rodriguez-Serrano, Germain Karou, Sebastien Niamke, Imene Ouzari, Abdellatif Boudabous, & Sevastianos Roussos. Robusta coffee beans post-harvest microflora: *Lactobacillus plantarum* sp. as potential antagonist of *aspergillus carbonarius*. Anaerobe, 17:267–272, 12 2011. ISSN 10759964. doi: 10.1016/j.anaerobe.2011.03.006.
- 53 Wenjiang Dong, Rongsuo Hu, Yuzhou Long, Hehe Li, Yanjun Zhang, Kexue Zhu, & Zhong Chu. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and hs-spme-gc-ms. Food Chemistry, 272:723–731, 1 2019. ISSN 03088146. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.08.068.
- 54 Ralph Dorfner, Thomas Ferge, Antonius Kettrup, Ralf Zimmermann, & Chahan Yeretzian. Real-time monitoring of 4-vinylguaiacol, guaiacol, and phenol during coffee roasting by resonant laser ionization time-of-flight mass spectrometry. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51(19):5768–5773, 2003.
- 55 Juarez de Sousa e Silva, Aldemar P Moreli, Sergio Mauricio L Donzeles, Sammy Fernandes Soares, & Douglas Gonzaga Vitor. Harvesting, drying and storage of coffee. Quality Determinants In Coffee Production, page 1, 2020.
- 56 Hosam Elhalis, Julian Cox, & Jian Zhao. Ecological diversity, evolution and metabolism of microbial communities in the wet fermentation of australian coffee beans. International Journal of Food Microbiology, 321:108544, 5 2020. ISSN 01681605. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108544.
- 57 In-Yong Eom. Identification of coffee fragrances using needle trap device-gas chromatograph/mass spectrometry (ntd-gc/ms). Bulletin of the Korean Chemical Society, 34(6):1703–1707, 2013.

- 58 T. Erdogan. Fiber grating spectra. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 15(8):1277,1294, 1997.
- 59 Mustafa Erkan & Adem Dogan. Harvesting of Horticultural Commodities, pages 129–159. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-813276-0.00005-5.
- 60 Flavio Esposito, Anubhav Srivastava, Agostino Iadicicco, & Stefania Campopiano. Multi-parameter sensor based on single long period grating in panda fiber for the simultaneous measurement of sri, temperature and strain. Optics & Laser Technology, 113:198–203, 5 2019. ISSN 00303992. doi: 10.1016/j.optlastec.2018.12.022.
- 61 Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, Xiaowei Xu, *et al.* A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In kdd, volume 96, pages 226–231, 1996.
- 62 Bikila Olika Fufa Muluneh Bekele Etana & Mosisa Chewaka Aga. Review on post-harvest and green bean coffee processing in ethiopia. Sweetmarias, 31:66–73, 2019.
- 63 Suzana Reis Evangelista, Maria Gabriela da Cruz Pedroso Miguel, Cristina Ferreira Silva, Ana Carla Marques Pinheiro, & Rosane Freitas Schwan. Microbiological diversity associated with the spontaneous wet method of coffee fermentation. International Journal of Food Microbiology, 210:102–112, 2015. ISSN 0168-1605. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.06.008>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816051530026X>.
- 64 Renato Faraco-Filho, Joao V. de Castro, Felipe Oliveira Barino, Deivid E. Campos, & Alexandre Bessa dos Santos. Monitoring and characterization technology for coffee fermentation aromas: A data-driven approach. IEEE Sensors Journal, 24:8371–8378, 3 2024. ISSN 1530-437X. doi: 10.1109/JSEN.2024.3357294.
- 65 Renato Luiz Faraco Filho, João Victor de Castro, Felipe Oliveira Barino, Deivid Campos, & Alexandre Bessa dos Santos. Enhanced aroma prediction in coffee fermentation through optical fiber sensor data fusion. Sensors and Actuators A: Physical, 369:115223, 2024. ISSN 0924-4247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115223>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424724002164>.
- 66 Adriana Farah. Coffee: Production, quality and chemistry. Royal society of chemistry, 2019.
- 67 Adriana Farah, Mariana C Monteiro, Veronica Calado, Adriana S Franca, & LC Trugo. Correlation between cup quality and chemical attributes of brazilian coffee. Food chemistry, 98(2):373–380, 2006.
- 68 Jonathan E Ferguson. COFFEE QUALITY, LAND USE, AND PROCESSING IN THE CAJAMARCA REGION OF PERU. PhD thesis, University of Nebraska-Lincoln, 2017.
- 69 Renato Luiz Faraco Filho, Alexandre Bessa dos Santos, Andros Pablo Lopez Barbero, & Vinicius Nunes Henrique Silva. Optical inclinometer based on a lpg-taper series configuration. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic

- Applications, 20:612–620, 9 2021. ISSN 2179-1074. doi: 10.1590/2179-10742021v20i3254754.
- 70 Renato Luiz Faraco Filho, Felipe Oliveira Barino, João Calderano, italo Fernando Valle Alvarenga, Deivid Campos, & Alexandre Bessa dos Santos. In-fiber mach–zehnder interferometer as a promising tool for optical nose and odor prediction during the fermentation process. Optics Letters, 48:3905, 8 2023. ISSN 0146-9592. doi: 10.1364/OL.486742.
- 71 G Fleet. Yeast interactions and wine flavour. International Journal of Food Microbiology, 86:11–22, 9 2003. ISSN 01681605. doi: 10.1016/S0168-1605(03)00245-9.
- 72 Graham H. Fleet. Wine yeasts for the future. FEMS Yeast Research, 8:979–995, 11 2008. ISSN 15671356. doi: 10.1111/j.1567-1364.2008.00427.x.
- 73 Adriana S Franca, Juliana CF Mendonça, & Sami D Oliveira. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. LWT-Food Science and Technology, 38 (7):709–715, 2005.
- 74 Hilmer A Frank, Norma A Lum, & Amy S Dela Cruz. Bacteria responsible for mucilage-layer decomposition in kona coffee cherries. Applied microbiology, 13(2): 201–207, 1965.
- 75 O. Frazão, R. Falate, J. L. Fabris, J. L. Santos, L. A. Ferreira, & F. M. Araujo. Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper. Optics Letters, 31(20):2960,2962, 2006.
- 76 Valder Viana Freitas. Chemical and Sensory Composition of Arabica and Robusta Coffee in Response to Modifications in the Roasting Process. PhD thesis, Universidade Federal de Viçosa, 2023.
- 77 Xinghu Fu, Jiahao Zhou, Zizhen Fu, Ming Xu, Shuming Huang, Wa Jin, Guangwei Fu, & Weihong Bi. A multiparameter sensor based on dumbbell-shaped double-cladding fiber structure cascaded long period fiber grating. IEEE Sensors Journal, 22:14118–14127, 7 2022. ISSN 1530-437X. doi: 10.1109/JSEN.2022.3181677.
- 78 Lin Gan, Ruoxu Wang, Deming Liu, Li Duan, Shuang Liu, Songnian Fu, Borui Li, Zhenhua Feng, Huifeng Wei, Weijun Tong, Ping Shum, & Ming Tang. Spatial-division multiplexed mach–zehnder interferometers in heterogeneous multicore fiber for multiparameter measurement. IEEE Photonics Journal, 8(1):1–8, 2016. doi: 10.1109/JPHOT.2016.2516254.
- 79 M. Ghasemi-Varnamkhasti, S. S. Mohtasebi, M. L. Rodriguez-Mendez, J. Lozano, S. H. Razavi, H. Ahmadi, & C. Apetrei. Classification of non-alcoholic beer based on aftertaste sensory evaluation by chemometric tools. Expert Systems with Applications, 39:4315, April 2012.
- 80 M. Ghasemi-Varnamkhasti, M. L. Rodriguez-Mendez, S. S. Mohtasebi, C. Apetrei, J. Lozano, H. Ahmadi, S. H. Razavi, & J. Antonio de Saja. Monitoring the aging of beers using a bioelectronic tongue. Food Control, 25:216, January 2012.

- 81 Mahdi Ghasemi-Varnamkhasti, Seyed Saeid Mohtasebi, Maria Luz Rodriguez-Mendez, Jesus Lozano, Seyed Hadi Razavi, Hojat Ahmadi, & Constantin Apetrei. Classification of non-alcoholic beer based on aftertaste sensory evaluation by chemometric tools. Expert Systems with Applications, 39:4315–4327, 3 2012. ISSN 09574174. doi: 10.1016/j.eswa.2011.09.101.
- 82 Mahdi Ghasemi-Varnamkhasti, Maria Luz Rodriguez-Mendez, Seyed Saeid Mohtasebi, Constantin Apetrei, Jesus Lozano, Hojat Ahmadi, Seyed Hadi Razavi, & Jose Antonio de Saja. Monitoring the aging of beers using a bioelectronic tongue. Food Control, 25:216–224, 5 2012. ISSN 09567135. doi: 10.1016/j.foodcont.2011.10.020.
- 83 Payel Ghosh & N Venkatachalapathy. Processing and drying of coffee—a review. Int. J. Eng. Res. Technol, 3(12):784–794, 2014.
- 84 O. Gonzalez-Rios, M. L. Suarez-Quiroz, R. Boulanger, M. Barel, B. Guyot, J.-P. Guiraud, & S. Schorr-Galindo. Impact of “ecological” post-harvest processing on the volatile fraction of coffee beans: I. green coffee. Journal of Food Composition and Analysis, 20:289, March 2007.
- 85 Oscar Gonzalez-Rios, Mirna L. Suarez-Quiroz, Renaud Boulanger, Michel Barel, Bernard Guyot, Joseph-Pierre Guiraud, & Sabine Schorr-Galindo. Impact of “ecological” post-harvest processing on the volatile fraction of coffee beans: I. green coffee. Journal of Food Composition and Analysis, 20:289–296, 5 2007. ISSN 08891575. doi: 10.1016/j.jfca.2006.07.009.
- 86 Mesfin Haile & Won Hee Kang. The role of microbes in coffee fermentation and their impact on coffee quality. Journal of Food Quality, 2019:1–6, 3 2019. ISSN 0146-9428. doi: 10.1155/2019/4836709.
- 87 Ahsan Hameed, Syed Ammar Hussain, Muhammad Umair Ijaz, Samee Ullah, Imran Pasha, & Hafiz Ansar Rasul Suleria. Farm to consumer: Factors affecting the organoleptic characteristics of coffee. ii: Postharvest processing factors. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 17:1184–1237, 9 2018. ISSN 1541-4337. doi: 10.1111/1541-4337.12365.
- 88 Heather, J. Patrick, Alan D. Kersey, & Frank Bucholtz. Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 16(9):1606, 1612, 1998.
- 89 James Hoffmann. The World Atlas of Coffee: From beans to brewing-coffees explored, explained and enjoyed. Hachette UK, 2018.
- 90 Kun hon Leong, Yi sheng Chen, Shwu fen Pan, Jen jye Chen, Hui chung Wu, Yu chung Chang, & Fujitoshi Yanagida. Diversity of lactic acid bacteria associated with fresh coffee cherries in taiwan. Current Microbiology, 68:440–447, 4 2014. ISSN 0343-8651. doi: 10.1007/s00284-013-0495-2.
- 91 David W.. Hosmer, Stanley Lemeshow, & Rodney X.. Sturdivant. Applied logistic regression. Wiley New York, 2000.
- 92 Harold Hotelling. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of educational psychology, 24(6):417, 1933.

- 93 Georgios Iatropoulos, Pawel Herman, Anders Lansner, Jussi Karlgren, Maria Larsson, & Jonas K. Olofsson. The language of smell: Connecting linguistic and psychophysical properties of odor descriptors. Cognition, 178:37–49, 9 2018. ISSN 00100277. doi: 10.1016/j.cognition.2018.05.007.
- 94 Ludmilla Janne Carvalho Ferreira, Matheus de Souza Gomes, Liliane Maciel de Oliveira, & Libia Diniz Santos. Coffee fermentation process: A review. Food Research International, 169:112793, 2023. ISSN 0963-9969. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112793>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996923003381>.
- 95 Yajun Jiang, Tao Wang, Chi Liu, Dingyi Feng, Biqiang Jiang, Dexing Yang, & Jianlin Zhao. Simultaneous measurement of refractive index and temperature with high sensitivity based on a multipath fiber mach–zehnder interferometer. Appl. Opt., 58(15):4085–4090, May 2019. doi: 10.1364/AO.58.004085. URL <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-58-15-4085>.
- 96 Sasan Karamizadeh, Shahidan M. Abdullah, Azizah A. Manaf, Mazdak Zamani, & Alireza Hooman. An overview of principal component analysis. Journal of Signal and Information Processing, 04:173–175, 2013. ISSN 2159-4465. doi: 10.4236/jsip.2013.43B031.
- 97 Andreas Keller, Richard C. Gerkin, Yuanfang Guan, Amit Dhurandhar, Gabor Turu, Bence Szalai, Joel D. Mainland, Yusuke Ihara, Chung Wen Yu, Russ Wolfinger, Celine Vens, leander schietgat, Kurt De Grave, Raquel Norel, Gustavo Stolovitzky, Guillermo A. Cecchi, Leslie B. Vosshall, & pablo meyer. Predicting human olfactory perception from chemical features of odor molecules. Science, 355:820–826, 2 2017. ISSN 0036-8075. doi: 10.1126/science.aal2014.
- 98 Tizian Klingel, Jonathan I. Kremer, Vera Gottstein, Tabata Rajcic de Rezende, Steffen Schwarz, & Dirk W. Lachenmeier. A review of coffee by-products including leaf, flower, cherry, husk, silver skin, and spent grounds as novel foods within the european union. Foods, 9:665, 5 2020. ISSN 2304-8158. doi: 10.3390/foods9050665.
- 99 Sven Knopp, Gerhard Bytof, & Dirk Selmar. Influence of processing on the content of sugars in green arabica coffee beans. European Food Research and Technology, 223:195–201, 2006.
- 100 Michael P LaValley. Logistic regression. Circulation, 117(18):2395–2399, 2008.
- 101 Byeong Ha Lee, Yu Liu, Sang Bae Lee, Sang Sam Choi, & Joo Nyung Jang. Displacements of the resonant peaks of a long-period fiber grating induced by a change of ambient refractive index. OPTICS LETTERS, 22(3):1769, 1771, 1998.
- 102 Liang Wei Lee, Mun Wai Cheong, Philip Curran, Bin Yu, & Shao Quan Liu. Coffee fermentation and flavor – an intricate and delicate relationship. Food Chemistry, 185:182–191, 10 2015. ISSN 03088146. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.03.124.
- 103 Ping Li, Meng Wang, Jianan Fu, Jinhui Shi, Zheng Zhu, Jun Yang, Chunying Guan, & Libo Yuan. Bend-compensated long period grating in hole-assisted eccentric-core fiber. Optics Communications, 434:19–22, 3 2019. ISSN 00304018. doi: 10.1016/j.optcom.2018.10.012.

- 104 Ted R. Lingle & Sunalini N. Menon. Cupping and Grading—Discovering Character and Quality, pages 181–203. Elsevier, 2017. doi: 10.1016/B978-0-12-803520-7.00008-6.
- 105 Qinpeng Liu, Xue He, Haiwei Fu, Dexing Yang, Fajun Xiao, & Xiangyu Wang. Temperature-insensitive optical fiber reflective micro-liquid level sensor base on the drop shape quasi-mach zehnder interferometer. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 216(164893), 2020.
- 106 Ting Liu, Yaowei Li, Xinyi Dai, Wenbo Gan, Xunsi Wang, Shixun Dai, Baoan Song, Tiefeng Xu, & Peiqing Zhang. Simultaneous detection of temperature, strain, refractive index, and ph based on a phase-shifted long-period fiber grating. Journal of Lightwave Technology, 41:5169–5180, 8 2023. ISSN 0733-8724. doi: 10.1109/JLT.2023.3254550.
- 107 Xinyue Liu, Jiale Long, Yi Ding, Yi Hu, Zihao Du, Bin Xu, & Dingnan Deng. Measuring the refractive index of scintillation crystal with a mach-zehnder interferometer. Optics Continuum, 1:909, 4 2022. ISSN 2770-0208. doi: 10.1364/OPTCON.453688.
- 108 Ye Liu, Xiaoyuan Ma, Lei Shu, Gerhard Petrus Hancke, & Adnan M. Abu-Mahfouz. From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17:4322–4334, 6 2021. ISSN 1551-3203. doi: 10.1109/TII.2020.3003910.
- 109 Yin Liu, Hongfeng Lin, Yutang Dai, Ai Zhou, & Libo Yuan. Humidity sensor based on an in-fiber integrated mach-zehnder interferometer. IEEE Photonics Technology Letters, 31:393–396, 3 2019. ISSN 1041-1135. doi: 10.1109/LPT.2019.2896191.
- 110 Ludwig Mach. Ueber einen interferenzrefraktor. Zeitschrift für Instrumentenkunde, 12:89, 93, 1892.
- 111 Laura Maeztu, Cristina Sanz, Susana Andueza, M Paz de Pena, José Bello, & Concepción Cid. Characterization of espresso coffee aroma by static headspace gc-ms and sensory flavor profile. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 49(11): 5437–5444, 2001.
- 112 Silvia Juliana Martinez, Mariane Helena Sances Rabelo, Ana Paula Pereira Bressani, Marcela Caroline Batista Da Mota, Flavio Meira Borém, & Rosane Freitas Schwan. Novel stainless steel tanks enhances coffee fermentation quality. Food Research International, 139:109921, 2021.
- 113 P Mazzafera & RP Purcino. Post harvest processing methods and physiological alterations in the coffee fruit. In ASIC 2004. 20th International Conference on Coffee Science, 2005.
- 114 JF McLoy. Mechanical drying of arabica coffee. Kenya Coffee, 24:177–33, 1959. ISSN 1010-3481.
- 115 Jicheng Meng & Yuming Yang. Symmetrical two-dimensional pca with image measures in face recognition. International Journal of Advanced Robotic Systems, 9: 238, 12 2012. ISSN 1729-8814. doi: 10.5772/54014.

- 116 Shilpi Gupta Monika, Gambhir. Review of turn around point long period fiber gratings. Journal of Sensor Technology, 5:81, 89, 2015.
- 117 Solange I Mussatto, Ercília MS Machado, Silvia Martins, & José A Teixeira. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. Food and bioprocess technology, 4:661–672, 2011.
- 118 Harry Nursten. The Chemistry of Nonenzymic Browning, pages 5–30. The Royal Society of Chemistry, 5 2005. doi: 10.1039/9781847552570-00005.
- 119 International Coffee Organization. Trade statistics tables, 2023.
- 120 Enrique Ortega-Rivas. Common preliminary operations: cleaning, sorting, grading. Non-thermal food engineering operations, pages 11–25, 2012.
- 121 Michael O’Mahony. Psychophysical aspects of sensory analysis of dairy product: A critique. Journal of Dairy Science, 62(12):1954–1962, 1979.
- 122 Ashok Pandey, Carlos R. Soccol, Poonam Nigam, Debora Brand, Radjiskumar Mohan, & Sevastianos Roussos. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. Biochemical Engineering Journal, 6:153–162, 10 2000. ISSN 1369703X. doi: 10.1016/S1369-703X(00)00084-X.
- 123 Gaspar Rego Paulo Caldas. Optical fiber interferometers based on arc-induced long period gratings at inesc tec. Sensors, 21(7400), 2021.
- 124 Karl Pearson. Liii. on lines and planes of closest fit to systems of points in space. The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science, 2(11):559–572, 1901.
- 125 Lucas Louzada Pereira, Aldemar Polonini Moreli, Tais Rizzo Moreira, Carla Schwengber Ten Caten, João Paulo Pereira Marcate, Danieli Grancieri Debona, & Rogerio Carvalho Guarçoni. Improvement of the quality of brazilian conilon through wet processing: A sensorial perspective. Agricultural Sciences, 10:395–411, 2019. ISSN 2156-8553. doi: 10.4236/as.2019.103032.
- 126 Aida Esther Peñuela-Martinez, Sandra Moreno-Riascos, & Ruben Medina-Rivera. Influence of temperature-controlled fermentation on the quality of mild coffee (*coffea arabica* l.) cultivated at different elevations. Agriculture, 13:1132, 5 2023. ISSN 2077-0472. doi: 10.3390/agriculture13061132.
- 127 Liang Qi, Chun-Liu Zhao, Jianying Yuan, Manping Ye, Jianfeng Wang, Zaixuan Zhang, & Shangzhong Jin. Highly reflective long period fiber grating sensor and its application in refractive index sensing. Sensors and Actuators B: Chemical, 193: 185–189, 3 2014. ISSN 09254005. doi: 10.1016/j.snb.2013.11.063.
- 128 Xiang Qin, Wenlin Feng, Xiaozhan Yang, Jianwei Wei, & Guojia Huang. Molybdenum sulfide/citric acid composite membrane-coated long period fiber grating sensor for measuring trace hydrogen sulfide gas. Sensors and Actuators B: Chemical, 272:60–68, 11 2018. ISSN 09254005. doi: 10.1016/j.snb.2018.05.152.
- 129 Emanuele Raimondo. Coffee industry market strategies in developing countries. PhD thesis, Politecnico di Torino, 2022.

- 130 G. Rego, O. Okhotnikov, E. Dianov, & V. Sulimov. High-temperature stability of long-period fiber gratings produced using an electric arc. Journal of Lightwave Technology, 19:1574–1579, 2001. ISSN 07338724. doi: 10.1109/50.956145.
- 131 Saif Ur Rehman, Sohail Asghar, Simon Fong, & S. Sarasvady. Dbscan: Past, present and future. pages 232–238. IEEE, 2 2014. ISBN 978-1-4799-2259-8. doi: 10.1109/ICADIWT.2014.6814687.
- 132 Samuel Achamfuo Yeboah Rikesh Patel. Widefield two laser interferometry. OPTICS EXPRESS, 22(22):27095, 27101, 2014.
- 133 Delia B Rodriquez, Frank A Hilmer, & Edward Tamotsu Fukunaga. A guide to processing kona coffee cherries. University of Hawaii Cooperative Extension Service, 1966.
- 134 Sarah P Santos Cooke. Evaluation of water volume and water quality over coffee quality using wet mill processing at two production areas of Guatemala. PhD thesis, CATIE, Turrialba (Costa Rica), 2011.
- 135 Abraham. Savitzky & M. J. E. Golay. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry, 36:1627–1639, 7 1964. ISSN 0003-2700. doi: 10.1021/ac60214a047.
- 136 MA Sfredo, JRD Finzer, & JR Limaverde. Heat and mass transfer in coffee fruits drying. Journal of Food Engineering, 70(1):15–25, 2005.
- 137 Fangcheng Shen, Changle Wang, Zhongyuan Sun, Kaiming Zhou, Lin Zhang, & Xuewen Shu. Small-period long-period fiber grating with improved refractive index sensitivity and dual-parameter sensing ability. Optics Letters, 42:199, 1 2017. ISSN 0146-9592. doi: 10.1364/OL.42.000199.
- 138 K. Shima, K. Himeno, T. Sakai, S. Okude, A. Wada, & R. Yamauchi. A novel temperature-insensitive long-period fiber grating using a boron-codoped-germanosilicate-core fiber. In Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, pages 347, 348. IEEE, 1997.
- 139 Xuewen Shu, Lin Zhang, & I. Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings. Journal of Lightwave Technology, 20:255–266, 2002. ISSN 07338724. doi: 10.1109/50.983240.
- 140 Xuewen Shu, Lin Zhang, Ian Bennion, Xuewen Shu, Lin Zhang, Ian Bennion, Xuewen Shu, Lin Zhang, & Ian Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings. Journal of Lightwave Technology, 20:255–266, 2002. ISSN 07338724. doi: 10.1109/50.983240. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/983240/>.
- 141 C SILVA, L BATISTA, L ABREU, E DIAS, & R SCHWAN. Succession of bacterial and fungal communities during natural coffee (coffea arabica) fermentation. Food Microbiology, 25:951–957, 12 2008. ISSN 07400020. doi: 10.1016/j.fm.2008.07.003.
- 142 Cristina F Silva, Rosane F Schwan, Eústáquio Sousa Dias, & Alan E Wheals. Microbial diversity during maturation and natural processing of coffee cherries of coffea arabica in brazil. International journal of food microbiology, 60(2-3):251–260, 2000.

- 143 Mandeep Singh, Sanjeev Kumar Raghuwanshi, & Om Prakash. Ultra-sensitive fiber optic gas sensor using graphene oxide coated long period gratings. IEEE Photonics Technology Letters, 31:1473–1476, 9 2019. ISSN 1041-1135. doi: 10.1109/LPT.2019.2932764.
- 144 Bambang Soeswanto, Ninik Lintang Edi Wahyuni, & Ghusrina Prihandini. The development of coffee bean drying process technology—a review. In 2nd International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2021), pages 164–170. Atlantis Press, 2021.
- 145 Ralph P Tatam Stephen, W James. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application. MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, 14(5):49,61, 2003.
- 146 Ralph P Tatam Stephen, W James. Cryogenic temperature response of fibre optic long period gratings. MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, 14(8): 1409, 1411, 2003.
- 147 Juzhong Tan & William L. Kerr. Characterizing cocoa refining by electronic nose using a kernel distribution model. LWT, 104:1–7, 5 2019. ISSN 00236438. doi: 10.1016/j.lwt.2019.01.028.
- 148 Juzhong Tan & Jie Xu. Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: A review. Artificial Intelligence in Agriculture, 4:104–115, 2020. ISSN 25897217. doi: 10.1016/j.aiia.2020.06.003.
- 149 Constantina Tzia, Panagiotis Sfakianakis, & Virginia Giannou. 1 raw materials of foods. Handbook of Food Processing: Food Safety, Quality, and Manufacturing Processes, page 1, 2015.
- 150 Eric Udd. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. A John Wiley & Sons, 2011.
- 151 Herbert van der Vossen, Benoit Bertrand, & Andre Charrier. Next generation variety development for sustainable production of arabica coffee (*coffea arabica* l.): a review. Euphytica, 204:243–256, 7 2015. ISSN 0014-2336. doi: 10.1007/s10681-015-1398-z.
- 152 Sofía Velásquez & Carlos Banchón. Influence of pre-and post-harvest factors on the organoleptic and physicochemical quality of coffee: A short review. Journal of Food Science and Technology, 60(10):2526–2538, 2023.
- 153 A.M. Vengsarkar, P.J. Lemaire, J.B. Judkins, T. Erdogan V. Bhatia, & J.E. Sipe. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. Journal of Lightwave Technology, 14(1):58,65, 1996.
- 154 David K. Campbell Daniel Sherr Tiffanie G. D’Alberto Noel A. Zabaronick Gregory A. Ten Eyck Kent A. Murphy Richard O. Claus Vikram, Bhatia. Temperature-insensitive and strain-insensitive long-period grating sensors for smart structures. Optical Engineering, 36(7):1872, 1876, 1997.
- 155 Pengfei Wang, Haiyan Zhao, Xianfan Wang, Gerald Farrell, & Gilberto Brambilla. A review of multimode interference in tapered optical fibers and related applications. Sensors, 18(858), 2018.

- 156 Yunlong Wang, Yunqi Liu, Fang Zou, Chen Jiang, Chengbo Mou, & Tingyun Wang. Humidity sensor based on a long-period fiber grating coated with polymer composite film. Sensors, 19:2263, 5 2019. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s19102263.
- 157 Alphas Dan Wilson. Review of electronic-nose technologies and algorithms to detect hazardous chemicals in the environment. Procedia Technology, 1:453–463, 2012. ISSN 22120173. doi: 10.1016/j.protecy.2012.02.101.
- 158 Kam Huey Wong, Suraini Abdul Aziz, & Suhaila Mohamed. Sensory aroma from maillard reaction of individual and combinations of amino acids with glucose in acidic conditions. International journal of food science & technology, 43(9): 1512–1519, 2008.
- 159 Qi Wu, Yoji Okabe, & Jianghai Wo. Fiber sensor based on interferometer and bragg grating for multiparameter detection. IEEE Photonics Technology Letters, 27(12): 1345–1348, 2015. doi: 10.1109/LPT.2015.2421350.
- 160 Bing Xu, Jun Huang, Xiaofeng Xu, Ai Zhou, & Liyun Ding. Ultrasensitive no gas sensor based on the graphene oxide-coated long-period fiber grating. ACS Applied Materials & Interfaces, 11:40868–40874, 10 2019. ISSN 1944-8244. doi: 10.1021/acsami.9b14212.
- 161 Jingci Yan, Jijun Feng, Jinman Ge, Jian Chen, Feng Wang, Caiwei Xiang, Ding Wang, Qinghua Yu, & Heping Zeng. Highly sensitive humidity sensor based on a go/co-mof-74 coated long period fiber grating. IEEE Photonics Technology Letters, 34:77–80, 1 2022. ISSN 1041-1135. doi: 10.1109/LPT.2021.3139114.
- 162 Xuemei Yang, Yingliang Liu, Lihong Mu, Wei Wang, Qi Zhan, Meiling Luo, Hongmin Tian, Caiyou Lv, & Jiahua Li. Discriminant research for identifying aromas of non-fermented pu-erh tea from different storage years using an electronic nose. Journal of Food Processing and Preservation, 42:e13721, 10 2018. ISSN 0145-8892. doi: 10.1111/jfpp.13721.
- 163 Yuanhong Yang, Lin Lu, Fuling Yang, Yuxuan Chen, & Wei Jin. The fiber optic sagnac interferometer and its sensing application. In Optoelectronics Global Conference. OCG, 2015.
- 164 Hugh D. Young. Fisica IV otica e fisica moderna. Pearson, 2016.
- 165 Francis To So Yu. Fiber Optic Sensors. Marcel Dekker, 2002.
- 166 Ludwig Zehnder. Ein neuer interferenzrefraktor. Zeitschrift für Instrumentenkunde, 11:275, 285, 1891.
- 167 Chao Zuo, Qian Chen, Yingjie Yu, & Anand Asundi. Transport-of-intensity phase imaging using savitzky-golay differentiation filter - theory and applications. Optics Express, 21:5346, 3 2013. ISSN 1094-4087. doi: 10.1364/OE.21.005346.

ANEXO A – Projeto e montagem do sistema de medição e aquisição de parâmetros com sensores eletrônicos

Este anexo apresenta os detalhes do projeto e montagem do sistema de medição de quantidade de CO_2 , temperatura. O objetivo principal deste projeto é auxiliar os sensores ópticos através da medição da sua emissão de carbono, temperatura.

Foram discutidas algumas configurações que este sistema deve apresentar para efetuar todas as medições. A primeira é que ao efetuar a medição, os dados aquisitados devem ser armazenados em um cartão SD removível, para que possam ser feitas análises posteriores. A segunda é que o funcionamento deve ser a bateria, pois pode não haver uma tomada disponível em campo, logo, ele deve possuir uma bateria e um sistema de carregamento interno. A terceira é que deve haver alguma tela de proteção para os sensores, uma vez que o mosto e a levedura presente nas bombonas pode estragar os sensores e produzir medições imprecisas. Na parte de contato com usuário, o sistema deve ter 1 chave para ligar e desligar, 1 botão para verificar o nível da bateria, 1 LED para sinalizar que a caixa está ligada e 1 LED que pisca quando os sensores estão requisitando os dados. E por fim, o sistema deve ser pequeno e de fácil manejo para que qualquer um possa efetuar a medição. Assim, após pensar nos parâmetros gerais do projeto, foi feita uma pesquisa para saber quais sensores utilizar.

A fim de medir a concentração de CO_2 no ambiente, existem alguns sensores eletrônicos no mercado que cumprem esta proposta. O primeiro sensor a ser pensado para esta aplicação foi o CCS811, que é um sensor relativamente barato e disponível no mercado brasileiro. Entretanto, ele já foi utilizado em outros projetos do LITel e foi visto que a sua qualidade e confiabilidade não são satisfatórias, assim, foi iniciada uma pesquisa no mercado mundial para fazer a escolha que melhor atendia o projeto. Logo, foram encontrados dois sensores que poderiam atender a proposta, são eles: MH-Z19B e SCD30. As suas características podem ser vistas nas tabelas .1 e .2, respectivamente. É importante ressaltar que:

Sensor de CO_2 MH-Z19B:

O **MH-Z19B** é um sensor de dióxido de carbono (CO_2) que opera com base no princípio de **absorção infravermelha não dispersiva (NDIR)**.

- **Princípio de Operação:** O MH-Z19B usa a tecnologia NDIR, onde uma fonte de luz infravermelha emite um feixe de luz que atravessa uma câmara contendo o gás a ser medido. Dentro da câmara, uma parte da luz é absorvida pelas moléculas de CO_2 , enquanto o restante passa pelo gás e atinge um detector. O detector mede a quantidade de luz infravermelha que não foi absorvida. A eletrônica do sensor converte a absorção medida em uma leitura de concentração de CO_2 , expressa em partes por milhão (ppm).

- **Características:**

- **Alta Precisão:** A tecnologia NDIR é conhecida por sua precisão e estabilidade a longo prazo.
- **Baixo Consumo de Energia:** O MH-Z19B é projetado para ser energeticamente eficiente, ideal para dispositivos de baixo consumo.
- **Correção Automática de Zero:** O sensor possui uma função de correção automática que recalibra o ponto zero periodicamente, garantindo medições precisas.

Sensor de CO_2 SCD30:

O **SCD30** é um sensor de CO_2 que também utiliza o princípio de **absorção infravermelha não dispersiva (NDIR)**, mas com características adicionais que o tornam mais avançado.

- **Princípio de Operação:** Similar ao MH-Z19B, o SCD30 usa a tecnologia NDIR, onde uma fonte de luz infravermelha emite radiação que passa por uma câmara contendo o ar ambiente. O CO_2 no ar absorve a luz em um comprimento de onda específico, e a quantidade de luz que atinge o detector é usada para calcular a concentração de CO_2 . O SCD30 inclui um sensor de temperatura e umidade integrado, permitindo compensações automáticas para variações ambientais.

- **Características:**

- **Medição de Temperatura e Umidade Integrada:** O SCD30 mede temperatura e umidade simultaneamente com o CO_2 , proporcionando um contexto adicional às medições e permitindo compensações ambientais para maior precisão.
- **Alta Precisão e Estabilidade:** Oferece medições precisas e estáveis, com a vantagem adicional de compensação ambiental.
- **Interfacing Fácil:** Pode ser integrado a sistemas de monitoramento e controle usando interfaces digitais como I2C.

Comparação e Aplicações:

Ambos os sensores são baseados na tecnologia NDIR, conhecida por sua precisão e confiabilidade. No entanto, o **SCD30** se destaca por suas funcionalidades adicionais, como a compensação de temperatura e umidade, tornando-o uma escolha superior em aplicações onde a precisão extrema e a compensação ambiental são críticas. Estes sensores são amplamente utilizados em sistemas de monitoramento de qualidade do ar, automação residencial, agricultura controlada e dispositivos portáteis de medição de CO_2 .

Especificação	Valor
Pinos	VCC, GND, Tx, Rx
Protocolo de comunicação	UART, SERIAL (Tx, Rx)
Tensão de alimentação	4.5~5.5 V
Corrente	60 mA
Tensão do sinal	3.3 V
Faixa de operação	0~5000 ppm
Precisão	± 50 ppm + 3% leitura
Temperatura de trabalho	0~50 °C
Umidade de trabalho	0~90%
Tempo para iniciar a aquisição	3 min
Compensação interna	Temperatura

Tabela .1 – Tabela de dados do sensor MH-Z19B

Especificação	Valor
Pinos	VCC, GND, TX, RX
Protocolo de comunicação	I ² C
Tensão de alimentação	3,3~5,5 V
Corrente	75 mA
Tensão do sinal	3,0 V
Faixa de operação	400~10000 ppm
Precisão	± 30 ppm + 3% leitura
Repetibilidade	± 10 ppm
Temperatura de trabalho	0~50 °C
Tempo para iniciar a aquisição	20 s
Compensação interna	Temperatura e Umidade

Tabela .2 – Tabela de dados do sensor SCD30

Em relação a medição de temperatura, existem muitos sensores no mercado brasileiro que poderiam ser úteis para este projeto. Assim, foi escolhido o sensor DS18B20 que possui uma alta confiabilidade e já foi utilizado em projetos anteriores no LITel. As suas características podem ser vistas na tabela .3.

Após escolher os sensores, foi feito o esquemático de todo o circuito, que pode ser visto na figura .1. Assim, ele pode ser dividido em 4 partes principais:

- Módulos Externos: são os botões, bornes, LEDs e display que ficarão do lado de fora para o acesso do usuário.
- Circuito principal: ligação do microcontrolador ESP32 aos sensores e módulos utilizados.
- Alimentação: circuito que carrega a bateria, faz a comutação entre a bateria e a fonte de alimentação e regula a alimentação para alimentar os sensores e o microcontrolador.

Especificação	Valor
Pinos	VCC, GND, DQ
Protocolo de comunicação	One Wire
Tensão de alimentação	3.0~5.5 V
Corrente	1 mA
Tensão do sinal	3.0~5.5 V
Faixa de medição de temperatura	-55~125 °C
Precisão da temperatura	± 0.5 °C de -10~85 °C
Resolução da temperatura	9~12 bits
Tempo de conversão	750 ms
Temperatura de operação	-55~125 °C
Dimensões	8.5 x 3.0 mm

Tabela .3 – Tabela de dados do sensor DS18B20

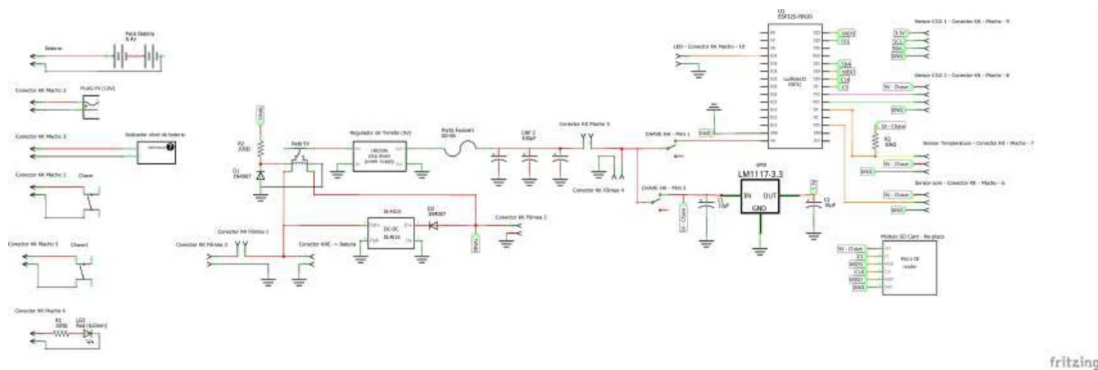


Figura .1 – Esquemático do circuito principal.

Na tabela .4 pode ser visto uma tabela com todos os componentes utilizados, contando com a quantidade e o modelo utilizado.

Após fazer o esquemático e comprar todos os componentes necessários, a placa de circuito impresso foi projetada no software PROTEUS e impressa no laboratório de prototipagem da UFJF.

Com a placa de circuito impresso pronta, foram feitos alguns testes antes de soldar os os componentes e montá-los na placa. O primeiro teste feito foi regular a tensão de saída e o limite máximo de corrente de curto-circuito do regulador de tensão e corrente XL4015, a fim de que a bateria seja carregada com 0,5 [A] e 9,8 [V]. Depois foi necessário ajustar o regulador de tensão LM2596 para a sua saída ser de 5 [V].

Após os ajustes, foi necessário testar cada sensor separadamente na protoboard para verificar se eles estavam realmente medindo e funcionando perfeitamente. Assim, com tudo isso feito, os componentes foram soldados na placa principal e os sensores foram soldados em uma placa secundária, como pode ser visto na figura .2.

Com a montagem eletrônica concluída, foi desenvolvido o software que será passado para o microcontrolador. Ele irá gerenciar os dados coletados dos sensores e os enviará para o cartão SD. O código também controla o LED para visualizar se o sistema está

QTD.	COMPONENTE	MODELO
1	SENSOR DE CO ₂	MH-Z19B
1	SENSOR DE CO ₂	SCD30
1	SENSOR DE TEMPERATURA	DS18B20
1	MICROCONTROLADOR	ESP32 DEVKIT V1
1	RELÉ	5V SONGLE
2	DIODO	1N4007
3	RESISTOR	100Ω
3	CAPACITOR	3300mF
2	CAPACITOR	10mF
1	REGULADOR COM AJUSTE DE CORRENTE E TENSÃO	XL4015
1	REGULADOR DE TENSÃO STEP DOWN	LM25967
1	PORTA FUSÍVEL	AS-06
2	CHAVE	HH-MINI
2	CHAVE	GANGORRA
2	LED	VERMELHO DIFUSO 5mm
1	REGULADOR DE TENSÃO	3.3V LM1117
1	MÓDULO LEITOR CARTÃO	SD
1	CONECTOR P4	FÊMEA ROSQUEÁVEL
1	VOLTÍMETRO INDICADOR DE CARGA	BATERIAS DE LÍTIO 2S
1	BATERIA	PACK DE LÍTIO 2S3P
7	CONECTOR KK FÊMEA	2 TERMINAIS
7	CONECTOR KK MACHO	2 TERMINAIS
3	CONECTOR KK FÊMEA	3 TERMINAIS
3	CONECTOR KK MACHO	3 TERMINAIS
4	CONECTOR KK FÊMEA	4 TERMINAIS
4	CONECTOR KK MACHO	4 TERMINAIS

Tabela .4 – Componentes utilizados, contendo a quantidade e modelo de cada um.

requisitando dados ou se o cartão SD está desconectado.

.1 Projeto da caixa e impressão 3D

Com o circuito devidamente montado e testado, foi feito no software SolidWorks o projeto da caixa que irá armazenar a placa, os sensores e a bateria. Com o projeto da caixa finalizado, ela foi impressa numa impressora 3D modelo Ender-3-V2-NEO.

Ao finalizar a impressão da caixa, o circuito principal, a bateria e o circuito com os sensores foram alocados na caixa de forma que eles ficassem protegidos. Os módulos externos também foram colocados na caixa, já que foi deixado a furação certa para cada um deles e para a proteção dos sensores, no furo onde passa o ar para a medição, foi colocada uma tela mosquiteira para evitar a passagem de espúrios e fuligens que porventura poderiam ser encontradas no local de medição e que poderiam danificar os sensores.

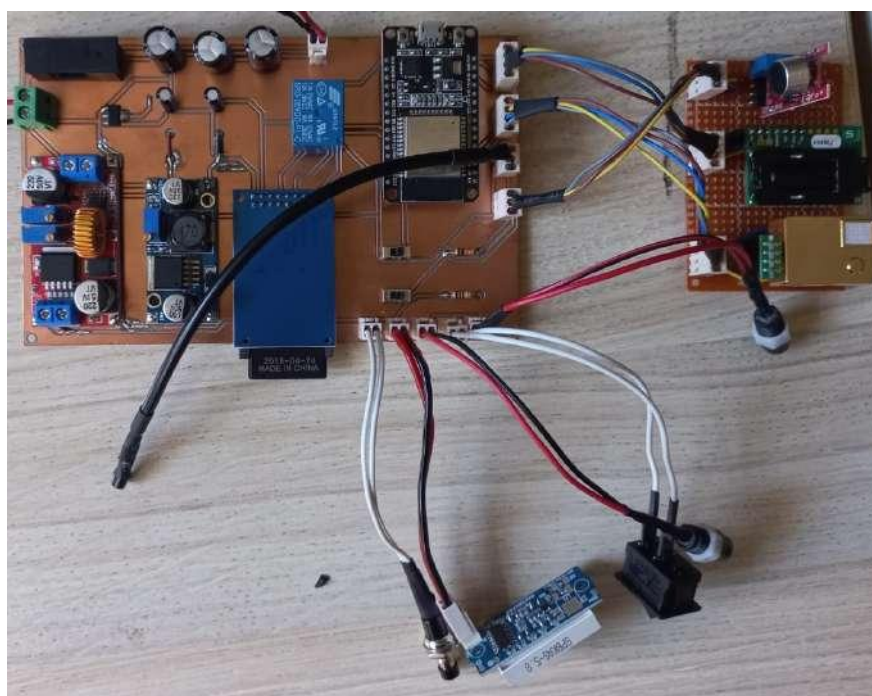


Figura .2 – Placa de circuito principal e secundária do sistema prontas.

ANEXO B – Códigos utilizados para o desenvolvimento do sistema de aquisição eletrônico

Algoritmo 1: Bibliotecas e Variáveis Globais para Aquisição de Dados com Arduino

```

// Bibliotecas:
#include <Arduino.h>
#include "FS.h" // SD Card
#include "SD.h"
#include "SPI.h"
#include <MHZ19.h> // CO2 - MHZ
#include <SensirionI2cScd30.h> // CO2 - SCD
#include <Wire.h> // Temperatura
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
// Objetos e Variáveis Globais:
// Led de Sinalização
const int pin_led = 32;
unsigned long millis_anterior = 0;
bool estado_led = 0;
// SD Card
String dataS = - NOVA AQUISIÇÃO -
\ndia:hora:minuto:segundo;CO2-MHZ;CO2-SCD;Temperatura;Ruido\n";
char dataC[150];
// CO2 - MHZ
MHZ19 mhz;
HardwareSerial mySerial(2);
// CO2 - SCD
SensirionI2cScd30 scd;
static char errorMessage[128];
static int16_t error_scd;
// Temperatura
const int pin_temperatura = 4;
OneWire oneWire(pin_temperatura);
DallasTemperature sensor(&oneWire);
DeviceAddress add_temperatura;
// Ruído
const int pin_Ruido = 15;
// Tempo
int tempo_inicial;

```

Algoritmo 2: Aquisição de Dados de Sensores com Arduino

```
void setup():
  pinMode(pin_led, OUTPUT)
  pinMode(pin_Ruido, INPUT)
  sensoresBegin()
  dataS.toCharArray(dataC, 100)
  appendFile(SD, "/dados.txt", dataC)
  tempo_inicial = millis()
void loop():
  dataS = getTime()
  dataS += ";"
  dataS += getCO2MHZ()
  dataS += ";"
  dataS += getCO2SCD()
  dataS += ";"
  dataS += getTemperatura()
  dataS += ";"
  dataS += getRuido()
  dataS += "\n"
  dataS.toCharArray(dataC, 100)
  appendFile(SD, "/dados.txt", dataC)
  piscaLed(500)
```

Algoritmo 3: Funções para Manipulação de Dados no SD Card e Sensores

```

void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message):
  Serial.printf("Writing file: %s\n", path)
  File file = fs.open(path, FILE_WRITE)
  if(!file){
    Serial.println("Failed to open file for writing")
    return
  }
  if(file.print(message)){
    Serial.println("File written")
  } else {
    Serial.println("Write failed")
  }
  file.close()
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message):
  Serial.printf("Appending to file: %s\n", path)
  File file = fs.open(path, FILE_APPEND)
  if(!file){
    Serial.println("Failed to open file for appending")
    return
  }
  if(file.print(message)){
    Serial.println("Message appended")
  } else {
    Serial.println("Append failed")
  }
  file.close()
void sensoresBegin():
  while(!SD.begin()){
    digitalWrite(pin_led, LOW)
  }
  mySerial.begin(9600)
  mhz.begin(mySerial)
  mhz.autoCalibration()
  Wire.begin()
  scd.begin(Wire, SCD30_I2C_ADDR_61)
  scd.stopPeriodicMeasurement()
  scd.softReset()
  error_scd = scd.startPeriodicMeasurement(0)
  sensor.begin()
void piscaLed(int intervalo_pisca):
  if (millis() - millis_anterior >= intervalo_pisca){
    millis_anterior = millis()
    if (estado_led == 0){
      estado_led = 1
    } else {
      estado_led = 0
    }
    digitalWrite(pin_led, estado_led)
  }

```

Algoritmo 4: Funções para Obtenção de Dados de Sensores

```
String getTime():
    unsigned long tempo = millis() - tempo_inicial;
    unsigned long segundos = tempo / 1000;
    unsigned long minutos = segundos / 60;
    unsigned long horas = minutos / 60;
    unsigned long dias = horas / 24;
    horas = horas % 24;
    minutos = minutos % 60;
    segundos = segundos % 60;
    String tempo_decorrido = String(dias) + ":" + String(horas) +
    ":" + String(minutos) + ":" + String(segundos);
    return tempo_decorrido;
float getCO2MHZ():
    return mhz.getCO2();
float getCO2SCD():
    float co2, temperatura, humidade;
    error_scd = scd.blockingReadMeasurementData(co2, temperatura,
    humidade);
    return co2;
float getTemperatura():
    sensor.requestTemperatures();
    if (sensor.getAddress(add_temperatura,0)) {
        return sensor.getTempC(add_temperatura);
    } else {
        return -127;
    }
}
float getRuido():
    float ruido;
    ruido = analogRead(pin_Ruido);
    return ruido;
```
