



Universidade Federal de Uberlândia
Instituto de Química
Programa de Pós-graduação em Química

**INTEGRAÇÃO DE SENSORES DE COR E CONSTRUÇÃO DE DISPOSITIVOS
ANALÍTICOS PARA MEDIDAS EM SOLUÇÃO E EM PAPEL**

CAIO CESAR SOUZA MACHADO

Uberlândia – MG

2026

Universidade Federal de Uberlândia
Instituto de Química
Programa de Pós-graduação em Química

**INTEGRAÇÃO DE SENSORES DE COR E CONSTRUÇÃO DE DISPOSITIVOS
ANALÍTICOS PARA MEDIDAS EM SOLUÇÃO E EM PAPEL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Química.

Aluno: Caio Cesar Souza Machado

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Gonçalves da Silva

Área de concentração: Química Analítica

Uberlândia – MG

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M149 Machado, Caio Cesar Souza, 1996-
2026 INTEGRAÇÃO DE SENSORES DE COR E CONSTRUÇÃO DE
DISPOSITIVOS ANALÍTICOS PARA MEDIDAS EM SOLUÇÃO E EM
PAPEL [recurso eletrônico] / Caio Cesar Souza Machado. - 2026.

Orientador: Sidnei Gonçalves da Silva.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-
graduação em Química.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.308>

Inclui bibliografia.

1. Química. I. Silva, Sidnei Gonçalves da, 1980-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Química.
III. Título.

CDU: 54

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Química
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 5I - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4385 - www.cpgquimica.iq.ufu.br - cpgquimica@ufu.br



ATA

Programa de Pós-Graduação em:	Química				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, 181, PPGQUI				
Data:	Vinte e três de fevereiro de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	8 horas	Hora de encerramento:	11:15
Matrícula do Discente:	12213QMI001				
Nome do Discente:	Caio Cesar Souza Machado				
Título do Trabalho:	Avaliação de sensores de cor e aplicações na Química Analítica				
Área de concentração:	Química				
Linha de pesquisa:	Instrumentação Analítica e Preparo de Amostras				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Integração de Sensores de Cor e Construção de Dispositivos Analíticos para Medidas em Solução e em Papel				
ODS 9	ODS 9 - Indústria, inovação e infraestrutura: construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação.				

Reuniu-se, por webconferência, no link: <https://meet.google.com/xid-zrqr-xvh>, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Química, assim composta: Professores Doutores: **Regina Massako Takeuchi**, da Universidade Federal de Uberlândia; **Thiago Regis Longo César da Paixão**, do Instituto de Química da USP; **Diogo Librandi da Rocha**, da Universidad Federal do ABC-UFABC; **Wanessa Melchert Mattos**, Departamento de Ciências Exatas / ESALQ e **Sidnei Gonçalves da Silva**, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, **Dr. Sidnei Gonçalves da Silva**, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao(à) Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.



Documento assinado eletronicamente por **Sidnei Gonçalves da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 11:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Regina Massako Takeuchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 11:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Regis Longo Cesar da Paixão, Usuário Externo**, em 23/02/2026, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Librandi da Rocha, Usuário Externo**, em 23/02/2026, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wanessa Melchert Mattos, Usuário Externo**, em 23/02/2026, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6921146** e o código CRC **37E437BE**.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ademar e Sueli, por toda a base familiar, construída em casa, que foi o início de toda a minha caminhada de vida pessoal e profissional. Ao meu irmão, Luís Gustavo, que se faz sempre presente me apoiando mesmo quando há uma distância geográfica.

À Giovana, minha companheira de vida, e nova família junto do Nhoque, por todo o amor, apoio, acolhimento e troca de experiências nessa caminhada.

Às minhas avós, Argelina e Coracy (*in memorian*) por todo o cuidado com toda nossa família.

Ao Sidnei, meu orientador e amigo, por todas as conversas, arguições e todos os cafés nestes quase 8 anos totais em seu laboratório.

Ao João, meu professor e amigo, por cada momento de discussão científica e momentos de descontração.

Aos amigos contemporâneos de pós-graduação, Débora, Weida, Diele, Diego e Geandre, que deixaram sempre o clima mais leve para seguirmos em frente em busca dos mesmos objetivos.

Aos amigos de graduação, Ronaldo, Terra, Alan e Kamila pela parceria de tantos anos e amizades que sei que levarei para sempre comigo.

A todos os professores que contribuíram diretamente para minha formação acadêmica seja em sala de aula, eventos científicos e/ou estágios.

A todos os colegas de laboratório do Smart, por todas as experiências compartilhadas, todas as reuniões, todos os cafés e todas as celebrações.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Instituto de Química pela disponibilização do espaço físico.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais, FAPEMIG, pela bolsa concedida e financiamento de projetos.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento e a aplicação de dispositivos analíticos baseados na integração de sensores digitais multiespectrais de cor (TCS34721, AS7262, AS7341, AS7343 e AS7265x) a microcontroladores, visando à construção de plataformas inteligentes para medidas analíticas por reflectância em solução aquosa e em dispositivos analíticos em papel. Inicialmente, realizou-se um estudo comparativo entre os sensores TCS34721, AS7262 e AS7341 na quantificação de corantes em solução aquosa. Os corantes tartrazina, índigo carmim, ponceau 4R e amarelo crepúsculo foram selecionados por abranger ampla faixa da região do visível e avaliar o desempenho analítico em diferentes regiões espectrais. Os resultados demonstraram que o AS7341 apresentou desempenho espectral superior, em função de sua maior resolução multicanal, possibilitando curvas de calibração, baixos limites de detecção ($1 \mu\text{mol L}^{-1}$) e precisão adequada ($\text{RSD} = 1,0\%$). Os resultados obtidos com esse sensor foram comparáveis aos de um espectrofotômetro comercial. Com base nesses resultados, foi desenvolvido um procedimento para a determinação de amarelo crepúsculo em bebidas isotônicas, sucos e gelatina, com resultados concordantes com a espectrofotometria UV-Vis. Na sequência, foi desenvolvido o dispositivo Smart-Sense, um sistema embarcado portátil que integra o sensor AS7341, controle eletrônico e interface gráfica em smartphone, aplicado com sucesso na determinação de amônio, ferro (II) e nitrito, apresentando desempenho compatível com métodos espectrofotométricos, além de vantagens associadas à portabilidade, baixo custo, rapidez analítica e conectividade. Adicionalmente, foi proposta a plataforma Smart-PAD, um sistema mecanizado para leitura de dispositivos analíticos em papel. Foram avaliados parâmetros como tempo de secagem, ganho e tempo de integração, sendo o controle temporal crítico devido à cinética lenta da reação de Berthelot modificada e à degradação do produto no papel. A plataforma realiza medições em 8,2 minutos para 18 spots, minimizando efeitos de heterogeneidade do substrato. A aplicação na determinação de amônio apresentou boa linearidade ($R = 0,997$), RSD de 2,7% e limite de detecção de 6 mg L^{-1} . De forma geral, os dispositivos desenvolvidos demonstram o potencial da integração de sensores multiespectrais com sistemas embarcados como alternativa viável e acessível para análises químicas, contribuindo para o avanço da instrumentação analítica e da Internet of Analytical Things (IoAT).

ABSTRACT

This work describes the development and application of analytical devices based on the integration of digital multispectral color sensors (TCS34721, AS7262, AS7341, AS7343, and AS7265x) with microcontrollers, aiming at the construction of intelligent platforms for analytical measurements by reflectance in aqueous solutions and in paper-based analytical devices. Initially, a comparative study was carried out among the TCS34721, AS7262, and AS7341 sensors for the quantification of dyes in aqueous solution. The dyes tartrazine, indigo carmine, ponceau 4R, and sunset yellow were selected because they cover a wide range of the visible spectrum, allowing the evaluation of analytical performance across different spectral regions. The results demonstrated that the AS7341 exhibited superior spectral performance due to its higher multichannel resolution, enabling linear calibration curves, low limits of detection ($1 \mu\text{mol L}^{-1}$), and adequate precision ($\text{RSD} = 1.0\%$). The results obtained with this sensor were comparable to those from a commercial spectrophotometer. Based on these findings, a procedure was developed for the determination of sunset yellow in isotonic beverages, juices, and gelatin, yielding results in agreement with UV–Vis spectrophotometry. Subsequently, the Smart-Sense device was developed, a portable embedded system integrating the AS7341 sensor, electronic control, and a smartphone-based graphical interface, which was successfully applied to the determination of ammonium, iron(II), and nitrite. This system exhibited performance compatible with spectrophotometric methods, in addition to advantages related to portability, low cost, analytical speed, and connectivity. Additionally, the Smart-PAD platform was proposed, consisting of a mechanized system for the reading of paper-based analytical devices. Parameters such as drying time, gain, and integration time were evaluated, with temporal control being critical due to the slow kinetics of the modified Berthelot reaction and the degradation of the reaction product on paper. The platform performs measurements within 8.2 minutes for 18 spots, minimizing the effects of substrate heterogeneity. Its application to ammonium determination showed good linearity ($R = 0.997$), an RSD of 2.7%, and a detection limit of 6 mg L^{-1} . Overall, the developed devices demonstrate the potential of integrating multispectral sensors with embedded systems as a viable and accessible alternative for chemical analyses, contributing to the democratization of analytical instrumentation and to the advancement of the Internet of Analytical Things (IoAT).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema representativo dos fenômenos da luz	18
Figura 2. Foto do sensor TCS34725 indicando o posicionamento do detector e do LED.	26
Figura 3. Esquema representativo do funcionamento dos sensores de cor.	26
Figura 4. Esquema representativo do funcionamento dos filtros nos sensores de cor...	27
Figura 5. Evolução anual do número de publicações relacionadas aos sensores espectrais AS7343, AS7265x, AS7341, AS7262 e TCS34725, no período de 2015 a 2025.....	29
Figura 6. Diagrama representativo da posição de cada um dos filtros nos sensores de cor	30
Figura 7. Esquema representativo das faixas de comprimento de onda de cada canal de cada um dos sensores	30
Figura 8. Foto dos dispositivos construídos a partir da impressão 3D do suporte para os sensores AS7341, AS7262 e TCS34725.....	36
Figura 9. Esquemas representativos da ligação realizada entre os sensores de cor e o microcontrolador Arduino Uno. a) AS7341; b) AS7262; c) TCS34725	37
Figura 10. Resposta espectral dos sensores: sinal obtido, para cada canal, de 400 à 700 nm com incrementos de 1 nm. a) AS7341; b) AS7262; c) TCS34725.....	42
Figura 11. Espectro de emissão do LED branco de alto brilho presente nos sensores de cor	43
Figura 12. Resposta efetiva dos sensores: Resposta obtida a partir da multiplicação do sinal da resposta espectral pelo sinal obtido do espectro de emissão dos LED's. a) AS7341; b) AS7262; c) TCS34725	44
Figura 13. Imagem do sensor de cor AS7343	45
Figura 14. Espectro de emissão do LED do sensor AS7343.....	46

Figura 15. Resposta espectral do sensor AS7343	46
Figura 16. Resposta espectral efetiva do sensor AS7343	47
Figura 17. Imagem do sensor de cor AS7265x	48
Figura 18. Espectros de emissão dos 3 LED's presente no sensor AS7265x	48
Figura 19. Espectro resultante da somatória da iluminação dos 3 LED's do sensor AS7265x.....	49
Figura 20. Resposta espectral do sensor AS7265x.....	49
Figura 21. Resposta efetiva do sensor AS7265x considerando os três LED's e os três detectores.....	50
Figura 22. Sinais obtidos em função da corrente aplicada ao LED (5–100 mA) em diferentes ganhos (1 a 512X) para otimização e seleção dos parâmetros para cada um dos canais disponíveis no sensor AS7341 a) Canal 1 = 415 nm, b) Canal 2 = 445 nm, c) Canal 3 = 480 nm, d) Canal 4 = 515 nm, e) Canal 5 = 555 nm, f) Canal 6 = 590 nm, g) Canal 7 = 630 nm e h) Canal 8 = 680 nm	52
Figura 23. Sinais obtidos em função da corrente aplicada ao LED (12,5; 25; 50 e 100 mA) em diferentes ganhos (1; 3,7; 16 e 64X) para otimização e seleção dos parâmetros para cada um dos canais disponíveis no sensor AS7262	54
Figura 24. Sinais obtidos para os canais R, G e B em função dos diferentes ganhos e um tempo de integração de 700 ms utilizando o sensor TCS34725.....	56
Figura 25. Espectros de absorção de soluções aquosas dos corantes amarelo tartrazina (50 mmol L ⁻¹), amarelo crepúsculo (45 mmol L ⁻¹), vermelho ponceau 4R (58 mmol L ⁻¹), e azul indigo (90 mmol L ⁻¹).....	57
Figura 26. Espectros de absorção de soluções aquosas dos corantes amarelo tartrazina (preto) e amarelo crepúsculo (vermelho) em sobreposição às respostas efetivas dos canais dos sensores de cor. a) AS7341, b) AS7262 e c) TCS34725	60

Figura 27. Curvas de calibração para quantificação do corante AC. Em preto, apenas o corante de interesse. E em vermelho, na presença do corante AT em mesmas concentrações.....	61
Figura 28. Fotografias de diferentes ângulos do dispositivo desenvolvido	76
Figura 29. Esquema representativo da ligação do sensor AS7341 com o microcontrolador ESP 32-S3 Reverse TFT Feather	76
Figura 30. <i>Printscreen</i> da tela do smartphone mostrando a interface desenvolvida e suas funcionalidades	77
Figura 31. Curva de calibração obtida para determinação de nitrito utilizando o dispositivo Smart-Sense	81
Figura 32. Curva de calibração obtida para a determinação do íon ferro (II) utilizando o dispositivo Smart-Sense	82
Figura 33. Curva de calibração obtida para a determinação do íon amônio utilizando o dispositivo Smart-Sense	83
Figura 34. Esquema representativo das peças que formam o Smart-PAD e suas respectivas dimensões	90
Figura 35. Fotos do dispositivo Smart-PAD em diferentes ângulos e suas dimensões .	93
Figura 36. <i>Printscreen</i> da interface utilizada para seleção e inicialização do Smart-PAD	93
Figura 37. Avaliação dos sinais obtidos em cada uma das posições de leitura do dispositivo. Posição: PAD de referência para cálculo do I_o	95
Figura 38. Curvas de calibração do corante amarelo crepúsculo sem secagem (preto) e após a secagem (vermelho)	97
Figura 39. Avaliação dos valores de RSD ($n = 5$, concentração = $0,5 \text{ mmol L}^{-1}$) em função do tempo em diferentes métodos de secagem dos PAD's.	98

Figura 40. Sinal médio de reflectância (n=5), desvio padrão e foto do PAD utilizado em diferentes tempos de secagem para o corante AC.	99
Figura 41. Sinais obtidos em função da corrente aplicada ao LED (5–100 mA) em diferentes ganhos (1 a 512X) para otimização e seleção dos parâmetros para cada um dos canais disponíveis no sensor AS7341 para as medidas em papel – a) Canal 1 = 415 nm, b) Canal 2 = 445 nm, c) Canal 3 = 480 nm, d) Canal 4 = 515 nm, e) Canal 5 = 555 nm, f) Canal 6 = 590 nm, g) Canal 7 = 630 nm e h) Canal 8 = 680 nm.....	101
Figura 42. Curvas de calibração obtidas para cada um dos corantes avaliados: Amarelo tartrazina, vermelho Bordaux, azul Indigo e verde de Bromocresol.	103
Figura 43. Esquema ilustrativo da reação de Berthelot modificada	104
Figura 44. Espectro de absorção do indophenol (verde) em sobreposição com a resposta efetiva do sensor AS7341.....	105
Figura 45. Valores de reflectância e desvio padrão (n = 5) obtidos em diferentes tempos de secagem do produto formado no PAD e as fotos dos spots.....	106
Figura 46. Curva de calibração obtida através do sinal de reflectância obtido em função da variação de concentração do íon amônio e foto dos spots de cada um dos spots utilizados	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tabela comparativa de faixa de resposta espectral, canais e comprimentos de onda, tempo de integração, ganho, corrente do LED e dimensões dos sensores AS7341, AS7262, TCS34725.	33
Tabela 2. Condições otimizadas de ganho e corrente do LED para os canais dos sensores AS7341 e AS7262	54
Tabela 3. Desempenho analítico comparativo (equações de calibração, o coeficiente de correlação (R), o limite de detecção (LD), a faixa linear de trabalho e o desvio padrão relativo (RSD) dos sensores de cor frente ao espectrofotômetro comercial utilizando os corantes azul índigo, amarelo tartrazina, vermelho ponceau 4R e amarelo crepúsculo .	58
Tabela 4. Concentrações do corante amarelo crepúsculo encontradas em amostras alimentícias utilizando os sensores de cor e comparando com os valores encontrados utilizando-se o espectrofotômetro comercial.....	62
Tabela 5. Resultados de recuperação (%) do corante amarelo crepúsculo em amostras de isotônico artificial e de gelatina sem sabor, em dois níveis de concentração (15 e 30 $\mu\text{g L}^{-1}$), obtidos com os sensores TCS34725, AS7262 e AS7341 em diferentes canais espectrais.	63
Tabela 6. Comparação do desempenho analítico (faixa linear, limite de detecção e desvio padrão relativo) de diferentes métodos empregados para a determinação do corante amarelo crepúsculo.	63
Tabela 7. Características analíticas obtidas para a determinação de nitrito utilizando o Smart-Sense.....	80
Tabela 8. Características analíticas obtidas na determinação de ferro (II) utilizando o dispositivo Smart-Sense	82

Tabela 9. Características analíticas obtidas para a determinação de amônio utilizando o dispositivo Smart-Sense	83
Tabela 10. Condições otimizadas de ganho e corrente do LED para os canais do sensor AS7341 para medidas no Smart-PAD	101
Tabela 11. Características analíticas obtidas para análise dos corantes avaliados: Faixa linear, RSD, LD, equação da reta e valor de R.....	103
Tabela 12. Comparação do desempenho analítico de diferentes métodos empregados para a determinação de amônio.....	108

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. $A(\lambda) = -\log_{10} T = \varepsilon(\lambda) \ell c$	20
Equação 2. $LD = 3\sigma/b$	57
Equação 3. $LQ = 10\sigma/b$	57
Equação 4. $RSD (\%) = s/x$	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	– Acrilonitrila Butadieno Estireno
AC	– Amarelo crepúsculo
AT	– Amarelo tartrazina
ANOVA	– Análise de variância
AP	– <i>Access Point</i>
ASTEP	– <i>Analog Step</i>
ATIME	– <i>Integration Time</i>
CCD	– <i>Charge-Coupled Device</i>
CMOS	– <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CMYK	– <i>Cyan, Magenta, Yellow and Key (Black)</i>
DBR	– <i>Distributed Bragg Reflector</i>
DIY	– <i>Do It Yourself</i>
GND	– Terra (<i>Ground</i>)
IoAT	– <i>Internet of Analytical Things</i>
IoT	– <i>Internet of Things</i>
I_0	– Intensidade da radiação incidente
I_r	– Intensidade da radiação refletida
I_t	– Intensidade da radiação transmitida
IUPAC	– <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
LCD	– <i>Liquid Crystal Display</i>
LD	– Limite de detecção
LED	– <i>Light Emitting Diode</i>
LD	– Limite de detecção
LQ	– Limite de quantificação
MMQ	– Método dos mínimos quadrados
MQTT	– <i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
NIR	– <i>Near Infrared</i>
PAD	– <i>Paper-based Analytical Device</i> (Dispositivo analítico a base de papel)
PLA	– Ácido polilático (<i>Polylactic Acid</i>)
R	– Coeficiente de correlação
RGB	– <i>Red, Green and Blue</i>

RSD – Desvio padrão relativo

SCL – *Serial Clock Line*

SDA – *Serial Data Line*

T – Transmitância

UV–Vis – Ultravioleta–Visível

SUMÁRIO

1. Capítulo I: Espectrofotometria.....	17
2. Capítulo II: Comparação sensores de cor.....	25
2.1. Introdução	25
2.1.1. Internet das coisas.....	25
2.1.2. Sensores de cor	25
2.2. Objetivos	35
2.3. Materiais e métodos.....	36
2.3.1. Instrumentação	36
2.3.2. Metodologia	39
2.4. Resultados e discussões	41
2.4.1. Resposta efetiva dos sensores	41
2.4.2. Sensores AS7343 e AS7265x.....	45
2.4.3. Otimização dos parâmetros para análises em soluções	51
2.4.4. Características analíticas.....	56
2.4.5. Quantificação do corante amarelo crepúsculo em amostras alimentícias.....	59
2.5. Conclusões	65
3. Capítulo III: Smart-Sense: um dispositivo embarcado para análises em solução	67
3.1. Introdução	67
3.1.1. Histórico.....	67
3.1.2. Fundamentos Físicos da Cor	68
3.1.3. Sistemas e Espaços de Cor.....	69
3.1.4. Instrumentação em Colorimetria	69
3.1.5. Limitações e aplicações dos colorímetros.....	71
3.1.6. Avanços Tecnológicos	72
3.2. Objetivos	74
3.3. Materiais e métodos.....	75
3.3.1. Instrumentação	75
3.3.2. Reagentes e soluções	78
3.4. Resultados e discussões	80
3.4.1. Determinação de nitrito.....	80
3.4.2. Determinação de ferro (II)	81
3.4.3. Determinação de amônio	82
3.5. Conclusões	84
4. Capítulo IV: Smart-PAD – Uma plataforma mecanizada para análise baseada em papel.....	85

4.1.	Introdução	85
4.1.1.	Dispositivos analíticos a base de papel (PADs)	85
4.1.2.	Mecanização	86
4.2.	Objetivos	88
4.3.	Materiais e métodos	89
4.3.1.	Reagentes e soluções	89
4.3.2.	Instrumentação	89
4.4.	Resultados e discussões	95
4.4.1.	Avaliação do Smart-PAD	95
4.4.2.	Avaliação da secagem dos PAD's	96
4.4.3.	Otimização dos parâmetros do sensor AS7341	99
4.4.4.	Avaliação da capacidade analítica do Smart-PAD	102
4.4.5.	Aplicação do Smart-PAD na análise de amônio em fertilizante	103
4.5.	Conclusões	111
5.	Conclusões gerais	112
6.	Referências	113

1. Capítulo I: Espectrofotometria

Os métodos espectrométricos constituem um dos pilares conceituais e instrumentais da Química Analítica, compreendendo um amplo conjunto de técnicas fundamentadas na interação entre a radiação eletromagnética e a matéria. Tais métodos englobam tanto abordagens de espectroscopia atômica quanto molecular e são amplamente empregados para fins qualitativos e quantitativos em diversas áreas do conhecimento científico e tecnológico. De forma geral, o termo espectroscopia refere-se ao estudo teórico e experimental das interações entre diferentes tipos de radiação e as espécies químicas, enquanto espectrometria diz respeito à mensuração quantitativa dessas interações, usualmente realizada por meio de detectores fotoelétricos acoplados a sistemas eletrônicos de aquisição, tratamento e processamento de sinais (Daniel C. Harris, 2016; Holler; Skoog; Crouch, 2009)

Métodos espectrométricos permitem investigar transições energéticas associadas à interação entre espécies químicas, tais como átomos e moléculas, e a radiação eletromagnética. Essas transições fornecem informações diretas e relevantes acerca da composição química, da estrutura eletrônica e do ambiente químico das espécies analisadas (Colin N. Barnwell; Elaine M. McCash, 1994; Peter Atkins; Júlio de Paula, 2014). Entre as técnicas mais amplamente difundidas, destaca-se a espectrofotometria de absorção molecular na região do ultravioleta e do visível (UV–Vis), a qual se encontra consolidada em virtude de sua robustez instrumental, versatilidade metodológica, rapidez nas medidas e aplicabilidade a uma ampla variedade de sistemas químicos (Donald L. Pavia et al., 2015; Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014)

A radiação eletromagnética incidente sobre uma amostra ou superfície está sujeita à principalmente três fenômenos: transmitância, reflectância e espalhamento. A **Figura 1** a seguir representa um esquema ilustrativo dos principais fenômenos da luz.

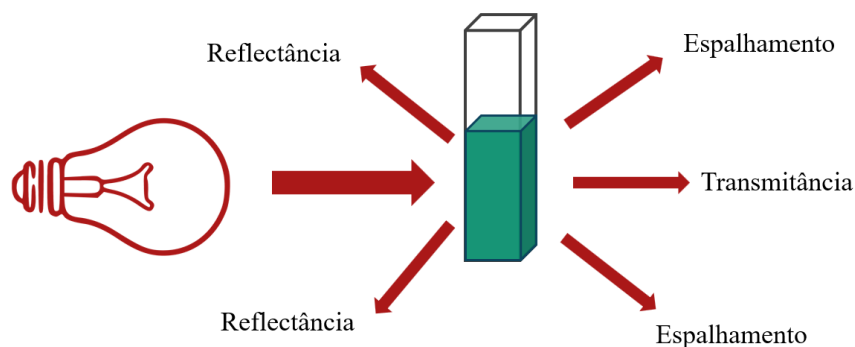


Figura 1. Esquema representativo dos fenômenos da luz

Fonte: o autor

Transmitância é o parâmetro óptico que expressa a fração da radiação eletromagnética incidente sobre um meio material que o atravessa sem ser absorvida ou refletida, emergindo do lado oposto do sistema. Matematicamente, a transmitância (T) é definida como a razão entre a intensidade da radiação transmitida (I_t) e a intensidade da radiação incidente (I_0), sendo, portanto, uma grandeza adimensional e dependente do comprimento de onda da radiação considerada (Daniel C. Harris, 2016). Em sistemas homogêneos e isotrópicos, a transmitância está diretamente relacionada aos processos de absorção molecular e pode ser descrita quantitativamente pela Lei de Beer–Lambert (Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014). Em meios reais, entretanto, a transmitância também pode ser influenciada por efeitos adicionais, como reflexões nas interfaces e espalhamento (Colin N. Barnwell; Elaine M. McCash, 1994).

A reflectância corresponde à fração da radiação eletromagnética incidente que é refletida por uma superfície ou interface, retornando ao meio de origem. Define-se como a razão entre a intensidade da radiação refletida (I_r) e a intensidade da radiação incidente (I_0), sendo igualmente uma grandeza adimensional e dependente do comprimento de onda, do ângulo de incidência e das propriedades ópticas do material. A reflectância pode ser classificada em especular, quando a reflexão ocorre de maneira ordenada conforme as leis da reflexão geométrica, e difusa, quando a radiação é refletida em múltiplas direções devido à rugosidade superficial ou à heterogeneidade do meio (Kubelka; Munk, 1931). Em aplicações analíticas, particularmente em espectrofotometria de reflectância difusa, este fenômeno é amplamente explorado para a caracterização óptica de sólidos, pós e substratos porosos, nos quais a radiação penetra parcialmente no material antes de ser retro espalhada (Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014; Gutav Kortum, 1969).

O espalhamento da luz é o fenômeno pelo qual a radiação eletromagnética incidente é desviada de sua trajetória original em múltiplas direções em decorrência de interações com diferentes valores de refração dos meios ou partículas presentes no meio. Diferentemente da absorção, o espalhamento não implica, necessariamente, transferência de energia para o material, mas sim uma redistribuição da radiação. O espalhamento depende da relação entre o tamanho das partículas ou irregularidades do meio e o comprimento de onda da radiação incidente. Em sistemas analíticos, o espalhamento pode atuar tanto como um fator interferente, afetando a intensidade efetivamente detectada, quanto como um sinal informativo, sendo explorado em técnicas como nefelometria, turbidimetria e espectroscopia de reflectância difusa, especialmente em meios heterogêneos e matrizes sólidas ou coloidais (Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014).

A interação entre a radiação eletromagnética é dependente do comprimento de onda ou da frequência da radiação incidente (Peter Atkins; Júlio de Paula, 2014), constituindo o fundamento dos métodos espectrométricos amplamente empregados na identificação e, sobretudo, na quantificação de espécies químicas em diferentes matrizes e contextos analíticos (Daniel C. Harris, 2016; Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014).

A identificação de linhas espectrais discretas na radiação solar, no início do século XIX, constituiu uma evidência fundamental de que a matéria interage com a luz de maneira característica. Em 1802, Wollaston empregou uma fenda estreita que possibilitou a observação de diversas linhas espectrais na região visível, cada uma associada a uma cor específica do espectro.

Nesses experimentos, constatou-se que o espectro contínuo da luz solar apresentava descontinuidades na forma de linhas escuras paralelas à fenda de entrada. Posteriormente, Fraunhofer aprofundou o estudo dessas estruturas espectrais, obtendo maior resolução por meio da introdução de uma lente convexa entre a fenda e o prisma, o que resultou na formação de imagens espectrais mais nítidas, bem definidas e reproduzíveis.

Ao final do século XIX, a espectrofotometria avançou a partir do desenvolvimento de instrumentos ópticos mais confiáveis e de métodos de detecção adequados. Adicionalmente, uma vez que o comprimento de onda no qual uma substância absorve radiação está intrinsecamente relacionado à sua composição química, a espectrofotometria passou a ser empregada também em análises de caráter qualitativo (Colin N. Barnwell; Elaine M. McCash, 1994; Holler; Skoog; Crouch, 2009).

A compreensão teórica da espectrofotometria avançou de maneira substancial na transição para o século XX, em consonância com o advento da Física Moderna. A teoria eletromagnética clássica, consolidada nos trabalhos de James Clerk Maxwell, estabeleceu que a luz consiste em uma onda eletromagnética. Posteriormente, em 1913, Niels Bohr introduziu um modelo atômico quantizado para o átomo de hidrogênio, representando um avanço decisivo na interpretação dos espectros atômicos e na compreensão dos processos de absorção e emissão de radiação (Bohr, 1913).

Os primeiros espectroscópios eram baseados no uso de prismas ou redes de difração para a dispersão da radiação, porém o registro dos espectros ocorria predominantemente de forma visual ou fotográfica, sem uma calibração rigorosa da intensidade luminosa. Nesse contexto, o termo espectrofotômetro passou a ser adotado para designar instrumentos capazes de medir quantitativamente a intensidade da luz, inicialmente por meio de métodos fundamentados na comparação visual entre feixes luminosos (Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014).

Um marco teórico de grande relevância nesse período foi o estabelecimento da lei de Beer–Lambert, também denominada lei de Beer. Contribuições fundamentais de Pierre Bouguer (1729), Johann Heinrich Lambert (1760) e August Beer (1852) demonstraram que a fração de radiação transmitida através de um meio absorvente decresce de forma exponencial em função do comprimento do caminho óptico e da concentração das espécies responsáveis pela absorção. Essa relação é expressa por:

$$\text{Equação 1. } A(\lambda) = -\log_{10} T = \varepsilon(\lambda) \ell c$$

em que A representa a absorbância, T a transmitância, $\varepsilon(\lambda)$ o coeficiente de absortividade molar no comprimento de onda λ , ℓ o comprimento do caminho óptico e c a concentração da espécie absorvente (Daniel C. Harris, 2016; Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014).

Apesar de sua ampla aplicabilidade, a lei de Beer–Lambert está sujeita a limitações decorrentes das hipóteses simplificadoras que a fundamentam. Os desvios em relação ao comportamento linear esperado podem ser classificados como reais ou aparentes. Os desvios reais estão associados a fenômenos físico-químicos intrínsecos ao sistema, tais como variações do índice de refração em função da concentração e interações entre centros absorventes, particularmente relevantes em soluções mais concentradas (Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014; Peter Atkins; Júlio de Paula, 2014). Tais efeitos alteram a probabilidade de

absorção da radiação e comprometem a linearidade da relação entre absorbância e concentração.

Os desvios aparentes, por sua vez, decorrem predominantemente de limitações instrumentais e de fatores experimentais, incluindo a ausência de monocromaticidade da radiação incidente, respostas não lineares dos detectores, flutuações na intensidade da fonte de radiação e alterações químicas no sistema analisado, como associações moleculares e deslocamentos de equilíbrios químicos (Daniel C. Harris, 2016; Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014). A adequada compreensão e o controle desses fatores são essenciais para assegurar a exatidão e a confiabilidade dos resultados obtidos por métodos espectrofotométricos.

No âmbito instrumental, o desenvolvimento do espectrofotômetro Beckman DU, no início da década de 1940, constitui um marco determinante para a consolidação da espectrofotometria como técnica analítica quantitativa. Concebido por Arnold O. Beckman, esse equipamento integrou de forma pioneira uma fonte de radiação estável, um monocromador de elevada eficiência e um sistema de detecção sensível em um único instrumento compacto e de operação simplificada. Tal configuração superou limitações inerentes aos métodos espectrais anteriores, predominantemente qualitativos, de baixa reprodutibilidade e fortemente dependentes de arranjos ópticos complexos. A introdução do Beckman DU viabilizou medições rápidas e confiáveis de absorbância nas regiões do ultravioleta e do visível, permitindo a aplicação sistemática da lei de Beer–Lambert em análises químicas e bioquímicas (Beckman, 1941).

O impacto científico e tecnológico dessas contribuições foi imediato e duradouro, refletindo-se na ampla disseminação do espectrofotômetro DU em áreas como Química Analítica, Bioquímica, Farmacologia e Ciência dos Materiais. Um dos primeiros estudos a empregar esse instrumento demonstrou sua aplicabilidade na determinação quantitativa de vitamina A, evidenciando a elevada precisão, sensibilidade e robustez do método espectrofotométrico moderno.

A partir desses avanços, a espectrofotometria consolidou-se como uma técnica indispensável para análises quantitativas, impulsionando o desenvolvimento de métodos analíticos padronizados e exercendo influência direta sobre a evolução subsequente de instrumentos ópticos e sensores espectrais. Assim, o trabalho de Beckman extrapolou a

introdução de um novo equipamento, promovendo uma transformação estrutural na prática analítica moderna (Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014).

Um espectrofotômetro UV–Vis é constituído, de forma geral, por uma fonte de radiação, um sistema de seleção de comprimento de onda, um compartimento para acomodação da amostra, um detector e um módulo eletrônico de aquisição e processamento de dados (Daniel C. Harris, 2016). As fontes de radiação mais comumente empregadas incluem lâmpadas de deutério ou hidrogênio para a região do ultravioleta e lâmpadas de filamento de tungstênio para a região do visível (Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014).

A seleção do comprimento de onda pode ser realizada por meio de filtros ópticos ou monocromadores, como prismas ou redes de difração, sendo a largura efetiva da banda espectral um parâmetro crítico para a sensibilidade e a seletividade analítica do método. As amostras são usualmente acondicionadas em células ou cubetas confeccionadas em materiais transparentes à radiação de interesse, tais como vidro, plástico ou quartzo, em função da região espectral analisada (Daniel C. Harris, 2016). A radiação transmitida é convertida em sinal elétrico por detectores fotoelétricos, incluindo fototubos, tubos fotomultiplicadores ou fotodiodos, possibilitando a quantificação da intensidade luminosa e o tratamento analítico dos dados obtidos (Douglas; F. James Holler; Stanley R. Crouch, 2014).

A literatura recente em química analítica tem registrado um movimento claro de modernização e miniaturização dos instrumentos clássicos de análise espectrofotométrica, sobretudo por meio da substituição de fontes de radiação convencionais por diodos emissores de luz (LEDs) e de detectores tradicionais por sensores emergentes (Capitán-Vallvey et al., 2015; Meloni et al., 2018). Essas mudanças não apenas refletem avanços tecnológicos, mas também respondem a uma demanda crescente por instrumentos mais compactos, energeticamente eficientes, de baixo custo e com maior robustez para aplicações em campo.

Tradicionalmente, espectrofotômetros utilizam lâmpadas de descarga (como tungstênio, xenônio ou deutério) como fontes de radiação. Embora essas lâmpadas ofereçam espectros contínuos e sejam adequadas para uma ampla gama de comprimentos de onda, elas apresentam desvantagens, como: alto consumo de energia, aquecimento e instabilidade térmica e altos custos operacionais e de manutenção (Dasgupta et al., 2003).

Em contraposição, LEDs vêm ganhando espaço como fontes de radiação por diversas razões: espectros de emissão específicos e estáveis, que podem ser selecionados para regiões

de interesse analítico (UV, visível e até próximo do infravermelho); Baixo consumo energético e praticamente nenhuma geração de calor, o que reduz interferências térmicas no sistema; Resposta rápida e alta vida útil, reduzindo custos de manutenção e aumentando a robustez do instrumento; facilidade de integração em sistemas modulares e portáteis (López-Molinero et al., 2010; Meloni et al., 2018).

Na literatura, há uma crescente quantidade de publicações relatando espectrofotômetros baseados em arranjos de LEDs, tanto para medições de absorbância quanto de fluorescência e até de refletância. Em muitos trabalhos, esses LEDs são combinados sequencialmente para cobrir faixas espectrais mais amplas, permitindo análises multicomponente com precisão comparável aos sistemas convencionais (Dasgupta et al., 2003).

Os detectores clássicos em espectrofotometria incluem fotomultiplicadores, fotodiodos e detectores CCD. Esses componentes oferecem alta sensibilidade e resolução, mas igualmente possuem limitações como custo elevado e necessidade de circuitos complexo (Skoog et al., 2014). A literatura atual descreve a implementação de sensores alternativos, tais como: Fotodiodos de silício integrados; Sensores CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*); sensores fotovoltaicos baseados em materiais nanoestruturados (Capitán-Vallvey et al., 2015).

Esses sensores se destacam por custos reduzidos, possibilidade de fabricação em larga escala, integração com sistemas eletrônicos de baixo consumo e potencial para instrumentação portátil (Daniel C. Harris, 2016). Em especial, sensores CMOS têm sido explorados devido à sua compatibilidade com eletrônica digital e facilidade de aquisição de dados, viabilizando espectrofotômetros que se conectam diretamente a microcontroladores ou computadores de baixo custo.

Publicações recentes demonstram, por exemplo, dispositivos espectrofotométricos portáteis para determinação de contaminantes em água, quantificação de corantes em alimentos e monitoramento de reações químicas em microescala, todos valendo-se de LEDs estrategicamente escolhidos e sensores fotodetectores integrados (Capitán-Vallvey et al., 2015; Meloni et al., 2018; Cesar Souza Machado; Da Silveira Petrucy; G. Silva, 2021).

O objetivo geral desta tese é desenvolver, integrar e avaliar dispositivos analíticos baseados em sensores digitais de cor aplicados à quantificação de espécies químicas em solução e em papel para medidas analíticas por reflectância, explorando estratégias de miniaturização,

automação e conectividade. Busca-se demonstrar a viabilidade analítica desses sistemas frente a métodos espectrofotométricos convencionais, avaliando parâmetros como seletividade, sensibilidade, precisão e robustez. Adicionalmente, objetivou-se investigar o potencial desses dispositivos para aplicações portáteis e descentralizadas, contribuindo para o avanço da instrumentação analítica de baixo custo e para a consolidação de abordagens associadas à *Internet of Analytical Things*.

2. Capítulo II: Comparação sensores de cor

2.1.Introdução

2.1.1. Internet das coisas

Internet das coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), é o termo utilizado para denominar o conjunto de objetos físicos que interagem entre si podendo identificar-se mutuamente através da internet (Ashouri et al., 2019). A IoT utiliza-se de diversas tecnologias como protocolos e comunicações para proporcionar uma administração inteligente, rastreamento e monitoramento de dados e informações (Patel; Patel; Scholar, 2016). Trata-se de um sistema que conecta objetos físicos por meio de um endereço ou rede, permitindo a troca, armazenamento e coleta de dados, integrando dispositivos eletrônicos em sistemas específicos para alcançar objetivos conjuntos.

O principal objetivo da IoT é afetar de forma positiva diferentes aspectos da vida cotidiana alterando a interação dos usuários em suas residências e seus locais de trabalho. No campo da Química, essas melhorias trazem grandes benefícios para o desenvolvimento de projetos, como a criação de centrais de monitoramento. Nessas centrais, o químico responsável pode acompanhar em tempo real o progresso de uma reação, graças à conexão entre sistemas reatores e detectores que enviam dados automaticamente para unidades de processamento (Fitzpatrick; Battilocchio; Ley, 2016).

No entanto, sensores, detectores e reatores fornecem uma parte limitada das informações necessárias para implementação do conceito IoT o que faz com que seja imprescindível novos avanços em termos de desempenho. Esses avanços são direcionados pelas áreas de aplicação específicas de cada projeto. Assim, a Química Analítica é fundamental para fornecer dados à IoT, especialmente em desafios relacionados à saúde, meio ambiente, clima e alimentos. Nesta interface entre IoT e química analítica, surge a Internet of Analytical Things, ou IoAT (Mayer; Baeumner, 2019).

2.1.2. Sensores de cor

De acordo com a IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), sensor é um dispositivo transdutor projetado para detectar uma característica específica do ambiente

onde está inserido ou algum estímulo externo, respondendo por meio de uma alteração visível em seu estado ou pela emissão de um sinal interpretável por instrumentos ou observadores. Sendo assim, sensores ópticos são sensores que detectam propriedades ópticas da luz como por exemplo intensidade, e emitem um sinal interpretável que pode ser relacionado com a concentração de um analito de interesse.

Dentre os sensores ópticos, destacam-se os sensores de cor, que empregam um arranjo de fotodiodos, cada um associado a um filtro espectral posicionado à sua frente, permitindo a discriminação da radiação incidente em diferentes comprimentos de onda. Esses sensores integram, em uma única placa de circuito impresso, uma fonte de luz baseada em um LED branco SMD, responsável pela iluminação da amostra e um detector formado por um conjunto de fotodiodos. A **Figura 2** a seguir apresenta uma fotografia do sensor TCS34725 (também conhecido como sensor RGB) destacando seus principais componentes e a **Figura 3** mostra um esquema representativo do funcionamento do sensor para medidas por reflectância.

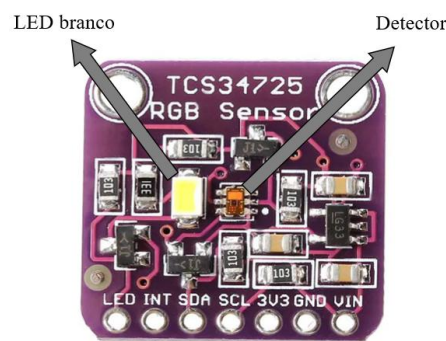


Figura 2. Foto do sensor TCS34725 indicando o posicionamento do detector e do LED.

Fonte: o autor

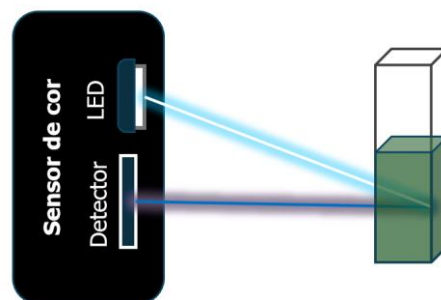


Figura 3. Esquema representativo do funcionamento dos sensores de cor.

Fonte: o autor

A luz emitida do LED incide sobre uma superfície de interesse, sólida, líquida ou gasosa, e é parcialmente refletida e retorna ao detector onde um conjunto de fotodiodos é o responsável por filtrar essa luz e converter os fótons recebidos em um sinal mensurável. Os fotodiodos presentes no detector são equipados com filtros ópticos em silício CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) padrão por meio de tecnologia de filtro de interferência nano-óptico. A **Figura 4** apresentada a seguir mostra um esquema da representação destes filtros.

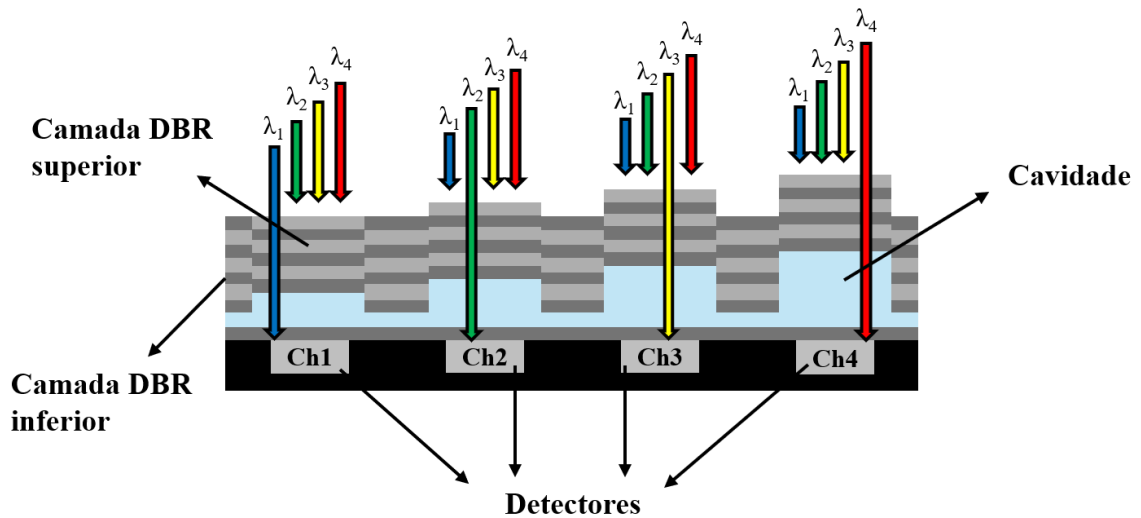


Figura 4. Esquema representativo do funcionamento dos filtros nos sensores de cor.

Fonte: o autor. Adaptado de: (Wang et al., 2013)

A camada DBR (*Distributed Bragg Reflector* do português: Refletor de Bragg Distribuído) empregada nos filtros de cor é constituída por uma sequência periódica de camadas dielétricas com índices de refração alternados, cujas espessuras ópticas são projetadas tipicamente como $\lambda/4$ para um comprimento de onda central de interesse. Essa configuração gera um empilhamento que promove interferência construtiva das ondas refletidas em cada interface, resultando em uma elevada refletividade dentro de uma banda espectral específica. Fora dessa banda, ocorre interferência destrutiva, permitindo alta transmitância. O espectro de reflexão e transmissão da DBR é controlado pelo contraste de índices de refração, pelo número de pares de camadas e pela precisão nanométrica das espessuras, possibilitando filtros com elevada seletividade espectral e transições abruptas. (Wang et al., 2013)

Os sensores de cor constituem dispositivos em sistemas embarcados contemporâneos, encontrando aplicação em diferentes áreas do cotidiano e das ciências. A integração desses sensores com microcontroladores demanda a consideração de quatro aspectos principais, a

saber: alimentação elétrica, programação, conexão física e lógica, e obtenção de dados. A compreensão articulada de cada um desses elementos permite não apenas o correto funcionamento do sistema, mas também a otimização do desempenho em contextos específicos de aplicação.

No que diz respeito à alimentação elétrica, os sensores de cor são projetados, para operar em baixas tensões, com valores usuais situados entre 3,3 V e 5 V. Essa característica possibilita sua compatibilidade direta com plataformas amplamente difundidas, como Arduino e ESP32. Além da tensão de alimentação, é imprescindível garantir a correta conexão ao terminal de aterramento (GND), responsável por fechar o circuito e assegurar a estabilidade operacional.

A etapa de programação está associada ao desenvolvimento do código executado no microcontrolador, que tem por finalidade inicializar o sensor, configurar seus parâmetros e interpretar os sinais coletados. Para tanto, diversas bibliotecas específicas são disponibilizadas pelo fabricante e pela comunidade acadêmica e industrial, as quais abstraem a complexidade da comunicação, simplificando o processo de implementação. Entre os parâmetros passíveis de configuração encontram-se o tempo de integração, o ganho (amplificação do sinal) e a corrente aplicada no LED (capacidade de iluminação).

Em relação à conexão, esta depende diretamente do protocolo de comunicação adotado pelo sensor. O protocolo I²C é frequentemente utilizado, necessitando apenas de duas linhas adicionais — dados (SDA) e clock (SCL) — além da alimentação elétrica. Em todos os casos, o correto mapeamento dos pinos constitui condições indispensáveis para a transmissão de dados.

Por fim, a obtenção e interpretação dos dados consistem na leitura dos valores brutos disponibilizados pelo sensor, os quais refletem a intensidade luminosa detectada em cada um dos canais de cor. Tal processamento permite a realização de comparações com padrões previamente definidos, possibilitando que o sistema embarcado execute tarefas de classificação, tomada de decisão ou envio das informações processadas a interfaces gráficas e bases de dados externas.

Utilizando-se a base de dados “*Web of Science*”, foi feita uma busca bibliográfica empregando como palavras-chaves, TCS34725, AS7262, AS7341 e AS7343 e AS7265x, . filtrando os resultados na categoria “*analytical chemistry*”. O gráfico a seguir (**Figura 5**), apresenta o número de publicações de trabalhos que utilizaram esses sensores na última década.

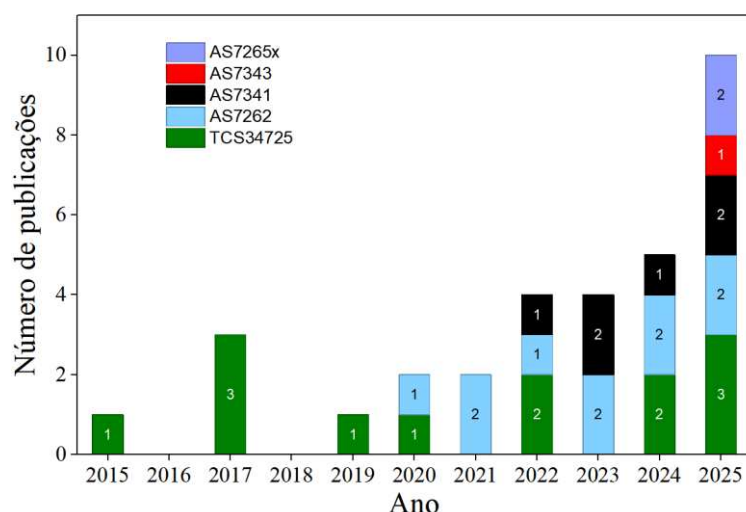


Figura 5. Evolução anual do número de publicações relacionadas aos sensores espectrais AS7343, AS7265x, AS7341, AS7262 e TCS34725, no período de 2015 a 2025.

O gráfico apresenta uma evolução no número de publicações científicas envolvendo os sensores de cor na área de química analítica ao longo da última década. Nos anos iniciais (2015 a 2019), os baixos volumes de trabalho, indicam o início da comercialização, de exploração e aplicação desses sensores e o primeiro trabalho, publicado em 2015, utilizou o sensor TCS34725 para determinação de Pb^{2+} através da mudança de cor de nanopartículas de ouro (De L. M. De Moraes et al., 2015). A partir de 2020, há um crescimento, possivelmente impulsionado por avanços na miniaturização e redução de custos, bem como pela integração facilitada com sistemas de análise baseados em microcontroladores e desenvolvimento de plataformas portáteis.

O pico observado em 2025, sugere que a área está em expansão e que novas metodologias e aplicações estão sendo exploradas. O crescimento nos últimos anos está relacionado ao aumento da demanda por soluções analíticas em tempo real, aplicáveis em áreas como controle ambiental (Grazioli; Abate; Dossi, 2025), segurança alimentar (Cadeado; Machado; Silva, 2025; Tonelli et al., 2025) e diagnósticos clínicos (Abdelfattah et al., 2025; Fatoni; Anggraeni; Rahmawati, 2025; Hussein et al., 2025). Além disso, o avanço das tecnologias IoT tem potencializado o interesse nesses sensores. Esses avanços indicam que a tendência é de ampliação do uso dessas ferramentas, consolidando-as como alternativas viáveis e inovadoras dentro da química analítica.

A **Figura 6** a seguir apresenta um esquema representativo de como estão dispostos os conjuntos de fotodiodos em cada um dos sensores. Ressalta-se que nos casos dos sensores

AS7341 e TCS34725 que possuem pares e trios de fotodiodos para cada canal específico esses são posicionados mais distantes uns dos outros para minimizar efeitos de diferentes ângulos na incidência da luz no detector.



Figura 6. Diagrama representativo da posição de cada um dos filtros nos sensores de cor

A **Figura 7** ilustra graficamente os comprimentos de onda da radiação eletromagnética selecionados por cada canal espectral dos sensores de cor, evidenciando as faixas espectrais efetivamente filtradas. Essa representação permite compreender a resposta espectral individual de cada canal, bem como a sobreposição entre as bandas, aspecto fundamental para a correta interpretação dos sinais, para o processo de calibração do sensor e para a avaliação da sua capacidade.

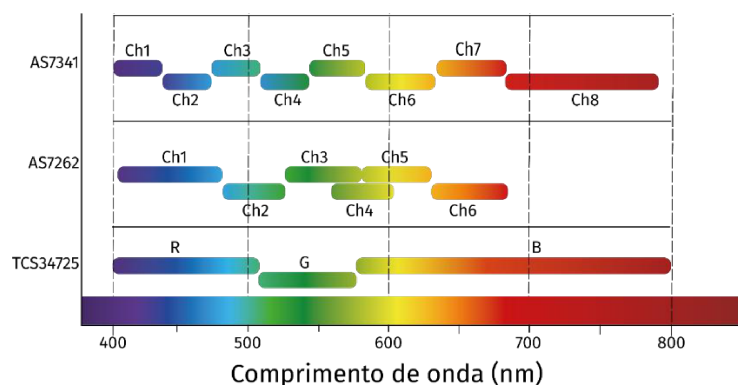


Figura 7. Esquema representativo das faixas de comprimento de onda de cada canal de cada um dos sensores

TCS34725

O sensor TCS34725 foi o primeiro dos sensores digitais de cor lançado comercialmente, incorporando uma matriz de fotodiodos organizada em 3×4 . Nessa configuração, cada fotodiodo é recoberto por um filtro óptico específico, responsável pelos canais vermelho (R),

verde (G), azul (B) e claro (C). Dessa forma, cada canal é composto por três fotodiodos, o que possibilita melhor média do sinal e redução do ruído aleatório.

O canal “*clear*” contribui para aumentar a sensibilidade em ambientes com pouca iluminação, enquanto o filtro integrado de bloqueio de infravermelho garante maior fidelidade das cores ao reduzir interferências desse tipo de radiação. A ampla adoção do TCS34725 na química analítica se deve principalmente à sua simplicidade, ao baixo custo e à facilidade de acesso em módulos de prototipagem largamente empregados.

A diversidade de aplicações descritas na literatura ressalta a importância deste sensor que tem sido explorado em áreas como: análises alimentícias (Cheng et al., 2024; Comejina; Kanna; Somnam, 2024; Singh et al., 2020), análises de água (De L. M. De Moraes et al., 2015; Heo et al., 2019; Singh et al., 2020), análises ambientais (Beyaz, 2017), análises bioquímicas (Abdelfattah et al., 2025; Cheng et al., 2024; Fatoni; Anggraeni; Rahmawati, 2025; Hussein et al., 2025; Rogge et al., 2017) e amostras gasosas (Greenawald et al., 2017).

No trabalho por (De Carvalho Oliveira et al., 2022), foi realizada uma discussão sobre a sobreposição das respostas efetivas do sensor RGB demonstrando assim uma limitação em seu uso em termos de possíveis interferentes. A partir disso, (Cadeado et al., 2022b), publicaram um trabalho demonstrando como a utilização de um LED verde, externo ao sensor, melhora a sensibilidade e a exatidão na determinação de nitrito em água, como alternativa instrumental para melhorar a resolução espectral, uma vez que a fonte de luz empregada possui emissão espectral em uma faixa menor do espectro eletromagnético.

AS7262

O AS7262 é um sensor de cor desenvolvido para realizar análises espectrais na região do visível. É composto por uma matriz de fotodiodos recoberta com seis filtros de interferência distintos, cada um correspondente a uma faixa espectral estreita, centralizada em 450, 500, 550, 570, 600 e 650 nm. Nessa disposição, cada canal conta com fotodiodos dedicados, o que assegura a detecção individual ao longo do espectro visível. A adoção de filtros de interferência garante alta seletividade espectral e estabilidade operacional ao longo do tempo, dispensando o uso de elementos ópticos adicionais, como rodas de filtros ou redes de difração.

A seleção de seis canais espectrais do sensor AS7262 constitui uma alternativa mais eficiente quando comparado ao sensor RGB, . A combinação entre portabilidade, robustez e

cobertura espectral torna esse sensor especialmente vantajoso para aplicações em dispositivos analíticos compactos e de baixo custo.

A partir de diferentes trabalhos, verifica-se que o sensor tem sido empregado em múltiplas finalidades como por exemplo: análise alimentícias e ambientais (Cano et al., 2024; Lopin et al., 2025; Machado et al., 2024; Srivastava; Vani; Sadistap, 2021), análises de corantes (Grazioli et al., 2022), análises biológicas (S et al., 2024; Yudhana et al., 2023), análises de água (Liao et al., 2020; Srivastava; Sharma, 2021) e análise de amostras sintéticas de fosfato (Grazioli; Abate; Dossi, 2025).

AS7341

O AS7341 é um sensor de cor multicanal projetado para medições que abrangem desde a região do visível até o infravermelho próximo (NIR), cobrindo comprimentos de onda entre aproximadamente 400 e 940 nm. Seu detector é composto por uma matriz de fotodiodos 4×4 , que inclui dois canais “clear” e um canal específico para NIR. Nos canais do visível, cada faixa espectral é monitorada por dois fotodiodos, o que proporciona maior sensibilidade e estabilidade do sinal. Cada fotodiodo está associado a um filtro de interferência exclusivo, possibilitando a detecção simultânea de múltiplos pontos espectrais sem a necessidade de elementos ópticos externos.

No contexto da química analítica, o AS7341 se destaca por permitir o acompanhamento detalhado de bandas de absorção em amostras complexas, sendo útil em ensaios colorimétricos, indicadores à base de corantes e medições em múltiplos comprimentos de onda, nos quais a aquisição de diversos pontos espectrais eleva a confiabilidade dos resultados. A combinação entre tamanho reduzido, robustez e ampla cobertura espectral torna o dispositivo especialmente adequado para sistemas portáteis, de baixo custo e com alta capacidade de análise.

Estudos recentes evidenciam que o AS7341 apresenta diferentes possibilidades de aplicações sendo reportado em trabalhos de: análises alimentícias (Cadeado; Machado; Silva, 2025; Cadeado; Silva, 2023; Machado et al., 2024; Tonelli et al., 2025) e ensaios biológicos (Watson et al., 2023; Yu et al., 2023).

A **Tabela 1** a seguir apresenta uma comparação das principais características dos sensores AS7341, AS7262 e TCS34725.

Tabela 1. Tabela comparativa de faixa de resposta espectral, canais e comprimentos de onda, tempo de integração, ganho, corrente do LED e dimensões dos sensores AS7341, AS7262, TCS34725.

Característica	AS7341	AS7262	TCS34725
Faixa de resposta espectral (nm)	350 - 1000	430 - 670	400 - 700
Canais e comprimentos de onda (nm)	8 canais:		
	F1: 415	6 canais:	
	F2: 445	F1: 415	3 canais:
	F3: 480	F2: 445	Vermelho
	F4: 515	F3: 480	Verde
	F5: 555	F4: 515	Azul
	F6: 590	F5: 555	Clear
	F7: 630	F6: 590	
	F8: 680	Clear	
	Clear		
Tempo de integração	Programável, de 2.78 μ s a > 500 ms	de 2.8 ms a 714 ms	de 2.4 ms a 614 ms
Ganho	12 opções:		
	0.5x, 1x, 2x, 4x, 8x, 16x, 32x, 64x, 128x, 256x, 512x	4 opções:	4 opções:
		1x, 3.7x, 16x, 64x	1x, 4x, 16x, 60x
Corrente do LED	Driver integrado programável de 4 mA a 258 mA (com variação de 2 mA)	Driver integrado programável (12.5, 25, 50, 100 mA)	Não aplicável

Dimensões	3.0 mm x 2.0 mm x 1.0	4.5 mm x 2.5 mm	2.0 mm x 2.4 mm x 0.65
(Altura x largura x profundidade)	mm		mm

Com base na **Tabela 1** apresentada, observa-se que os sensores AS7341, AS7262 e TCS34725 apresentam diferenças quanto à faixa espectral (**Figura 7**) e ao número de canais disponíveis. O AS7341 é o mais abrangente, cobrindo de 415 a 680 nm, com 8 canais distintos e elevada versatilidade em medições espectrais. Já o AS7262 limita-se ao intervalo de 430 a 670 nm e conta com apenas 6 canais, voltados principalmente à região visível. Em contrapartida, o TCS34725 apresenta arquitetura mais simplificada, com três canais correspondentes às cores (vermelho, verde e azul), além do canal *clear*, cobrindo o espectro entre 400 e 700 nm.

Além da faixa de detecção, outros parâmetros técnicos distinguem os sensores. O AS7341 oferece maior flexibilidade de operação, com tempo de integração programáveis de 2,78 μ s a mais de 500 ms, além de 12 opções de ganho e corrente do LED ajustável. O AS7262 e o TCS34725, por sua vez, apresentam menor número de opções de ganho e faixas de integração mais restritas. Dessa forma, o sensor AS7341 se sobressai em aplicações que demandam maior resolução espectral, enquanto o AS7262 e o TCS34725 são mais indicados para sistemas que requerem simplicidade e baixo custo.

Apesar de o sensor TCS34725 já ter sido objeto de investigações voltadas à análise quantitativa de soluções coloridas, nas quais se evidenciaram suas capacidades de detecção espectral nos canais RGB e sua aplicabilidade em diferentes contextos analíticos (De Carvalho Oliveira et al., 2022), observa-se que avaliações análogas envolvendo os sensores AS7262 e AS7341 permanecem notoriamente escassas. Essa lacuna na literatura científica revela a necessidade de aprofundar a exploração sistemática e rigorosa desses dispositivos pertencentes à família AS, de modo a elucidar seu real potencial na implementação de métodos colorimétricos e, conseqüentemente, ampliar o escopo de suas aplicações em cenários de interesse científico e tecnológico.

2.2.Objetivos

O objetivo deste capítulo é avaliar e comparar o desempenho analítico dos sensores digitais de cor TCS34725, AS7262 e AS7341 em medidas espectrofotométricas por reflectância em solução aquosa, visando sua aplicação em instrumentação analítica portátil.

Objetivos específicos

- (i) investigar a resposta espectral dos sensores em diferentes regiões do espectro visível;
- (ii) avaliar parâmetros analíticos fundamentais, incluindo linearidade, sensibilidade, limites de detecção e precisão;
- (iii) analisar o efeito da resolução espectral e da sobreposição de bandas na qualidade das medidas; e
- (iv) comparar os resultados obtidos com aqueles fornecidos por um espectrofotômetro UV–Vis convencional, identificando o sensor mais adequado para aplicações analíticas quantitativas.

2.3. Materiais e métodos

2.3.1. Instrumentação

Para a avaliação e utilização dos três sensores para medidas em soluções, três suportes para encaixe de cada um dos sensores juntamente com espaço para encaixe de uma cubeta de 1 cm de caminho óptico foram desenhados (Autodesk Inventor Professional 2020®) e impressos em impressora 3D (GTMAX Core A2V2). Estes suportes estão apresentados a seguir na **Figura 8**. Na fabricação de tais dispositivos, utilizou-se filamento do tipo ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) de cor branca.

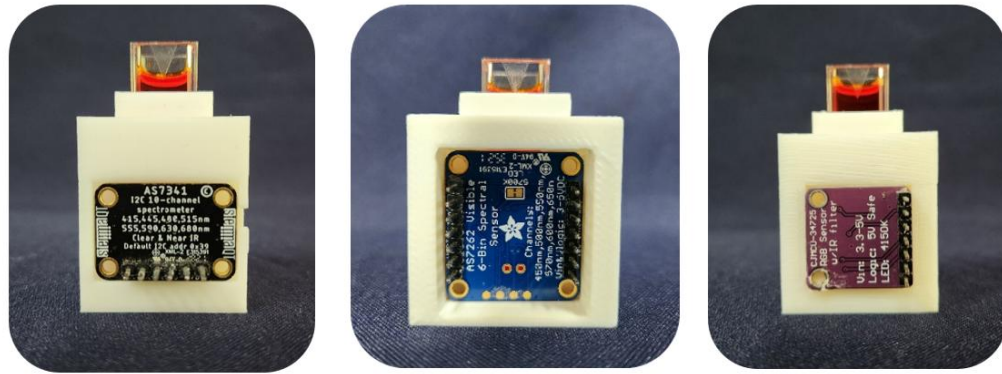
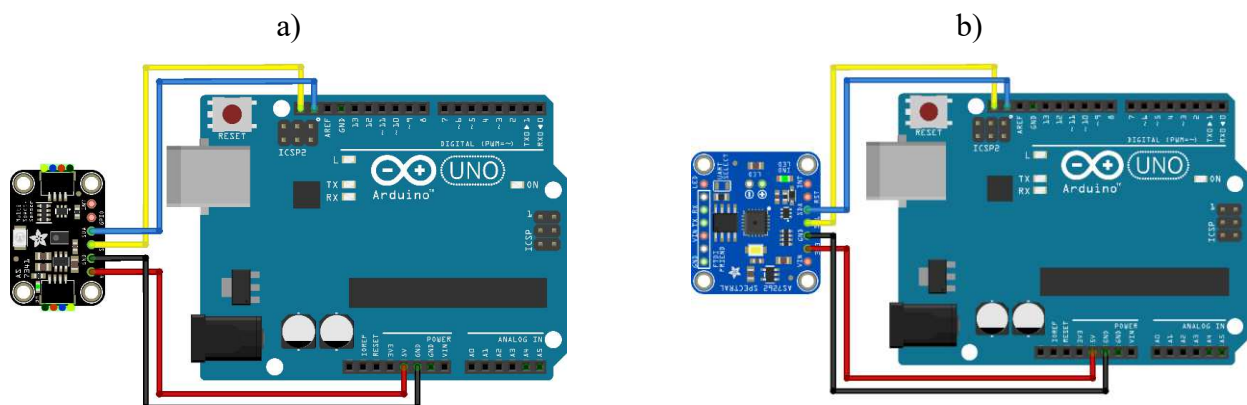


Figura 8. Foto dos dispositivos construídos a partir da impressão 3D do suporte para os sensores AS7341, AS7262 e TCS34725

A conexão elétrica, alimentação e programação dos sensores foram realizadas utilizando-se um microcontrolador Arduino Uno. A **Figura 9** a seguir representa o esquema de ligação elétrica destes sensores com o microcontrolador.



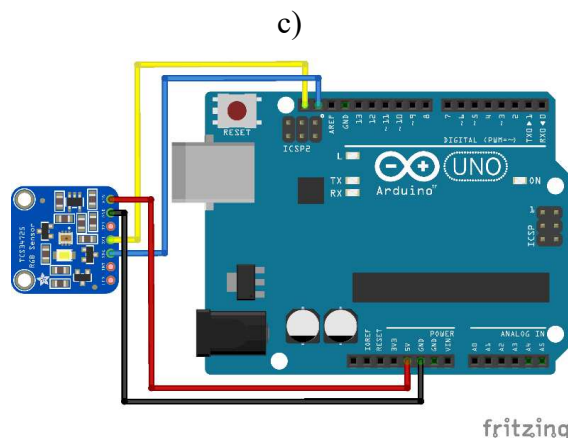


Figura 9. Esquemas representativos da ligação realizada entre os sensores de cor e o microcontrolador Arduino Uno. a) AS7341; b) AS7262; c) TCS34725

Os espectros de emissão dos LEDs integrados aos sensores de cor e os espectros de absorção dos corantes foram obtidos utilizando um espectrofotômetro CCD (*charged-coupled device*) (USB200, Ocean Optics, Dunedin, FL, USA). A resposta espectral dos sensores foi avaliada empregando um espectrofotômetro UV-Vis FEMTO 600s. Para essa finalidade, o detector de cada sensor foi posicionado diretamente no caminho óptico do feixe de radiação monocromática do espectrofotômetro, na posição correspondente ao compartimento da cubeta, conforme procedimentos previamente descritos na literatura (De Carvalho Oliveira et al., 2022)(De Carvalho Oliveira et al., 2022). As medições foram realizadas na ausência de amostra, registrando-se a resposta dos canais dos sensores em função do comprimento de onda.

Reagentes e Soluções

Todos os solventes e reagentes utilizados possuem pureza analítica e foram preparados utilizando-se água ultrapura (18,2 MΩ cm, Milli-Q, Brasil). Soluções padrão de azul indigo (Sigma Aldrich, Alemanha), amarelo tartrazina (AT) e vermelho ponceau 4R (ambos Merck, Alemanha) (20,0 mmol L⁻¹) foram preparadas dissolvendo quantidades apropriadas dos corantes em água. Todas as soluções utilizadas para obtenção das curvas de calibração foram preparadas diariamente pela devida diluição das soluções estoque.

Para a determinação colorimétrica de amarelo crepúsculo (AC), preparou-se uma solução estoque do corante (Merck, Alemanha) 20 mmol L⁻¹ a partir da dissolução do sólido em quantidade apropriada de água. Todas as amostras alimentícias analisadas foram obtidas no comércio local (Uberlândia, Minas Gerais, Brasil) e preparadas de acordo com a especificação contida no rótulo de cada produto

Uma amostra de isotônico sintético foi preparada de acordo com um procedimento descrito na literatura (De Rosso; Mercadante, 2007)(De Rosso; Mercadante, 2007) que consistia das seguintes quantidades de reagentes: Sacarose (10,0 g), frutose (1,375 g) glicose (1,375 g), ácido cítrico (0,75 g), citrato de sódio (0,035 g), cloreto de sódio (0,125 g) e fosfato monobásico de potássio (0,10 g) em 125 mL de água deionizada. Quantidades apropriadas do corante foram adicionadas para realizar o teste de recuperação.

2.3.2. Metodologia

O procedimento experimental da avaliação sistemática do desempenho analítico dos diferentes sensores digitais compreendeu etapas de caracterização espectral, definição das condições instrumentais, aquisição dos sinais analíticos, construção de curvas de calibração e comparação dos resultados obtidos com aqueles fornecidos por um espectrofotômetro UV–Vis convencional.

Inicialmente, os sensores de cor TCS34725, AS7262 e AS7341 foram integrados a um microcontrolador Arduino Uno, utilizando comunicação digital via protocolo I²C. A leitura dos sinais foi realizada por meio de rotinas desenvolvidas em ambiente Arduino IDE, responsáveis pela inicialização dos sensores, configuração dos parâmetros operacionais (tempo de integração, ganho e corrente aplicada ao LED) e aquisição dos valores brutos correspondentes a cada canal espectral disponível. Para todos os experimentos, os sensores foram posicionados em suportes confeccionados por impressão 3D, garantindo reprodutibilidade, controle do ângulo de incidência da radiação e minimização da interferência da luz ambiente.

A caracterização espectral dos sensores foi conduzida a partir da determinação da resposta espectral individual de cada canal, considerando-se a resposta relativa em função do comprimento de onda. Para tanto, utilizou-se de dados experimentais obtidos utilizando a fonte de luz monocromática de um espectrofotômetro de bancada.

Na etapa seguinte, procedeu-se à otimização dos parâmetros instrumentais para cada sensor, com o objetivo de maximizar a razão sinal/ruído e evitar a saturação dos detectores. Foram avaliadas diferentes combinações de corrente aplicada ao LED, ganho e tempo de integração. A seleção dos parâmetros ótimos foi baseada na linearidade do sinal, na estabilidade das leituras e na repetibilidade das medições, sendo adotadas, para cada canal, as condições que resultaram em maior sinal sem atingir a saturação.

Para a análise dos corantes, as medições foram realizadas por reflectância em solução, utilizando-se um suporte fabricado em impressora 3D, no qual a luz emitida pelo LED incidia sobre a amostra e a luz refletida era quantificada pelo detector do sensor. Para cada concentração, foram realizadas leituras em triplicata, sendo os valores médios utilizados para fins de calibração.

As curvas de calibração foram construídas a partir da relação entre o sinal obtido em cada canal espectral e a concentração do analito de interesse, empregando-se o método dos

mínimos quadrados para ajuste linear. A escolha do canal analítico foi realizada com base na maior correlação entre o espectro de absorção do corante e a resposta espectral efetiva do sensor, visando maximizar a seletividade e minimizar interferências espectrais. Os parâmetros analíticos, incluindo coeficiente de correlação, limite de detecção, limite de quantificação e desvio padrão relativo, foram determinados de acordo com recomendações da IUPAC.

Para averiguar a exatidão, os resultados obtidos com os sensores de cor foram comparados com aqueles fornecidos por um espectrofotômetro UV–Vis comercial, utilizando-se as mesmas soluções padrão e condições analíticas equivalentes.

2.4. Resultados e discussões

2.4.1. Resposta efetiva dos sensores

A avaliação da resposta espectral efetiva dos sensores digitais multicanais foi conduzida com o objetivo de compreender como cada dispositivo responde à radiação incidente ao longo da região do visível, considerando suas características construtivas, como o número de canais, a largura espectral e a posição central dos filtros. Diferentemente de espectrofotômetros convencionais, nos quais a resposta é contínua em função do comprimento de onda, esses sensores fornecem sinais discretos associados a bandas espectrais pré-definidas, tornando essencial a caracterização experimental de sua resposta frente a uma fonte de radiação controlada.

Nesse contexto, a irradiação direta dos sensores com radiação monocromática proveniente de um espectrofotômetro UV–Vis permitiu mapear a resposta relativa de cada canal em função do comprimento de onda, fornecendo uma estimativa da resolução espectral efetiva e do grau de sobreposição entre os canais. Experimentos semelhantes já foram reportados na literatura (De Carvalho Oliveira et al., 2022; Iqbal; Eriksson, 2013). Esperava-se que sensores com maior número de canais e filtros espectrais mais estreitos apresentassem melhor discriminação espectral, refletindo-se em respostas mais seletivas e em maior capacidade de resolver sistemas com bandas de absorção próximas ou parcialmente sobrepostas.

Essa abordagem experimental permitiu, portanto, estabelecer uma base comparativa entre os sensores avaliados, auxiliando na interpretação dos resultados obtidos nas análises colorimétricas subsequentes e na seleção do sensor mais adequado para aplicações analíticas em diferentes regiões do espectro visível.

Desta forma, realizou-se um estudo para obter as características das respostas espectrais de cada um dos sensores, pois, tais respostas, são essenciais para otimizar o uso de cada um dos sensores. Neste estudo, utilizou-se a fonte de radiação monocromática proveniente de espectrofotômetro comercial (Femto 600s) para obter as respostas espectrais de cada sensor individualmente na faixa entre 400 e 700 nm com incrementos de 1 nm. Durante todo o experimento, o LED branco, nativo de cada um dos sensores, foi mantido desligado. Os resultados obtidos estão apresentados na **Figura 10**.

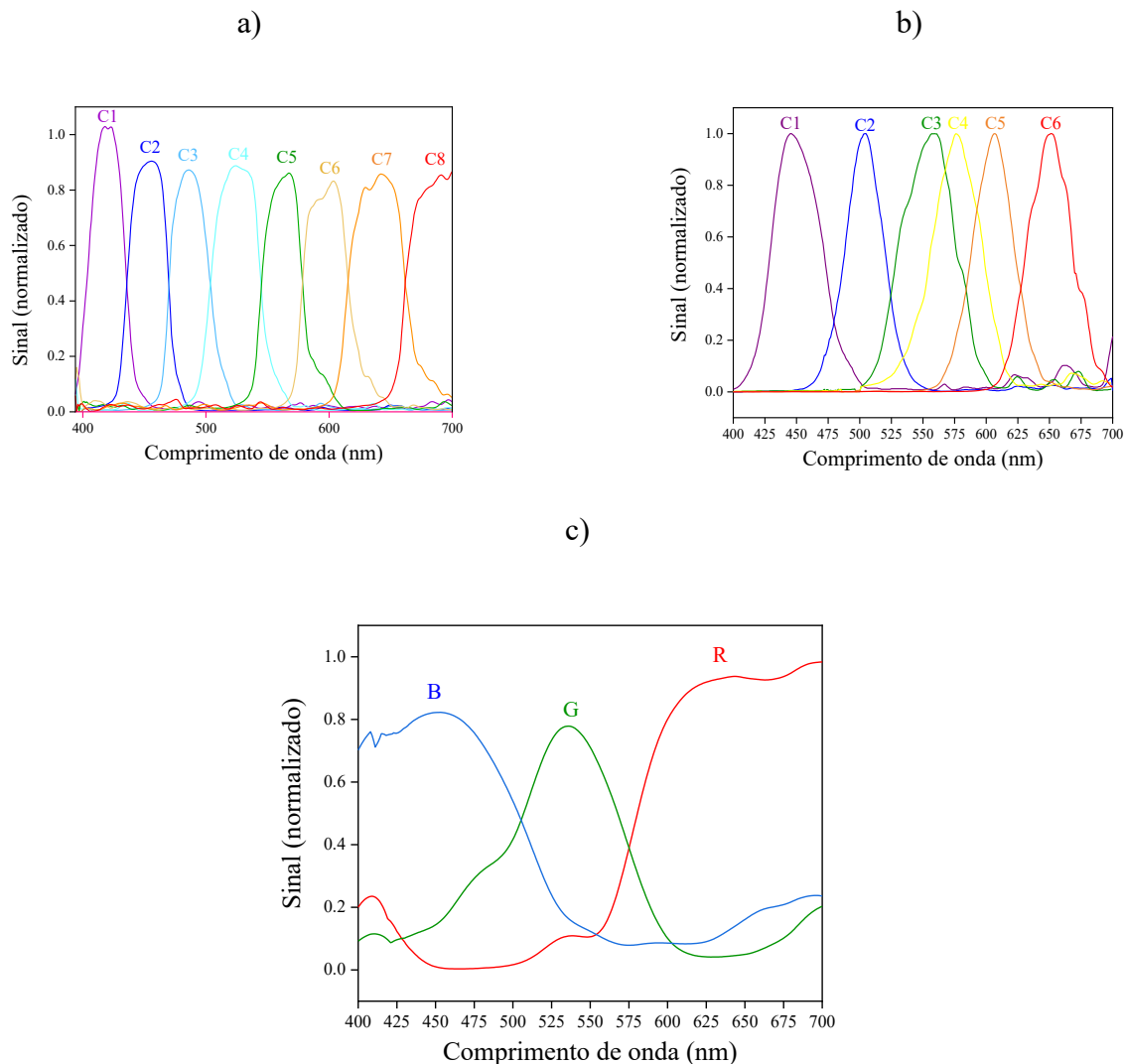


Figura 10. Resposta espectral dos sensores: sinal obtido, para cada canal, de 400 à 700 nm com incrementos de 1 nm. a) AS7341; b) AS7262; c) TCS34725

Entretanto, o funcionamento do sensor baseia-se na interação conjunta entre a radiação emitida pela fonte luminosa integrada (LED) e a capacidade do detector em registrar a luz refletida pela amostra. Dessa forma, a simples resposta espectral do detector não representa, isoladamente, o comportamento real do sistema durante as medições. Sendo assim, foi determinada a resposta espectral efetiva de cada sensor, a partir da multiplicação, ponto a ponto, da resposta espectral de cada canal de detecção pelo espectro de emissão do LED branco integrado, apresentado na **Figura 11**.

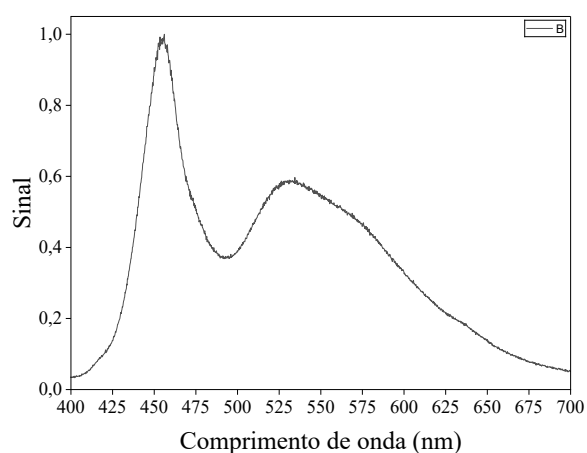
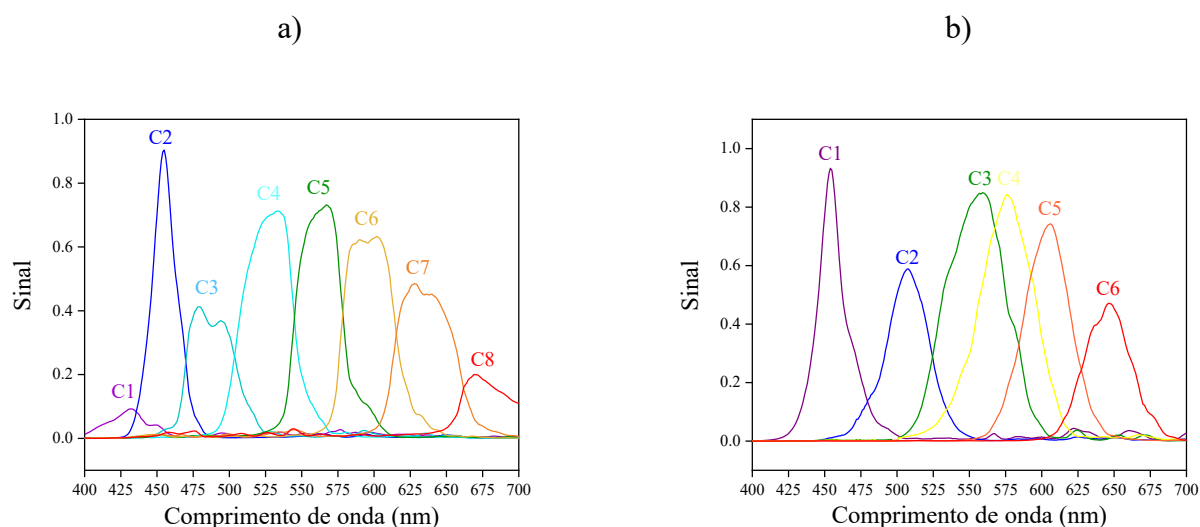


Figura 11. Espectro de emissão do LED branco de alto brilho presente nos sensores de cor

Por exemplo, na **Figura 10 a)** tem-se que o valor normalizado do sinal analítico do canal 1 no comprimento de onda de 410 nm é de aproximadamente 0,86. Esse valor dá a entender que o canal 1 é bastante sensível. Porém, analisando-se o gráfico apresentado na **Figura 11**, tem-se que o sinal normalizado da emissão do LED branco em 410 nm é de aproximadamente 0,05, o que demonstra ser uma iluminação baixa nesse comprimento de onda. Sendo assim, faz-se necessário multiplicar os dois valores para a obtenção da resposta efetiva do canal 1 em 410 nm: Resposta efetiva $\rightarrow 0,86 * 0,05 = 0,043$.

Dessa forma, combinou-se a capacidade de iluminação do sensor frente à capacidade de detecção da luz refletida. Os resultados de respostas espectrais efetivas estão apresentados na **Figura 12**. Essa combinação apresenta um resultado mais confiável em relação à sensibilidade dos sensores para cada comprimento de onda.



c)

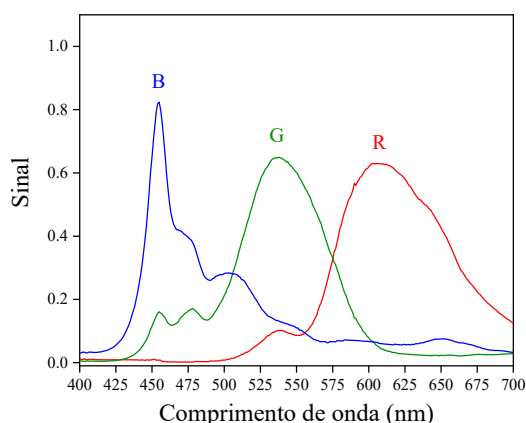


Figura 12. Resposta efetiva dos sensores: Resposta obtida a partir da multiplicação do sinal da resposta espectral pelo sinal obtido do espectro de emissão dos LED's. a) AS7341; b) AS7262; c) TCS34725

O AS7341 apresenta um conjunto de múltiplos canais espectrais relativamente estreitos em termos de largura de banda e bem distribuídos ao longo da região do visível, com sobreposição moderada entre bandas adjacentes. As curvas evidenciam picos bem definidos, cobrindo aproximadamente de 400 a 700 nm, o que confere a esse sensor uma capacidade comparável a um espectrofotômetro. Essa característica favorece aplicações que demandam maior seletividade espectral e melhor discriminação de espécies com bandas de absorção próximas, ainda que à custa de maior complexidade de tratamento de dados e calibração multivariada.

O AS7262, por sua vez, apresenta seis canais espectrais no visível, com larguras de banda mais amplas e sobreposição mais pronunciada quando comparado ao AS7341. As respostas efetivas indicam picos centrados em regiões estratégicas do espectro, permitindo uma amostragem menos seletiva, porém ainda informativa. Esse sensor se posiciona como uma solução intermediária, oferecendo um equilíbrio entre simplicidade instrumental e capacidade analítica, sendo adequado para métodos colorimétricos e semiquantitativos, especialmente quando associado a modelos quimiométricos.

Em contraste, o TCS34725 adota uma abordagem distinta, baseada em três canais largos correspondentes às componentes RGB, além de um canal clear. As respostas espectrais efetivas mostram bandas extensas e fortemente sobrepostas, cobrindo grandes regiões do espectro visível. Essa configuração limita a seletividade espectral, tornando o sensor mais adequado para variações drásticas de cor. Consequentemente, sua aplicação é mais adequada para análises

colorimétricas globais, controle visual de qualidade e detecção de variações macroscópicas, sendo menos indicado para sistemas analíticos que exigem discriminação espectral fina.

2.4.2. Sensores AS7343 e AS7265x

Os sensores espectrais AS7343 e AS7265x representam uma nova geração de dispositivos optoeletrônicos desenvolvidos para ampliar a capacidade analítica de sistemas miniaturizados, aproximando-os conceitualmente de instrumentos espectrofotométricos convencionais. Ambos foram projetados para fornecer informações espectrais mais ricas do que sensores colorimétricos, incorporando múltiplos canais distribuídos ao longo de uma ampla faixa de comprimentos de onda. Em termos de alimentação, programação e obtenção de dados, as condições são análogas às já discutidas na seção 2.3.1 deste trabalho.

O AS7343, apresentado na **Figura 13**, é um sensor multiespectral que se destaca pela elevada quantidade de canais na região do visível, com extensão para o infravermelho próximo. Sua arquitetura integra filtros de interferência depositados diretamente sobre o fotodetector, resultando em bandas espectrais relativamente estreitas e bem definidas. Essa configuração permite uma amostragem espectral mais refinada quando comparada a sensores RGB ou multicanais de menor resolução, favorecendo a discriminação de espécies químicas com respostas ópticas parcialmente sobrepostas. Além disso, a presença de canais no NIR amplia o escopo de aplicação do sensor, possibilitando a exploração de informações adicionais relacionadas tanto a propriedades ópticas da matriz quanto a interações físico-químicas que não são acessíveis exclusivamente no visível.



Figura 13. Imagem do sensor de cor AS7343

Para a determinação da resposta espectral efetiva deste sensor, foram adotados os mesmos procedimentos experimentais e metodológicos descritos na Seção 2.4.1 deste trabalho.

A aplicação dessa abordagem permitiu a caracterização detalhada do comportamento espectral do sensor, cujos resultados são apresentados e discutidos a seguir nas **Figuras 14, 15 e 16**.

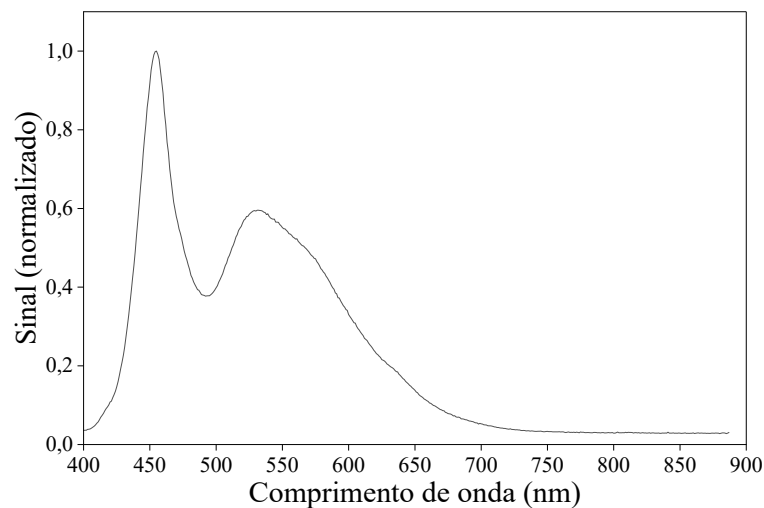


Figura 14. Espectro de emissão do LED do sensor AS7343

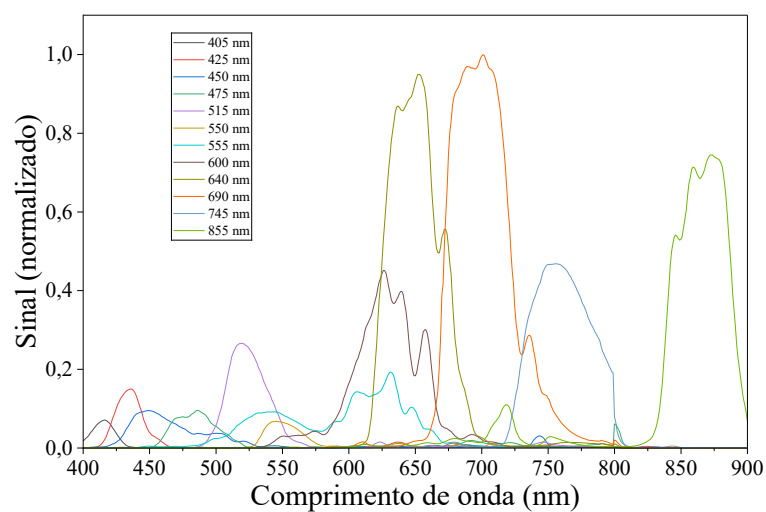


Figura 15. Resposta espectral do sensor AS7343

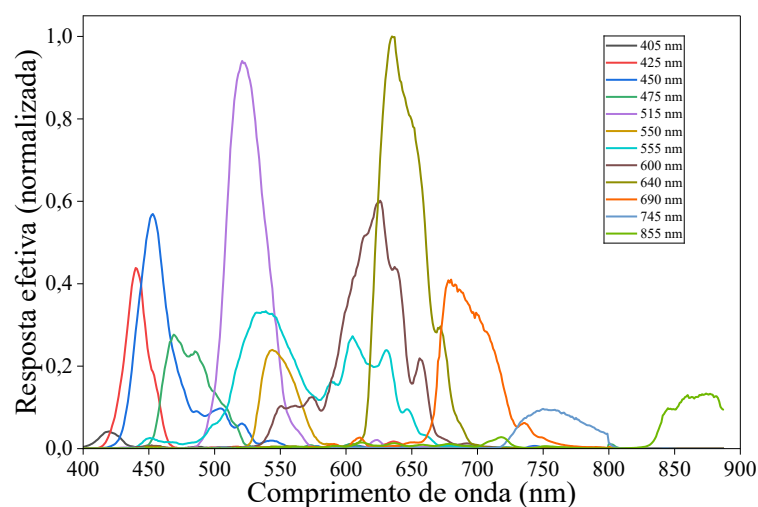


Figura 16. Resposta espectral efetiva do sensor AS7343

O sensor AS7343 amplia o conceito do AS7341 ao incorporar um número maior de canais e estender a resposta espectral para além do visível, alcançando a região do infravermelho próximo. As curvas apresentadas na **Figura 16** evidenciam picos relativamente estreitos (425, 450 e 515 nm) e bem definidos, distribuídos desde o 400 nm até comprimentos de onda superiores a 850 nm. Apesar disso, o sensor apresenta também muita sobreposição de canais, alguns canais ruidosos como o 555 nm.

AS7265x

O AS7265x, por sua vez, constitui um sistema espectral modular composto por três sensores integrados, cobrindo de forma combinada as regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas. Essa configuração resulta em um conjunto de canais discretos distribuídos ao longo de uma faixa espectral significativamente mais ampla, conferindo ao dispositivo um caráter quase espectrométrico.

As bandas espectrais do AS7265x são projetadas para oferecer seletividade adequada em diferentes regiões do espectro, permitindo a obtenção de assinaturas ópticas complexas, devido à presença de 3 diferentes LED's, (de acordo com o fabricante: um LED UV, um LED visível e um LED infravermelho) e a aplicação de abordagens multivariadas avançadas para análise de dados.

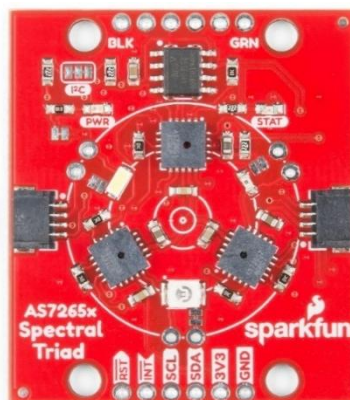


Figura 17. Imagem do sensor de cor AS7265x

A caracterização da resposta espectral do sensor AS7265x foi conduzida a partir de uma abordagem experimental análoga à empregada anteriormente neste trabalho, assegurando a consistência metodológica das análises. A partir dessa estratégia, foi possível avaliar o desempenho espectral do sensor em suas diferentes bandas de detecção, sendo os resultados obtidos apresentados na sequência nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

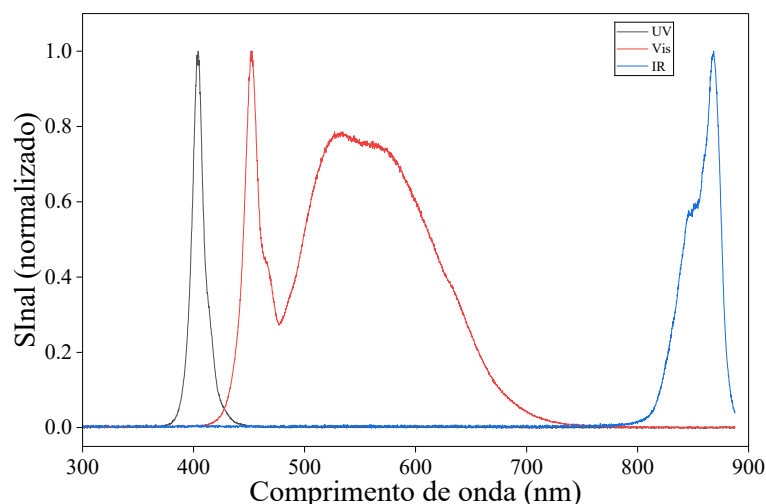


Figura 18. Espectros de emissão dos 3 LED's presente no sensor AS7265x

Considerando que o sistema de iluminação empregado é composto por três LEDs com emissões espectrais distintas, a caracterização da fonte luminosa foi realizada a partir da construção de um espectro de iluminação total. Esse espectro foi obtido pelo somatório das distribuições espectrais individuais de cada LED, resultando em uma representação mais fiel da radiação efetivamente incidente sobre a amostra durante as medições. Tal abordagem permite avaliar de forma integrada a cobertura espectral do sistema de iluminação, bem como

identificar possíveis lacunas ou sobreposições entre as bandas emitidas, aspectos relevantes para a interpretação da resposta do sensor e para o processo de calibração do dispositivo.

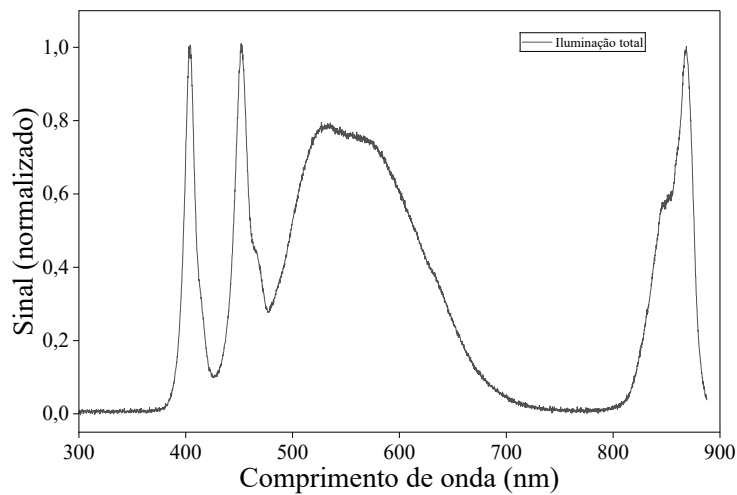


Figura 19. Espectro resultante da somatória da iluminação dos 3 LED's do sensor AS7265x

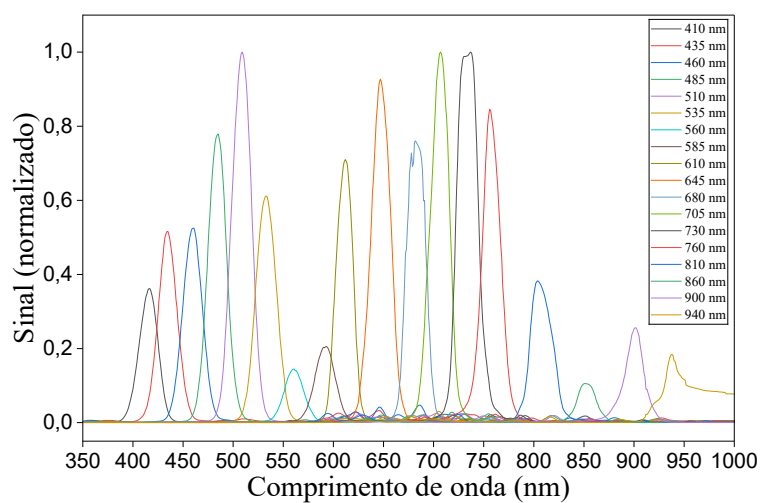


Figura 20. Resposta espectral do sensor AS7265x

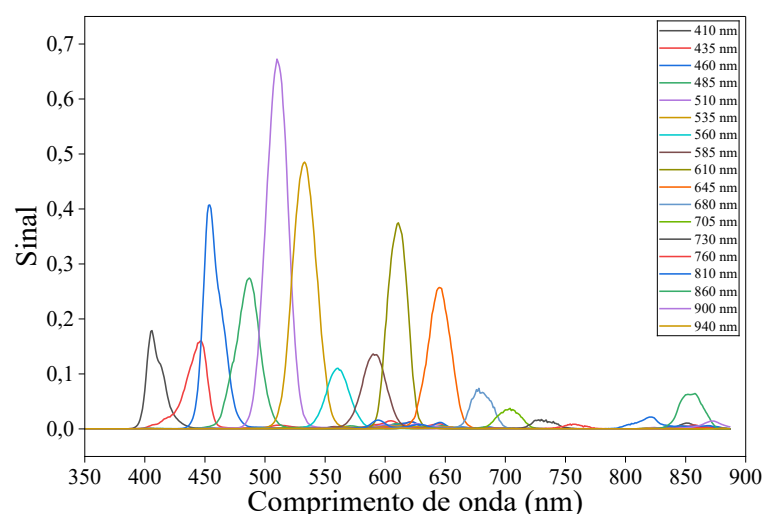


Figura 21. Resposta efetiva do sensor AS7265x considerando os três LED's e os três detectores

O AS7265x destaca-se como o sensor com maior abrangência espectral entre os avaliados, cobrindo de forma descontínua, porém extensa, as regiões do visível, infravermelho próximo. As respostas efetivas mostram canais relativamente estreitos ao longo de uma ampla faixa espectral, o que aproxima esse dispositivo de um espectrômetro multicanal. Essa configuração permite elevada flexibilidade analítica e maior potencial para análises multicomponentes e modelagens quimiométricas robustas, embora envolva maior complexidade de integração e processamento de sinais.

Entretanto, a utilização simultânea de três LED's e três detectores espectrais impõe desafios adicionais aos procedimentos de ajuste e modelagem do sensor. A combinação de múltiplas fontes de emissão com múltiplos canais de detecção aumenta a complexidade do sistema, podendo dificultar o estabelecimento de encaixes precisos e a separação das contribuições individuais de cada LED nos sinais detectados. Esse cenário exige maior cuidado na definição dos parâmetros de calibração e na escolha dos modelos de ajuste, de modo a minimizar correlações indesejadas entre canais e assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos.

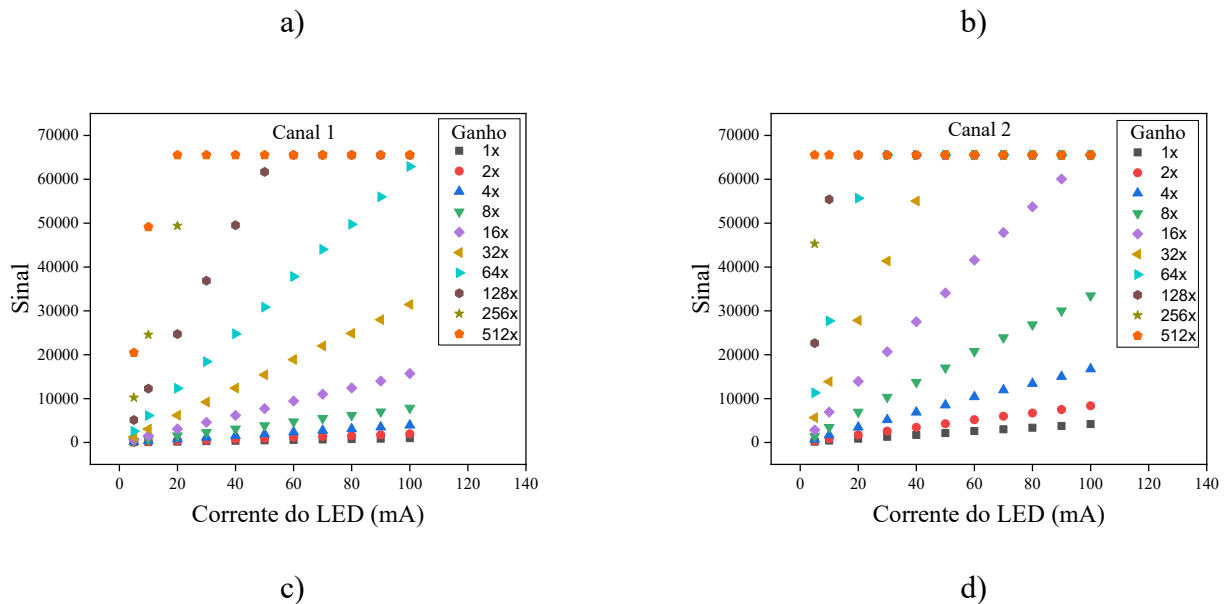
Cabe ressaltar que a inserção de resultados referentes aos sensores AS7343 e AS7265x se mantém restrita à essa seção do texto pois começaram a ser comercializados apenas recentemente e não estavam disponíveis no desenvolvimento do trabalho desenvolvido neste Capítulo II.

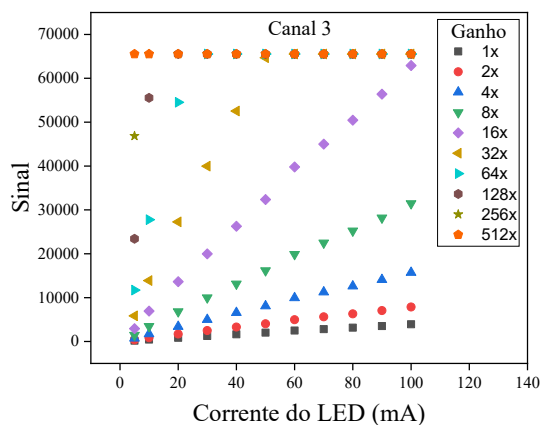
2.4.3. Otimização dos parâmetros para análises em soluções

Dentro das bibliotecas disponibilizadas pelo fabricante, cada um dos três sensores avaliados neste trabalho permite selecionar determinados valores para alguns parâmetros. Os sensores AS7341 e AS7262 permitem que sejam alterados valores de ganho e valores de corrente do LED enquanto o sensor TCS34725 permite alterar valores de ganho e tempo de integração. Sendo assim, realizou-se um estudo para a otimização de cada um dos sensores.

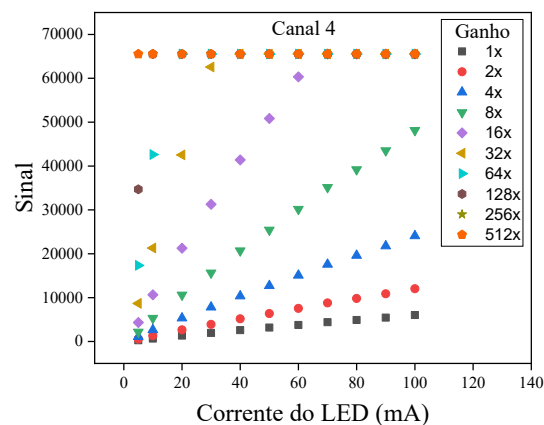
Para este estudo, utilizou-se o suporte construído juntamente com uma cubeta de plástico com água e avaliou-se os sinais obtidos em cada uma das condições estabelecidas. Todos os sensores possuem conversores analógicos-digitaes de 16 bits, o que significa que os sinais podem variar numa escala que vai de 0 a 65535.

O sensor AS7341 permite valores de 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 e 512x de ganho e a corrente aplicada no LED pode variar de 5 a 100 mA em incrementos de 1 mA. Sendo assim, construiu-se gráficos dos valores de sinal x corrente do LED em função dos diferentes ganhos para cada um dos 8 canais do sensor. A **Figura 22** a seguir apresenta o gráfico obtido para cada um dos 8 canais.

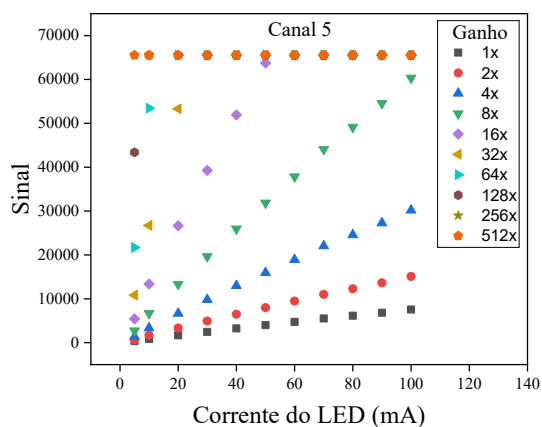




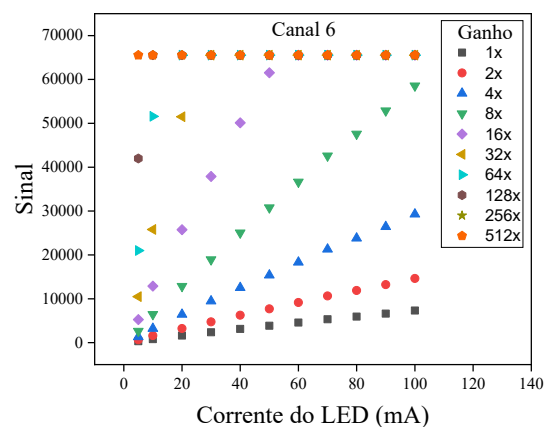
e)



f)



g)



h)

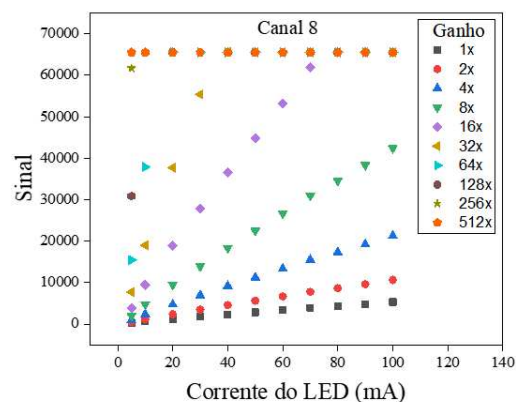
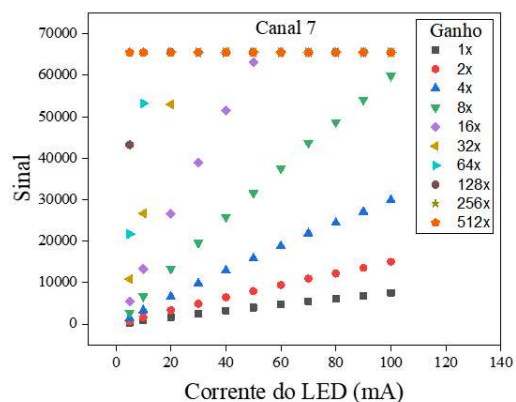
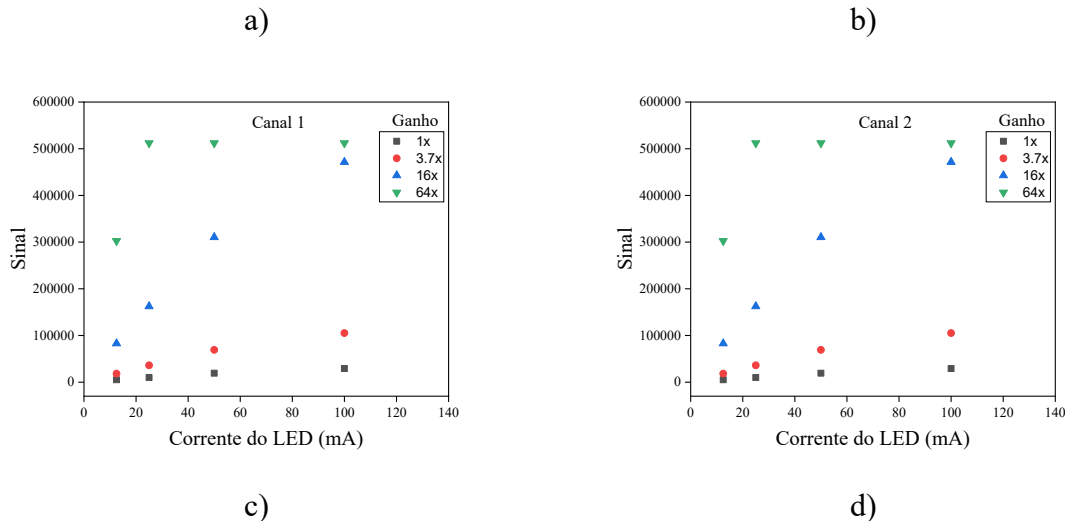


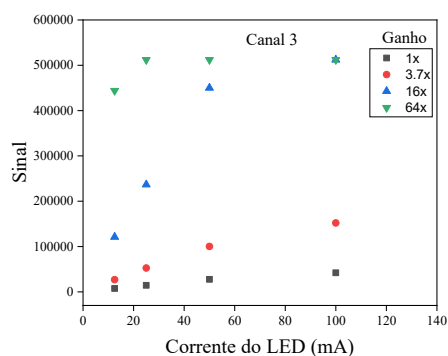
Figura 22. Sinais obtidos em função da corrente aplicada ao LED (5–100 mA) em diferentes ganhos (1 a 512X) para otimização e seleção dos parâmetros para cada um dos canais disponíveis no sensor

AS7341 a) Canal 1 = 415 nm, b) Canal 2 = 445 nm, c) Canal 3 = 480 nm, d) Canal 4 = 515 nm, e) Canal 5 = 555 nm, f) Canal 6 = 590 nm, g) Canal 7 = 630 nm e h) Canal 8 = 680 nm

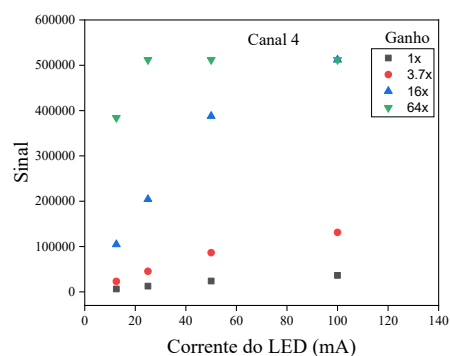
A partir da análise do gráfico presente na **Figura 22** (a), pode-se definir que a condição otimizada para o Canal 1 é de ganho de 128x e 50 mA de corrente aplicada no LED, pois é nesta condição que o sensor obtém o maior sinal possível sem que ocorra a saturação do sinal (65535). A condição de 64x e 100 mA foi desconsiderada por apresentar valor próximo ao da saturação o que poderia acarretar medidas saturadas no caso de alguma flutuação das medidas. O alto valor de ganho vai de encontro com o apresentado na **Figura 12** na qual percebe-se que a resposta efetiva do sensor neste canal é relativamente mais baixa frente aos outros canais e pode ser compensada com um ajuste maior do ganho. As condições otimizadas para cada um dos canais estão apresentadas na **Tabela 2**.

De forma análoga, fez-se os estudos de otimizações para o sensor AS7262 que permite valores de ganho iguais a 1; 3,7; 16 e 64x e corrente aplicada no LED igual a 12,5; 25; 50 e 100 mA. A **Figura 23** a seguir apresenta os resultados da otimização para cada um dos seis canais e na **Tabela 2** estão apresentadas as condições otimizadas.





e)



f)

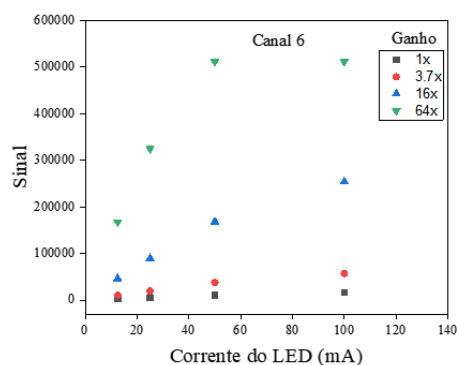
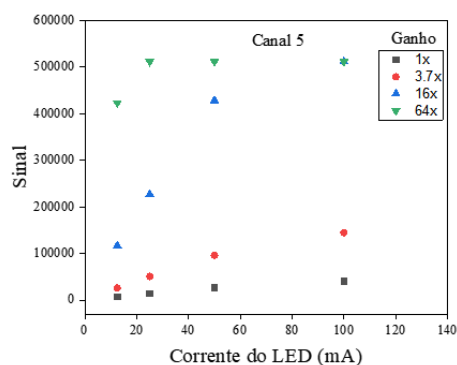


Figura 23. Sinais obtidos em função da corrente aplicada ao LED (12,5; 25; 50 e 100 mA) em diferentes ganhos (1; 3,7; 16 e 64X) para otimização e seleção dos parâmetros para cada um dos canais disponíveis no sensor AS7262

Tabela 2. Condições otimizadas de ganho e corrente do LED para os canais dos sensores AS7341 e AS7262

Sensor	Canal	Ganho	Corrente do LED (mA)
AS7341	Ch1	128	50
	Ch2	16	80
	Ch3	16	70
	Ch4	16	60
	Ch5	8	100

	Ch6	8	100
	Ch7	8	100
	Ch8	8	100
AS7262	Ch1	16	100
	Ch2	64	25
	Ch3	16	50
	Ch4	16	50
	Ch5	16	50
	Ch6	64	25

Para análises simultâneas é necessário escolher condições em que nenhum canal sature tanto para o sensor AS7341 quanto para o sensor AS7262. Para estes casos são utilizadas as condições de 16x e 80 mA para o AS7341 e 16x e 50 mA para o AS7262.

O sensor TCS34725 permite alterar os parâmetros de ganho e tempo de integração. Os valores possíveis para o ganho são de 1, 4, 16 e 60x enquanto os valores de tempo de integração podem ser de 2,4; 24; 101; 154 e 700 ms. Apesar de ser possível selecionar estes 5 diferentes valores de tempo de integração, apenas os tempos de integração de 154 e 700 ms permitem a contagem máxima de 16 bits (0-65535) e entre estes dois valores não houve diferença significativa em termos de sinal obtido. Sendo assim, definiu-se o tempo de integração de 700 ms. Em termos de ganho, o estudo foi realizado e o gráfico apresentado na **Figura 24** percebe-se que a melhor condição é a de 16x para quaisquer um dos canais.

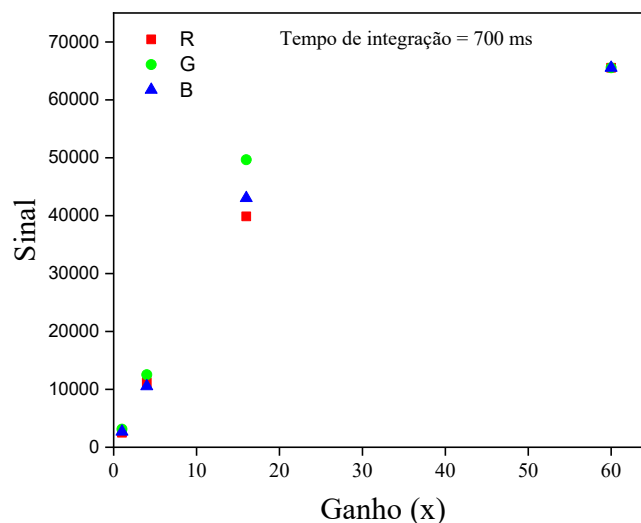


Figura 24. Sinais obtidos para os canais R, G e B em função dos diferentes ganhos e um tempo de integração de 700 ms utilizando o sensor TCS34725

Os estudos de otimização dos três sensores mostraram que o aumento da corrente aplicada no LED (AS7341 e AS7262) aumenta a luz incidida sobre a amostra e aumenta, consequentemente, a luz refletida e que chega aos detectores maximizando os sinais recebidos. De forma similar, os ajustes de ganho demonstraram um aumento proporcional do sinal obtido e auxiliaram a aumentar a sensibilidade analítica.

2.4.4. Características analíticas

Para avaliar o desempenho analítico de cada um dos três sensores, utilizou-se 4 diferentes corantes que abrangem grande parte do espectro visível da luz sendo eles: azul indigo ($\lambda_{\text{máx}} = 610 \text{ nm}$), amarelo tartrazina ($\lambda_{\text{máx}} = 425 \text{ nm}$), amarelo crepúsculo ($\lambda_{\text{máx}} = 480 \text{ nm}$) e vermelho ponceau 4R ($\lambda_{\text{máx}} = 520 \text{ nm}$). Os espectros de absorção de cada um destes corantes estão apresentados na **Figura 25** a seguir.

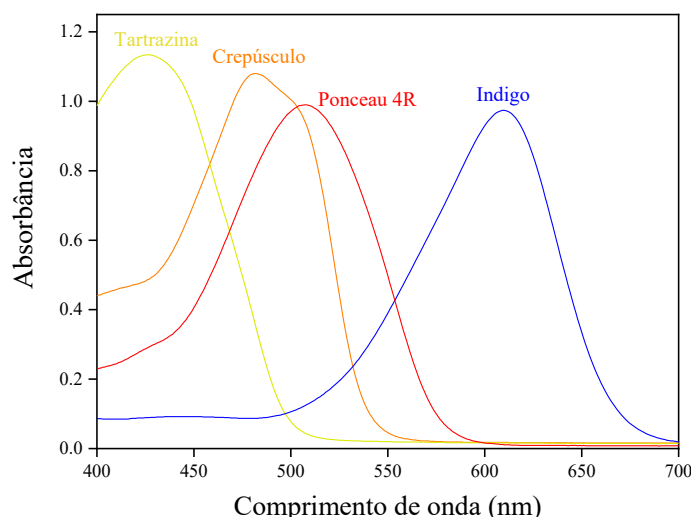


Figura 25. Espectros de absorção de soluções aquosas dos corantes amarelo tartrazina (50 mmol L⁻¹), amarelo crepúsculo (45 mmol L⁻¹), vermelho ponceau 4R (58 mmol L⁻¹), e azul indigo (90 mmol L⁻¹).

Para as análises a seguir, selecionou-se os canais dos sensores baseado no comprimento de onda de máxima absorção de cada corante e a sobreposição de tais espectros juntamente com a resposta efetiva dos sensores buscando uma maior sobreposição. Em alguns casos, selecionou-se mais de um canal devido às sobreposições a fim de avaliar se haveria diferenças analíticas relevantes entre os dados obtidos.

Construiu-se curvas de calibração, obteve-se a faixa linear, o RSD e o limite de detecção para cada um dos corantes utilizando-se cada um dos sensores e utilizando como comparação os mesmos dados obtidos utilizando-se um espectrofotômetro comercial. Os resultados obtidos nestes estudos estão apresentados na **Tabela 3**.

Os valores de LD e LQ foram calculados a partir das Equações 2 e 3 a seguir:

$$\text{Equação 2. LD} = 3\sigma/b$$

$$\text{Equação 3. LQ} = 10\sigma/b$$

onde σ = desvio padrão amostral de 10 medidas do branco e b = coeficiente angular da equação da reta da curva de calibração obtida. O desvio padrão relativo (RSD) foi calculado a partir do uso da **Equação 4** a seguir:

$$\text{Equação 4. RSD (\%)} = s/x$$

onde s = desvio padrão de 10 medidas de um ponto de concentração média da curva e x = a média do sinal dessas medidas.

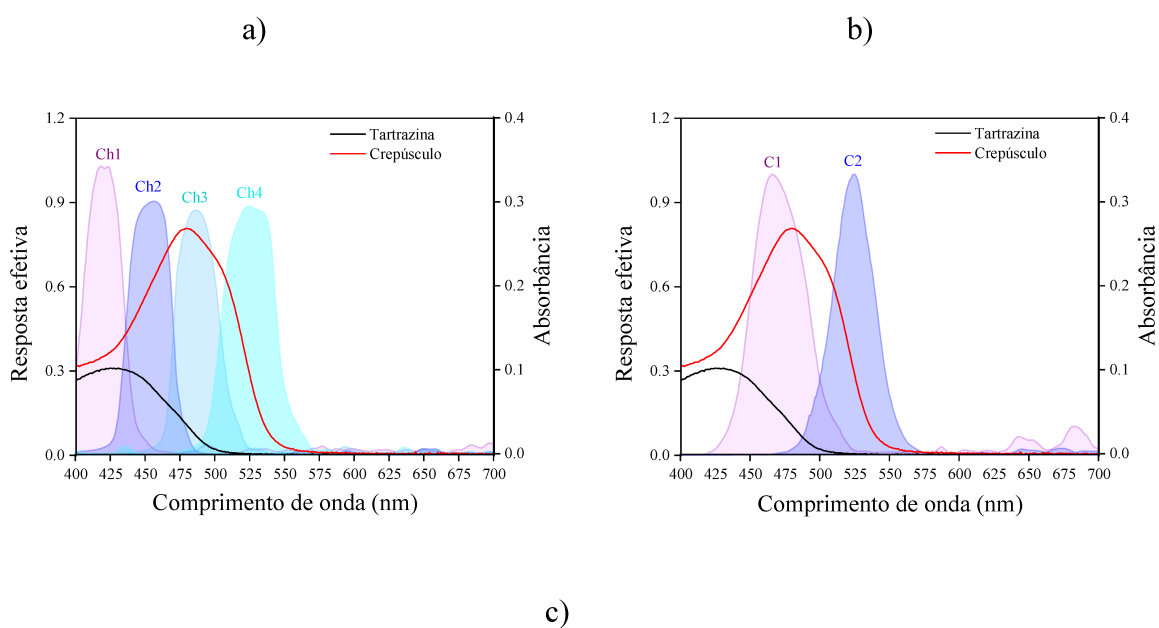
Tabela 3. Desempenho analítico comparativo (equações de calibração, o coeficiente de correlação (R), o limite de detecção (LD), a faixa linear de trabalho e o desvio padrão relativo (RSD) dos sensores de cor frente ao espectrofotômetro comercial utilizando os corantes azul índigo, amarelo tartrazina, vermelho ponceau 4R e amarelo crepúsculo

Analito	Dispositivo / Canal	Equação	R	LD ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Faixa Linear ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	RSD (%)
Índigo	AS7341 / 590 nm	$A = 25,0c + 6,0 \times 10^{-4}$	0,999	1	3 - 50	0,8
	AS7262 / 570 nm	$A = 18,5c + 7,6 \times 10^{-4}$	0,999	1	4 - 50	0,8
	AS7262 / 600 nm	$A = 22,3c - 2,0 \times 10^{-4}$	0,999	1	3 - 50	0,7
	TCS34725 / R	$A = 7,84c + 2,1 \times 10^{-4}$	0,998	3	9 - 50	0,5
	Espectrofotômetro	$A = 15,6c + 1,6 \times 10^{-4}$	0,999	1	3 - 80	0,7
Tartrazina	AS7341 / 415 nm	$A = 24,3c + 5,7 \times 10^{-4}$	0,999	1	3 - 40	0,7
	AS7341 / 445 nm	$A = 22,1c + 6,0 \times 10^{-4}$	0,998	1	3 - 40	0,8
	AS7262 / 450 nm	$A = 21,6c - 9,7 \times 10^{-5}$	0,998	1	4 - 40	0,7
	TCS34725 / B	$A = 7,1c + 7,2 \times 10^{-4}$	0,997	3	10 - 25	1,0
	Espectrofotômetro	$A = 11,5c + 2,2 \times 10^{-4}$	0,999	1	3 - 80	1,0
Ponceu 4R	AS7341 / 515 nm	$A = 25,1c + 3,0 \times 10^{-4}$	0,999	1	3 - 50	0,6
	AS7262 / 500 nm	$A = 24,0c + 7,9 \times 10^{-4}$	0,998	1	3 - 50	0,9
	AS7262 / 550 nm	$A = 21,8c - 1,1 \times 10^{-3}$	0,998	1	4 - 50	1,0
	TCS34725 / G	$A = 12,0c + 1,2 \times 10^{-4}$	0,997	3	8 - 25	1,1
	Espectrofotômetro	$A = 16,7c + 1,3 \times 10^{-3}$	0,999	1	3 - 80	0,3
Crepúsculo	AS7341 / 445 nm	$A = 0,023c + 3,7 \times 10^{-4}$	0,999	1	4 - 30	1,0
	AS7341 / 480 nm	$A = 0,026c + 6,4 \times 10^{-4}$	0,999	1	3 - 30	1,0
	AS7341 / 515 nm	$A = 0,019c - 2,4 \times 10^{-3}$	0,998	1	5 - 30	1,0
	AS7262 / 450 nm	$A = 0,034c + 4,8 \times 10^{-4}$	0,999	1	3 - 30	1,0

Os valores e as características analíticas obtidas apresentados na **Tabela 3** mostram que os sensores AS7341 e AS7262 forneceram resultados analíticos comparáveis aos obtidos com o espectrofotômetro comercial nos comprimentos de onda testados. Em contrapartida, o sensor TCS34725 mostrou menor sensibilidade nas mesmas condições. Este estudo destaca o potencial dos sensores de cor, especificamente o AS7341 e o AS7262, para a análise quantitativa de analitos coloridos. Esses sensores demonstraram alta sensibilidade e alta precisão, tornando-os alternativas viáveis, de menor custo, aos métodos espectrofotométricos tradicionais dentro da faixa do espectro visível. Em termos de parâmetros de desempenho analítico como sensibilidade, repetibilidade e faixa linear, os sensores da família AS também mostraram um desempenho comparável ao espectrofotômetro comercial.

2.4.5. Quantificação do corante amarelo crepúsculo em amostras alimentícias

A fim de avaliar a seletividade de cada um dos sensores, optou-se por realizar a determinação do corante amarelo crepúsculo na presença do corante amarelo tartrazina. Os espectros de absorção dos dois corantes estão apresentados na **Figura 26** juntamente com a resposta efetiva de cada um dos sensores.



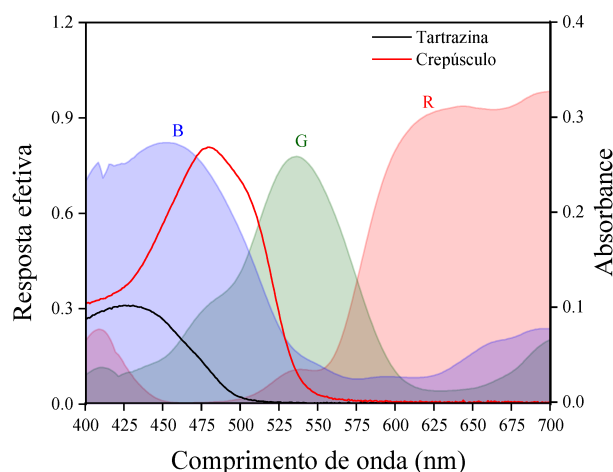


Figura 26. Espectros de absorção de soluções aquosas dos corantes amarelo tartrazina (preto) e amarelo crepúsculo (vermelho) em sobreposição às respostas efetivas dos canais dos sensores de cor. a) AS7341, b) AS7262 e c) TCS34725

A partir da análise da sobreposição dos gráficos, percebe-se que para o sensor AS7341 o corante amarelo tartrazina absorve na região dos canais 1 e 2 enquanto o corante amarelo crepúsculo absorve nas regiões dos canais de 1 a 4. Portanto, constata-se que a partir do monitoramento dos canais 3 e 4 é possível fazer a quantificação do corante amarelo crepúsculo mesmo na presença do corante amarelo tartrazina sem que este interfira de maneira significativa. Para o sensor AS7262 o canal 1 pode ser utilizado para monitorar o corante amarelo tartrazina enquanto o canal 2 pode monitorar o corante amarelo crepúsculo com pouca influência do outro corante. Em contrapartida, o sensor TCS34725 apresenta resposta de ambos os corantes em quaisquer um dos três canais.

Para verificar essa afirmação, preparou-se curvas de calibração abrangendo uma concentração de 1-10 μM de amarelo crepúsculo, tanto na presença quanto na ausência de quantidades iguais amarelo tartrazina.

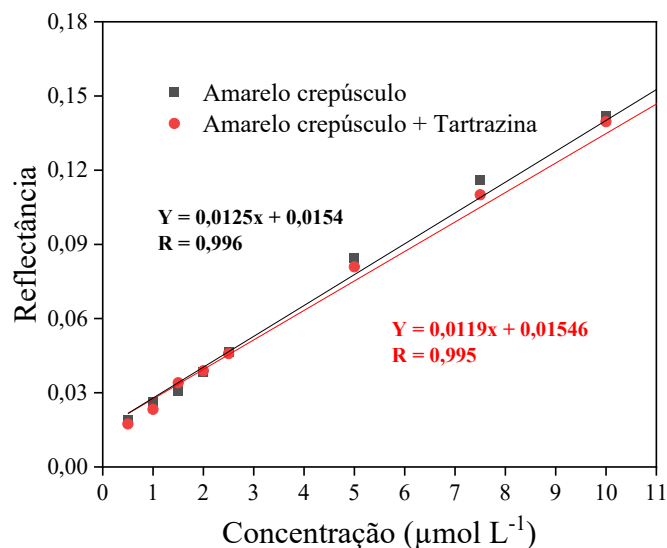


Figura 27. Curvas de calibração para quantificação do corante AC. Em preto, apenas o corante de interesse. E em vermelho, na presença do corante AT em mesmas concentrações

Conforme mostrado na **Figura 27**, não foram observadas diferenças significativas nos perfis das curvas, sugerindo que o sensor AS7341 é capaz de monitorar o corante AC de forma eficaz, sem interferência de AT, quando o Canal 4 deste sensor é utilizado para as medições em concentrações iguais dos corantes.

Na sequência, analisou-se 11 amostras alimentícias, em que todas possuíam tanto amarelo crepúsculo quanto amarelo tartrazina, a fim de quantificar o corante o amarelo crepúsculo nestas amostras. Estes corantes estão presentes em uma grande gama de alimentos que possuem principalmente coloração amarelada/alaranjada. As amostras analisadas foram 5 isotônicos (3 de sabor laranja, 1 de maracujá e 1 de frutas cítricas), 1 suco de garrafa (sabor laranja), 2 sucos em pó (1 sabor frutas cítricas e 1 sabor manga) e 3 gelatinas (1 sabor maracujá e 2 sabores abacaxi). As amostras de suco em pó e de gelatina foram preparadas de acordo com as instruções do fabricante presentes na embalagem.

Os valores encontrados do corante amarelo crepúsculo em cada uma das amostras utilizando cada um dos sensores e utilizando também o espectrofotômetro comercial (no comprimento de onda de maior absorção do amarelo crepúsculo) estão apresentados na **Tabela 4**. Os valores obtidos através do uso dos sensores de cor e através do espectrofotômetro são comparáveis a um nível de confiança de 95% (n=3). A amostra 9 apresentou valores abaixo do limite de quantificação quando utilizado o canal G do sensor TCS 34725 e a amostra 10

apresentou valores abaixo do limite de quantificação também para ambos os canais (G e B). Os maiores valores de desvio padrão ao utilizar-se o TCS 34725 corroboram com a hipótese de que esse sensor se mostra menos interessante em termos de seletividade quando comparado com os outros dois sensores.

Tabela 4. Concentrações do corante amarelo crepúsculo encontradas em amostras alimentícias utilizando os sensores de cor e comparando com os valores encontrados utilizando-se o espectrofotômetro comercial

	Amostra	Espectrofotômetro	TCS34725		AS7262		AS7341	
			Canal G	Canal B	450 nm	500 nm	480 nm	515 nm
1	Isotônico sabor laranja	32 ± 1	32 ± 1	32 ± 1	32 ± 1	31 ± 1	31 ± 1	31 ± 1
2	Isotônico sabor laranja	52 ± 1	52 ± 2	50 ± 1	52 ± 1	51 ± 1	51 ± 1	51 ± 1
3	Isotônico sabor laranja	46 ± 1	46 ± 1	46 ± 1	45 ± 1	46 ± 1	46 ± 1	46 ± 1
4	Isotônico sabor maracujá	28 ± 1	28 ± 1	29 ± 1	29 ± 1	29 ± 1	29 ± 1	29 ± 1
5	Isotônico sabor frutas cítricas	33 ± 1	33 ± 1	33 ± 1	33 ± 1	33 ± 1	33 ± 1	34 ± 1
6	Suco sabor frutas cítricas	111 ± 1	110 ± 1	112 ± 1	111 ± 1	112 ± 1	110 ± 1	113 ± 1
7	Suco em pó sabor laranja	39 ± 1	42 ± 2	40 ± 1	39 ± 1	39 ± 1	39 ± 1	40 ± 1
8	Suco em pó sabor manga	115 ± 1	115 ± 2	116 ± 2	116 ± 1	116 ± 1	115 ± 1	116 ± 1
9	Gelatina sabor maracujá	9 ± 1	< LQ	9 ± 1	10 ± 1	9 ± 1	9 ± 1	9 ± 1
10	Gelatina sabor abacaxi	6 ± 1	< LQ	< LQ	5 ± 1	5 ± 1	5 ± 1	6 ± 1
11	Gelatina sabor abacaxi	12 ± 1	13 ± 1	12 ± 1	12 ± 1	13 ± 1	13 ± 1	13 ± 1

A fim de avaliar a quantificação do corante amarelo crepúsculo na presença do corante amarelo tartrazina, realizou-se um estudo no qual visava-se adicionar quantidades conhecidas (e em diferentes proporções) dos corantes de interesse em amostras de isotônico artificial e gelatina sem sabor visando simular a adição destes corantes a esses alimentos comerciais.

Adicionou-se nas amostras de isotônico artificial e gelatina sem sabor quantidades variáveis de cada um dos corantes e fez-se um estudo de recuperação a fim de avaliar, também, a possível interferência do amarelo tartrazina. Os resultados estão apresentados na **Tabela 5** a seguir.

Tabela 5. Resultados de recuperação (%) do corante amarelo crepúsculo em amostras de isotônico artificial e de gelatina sem sabor, em dois níveis de concentração (15 e 30 $\mu\text{g L}^{-1}$), obtidos com os sensores TCS34725, AS7262 e AS7341 em diferentes canais espectrais.

Amostra	Proporção		Recuperação (%)					
	Crepúsculo	Tartrazina	TCS 34725		AS 7262		AS 7341	
	(15 $\mu\text{mol L}^{-1}$)	(15 $\mu\text{mol L}^{-1}$)	Canal G	Canal B	450 nm	500 nm	480 nm	515 nm
1	1	1	103 $\pm$ 2	103 $\pm$ 3	101 $\pm$ 1	97 $\pm$ 2	99 $\pm$ 2	99 $\pm$ 1
2 Isotônico	1	2	118 $\pm$ 1	117 $\pm$ 2	114 $\pm$ 1	115 $\pm$ 2	113 $\pm$ 1	113 $\pm$ 1
3	2	1	108 $\pm$ 2	105 $\pm$ 4	99 $\pm$ 1	100 $\pm$ 1	102 $\pm$ 1	95 $\pm$ 1
4	1	1	110 $\pm$ 2	107 $\pm$ 2	100 $\pm$ 1	98 $\pm$ 1	100 $\pm$ 1	100 $\pm$ 1
5 Gelatina	1	2	117 $\pm$ 3	119 $\pm$ 2	114 $\pm$ 1	114 $\pm$ 1	114 $\pm$ 1	114 $\pm$ 1
6	2	1	112 $\pm$ 3	106 $\pm$ 3	99 $\pm$ 1	101 $\pm$ 1	96 $\pm$ 1	101 $\pm$ 1

A partir da análise dos valores apresentados na **Tabela 5** percebe-se que em proporções de 1:1 ou 2:1 (crepúsculo:tartrazina) o corante amarelo tartrazina não interfere uma vez que todos os resultados apresentaram recuperação perto de 100%. Porém, na proporção 1:2 já é possível notar que o corante amarelo tartrazina pode ser um interferente visto que todas as medidas foram sempre iguais ou acima de 113%. Apesar disso, em uma busca na literatura não foram encontrados trabalhos que quantificassem o corante amarelo crepúsculo na proporção 1:2 frente ao amarelo tartrazina.

Na **Tabela 6** a seguir é apresentada uma comparação entre métodos descritos na literatura e as abordagens desenvolvidas neste trabalho, que empregam os sensores de cor utilizados neste trabalho (AS7341, AS7262 e TCS34725) para a determinação do corante AC em bebidas.

Tabela 6. Comparação do desempenho analítico (faixa linear, limite de detecção e desvio padrão relativo) de diferentes métodos empregados para a determinação do corante amarelo crepúsculo.

Método	Faixa linear $\mu\text{mol L}^{-1}$	LD $\mu\text{mol L}^{-1}$	RSD (%)	Referência
Fotômetro AS7341	4-30	1,0	1,0	Este trabalho
Fotômetro AS7262	3-30	0,9	1,0	
Fotômetro TCS34725	10-25	3,0	3,0	

Espectrofotometria derivativa	8,84-88,40	0,20	-	(Nevado; Flores; Llerena, 1994)
Imagens digitais	17,2-87,8	0,66	-	(Botelho; De Assis; Sena, 2014)
Supressão de fluorescência	0,3-8,0	0,0796	-	(Yuan et al., 2016)
Supressão de fluorescência	0,25 – 60,0	0,20	0,21	(Kaur et al., 2021)
Eletroquímica	0,09-8,0	0,025	3,7	(Qiu et al., 2016)
Eletroquímica com eletrodo modificado	0,0001-0,05	0,000015	4,1	(Ji et al., 2022)
HPLC	1,11-6,63	0,153	-	(Dinç Zor et al., 2016)
Eletroforese capilar	0,35-11,1	0,066	3,18	(Liu et al., 2015)
Ensaio bioquímico (QLISA)	0,002-0,0442	0,002	-	(Dinç Zor et al., 2016)

O método proposto apresenta desempenho analítico comparável ao de outros métodos ópticos; entretanto, exibe limites de detecção mais elevados quando comparado a técnicas baseadas em fluorescência, métodos eletroanalíticos e técnicas de separação.

Ressalta-se, contudo, que as concentrações de AC normalmente encontradas em bebidas situam-se dentro dos limites de detecção alcançados pelo método desenvolvido. Adicionalmente, o custo dos componentes instrumentais empregados é reduzido, o que torna a abordagem facilmente aplicável, dispensando modificações em detectores, como alterações em eletrodos ou procedimentos de derivatização química, para a determinação de corantes em bebidas. O método também permite integração com microcontroladores, viabilizando conectividade com sistemas em nuvem, além de estar alinhado aos princípios *DIY* (do-it-yourself), configurando-se como uma solução prática, de baixo custo e adequada para análises *in situ*.

2.5. Conclusões

Este trabalho apresentou uma avaliação e comparativa do desempenho analítico de diferentes sensores de cor aplicados a medidas de refletância em soluções, com ênfase nos sensores TCS34725, AS7262 e AS7341. A análise integrada dos aspectos construtivos, das respostas espectrais, da otimização dos parâmetros instrumentais e das características analíticas permitiu estabelecer um panorama claro das potencialidades e limitações de cada dispositivo no contexto da química analítica.

Os estudos de resposta espectral e resposta efetiva evidenciaram diferenças marcantes entre os sensores avaliados. Enquanto o TCS34725 apresenta bandas largas e fortemente sobrepostas, adequadas a análises colorimétricas globais, os sensores AS7262 e AS7341 exibem canais espectrais mais estreitos e mais bem distribuídos ao longo do visível, conferindo maior seletividade e capacidade de discriminação espectral. Em especial, o AS7341 destacou-se por oferecer uma amostragem espectral mais densa, aproximando-se de um comportamento quase espectrofotométrico discreto.

A otimização dos parâmetros operacionais mostrou-se essencial para maximizar a sensibilidade e evitar saturação dos sinais, evidenciando que o ajuste adequado de ganho, corrente do LED e tempo de integração impacta diretamente o desempenho analítico dos sensores. Nessas condições otimizadas, os sensores AS7341 e AS7262 apresentaram curvas de calibração com excelente linearidade, baixos limites de detecção e boa repetibilidade, com resultados comparáveis aos obtidos com um espectrofotômetro comercial.

Os estudos de seletividade, particularmente na quantificação do corante amarelo crepúsculo na presença de amarelo tartrazina, reforçaram a superioridade dos sensores multicanais da família AS. O AS7341 demonstrou capacidade de quantificação seletiva mesmo diante de sobreposição espectral significativa entre os analitos, enquanto o TCS34725 apresentou maiores limitações associadas à sua arquitetura RGB, refletidas em maiores desvios e limites de quantificação mais elevados em matrizes complexas.

Adicionalmente, a análise exploratória dos sensores AS7343 e AS7265x, apresentada de forma complementar, permitiu ampliar a discussão para uma nova geração de sensores espectrais com maior densidade de canais e extensão da resposta espectral para além da região do visível. O AS7343 demonstrou potencial analítico relevante ao incorporar um número

ampliado de canais, incluindo a região do infravermelho próximo, possibilitando uma amostragem espectral mais refinada e maior flexibilidade na discriminação de espécies com respostas ópticas parcialmente sobrepostas, ainda que apresente desafios associados à sobreposição de alguns canais e à presença de ruído em determinadas bandas.

O sensor AS7265x, por sua vez, destacou-se pela ampla cobertura espectral resultante da integração de três módulos sensores e de um sistema de iluminação baseado em múltiplos LED's. Essa configuração confere ao dispositivo um caráter quase espectrométrico, com elevado potencial para análises multicomponentes e aplicações quimiométricas avançadas. Contudo, a combinação simultânea de múltiplas fontes de emissão e múltiplos canais de detecção aumenta a complexidade do sistema, exigindo maior rigor nos procedimentos de calibração, ajuste e modelagem dos dados, a fim de minimizar correlações indesejadas e assegurar a confiabilidade dos resultados.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam que os sensores constituem alternativas viáveis, robustas e de baixo custo para aplicações colorimétricas quantitativas, especialmente em sistemas portáteis e integrados a plataformas IoT.

3. Capítulo III: Smart-Sense: um dispositivo embarcado para análises em solução

3.1.Introdução

A colorimetria é a área da ciência dedicada ao estudo quantitativo da cor e de sua percepção pelo observador humano, constituindo um elo fundamental entre a física da luz, a fisiologia da visão e as aplicações tecnológicas em diferentes campos do conhecimento (Gunter Wyszecki; W. S. Stiles, 1982; R. W. G. Hunt; Michael R. Pointer, 2011). Ao longo das últimas décadas, a colorimetria consolidou-se como uma ferramenta essencial em setores como indústria gráfica, têxtil, alimentícia, farmacêutica, biomédica, química analítica e ciência dos materiais, além de desempenhar papel central no desenvolvimento de dispositivos digitais e sistemas de imagem (R. S. Sharma, 2003; Roy S. Berns, 2000).

A capacidade de medir, reproduzir e padronizar cores de forma objetiva tornou-se um requisito indispensável em processos industriais, diagnósticos, controle de qualidade e comunicação visual. Embora a percepção da cor seja subjetiva do ponto de vista humano, ela pode ser descrita e modelada por meio de fundamentos físicos e matemáticos bem estabelecidos, o que permite sua quantificação e comparação de forma reprodutível (Commission Internationale de l'Éclairage, 2018).

3.1.1. Histórico

O estudo da cor acompanha a história da ciência desde a Antiguidade, inicialmente associado à filosofia natural e à observação empírica dos fenômenos luminosos. Concepções qualitativas sobre a origem das cores podem ser encontradas em textos clássicos, como os de Aristóteles, nos quais a cor era interpretada como resultado da interação entre luz e escuridão. Embora essas ideias carecessem de base experimental, elas representaram as primeiras tentativas sistemáticas de compreender a cor como um fenômeno natural. (Gunter Wyszecki; W. S. Stiles, 1982)

Um marco decisivo na história da colorimetria ocorreu no século XVII com os experimentos de Isaac Newton, que demonstrou que a luz branca é composta por um espectro contínuo de cor. Ao utilizar prismas para decompor e recompor a luz, Newton estabeleceu os fundamentos da óptica moderna e evidenciou que a cor é uma propriedade da luz, e não dos objetos em si, rompendo com concepções anteriores amplamente aceitas. (Edward Hering, 1964)

No século XIX, os avanços na fisiologia da visão e na psicofísica contribuíram significativamente para o entendimento da percepção cromática. Thomas Young propôs a teoria tricromática da visão, segundo a qual a percepção da cor resulta da combinação da resposta de três tipos de receptores visuais sensíveis a diferentes regiões do espectro. Essa teoria foi posteriormente desenvolvida e sistematizada por Hermann von Helmholtz, tornando-se um dos pilares da colorimetria moderna (Gutav Kortum, 1969).

Paralelamente, Ewald Hering introduziu a teoria dos processos oponentes, segundo a qual a percepção cromática é organizada em pares antagônicos, como vermelho-verde e azul-amarelo. A complementaridade entre as teorias tricromática e oponente contribuiu para uma compreensão mais abrangente dos mecanismos fisiológicos e perceptuais da visão de cores. (Eward Hering, 1964)

A consolidação da colorimetria como disciplina científica ocorreu no início do século XX, impulsionada pela crescente demanda por padronização de cores em contextos industriais e comerciais. Em 1931, a *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) estabeleceu o primeiro sistema colorimétrico padronizado, baseado em funções de correspondência de cores e no conceito de observador padrão, permitindo a representação matemática universal da cor (Commission Internationale de l'Éclairage, 2018).

3.1.2. Fundamentos Físicos da Cor

A base física da colorimetria está associada à radiação eletromagnética na faixa do espectro visível, compreendida aproximadamente entre 380 nm e 780 nm. A interação da luz com a matéria envolve fenômenos de absorção, reflexão, transmissão e espalhamento, os quais determinam a distribuição espectral da radiação que alcança o observador (R. W. G. Hunt; Michael R. Pointer, 2011).

Do ponto de vista da percepção, a cor resulta da resposta do sistema visual humano à luz incidente. A retina contém células fotorreceptoras denominadas cones, responsáveis pela visão cromática, cuja resposta espectral combinada é processada pelo sistema nervoso central, originando a sensação de cor (Gunter Wyszecki; W. S. Stiles, 1982; Mark D. Fairchild, 2013). Esse processo é influenciado por fatores fisiológicos, psicológicos e contextuais, o que torna a cor uma grandeza inerentemente complexa.

Para lidar com essa complexidade, a colorimetria baseia-se no princípio da equivalência tricromática, segundo o qual estímulos espectrais distintos podem produzir a mesma sensação

de cor quando geram respostas equivalentes nos três tipos de cones. Esse princípio fundamenta a definição dos valores tristímulo e dos espaços de cor adotados pela CIE.

Além dos aspectos físicos e fisiológicos, a colorimetria considera atributos perceptíveis como matiz, saturação e luminosidade, que permitem uma descrição mais intuitiva da cor. Espaços de cor mais uniformes, como CIELAB e CIELUV, foram desenvolvidos com o objetivo de garantir que diferenças numéricas correspondam, de forma aproximada, a diferenças perceptíveis equivalentes (Roy S. Berns, 2000).

3.1.3. Sistemas e Espaços de Cor

O sistema CIE XYZ, introduzido em 1931, é considerado o marco inicial da colorimetria moderna. Baseado em funções de correspondência de cores obtidas experimentalmente, esse sistema permite representar qualquer estímulo cromático visível por meio de três coordenadas tristímulo independentes de dispositivos específicos (Commission Internationale de l'Éclairage, 2018).

A partir do sistema XYZ, foram desenvolvidos diversos espaços de cor com finalidades distintas. Espaços dependentes de dispositivos, como RGB e CMYK (*Cian, Magenta, Yellow e Key*), são amplamente utilizados em sistemas de exibição e impressão, respectivamente, enquanto espaços independentes de dispositivos, como CIELAB, são preferidos em aplicações científicas e industriais devido à sua maior uniformidade perceptual (R. S. Sharma, 2003; Roy S. Berns, 2000).

A escolha do espaço de cor adequado depende do contexto de aplicação, do tipo de dispositivo envolvido e do nível de precisão requerido. Em medições colorimétricas, a conversão entre diferentes espaços é uma etapa crítica, exigindo o uso de perfis de cor e procedimentos rigorosos de calibração (R. W. G. Hunt; Michael R. Pointer, 2011).

3.1.4. Instrumentação em Colorimetria

A instrumentação em colorimetria é um dos pilares centrais para a obtenção de medições objetivas, reproduzíveis e comparáveis da cor. A evolução desses instrumentos acompanhou diretamente os avanços na óptica, na eletrônica e nos sistemas de aquisição e processamento de sinais. De modo geral, os dispositivos colorimétricos podem ser classificados em métodos visuais ou instrumentais (Gunter Wyszecki; W. S. Stiles, 1982; R. W. G. Hunt; Michael R. Pointer, 2011).

Os colorímetros são instrumentos projetados para medir diretamente os valores associados à percepção humana da cor, geralmente em conformidade com o observador padrão. Embora apresentem menor flexibilidade quando comparados aos espectrofotômetros, os colorímetros destacam-se pela simplicidade de operação, rapidez na aquisição dos dados e menor custo, tornando-se amplamente utilizados em aplicações de controle de qualidade e monitoramento de processos.

De forma geral, um colorímetro é constituído por um conjunto de subsistemas bem definidos, cuja integração garante a confiabilidade das medições colorimétricas. Os principais componentes incluem a fonte de iluminação, o sistema óptico de condicionamento da luz, os elementos de seleção espectral (filtros), os detectores e a eletrônica de processamento do sinal.

A fonte de iluminação é responsável por fornecer a radiação incidente sobre a amostra e exerce influência direta na qualidade da medição. Idealmente, a fonte deve apresentar estabilidade temporal, reprodutibilidade e um espectro conhecido e bem definido. Em colorímetros tradicionais, são comumente utilizadas lâmpadas halógenas de tungstênio, devido à sua boa estabilidade e ampla emissão espectral na região visível. Em dispositivos mais modernos, fontes baseadas em LED's têm sido amplamente adotadas, oferecendo maior eficiência energética, menor aquecimento e maior vida útil (R. W. G. Hunt; Michael R. Pointer, 2011).

O sistema óptico tem a função de direcionar e condicionar a luz emitida pela fonte até a amostra e, posteriormente, conduzir a radiação refletida ou transmitida até os detectores. Esse sistema é composto por elementos como lentes, espelhos, difusores e diafragmas, que controlam o caminho óptico e a distribuição espacial da luz. A geometria de medição é um aspecto crítico na instrumentação colorimétrica, sendo responsável por minimizar efeitos indesejados, como reflexões especulares. (Commission Internationale de l'Éclairage, 2018; Roy S. Berns, 2000)

Um dos componentes centrais do colorímetro é o conjunto de filtros espectrais, cuja função é simular a resposta espectral do sistema visual humano. Esses filtros são projetados de modo a reproduzir, de forma aproximada, as funções de correspondência de cores definidas pela CIE para o observador padrão.

Em um colorímetro tristímulo típico, três filtros são utilizados, correspondendo às respostas associadas aos canais X, Y e Z do sistema CIE. A qualidade e a precisão desses filtros influenciam diretamente a exatidão da medição, sendo uma das principais limitações dos

colorímetros quando comparados aos espectrofotômetros, que realizam medições espectrais completas (Gunter Wyszecki; W. S. Stiles, 1982).

Os detectores são responsáveis por converter a radiação luminosa filtrada em sinais elétricos mensuráveis. Historicamente, fotodiodos e fotomultiplicadores foram amplamente utilizados em instrumentação colorimétrica. Atualmente, fotodiodos de silício são os sensores mais comuns, devido à sua boa linearidade, estabilidade e sensibilidade na faixa do visível (R. S. Sharma, 2003).

A resposta espectral do detector, sua relação sinal-ruído e sua estabilidade térmica são fatores críticos para a qualidade da medição. Em muitos instrumentos, circuitos de compensação e calibração são empregados para minimizar variações associadas à temperatura e ao envelhecimento dos componentes.

A eletrônica associada ao colorímetro é responsável pela amplificação, digitalização e processamento dos sinais provenientes dos detectores. Esses sinais são convertidos em valores tristímulo, que podem ser posteriormente transformados em diferentes espaços de cor, como CIELAB, por meio de relações matemáticas padronizadas (Commission Internationale de l'Éclairage, 2018).

Além disso, os sistemas modernos incorporam microcontroladores e softwares dedicados, que permitem a aplicação de rotinas de calibração, correção de desvios instrumentais e armazenamento dos dados. A calibração periódica, geralmente realizada com padrões de branco e preto certificados, é essencial para garantir a rastreabilidade metrológica das medições (Commission Internationale de l'Éclairage, 2018).

3.1.5. Limitações e aplicações dos colorímetros

Embora os colorímetros apresentem vantagens significativas em termos de simplicidade e custo, suas limitações estão associadas principalmente à dependência dos filtros espectrais e à menor flexibilidade frente a variações espectrais complexas. Ainda assim, esses instrumentos são amplamente utilizados em aplicações de controle de qualidade, monitoramento de processos industriais e análises comparativas, onde a rapidez e a repetibilidade são mais relevantes do que a obtenção de informações espectrais completas (R. W. G. Hunt; Michael R. Pointer, 2011).

3.1.6. Avanços Tecnológicos

Os avanços recentes na miniaturização de sensores ópticos e no processamento digital de imagens impulsionaram o uso de *smartphones* como ferramentas colorimétricas alternativas. Equipados com câmeras de alta resolução e grande capacidade computacional, esses dispositivos têm sido investigados em aplicações de análise colorimétrica em campo, especialmente em contextos biomédicos, ambientais e educacionais (Shen; Hagen; Papautsky, 2012).

Apesar das limitações associadas à variabilidade entre dispositivos, à calibração e ao controle das condições de iluminação, estudos demonstram que estratégias baseadas no uso de cartas de referência, iluminação controlada e algoritmos de correção podem aumentar significativamente a confiabilidade das medições realizadas com smartphones (Lopez-Ruiz et al., 2014; Morbioli et al., 2017).

De forma semelhante, scanners de mesa têm sido explorados como ferramentas colorimétricas, especialmente em análises bidimensionais e estudos comparativos. A capacidade de capturar informações de cor com alta resolução espacial torna esses dispositivos particularmente úteis em aplicações que exigem mapeamento cromático detalhado (Capitán-Vallvey et al., 2015).

A colorimetria, ao integrar fundamentos físicos, fisiológicos e tecnológicos, desempenha um papel central na ciência e na tecnologia contemporâneas. Desde suas origens históricas até os avanços mais recentes, essa área tem evoluído de forma contínua, respondendo às demandas de novos contextos e aplicações (Commission Internationale de l'Éclairage, 2018; R. W. G. Hunt; Michael R. Pointer, 2011).

A incorporação de dispositivos digitais de uso cotidiano, como smartphones e scanners, representa uma tendência promissora para o avanço na medição de cor. No entanto, esses avanços também impõem desafios relacionados à padronização, calibração e validação dos resultados.

Com o objetivo de contornar esses desafios, foi desenvolvido um dispositivo dedicado à medição de cor baseado no sensor espectral AS7341. Diferentemente das abordagens baseadas em dispositivos de uso geral, o sistema proposto permite o controle das condições de aquisição e a padronização do processo de medição. Além disso, o dispositivo foi projetado para realizar a construção automática de curvas de calibração, reduzindo a dependência de

procedimentos manuais e minimizando erros associados ao operador. Essa estratégia possibilita maior rastreabilidade e consistência dos dados obtidos, contribuindo para a validação dos resultados e ampliando o potencial de aplicação do sistema em contextos experimentais e tecnológicos que demandam medições de cor confiáveis e reprodutíveis.

3.2.Objetivos

Objetivo Geral

Desenvolver um sistema colorimétrico portátil de baixo custo, baseado no sensor AS7341 e microcontrolador ESP32-S3, capaz de realizar análises espectrais e quantificação de amostras líquidas *in-situ* com processamento de dados embarcado.

Objetivos Específicos

- Projetar e integrar o hardware: Consolidar uma arquitetura embarcada autônoma utilizando conexão STEMMA QT e alimentação via USB-C para operação em campo.
- Implementar interface de controle remoto: Desenvolver um servidor web embarcado no ESP32-S3 para configuração de parâmetros e visualização de dados via rede *Access Point* (AP).
- Automatizar a calibração analítica: Implementar algoritmos de regressão linear por Mínimos Quadrados Ordinários (MMQ) diretamente no *firmware* para geração de curvas de calibração e medição direta de concentrações desconhecidas.
- Avaliar o dispositivo: Avaliar o desempenho do dispositivo desenvolvido a partir da análise de águas na determinação de Ferro, Amônio e Nitrato

3.3. Materiais e métodos

3.3.1. Instrumentação

O dispositivo desenvolvido, apresentado na **Figura 28**, foi fabricado a partir do uso de impressão 3D utilizando-se filamento do tipo PLA (ácido polilático) de cor preta em impressora Bambu Lab A1 e consiste em um sistema embarcado compacto projetado para a realização de análises colorimétricas e espectrais em amostras líquidas.

A arquitetura de hardware baseia-se na integração do sensor espectral AS7341 com o microcontrolador ESP32-S3 (*Adafruit ESP32-S3 Reverse TFT Feather*). Essa placa, possui uma tela LCD (*liquid crystal display*) na qual são mostrados os valores de cada uma das análises para o operador.



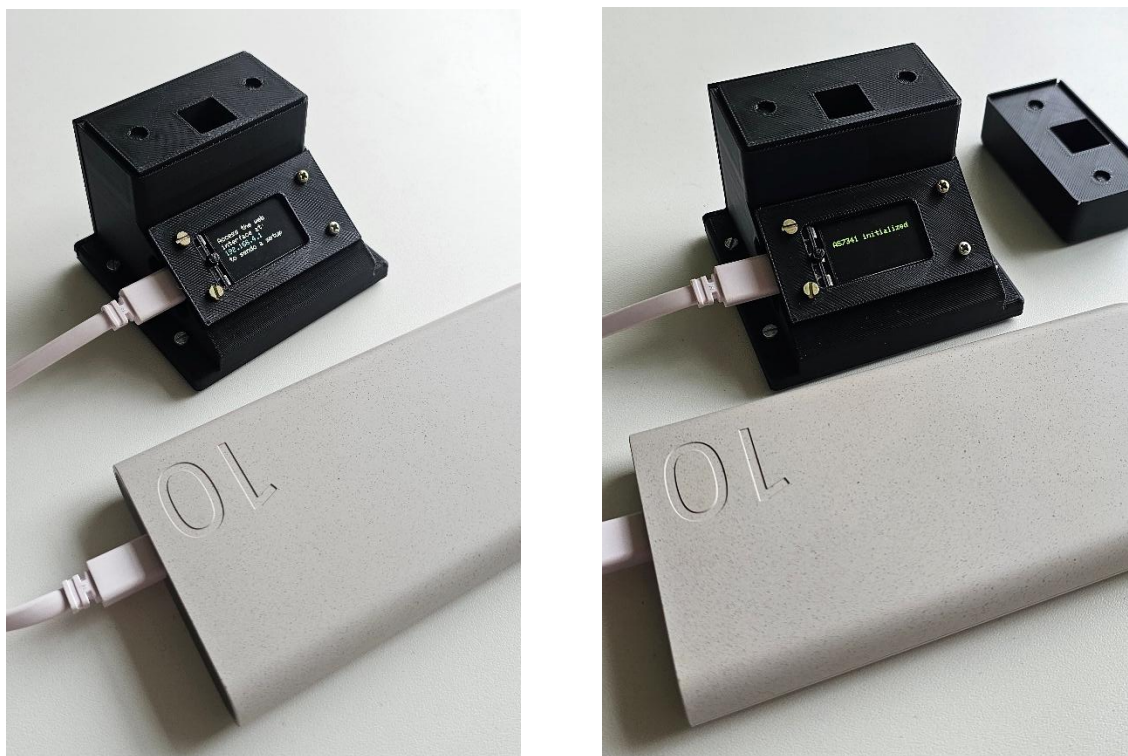


Figura 28. Fotografias de diferentes ângulos do dispositivo desenvolvido

A comunicação entre a unidade de sensoriamento e o processador central é estabelecida via protocolo I2C através do padrão de conexão STEMMA QT (**Figura 29**). O sistema é energeticamente autônomo, alimentado via porta USB-C por meio de um *power bank*, viabilizando sua operação *in-situ*.

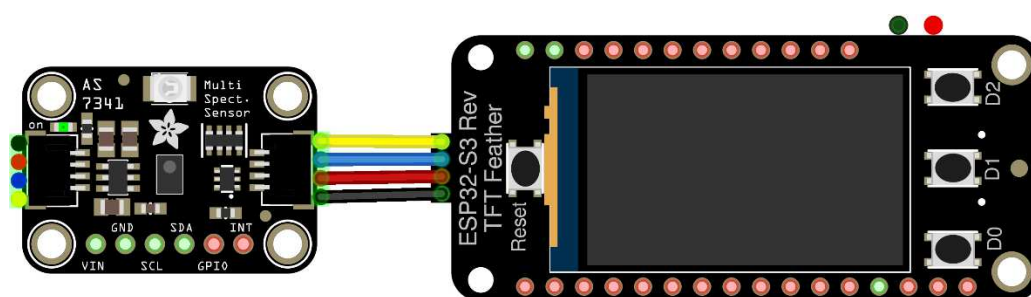
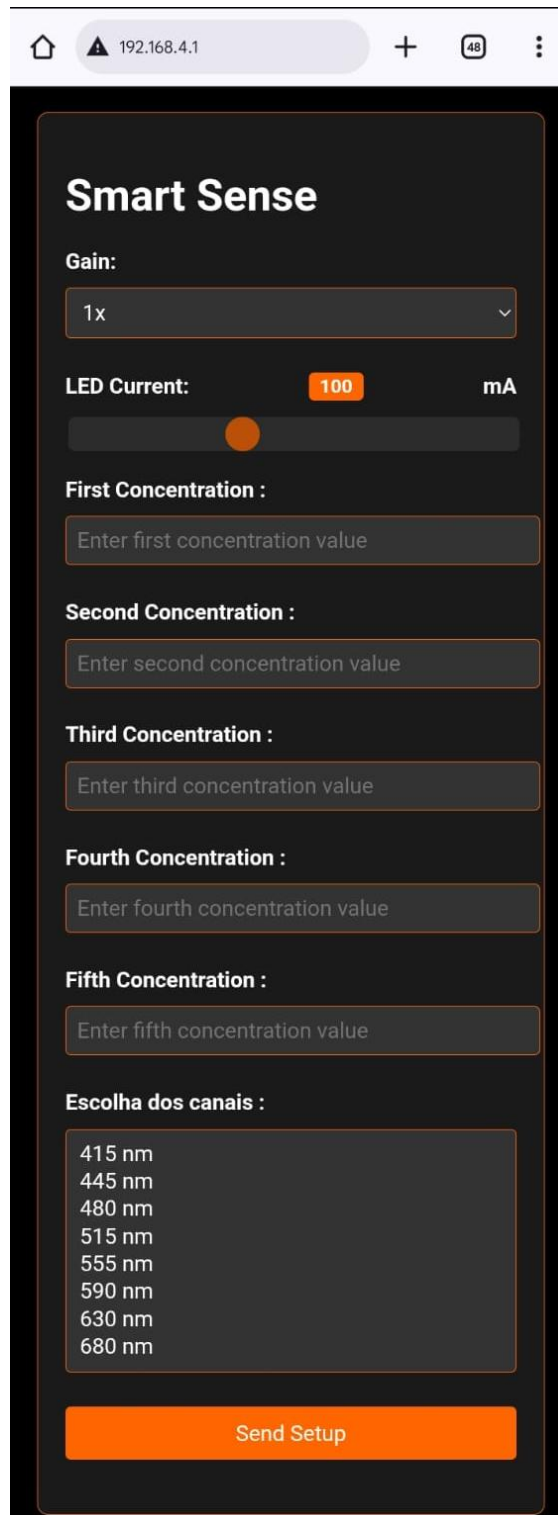


Figura 29. Esquema representativo da ligação do sensor AS7341 com o microcontrolador ESP 32-S3 Reverse TFT Feather

O *firmware* foi desenvolvido utilizando o *framework* Arduino sobre a plataforma PlatformIO. O software implementa uma arquitetura de servidor web embarcado operando em modo *Access Point*. Ao ser inicializado, o microcontrolador gera uma rede Wi-Fi local e exibe o endereço IP de acesso em seu display TFT integrado.

Através de uma interface web responsiva, o usuário configura os parâmetros de aquisição: ganho do sensor, corrente do LED e canais espectrais; e insere os valores de concentração das cinco amostras padrão utilizadas para a calibração. Um *printscreen* dessa interface está apresentado na **Figura 30**.



The image shows a smartphone screen displaying a web interface titled "Smart Sense". The interface is designed for configuring sensor parameters and calibration data. At the top, there is a status bar with a home icon, a warning icon, the IP address "192.168.4.1", a plus sign, a battery icon showing 48%, and a menu icon. The main content area has a dark background with orange accents. It includes a "Gain:" section with a dropdown menu set to "1x". Below that is an "LED Current:" section with a slider set to "100" mA. The "First Concentration :" section has a text input field with the placeholder "Enter first concentration value". This is followed by similar sections for "Second Concentration :", "Third Concentration :", "Fourth Concentration :", and "Fifth Concentration :", each with its own text input field. The "Escolha dos canais :" section features a list of wavelength options: 415 nm, 445 nm, 480 nm, 515 nm, 555 nm, 590 nm, 630 nm, and 680 nm. At the bottom, there is a large orange button labeled "Send Setup".

Figura 30. *Printscreen* da tela do smartphone mostrando a interface desenvolvida e suas funcionalidades

Para garantir a confiabilidade das medições e mitigar a influência de ruídos transientes (como flutuações de luminosidade ou instabilidade eletrônica momentânea), o sistema implementa um filtro digital de média truncada (*Truncated Mean*). O protocolo de aquisição para cada amostra segue as seguintes etapas:

1. Amostragem: O sensor realiza uma série de 20 leituras consecutivas ($N=20$) da resposta espectral.
2. Ordenação: O vetor de leituras é organizado em ordem crescente utilizando o algoritmo *Bubble Sort*.
3. Truncamento e Média: Eliminam-se as 5 menores e as 5 maiores leituras removendo potenciais *outliers*. A concentração final é calculada através da média aritmética das 10 leituras centrais remanescentes.

A construção da curva de calibração fundamenta-se no método de regressão linear por Mínimos Quadrados Ordinários (MMQ). O algoritmo embarcado processa os pares de dados (concentração conhecida vs. resposta do sensor filtrada) para cada canal espectral selecionado, determinando os coeficientes angular (a) e linear (b) da equação da reta ($y = ax + b$).

Os coeficientes são calculados internamente pelo microcontrolador através de equações analíticas. Após a obtenção destes coeficientes, o dispositivo habilita o modo de medição contínua, permitindo a quantificação direta de amostras desconhecidas aplicando-se a função inversa da reta calibrada.

O vídeo do dispositivo em funcionamento está disponível no perfil oficial do YouTube do laboratório Smart - Instrumental Analysis Laboratory e pode ser acessado pelo link a seguir: <https://www.youtube.com/watch?v=hoCaa-bFJ0w>

3.3.2. Reagentes e soluções

Para a quantificação de amônio, foram utilizados dois reagentes. O reagente 1 foi preparado dissolvendo-se 10 g de salicilato de sódio (Synth, Brasil) e 0,5 g de nitroprussiato de sódio di-hidratado (Neon, Brasil) em um volume final de 100 mL. O reagente 2 foi obtido pela dissolução de 1 mL de hipoclorito de sódio (12 %, Neon, Brasil), 2 g de hidróxido de sódio (Neon, Brasil) e 20 g de citrato trissódico di-hidratado (Sigma-Aldrich, Alemanha), também em um volume final de 100 mL. Para as análises, 1 mL do reagente 1 e 1 mL do reagente 2 foram adicionados sequencialmente a um tubo falcon de 15 mL, seguidos da adição de 2,0 mL

da solução de calibração ou da amostra. A solução foi transferida para uma cubeta de 1 cm para análise.

A solução estoque de **nitrito**, com concentração de 1000 mg L^{-1} , foi obtida a partir da dissolução de quantidades adequadas de nitrito de sódio (NaNO_2 , Êxodo Científica, Brasil). O reagente de Griess foi preparado adicionando-se 10 mL de ácido fosfórico a 85% (Vetec, Brasil) a 50 mL de água ultrapura em um balão volumétrico de 100 mL. Em seguida, 1,0 g de sulfanilamida (Vetec, Brasil) foi completamente solubilizado nessa solução. Posteriormente, adicionaram-se 0,10 g de dicloridrato de *N*-(1-naftil) etilenodiamina (pureza > 98%, Sigma-Aldrich, Alemanha), completando-se o volume final com água deionizada.

Para a determinação colorimétrica de ferro (III), empregaram-se uma solução de tiocianato de potássio $2,0 \text{ mol L}^{-1}$ (Vetec) e uma solução de ácido nítrico $4,0 \text{ mol L}^{-1}$ (Synth, Brasil). As soluções padrão de ferro foram obtidas por diluição apropriada de uma solução padrão de referência de elemento único, com concentração de 1000 mg L^{-1} em meio contendo 1% de HNO_3 (Merck), utilizando água ultrapura como solvente.

3.4. Resultados e discussões

O desempenho do dispositivo Smart-Sense foi avaliado na determinação de íons nitrito, ferro (II) e amônio em solução aquosa. O desempenho analítico foi investigado a partir de parâmetros clássicos, como faixa linear, equação da curva analítica, coeficiente de correlação (R), limites de detecção (LD) e quantificação (LQ), bem como a precisão expressa pelo desvio padrão relativo (RSD).

No contexto das determinações colorimétricas realizadas neste trabalho, a escolha adequada do canal espectral foi um fator determinante para maximizar a sensibilidade analítica e, simultaneamente, minimizar interferências espectrais provenientes da matriz ou de reações secundárias.

A seleção do canal ideal foi baseada na correspondência entre o comprimento de onda central de cada canal do AS7341 e a região de máxima absorbância do complexo colorido formado em cada reação analítica. Ao priorizar canais cujo máximo espectral coincide com o pico de absorção do analito, observou-se um aumento significativo da inclinação da curva analítica, refletido em maiores coeficientes angulares e, conseqüentemente, em maior sensibilidade do método. Ao restringir a aquisição do sinal ao canal mais seletivo, foi possível melhorar a relação sinal–ruído e obter curvas de calibração com melhor linearidade e menores desvios experimentais.

3.4.1. Determinação de nitrito

O complexo azo formado na reação de Griess para determinação de nitrito, apresenta máximo de absorção na região de 540–550 nm (Cadeado et al., 2022b). Entre os canais disponíveis no AS7341, o Canal 5 (555 nm) é o que melhor coincide com essa região espectral e os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 7** e **Figura 31** a seguir.

Tabela 7. Características analíticas obtidas para a determinação de nitrito utilizando o Smart-Sense

Fixa Linear	Equação	R	LD (mg L ⁻¹)	LQ (mg L ⁻¹)	RSD (%)
0,1 – 0,5	$R = 0,394C + 0,004$	0,999	0,02	0,07	1,40

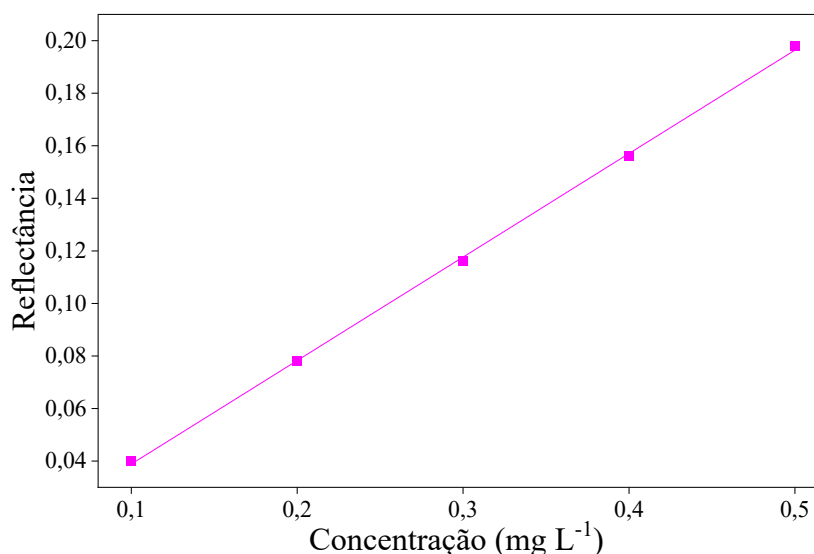


Figura 31. Curva de calibração obtida para determinação de nitrito utilizando o dispositivo Smart-Sense

Para o íon nitrito, o método apresentou comportamento linear na faixa de concentração entre 0,1 e 0,5 mg L⁻¹, com equação da curva analítica $R = 0,394C + 0,004$ e coeficiente de correlação igual a 0,999. Esse valor elevado de R indica excelente linearidade e adequada correlação entre o sinal colorimétrico obtido pelo Smart-Sense e a concentração do analito, evidenciando a confiabilidade do sistema de aquisição e processamento de dados.

Os limites de detecção e quantificação, estimados em 0,02 e 0,07 mg L⁻¹, respectivamente, demonstram sensibilidade compatível com métodos colorimétricos clássicos baseados na reação de Griess. Além disso, o RSD de 1,40% confirma a boa repetibilidade das medidas, mesmo com a automatização do tratamento dos dados analíticos. Esses resultados indicam que o Smart-Sense é adequado para a determinação de nitrito em baixas concentrações, com desempenho analítico comparável ao de instrumentos espectrofotométricos convencionais.

3.4.2. Determinação de ferro (III)

A determinação de ferro foi realizada por meio do método baseado na formação de um complexo com tiocianato de potássio (De Carvalho Oliveira et al., 2022), no qual ocorre a formação do complexo $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$, caracterizado por coloração vermelho-intensa. Esse complexo apresenta máximo de absorção localizado na região do vermelho do espectro visível, tipicamente entre 470 nm.

No contexto do sensor AS7341, o canal mais adequado para a quantificação do ferro foi o canal 4 (515 nm). Embora esse canal não coincida exatamente com o máximo espectral

clássico do complexo Fe–SCN, ele se posiciona em uma região onde ainda há absorção significativa do complexo, ao mesmo tempo em que se observa menor interferência do fundo óptico e maior estabilidade do sinal. Experimentalmente, a utilização do canal F4 resultou em curvas analíticas com boa linearidade e adequada sensibilidade, conforme evidenciado pelo coeficiente de correlação obtido.

Tabela 8. Características analíticas obtidas na determinação de ferro (III) utilizando o dispositivo Smart-Sense

Fixa Linear	Equação	R	LD (mg L ⁻¹)	LQ (mg L ⁻¹)	RSD (%)
0,5-3,0	$R = 0,072C + 0,010$	0,996	0,15	0,50	1,27

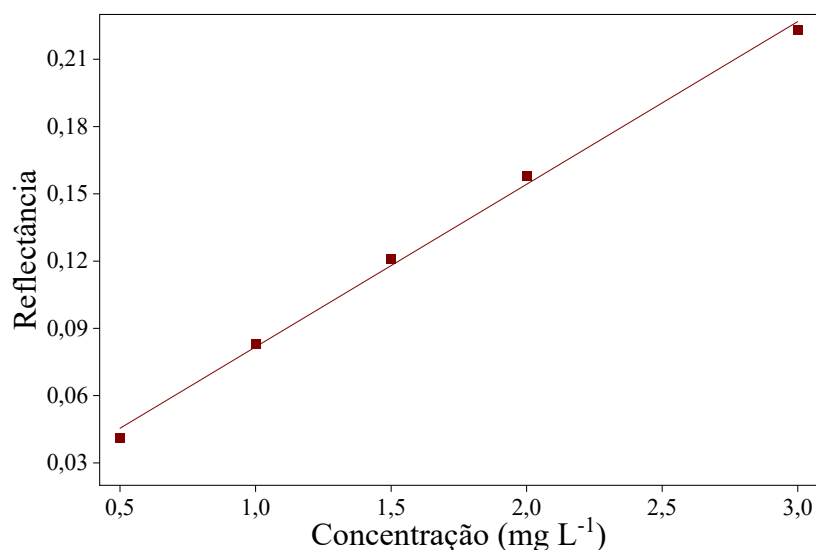


Figura 32. Curva de calibração obtida para a determinação do íon ferro (III) utilizando o dispositivo Smart-Sense

3.4.3. Determinação de amônio

A determinação de amônio foi baseada na reação de Berthelot modificada, (Thongkam; Rungsirisakun; Hemavibool, 2020) na qual o amônio reage formando o composto conhecido como azul de indofenol. O produto dessa reação apresenta coloração azul característica, com máximo de absorção situado na região do vermelho–infravermelho próximo, geralmente entre 630 e 660 nm.

Considerando as opções espectrais do sensor AS7341, que possui canais centrados acima de 600 nm, o canal mais adequado para a quantificação do amônio foi o canal 7 (630 nm). É o canal que melhor capta a variação de intensidade associada à formação do complexo colorido, mantendo sensibilidade para a construção de curvas analíticas lineares.

A escolha do canal 6 mostrou-se vantajosa por reduzir interferências provenientes de espécies que absorvem nas regiões azul e verde do espectro, além de apresentar melhor relação sinal–ruído quando comparado a canais de menor comprimento de onda. Os resultados experimentais confirmam que, o dispositivo desenvolvido permite uma quantificação confiável de amônio, com precisão e linearidade compatíveis com aplicações analíticas em dispositivos portáteis e baseados em papel.

Tabela 9. Características analíticas obtidas para a determinação de amônio utilizando o dispositivo Smart-Sense

Fixa Linear	Equação	R	LD (mg L ⁻¹)	LQ (mg L ⁻¹)	RSD (%)
1,0 – 5,0	$R = 0,059C - 0,005$	0,997	0,27	0,9	1,70

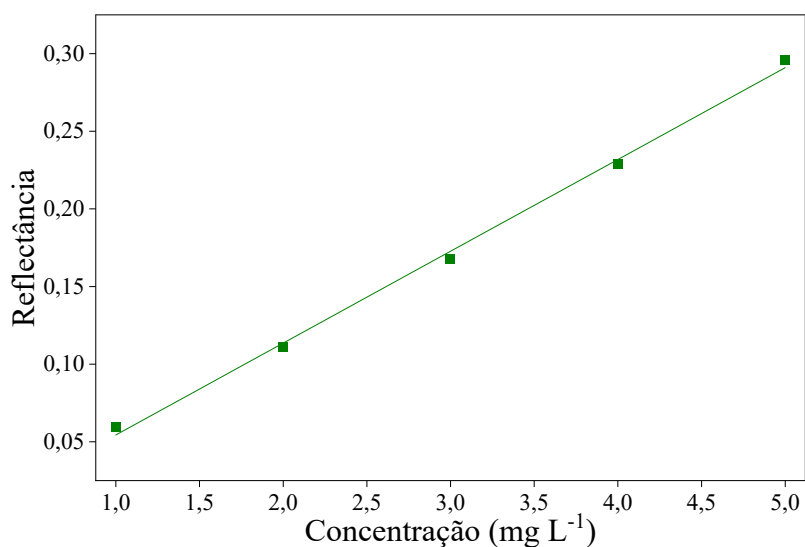


Figura 33. Curva de calibração obtida para a determinação do íon amônio utilizando o dispositivo Smart-Sense

3.5.Conclusões

As etapas de desenvolvimento e os ensaios realizados demonstram que o sistema colorimétrico portátil cumpre os requisitos propostos para uma nova instrumentação analítica. A integração do sensor AS7341 com o microcontrolador ESP32-S3 resultou em uma plataforma de hardware compacta e eficiente, cuja autonomia energética e conectividade via rede *Access Point* viabilizaram a operação *in-situ* sem a dependência de infraestruturas laboratoriais complexas.

Em relação ao processamento de dados, a implementação do algoritmo de média truncada mostrou-se eficaz na mitigação de ruídos ambientais, garantindo a estabilidade necessária para as leituras espectrais. Complementarmente, a automação da calibração via Mínimos Quadrados Ordinários (MMQ) permitiu que o processamento matemático, tradicionalmente realizado de forma externa, fosse executado integralmente no dispositivo. Isso conferiu ao sistema a capacidade de entregar resultados de concentração em tempo real, eliminando a etapa de pós-processamento manual.

Por fim, a partir da avaliação experimental do dispositivo na análise de ferro (III), amônio e nitrito em amostras de água avaliou-se sua aplicabilidade. Os resultados obtidos confirmam que o sistema apresenta sensibilidade e precisão compatíveis com os métodos de referência, consolidando-se como uma alternativa viável e de baixo custo para o monitoramento ambiental e o suporte à tomada de decisão em campo.

4. Capítulo IV: Smart-PAD – Uma plataforma mecanizada para análise baseada em papel

4.1.Introdução

4.1.1. Dispositivos analíticos a base de papel (PADs)

Os dispositivos analíticos baseados em papel (PADs) têm despertado crescente interesse na área de química analítica, principalmente em função de seu baixo custo, portabilidade e simplicidade na execução de determinações colorimétricas (Cate et al., 2015; Fernandes et al., 2020; Yang et al., 2017). Esses métodos são passíveis de serem registrados por dispositivos de imagem, como câmeras digitais, smartphones ou scanners (Fu; Wang, 2018).

Apesar de amplamente disponíveis e de fácil manuseio, tais dispositivos apresentam limitações quanto à precisão e à exatidão (Ozer; McMahon; Henry, 2025). O uso de smartphones para realizar as medidas acarreta dois principais obstáculos: diferentes hardwares para diferentes modelos de aparelho e diferentes condições de captura das imagens (Fyfe et al., 2025). Cada smartphone possui diferentes conjuntos de sensores e lentes, e os algoritmos de pós-processamento das imagens pode afetar a qualidade das imagens gerando maiores imprecisões (Tominaga; Nishi; Ohtera, 2021).

As informações colorimétricas obtidas são, em geral, transformadas em valores numéricos por meio de modelos de cor, como RGB (Red, Green, Blue). Contudo, o emprego de PADs em análises colorimétricas enfrenta desafios que comprometem a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados (Morbioli et al., 2017). Fatores como variação das condições de iluminação, intensidade e ângulo da luz, distância de leitura e até mesmo a qualidade do papel utilizado podem introduzir inconsistências que impactam a análise quantitativa (McCracken et al., 2016).

Soma-se a isso a variedade de softwares utilizados para extração e a ausência de protocolos padronizados para o tratamento dos dados, o que dificulta a comparação entre diferentes sistemas, a consolidação de modelos analíticos robustos e dificulta a possibilidade de automação. Tais limitações evidenciam a necessidade de metodologias mais bem estruturadas e de padronização para ampliar a precisão e a aplicabilidade de ensaios colorimétricos em PADs (Morbioli et al., 2017). Nesse cenário, a integração de processos de mecanização e automação surge como alternativa promissora para superar essas limitações (Capitán-Vallvey et al., 2015).

4.1.2. Mecanização

A mecanização corresponde ao uso de dispositivos que substituem ou otimizam a ação humana em tarefas específicas, como o posicionamento de amostras ou o controle da iluminação. A automação, por sua vez, consiste em um nível mais avançado, incorporando sistemas de controle capazes de executar operações de forma autônoma. Ambas as abordagens contribuem para maior precisão e confiabilidade; no entanto, a distinção entre elas é fundamental: a mecanização foca em etapas pontuais (por exemplo, manipulação da amostra), enquanto a automação engloba uma perspectiva sistêmica, coordenando múltiplas tarefas e reduzindo significativamente a intervenção humana ao longo de todo o processo (Vargas Medina; Maciel; Lanças, 2023).

O emprego de tecnologias emergentes, como impressão 3D e microcontroladores, potencializa consideravelmente os sistemas de PAD automatizados. A impressão 3D, por exemplo, possibilita tanto a prototipagem rápida quanto a produção de dispositivos customizados, incluindo plataformas para PADs, sistemas microfluídicos e até braços robóticos para manipulação de amostras (Rahbar et al., 2017). Além de reduzir custos de desenvolvimento, tais recursos favorecem a criação de equipamentos compactos, portáteis e de alta eficiência.

Microcontroladores e microcomputadores, como Arduino e Raspberry Pi, desempenham papel central nesse contexto, viabilizando o desenvolvimento de sistemas analíticos acessíveis e personalizáveis (Bandara et al., 2024; Firoozbakhtian et al., 2023). Sua aplicação em química analítica abrange desde o controle de sensores e aquisição de dados até o processamento de sinais e a execução de análises em tempo real, elevando a precisão e a eficiência dos processos. Por serem plataformas de código aberto, demandam baixo nível de especialização técnica e permitem o controle de sensores, atuadores e periféricos de maneira simplificada.

Esses dispositivos podem, por exemplo, regular condições de iluminação, automatizar a captura de imagens e processar informações obtidas de sensores de cor, assegurando maior reprodutibilidade (Maejima; Hiruta; Citterio, 2020). Adicionalmente, a integração com recursos da Internet das Coisas (IoT) expande ainda mais sua aplicabilidade, viabilizando monitoramento e controle remotos do processo analítico (Cadeado et al., 2022a; Capella et al., 2019). Com a conexão a plataformas em nuvem, PADs podem disponibilizar dados em tempo

real, receber atualizações automáticas e otimizar a gestão das informações, o que é particularmente vantajoso em análises de alta demanda (Silva-Neto et al., 2025).

A convergência entre automação, mecanização, impressão 3D, microcontroladores e IoT em sistemas baseados em PAD's apresenta elevado potencial para aprimorar a acurácia, a reprodutibilidade e a eficiência das análises colorimétricas (Rojas et al., 2024; Vargas-Muñoz et al., 2023; Yafia et al., 2015). Ao mitigar problemas recorrentes relacionados à captura de imagens e ao tratamento de dados, essas tecnologias favorecem a migração de metodologias manuais e trabalhosas para sistemas totalmente automatizados e de alta vazão (Vargas-Muñoz et al., 2023), permitindo análises mais rápidas e monitoramento em tempo real (Yafia et al., 2015)

Sensores de cor, nesse contexto, constituem alternativa contemporânea e eficiente para medições colorimétricas, apresentando vantagens em relação a técnicas clássicas, como fotometria e espectrofotometria (Machado et al., 2024). Entretanto, seu emprego em análises automatizadas ou mecanizadas ainda não foi explorado. A integração desses sensores a plataformas como Arduino ou ESP32 pode viabilizar a automação, com processamento em tempo real, armazenamento de dados e monitoramento remoto via protocolos IoT, ampliando sua aplicabilidade em análises de campo.

4.2.Objetivos

Projetar, construir e avaliar um dispositivo analítico mecanizado e integrado, denominado Smart-PAD, destinado à realização de medições colorimétricas em substratos de papel, baseado na integração do sensor espectral AS7341 com um arranjo geométrico controlado e mecanizado, de modo a assegurar condições reprodutíveis de aquisição de sinal, elevada precisão analítica.

Desenvolver mecânica e eletronicamente o Smart-PAD, contemplando a integração do sensor espectral AS7341 e os sistemas de controle e aquisição de dados, com vistas à obtenção de um dispositivo compacto, robusto e adequado a aplicações analíticas em campo.

Empregar uma plataforma mecanizada para o controle do posicionamento da amostra, visando à redução de erros sistemáticos e aleatórios associados à manipulação manual, com consequente melhoria da precisão e da repetibilidade das medições, dispensando a necessidade de aquisição e tratamento de imagens digitais.

Avaliar o desempenho analítico do Smart-PAD, por meio da investigação de parâmetros como linearidade, sensibilidade, limites de detecção, precisão e exatidão, bem como da identificação de eventuais limitações instrumentais e operacionais do sistema.

Aplicar o Smart-PAD na determinação de amônio em amostras de fertilizantes, utilizando uma versão modificada da reação de Berthelot adaptada a substratos de papel, avaliando o comportamento colorimétrico do sistema e a adequação do dispositivo à análise química quantitativa.

4.3. Materiais e métodos

4.3.1. Reagentes e soluções

Todos os reagentes e solventes empregados apresentavam grau analítico. Soluções estoque (20 mmol L^{-1}) de azul de índigo (Sigma-Aldrich, Alemanha), tartrazina, amarelo cepúsculo, vermelho bordeaux e verde de bromocresol (Merck, Alemanha) foram preparadas por meio da dissolução das quantidades apropriadas de cada composto em água ultrapura Milli-Q ($18,2 \text{ M}\Omega \text{ cm}$).

Para a quantificação de amônio, foram utilizados dois reagentes. O reagente 1 foi preparado dissolvendo-se 10 g de salicilato de sódio (Synth, Brasil) e 0,5 g de nitroprussiato de sódio di-hidratado (Neon, Brasil) em um volume final de 100 mL. O reagente 2 foi obtido pela dissolução de 1 mL de hipoclorito de sódio (12 %, Neon, Brasil), 2 g de hidróxido de sódio (Neon, Brasil) e 20 g de citrato trissódico di-hidratado (Sigma-Aldrich, Alemanha), também em um volume final de 100 mL. Para as análises, 0,5 mL do reagente 1 e 0,5 mL do reagente 2 foram adicionados sequencialmente a um tubo falcon de 15 mL, seguidos da adição de 1,0 mL da solução de calibração ou da amostra. Após 15 min, uma alíquota de 15 μL da mistura resultante foi depositada sobre o PAD para a análise.

Duas amostras de fertilizantes nitrogenados contendo nitrato de amônio e sulfato de amônio foram adquiridas de fornecedores localizados em Uberlândia, Brasil. Os fertilizantes analisados consistiam em formulações granuladas do tipo blend, contendo diferentes proporções de compostos nitrogenados.

4.3.2. Instrumentação

O dispositivo Smart-PAD foi concebido como um sistema modular com o objetivo de facilitar a usabilidade, bem como a montagem, substituição e manutenção de seus componentes. A estrutura foi fabricada por impressão 3D (GTMax3D, Core A2v2, Brasil) e é composta por três módulos interligados por ímãs de neodímio, garantindo um encaixe simples e mecanicamente estável. A **Figura 34** apresenta um esquema representativo de todas as partes do dispositivo, bem como as dimensões correspondentes a cada módulo.

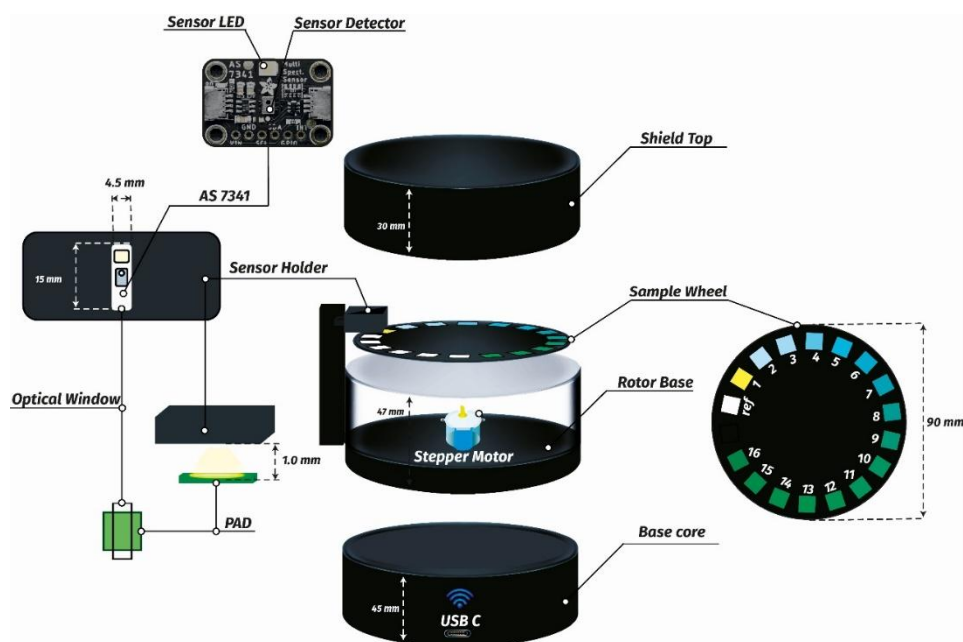


Figura 34. Esquema representativo das peças que formam o Smart-PAD e suas respectivas dimensões

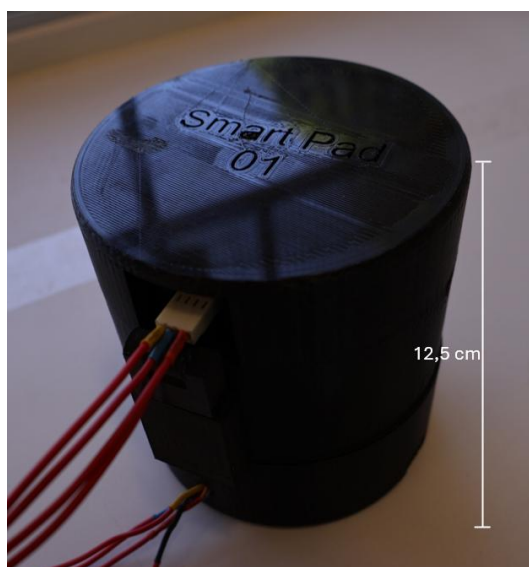
O microcontrolador ESP32, presente no módulo BaseCore, é responsável pelo controle dos componentes do Smart-PAD, incluindo o motor de passo e o sensor de cor AS7341. A comunicação para envio e recebimento de dados ocorre via Wi-Fi entre o ESP32 e um *hub* de análise hospedado em uma Raspberry Pi 3. O módulo BaseCore também integra uma interface de alimentação USB-C, responsável por fornecer energia ao sistema.

O módulo principal, denominado RotorBase, foi projetado para acomodar o motor de passo e uma roda de amostras (*SampleWheel*) impressa em 3D. O motor de passo possibilita a rotação precisa da roda, assegurando o alinhamento adequado das regiões de amostra com o detector. A *SampleWheel* possui 17 posições, sendo 16 destinadas às amostras e uma ao ponto de referência. As cavidades são dispostas simetricamente ao longo da circunferência, com profundidade de 1 mm, e foram dimensionadas para acomodar dispositivos analíticos em papel com dimensões de 10×10 mm.

Os sinais obtidos foram tratados por meio de uma função logarítmica, evidenciando uma relação linear entre a concentração do analito e a resposta do sensor em cada canal monitorado. O sinal analítico de reflectância foi definido como $-\log(I/I_0)$, em que I corresponde ao sinal da amostra e I_0 ao sinal do ponto de referência.

O suporte do sensor (*SensorHolder*), também produzido por impressão 3D e fixado por ímãs de neodímio, abriga o sensor AS7341 e inclui uma janela óptica que direciona a luz incidente para a região do papel e permite que a luz refletida retorne ao detector. Um

microinterruptor de três pinos é utilizado para indicar o ponto final de deslocamento do motor, garantindo a precisão e o final dos movimentos. O módulo superior (*ShieldTop*) atua como proteção da área de medição contra a luz ambiente, reduzindo interferências externas e aumentando precisão e exatidão das leituras. A **Figura 35** apresenta fotos do dispositivo desenvolvido.



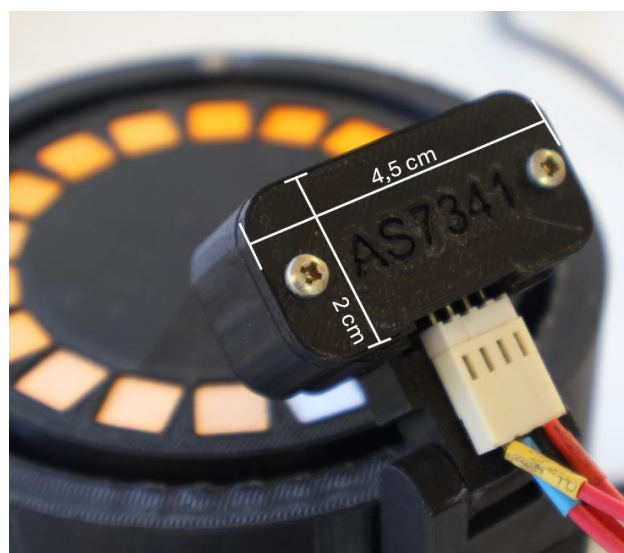
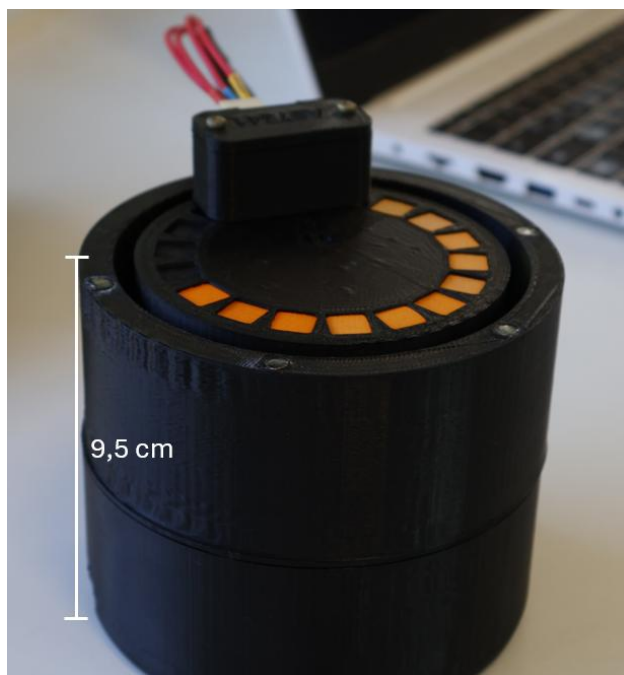




Figura 35. Fotos do dispositivo Smart-PAD em diferentes ângulos e suas dimensões

A interface Node-RED de controle do sistema Smart-PAD foi desenvolvida como uma aplicação baseada em web, utilizando JavaScript, o que possibilita a operação remota a partir de qualquer dispositivo conectado à rede Wi-Fi. A arquitetura do sistema é composta por um ESP32 que se comunica com uma Raspberry Pi 3 por meio do protocolo MQTT (*message queuing telemetry transport*) via rede sem fio, sendo o Raspberry Pi conectado a um roteador. A **Figura 36** a seguir apresenta um *printscreen* da interface desenvolvida.

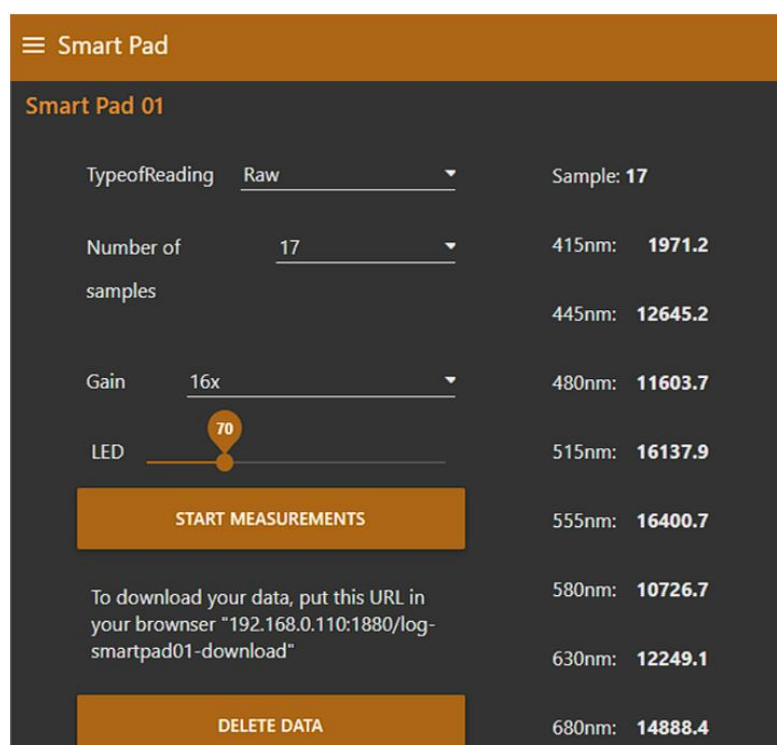


Figura 36. *Printscreen* da interface utilizada para seleção e inicialização do Smart-PAD

Nesta interface, é possível selecionar os parâmetros de interesse para a análise como: o tipo de medida (valores brutos de sinal ou cálculo automático de reflectância), número de amostras, ganho, corrente do LED do sensor e selecionar quais os canais serão utilizados para as medidas. Essas configurações são enviadas ao ESP32 via MQTT, que executa as medições conforme os parâmetros definidos.

Após a conclusão das análises, os resultados são retornados ao Node-RED pelo mesmo protocolo e armazenados no Raspberry Pi em um arquivo no formato .txt, o qual pode ser posteriormente exportado para o computador do usuário para tratamento e análise em softwares externos. Um vídeo demonstrando o funcionamento do dispositivo está disponível no link a seguir: <https://www.youtube.com/watch?v=-ARHYbEnVU0>

4.4. Resultados e discussões

4.4.1. Avaliação do Smart-PAD

Para avaliação do alinhamento e reprodutibilidade do Smart-PAD, realizou-se medidas utilizando o canal 3 do sensor AS7341 de uma mesma solução do corante amarelo crepúsculo para avaliar possíveis erros sistemáticos advindos de desníveis da *sample wheel* o que acarretaria spots mais próximos ou mais afastados da janela ótica interferindo assim nos sinais obtidos. A **Figura 37** a seguir apresenta os sinais obtidos em triplicata em cada uma das posições do Smart-PAD.

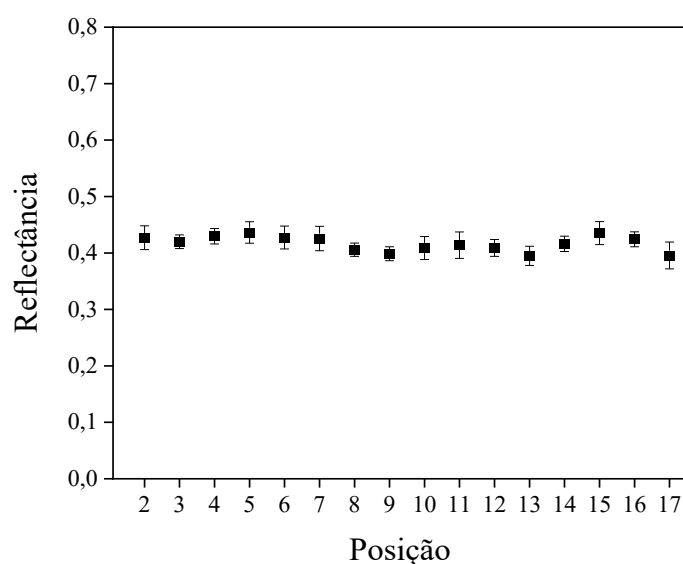


Figura 37. Avaliação dos sinais obtidos em cada uma das posições de leitura do dispositivo. Posição: PAD de referência para cálculo do Io.

Conforme apresentado na **Figura 37**, não foi observada nenhuma tendência sistemática nos valores de reflectância obtidos para os 16 spots analisados. O valor médio de reflectância registrado foi de 0,417, com desvio padrão de 0,014. O desvio padrão relativo ($RSD = 3,4 \%$) apresentou-se baixo, indicando boa precisão nas medidas associadas aos 16 spots. As medidas foram realizadas utilizando como referência um papel antes da adição de quaisquer reagentes.

Com o objetivo de avaliar a existência de uma possível relação entre a variável de interesse e o sinal medido, foi realizada uma análise de regressão linear utilizando os dados do canal 3 do AS7341. A reta de regressão obtida apresentou inclinação de $-0,0012$ e valor de p igual a $0,1069$, indicando que a relação observada não é estatisticamente significativa ao nível

de confiança de 95 %. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,175$) reforça a presença de uma correlação fraca entre o sinal medido e a variável avaliada.

A normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro–Wilk, que resultou em um estatístico de 0,9418 e valor de p de 0,3719, indicando que não há evidências de desvio significativo da distribuição normal.

Adicionalmente, para investigar a presença de possíveis erros sistemáticos, foi conduzida uma análise de variância (ANOVA) comparando a primeira e a segunda metade do conjunto de dados. O teste resultou em um valor de F igual a 1,901 e $p = 0,189$, demonstrando ausência de diferença estatisticamente significativa entre os dois segmentos analisados.

A partir dos dados apresentados, a 95% de confiança, não tem-se evidências de erros sistemáticos nas medidas, assegurando que todas as posições avaliadas proporcionam condições de medição equivalentes entre si.

4.4.2. Avaliação da secagem dos PAD's

A secagem dos PAD's tem grande influência na obtenção de medidas confiáveis e reprodutivas no dispositivo. Isso se deve ao fato de que a presença de umidade nos papéis altera o índice de refração da matriz, causa dispersão da luz e reduz, assim, o sinal analítico. Além disso, quando molhados, os papéis são expostos à base preta do dispositivo e diminui a reflexão da luz. Essa exposição acontece de forma aleatória e aumenta a variabilidade do sinal entre replicatas.

Para comprovar a influência do tempo de secagem, construiu-se duas curvas de calibração para o corante AC e estão apresentadas na **Figura 38** a seguir. Uma curva obtida logo após a dispensação da solução no papel (sem secagem) e uma curva após a secagem dos papéis (tempo arbitrário decidido neste experimento apenas olhando a mudança do aspecto físico dos papéis).

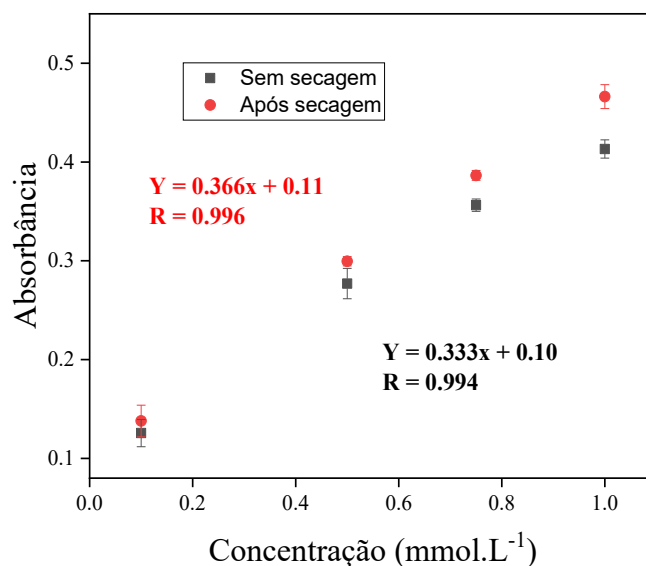


Figura 38. Curvas de calibração do corante amarelo crepúsculo sem secagem (preto) e após a secagem (vermelho)

A partir da análise das curvas de calibração nota-se que após o período de secagem há um aumento do sinal obtido o que melhora também a sensibilidade do método. Realizou então estudos para otimização desta secagem. O primeiro estudo realizado foi sobre a secagem dos papéis em temperatura ambiente fora da *sample wheel* e em uma estufa a 60°C. Avaliou-se a secagem de uma solução do corante AC monitorando-se os valores de RSD ($n = 5$, 12 μ L e concentração = 0,5 mmol L⁻¹) em diferentes tempos de secagem. Os resultados obtidos estão apresentados na **Figura 39** a seguir.

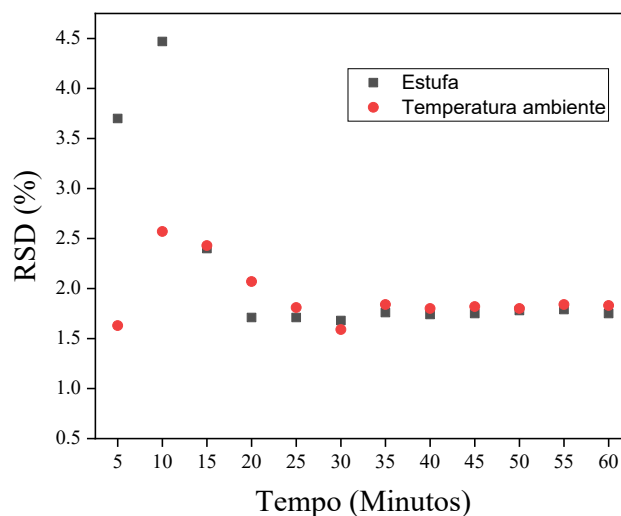


Figura 39. Avaliação dos valores de RSD ($n = 5$, concentração = $0,5 \text{ mmol L}^{-1}$) em função do tempo em diferentes métodos de secagem dos PAD's.

A alta variação dos valores de RSD nos minutos iniciais, indicam uma secagem inconsistente e incompleta onde a umidade residual altera de forma não uniforme o índice de refração e aumenta os valores de RSD. A partir de 25 minutos percebe-se uma estabilização de baixa variabilidade dos sinais analíticos. Indicando assim, que este é o tempo mínimo de espera para qualquer um dos dois meios de secagem.

A pequena diferença entre os valores de RSD obtidos pela secagem em temperatura ambiente em comparação com a secagem na estufa, indica que a principal fonte de erro é o tempo de secagem insuficiente e o uso da estufa não diminui esse tempo de forma que justifique o uso de mais um equipamento no procedimento experimental.

A partir disso, avaliou-se a dispensação da solução nos papéis e seguinte secagem diretamente na sample wheel. Neste estudo, utilizou-se o mesmo corante, e a secagem aconteceu em temperatura ambiente. A **Figura 40** a seguir apresenta os sinais obtidos em intervalo de tempo de 5 minutos, o desvio padrão (barras de erro) e as fotos dos spots.

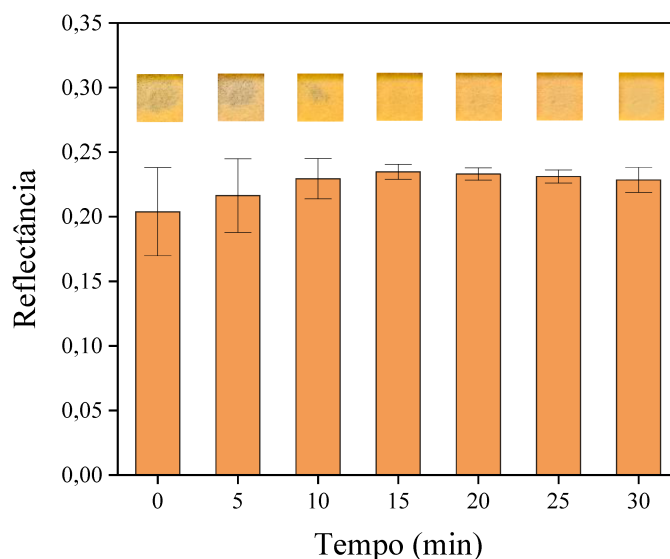


Figura 40. Sinal médio de reflectância (n=5), desvio padrão e foto do PAD utilizado em diferentes tempos de secagem para o corante AC.

O gráfico apresentado demonstra elevação do sinal e diminuição do desvio padrão nos primeiros 15 minutos e corresponde visualmente à mudança dos spots de um estado úmido e manchado (0 e 5 min) para um estado seco e uniforme (a partir de 15 min). À medida que a água evapora, a estrutura do papel se torna mais opaca e as propriedades ópticas se estabilizam, resultando na maximização e estabilização do sinal de reflectância.

Sendo assim, o período de secagem de 15 minutos foi estabelecido como o tempo ideal para garantir a secagem integral dos PAD's levando assim à estabilização do sinal analítico, diminuição de incertezas e aproximação da exatidão nas medidas realizadas utilizando o Smart-PAD.

4.4.3. Otimização dos parâmetros do sensor AS7341

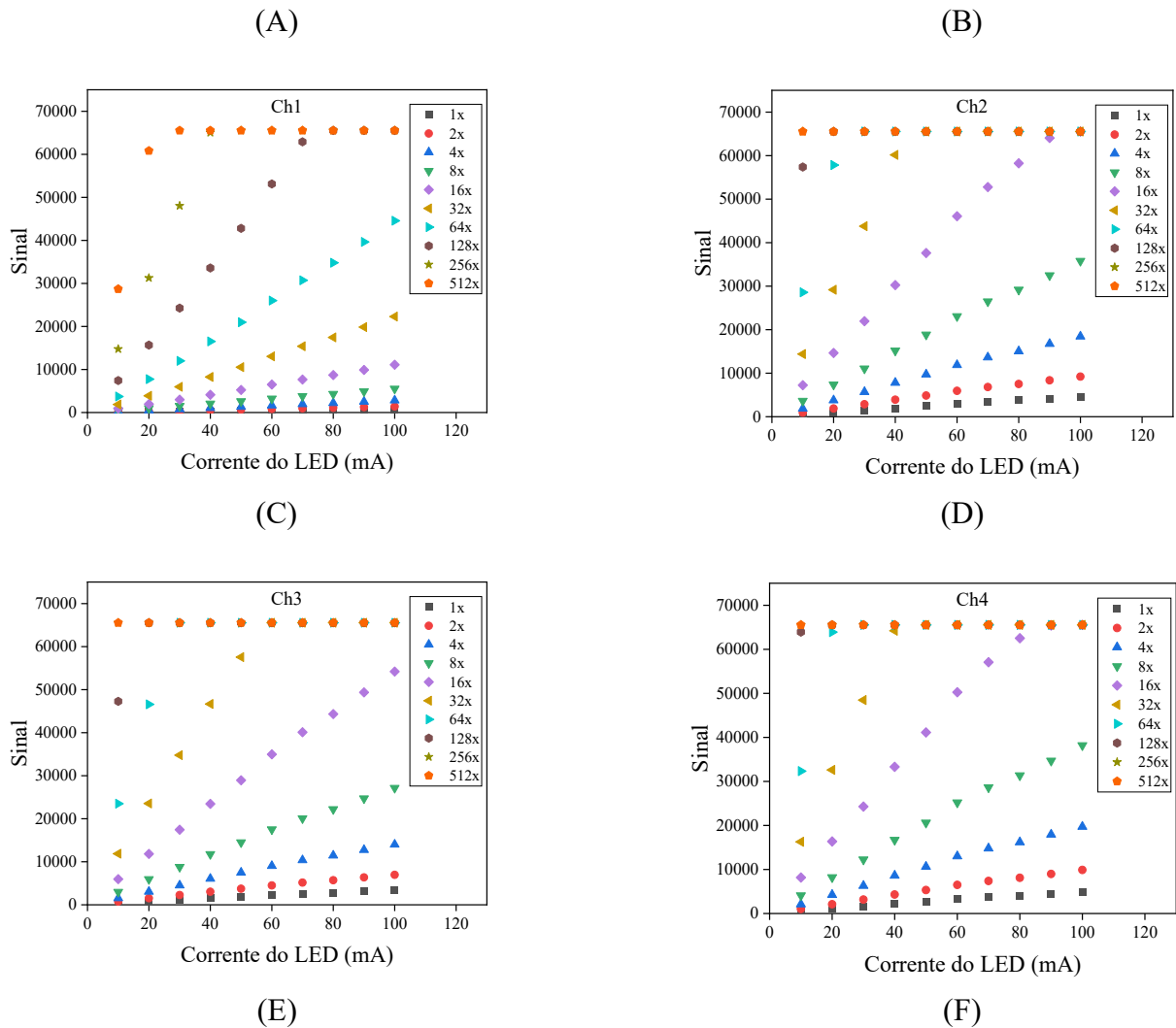
Conforme discutido no item 2.4.2 deste trabalho, o desempenho do sensor AS7341, em medidas de reflectância, está condicionado tanto ao ganho do detector quanto à intensidade luminosa do LED integrado. Esses parâmetros foram avaliados de forma sistemática com o objetivo de maximizar a amplificação do sinal, assegurando simultaneamente que não ocorresse saturação em nenhum dos canais de detecção, considerando o conversor analógico-digital de 16 bits do sensor, cujo valor máximo é 65.535 contagens (2^{16}).

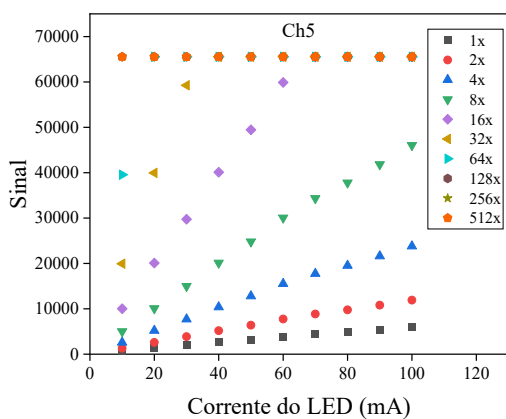
O aumento da corrente aplicada ao LED promoveu maior intensidade da luz refletida pelos PAD's, resultando em elevação do sinal analítico. De maneira análoga, o ajuste do ganho

do sensor produziu uma amplificação proporcional do sinal, evidenciando a relevância desses fatores na otimização da sensibilidade das medições.

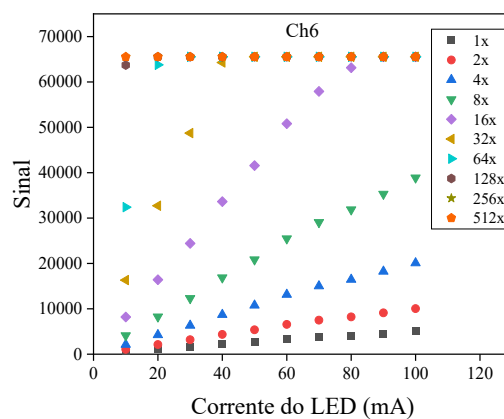
A otimização conjunta da corrente do LED e do ganho do sensor teve como finalidade alcançar a maior razão sinal-ruído possível em cada canal espectral, evitando rigorosamente a saturação do detector. Como o AS7341 opera em 16 bits, seu intervalo de contagem se estende de 0 a 65.535. Os parâmetros finais selecionados, apresentados nos gráficos de otimização incluídos nas **Figuras 41** e resumidos na **Tabela 10**, correspondem às condições nas quais o sinal máximo foi obtido imediatamente abaixo do limiar de saturação. Essa estratégia fornece subsídios relevantes para a obtenção de resultados confiáveis e precisos em aplicações analíticas baseadas em papel.

Cabe resaltar que a otimização realizada é dependente do meio no qual está inserido o sensor. Diferentes tipos e cor de filamento, diferente resolução e velocidade de impressão podem alterar as condições ótimas do sensor em cada dispositivo e sistema.





(G)



(H)

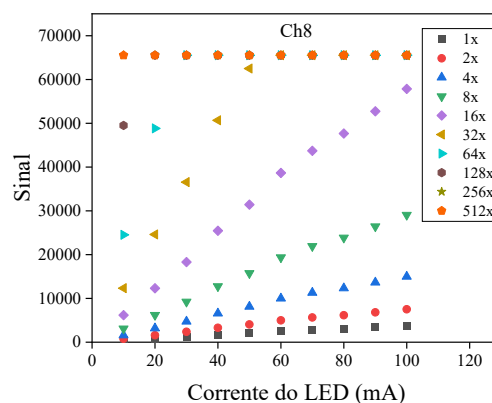
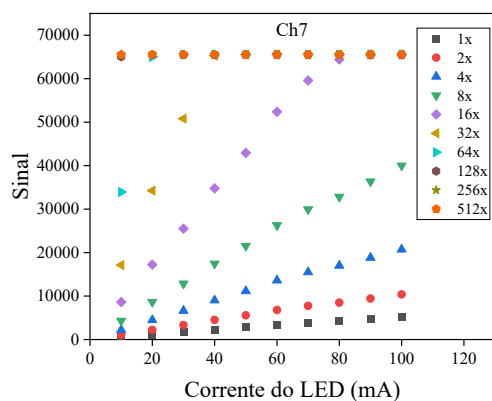


Figura 41. Sinais obtidos em função da corrente aplicada ao LED (5–100 mA) em diferentes ganhos (1 a 512X) para otimização e seleção dos parâmetros para cada um dos canais disponíveis no sensor AS7341 para as medidas em papel – a) Canal 1 = 415 nm, b) Canal 2 = 445 nm, c) Canal 3 = 480 nm, d) Canal 4 = 515 nm, e) Canal 5 = 555 nm, f) Canal 6 = 590 nm, g) Canal 7 = 630 nm e h) Canal 8 = 680 nm.

Tabela 10. Condições otimizadas de ganho e corrente do LED para os canais do sensor AS7341 para medidas no Smart-PAD

Canal	Ganho	Corrente do LED
		(mA)
C1	512	20
C2	64	20
C3	32	50
C4	16	70

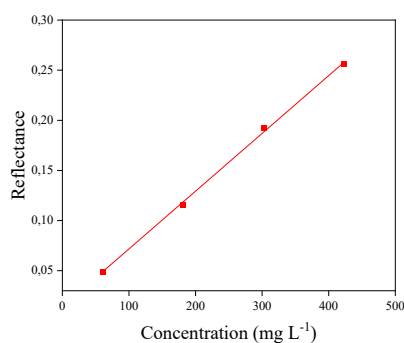
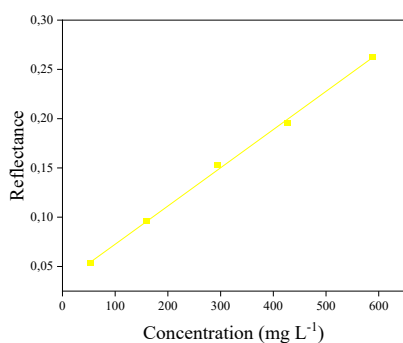
C5	16	60
C6	16	70
C7	16	70
C8	16	100

4.4.4. Avaliação da capacidade analítica do Smart-PAD

Com o objetivo de verificar a capacidade do sistema proposto em apresentar respostas lineares para diferentes corantes com ampla faixa de absorção ao longo do espectro eletromagnético, aplicados em dispositivos analíticos baseados em papel (μ PADs), este estudo foi conduzido como uma prova de conceito para demonstrar a adequação do sensor à detecção colorimétrica nesse tipo de plataforma. Todas as medidas foram realizadas em triplicata, visando assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos dados obtidos.

O desempenho analítico de distintos corantes — tartrazina ($\lambda_{\text{max}} = 428 \text{ nm}$), vermelho Bordeaux ($\lambda_{\text{max}} = 540 \text{ nm}$), bromocresol ($\lambda_{\text{max}} = 576 \text{ nm}$, pH = 4,5) e índigo ($\lambda_{\text{max}} = 610 \text{ nm}$) — foi investigado para avaliar a eficiência do dispositivo em papel na análise de amostras coloridas. A escolha desses corantes baseou-se em suas características espectrais específicas, que abrangem uma ampla faixa de comprimentos de onda dentro da região visível. Todas as análises foram conduzidas sob condições previamente otimizadas.

A **Tabela 11** apresenta os principais parâmetros analíticos de cada corante, incluindo a faixa linear, o desvio padrão relativo (RSD), a equação de calibração e o coeficiente de correlação (R). As curvas analíticas correspondentes encontram-se na **Figura 42** a seguir.



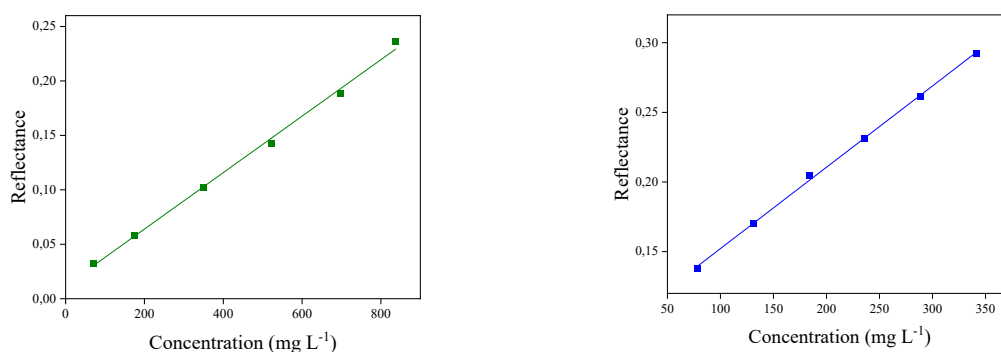


Figura 42. Curvas de calibração obtidas para cada um dos corantes avaliados: Amarelo tartrazina, vermelho Bordeaux, azul Indigo e verde de Bromocresol.

Tabela 11. Características analíticas obtidas para análise dos corantes avaliados: Faixa linear, RSD, LD, equação da reta e valor de R

	Faixa linear (mg L ⁻¹)	RSD (%)	LD (mg L ⁻¹)	Equação da reta	R
Tartrazina	50 - 590	1,7	50	$R = 3,8 \times 10^{-4} C + 0,034$	0.998
Bordeaux	60 - 420	1,5	40	$R = 5,8 \times 10^{-4} C + 0,014$	0.997
Indigo	80 - 340	1,3	30	$R = 5,8 \times 10^{-4} C + 0,093$	0.996
Bromocresol	70 - 840	1,8	60	$R = 2,6 \times 10^{-4} C + 0,012$	0.997

Os resultados obtidos evidenciam elevada precisão, com valores de RSD inferiores a 2 %. Tal desempenho é atribuído à mecanização do processo de medição, que garantiu condições controladas e altamente reprodutíveis em cada análise, tornando o sistema particularmente adequado para aplicações em μ PADs que demandam alta confiabilidade e elevada capacidade analítica.

4.4.5. Aplicação do Smart-PAD na análise de amônio em fertilizante

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade analítica do dispositivo construído a determinação de amônio foi realizada empregando a reação colorimétrica de Berthelot em sua forma modificada (reação esquemática apresentada na **Figura 43**). Nesse procedimento, os íons amônio reagem com hipoclorito de sódio em meio alcalino catalisados por nitroprussiato de sódio, resultando na formação do indofenol, um complexo de coloração verde/azul, o qual apresenta máximo de absorção em 640 nm (Thongkam; Rungsirisakun; Hemavibool, 2020a).

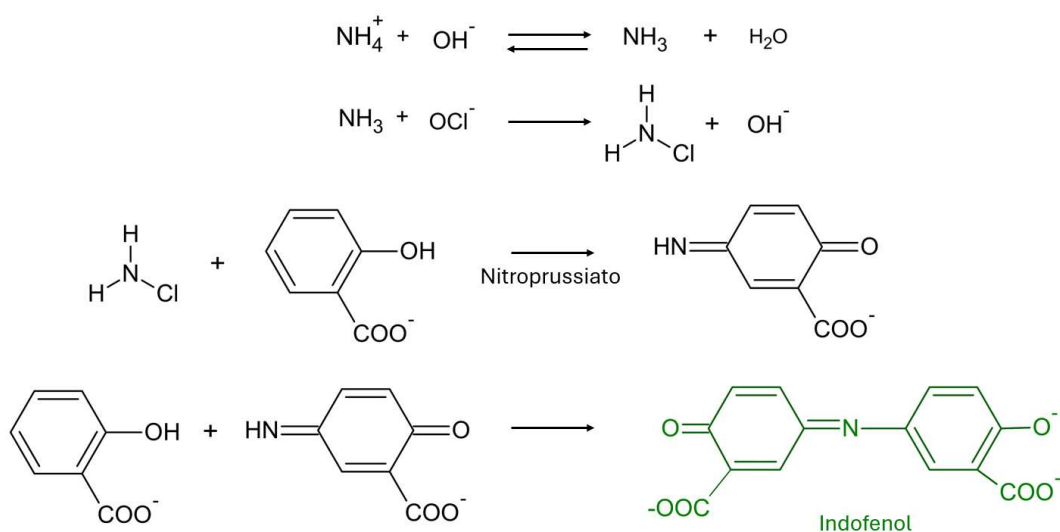


Figura 43. Esquema ilustrativo da reação de Berthelot modificada

Fonte: o autor. Adaptada de: (Thongkam; Rungsirisakun; Hemavibool, 2020a)

Apesar de sua eficiência, esse método apresenta cinética de reação lenta, exigindo tempos prolongados para que a coloração se desenvolva completamente (Patton'; Crouch, 1977). Diante dessa limitação, a automação das medidas torna-se essencial para garantir o controle preciso do tempo reacional, possibilitando leituras de reflectância mais exatas e reprodutíveis no ponto ideal de desenvolvimento da cor (Cogan et al., 2014). A **Figura 44** a seguir ilustra o espectro de absorção do complexo formado, sobreposto às respostas espectrais de cada canal do sensor. Observa-se que o canal 8 apresenta a resposta mais expressiva ao produto formado, uma vez que o espectro de absorção do complexo coincide de forma mais adequada com a resposta espectral desse canal.

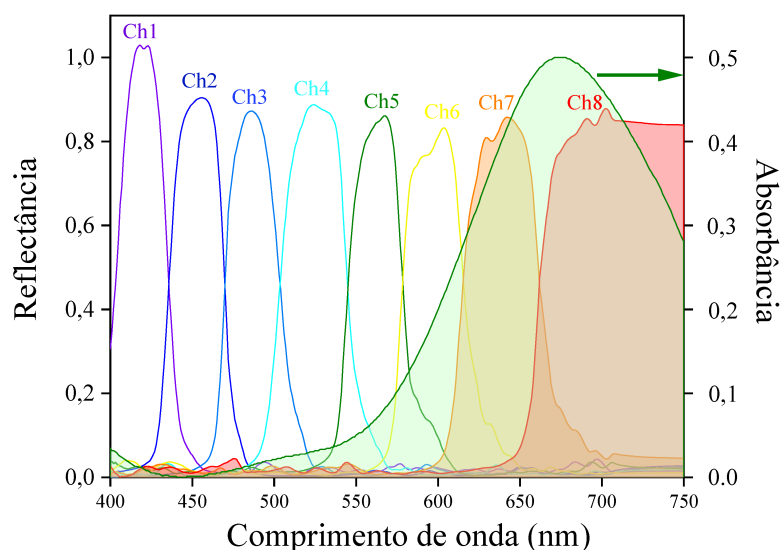


Figura 44. Espectro de absorção do indophenol (verde) em sobreposição com a resposta efetiva do sensor AS7341

A estabilidade do cromóforo indofenol, formado por meio da reação de Berthelot, foi avaliada, verificando-se que a intensidade da coloração diminui ao longo do tempo quando o produto é depositado na zona de detecção do dispositivo analítico em papel. Essa redução na intensidade da cor resulta no enfraquecimento do sinal analítico, afetando negativamente a precisão das medições devido ao aumento da variabilidade associada à degradação do cromóforo.

Esse comportamento foi relatado em estudos anteriores e pode estar relacionado a fatores como a difusão do cromóforo pela estrutura porosa do papel, interações com umidade residual ou desprendimento parcial da região de detecção (Thongkam; Rungsirisakun; Hemavibool, 2020b). O estudo de estabilidade do produto formado é apresentado na **Figura 45**.

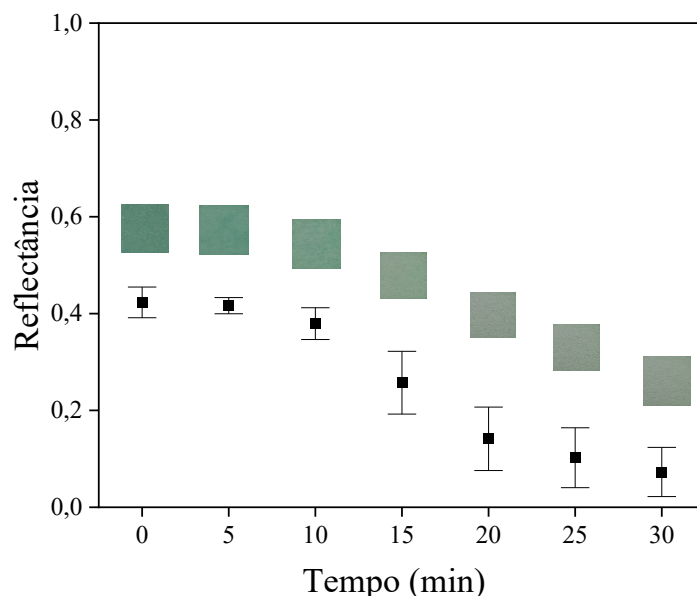


Figura 45. Valores de reflectância e desvio padrão ($n = 5$) obtidos em diferentes tempos de secagem do produto formado no PAD e as fotos dos spots

Conforme apresentado na **Figura 45**, o tempo de secagem de 15 min proporciona medições mais precisas no Smart-PAD. No entanto, para a determinação de amônio pela reação de Berthelot, observa-se que a degradação do cromóforo indofenol se inicia após aproximadamente 5 min. Dessa forma, torna-se necessário estabelecer uma relação de compromisso entre um tempo de secagem adequado do dispositivo em papel e a realização das medições antes que ocorra degradação significativa do cromóforo.

Com base nesse equilíbrio, as medições foram iniciadas 3 min após a adição da amostra. Considerando que cada medição requer 19,4 s e que o período de secagem antes do início das leituras é de 3 min, o tempo total necessário para a realização das 16 medições é de aproximadamente 8,2 min. A automatização desse procedimento é fundamental, uma vez que o Smart-PAD permite o controle rigoroso do tempo, assegurando que as medições permaneçam consistentes e confiáveis ao longo do processo. Essa automatização aumenta a confiabilidade dos resultados e garante elevada precisão por meio do controle temporal.

Nas condições otimizadas, foram obtidas as características analíticas para a determinação de amônia pelo método de Berthelot utilizando o Smart-PAD. O limite de detecção (LD) foi calculado como $3,3 \times SD$ ($n = 10$) dividido pela inclinação da curva de calibração. O método apresentou comportamento linear para concentrações de amônia entre 10

e 110 mg L^{-1} , com LD calculado de 6 mg L^{-1} . Além disso, foi obtido um desvio padrão relativo (RSD) de 2,7 %, evidenciando a boa precisão do método. A curva analítica para a determinação de amônio é apresentada na **Figura 46**.

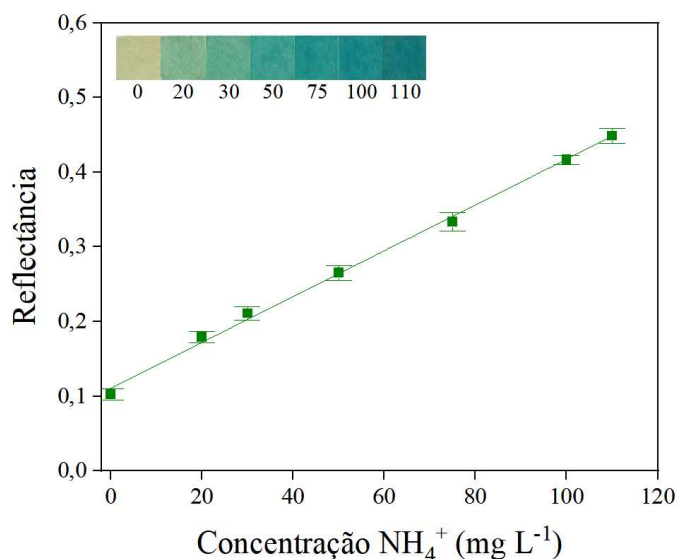


Figura 46. Curva de calibração obtida através do sinal de reflectância obtido em função da variação de concentração do íon amônio e foto dos spots de cada um dos spots utilizados

Os resultados obtidos com o sistema Smart-PAD para a determinação de amônio foram comparados com aqueles reportados na literatura para dispositivos analíticos em papel baseados em detecção colorimétrica (Cho et al., 2018; Ferreira; Mesquita; Rangel, 2023; Jaikang; Paengnakorn; Grudpan, 2020; Manori Jayawardane; Mckelvie; Kolev, 2015; Musile et al., 2019; Peters et al., 2019; Thangjitsirisin; Seecharaj; Choengchan, 2024; Thepchuay et al., 2020; Thongkam; Rungsirisakun; Hemavibool, 2020b; Uhlikova et al., 2024).

As principais características analíticas desses métodos estão resumidas na **Tabela 12**. Nos trabalhos selecionados, foram utilizados diferentes dispositivos de aquisição de imagem, como câmeras digitais, câmeras de smartphones e scanners, associados a softwares como ImageJ, MATLAB e o aplicativo móvel “*What a Color*” para conversão das imagens em sinais RGB e extração das informações analíticas. Isso evidencia a dependência de etapas adicionais de processamento de sinal nesses métodos.

Tabela 12. Comparação do desempenho analítico de diferentes métodos empregados para a determinação de amônio

Método	Amostra	Faixa linear	LD	RSD	Ref
Berthelot modificado	Fertilizante	10-110 mg/L	6 mg/L	2,7%	Este trabalho (Cho et al., 2018) (Thongkam; Rungsirisakun; Hemavibool, 2020a) (Thangjitsirisin; Seecharaj; Choengchan, 2024) (Manori Jayawardane; Mckelvie; Kolev, 2015)
	Água	10-200 mg/L	10 mg/L	-	
	Solo	10-100 mg/L	0,5 mg/L	3,2%	
	Água	5-100 mg N/L	1.05 mg N/L	0,85	
3-Azul de nitrofenol/bromotimol	Efluente	10-100/10-50 mg N/L	0,8 / 1,8 mg N/L	3,3/3,7	
Amarelo de Nitrazina/Azul de bromotimol	Água doce	0,5-3,0/2,0-10 mg N/L	0,32 / 0,47 mg N/L	7,6/9,0	(Peters et al., 2019)
	Água / solo	6,5–100/2,1–15,0 mg N/L	6,5 / 2,1 mg N/L	-	(Uhlikova et al., 2024)
Azul de bromotimol	Saliva	15–150 mg/L	3,42 mg/L	3,1%	(Thepchuay et al., 2020)
	Saliva	1,80-90,2 mg/L	0,032 mmol/L	4,7%	(Ferreira; Mesquita; Rangel, 2023)

Extrato da flor de ervilha-borboleta	Água doce / fertilizante	10-100 mg/L	4 mg/L	-	(Jaikang; Paengnakorn; Grudpan, 2020)
Reagente de Nessler	Humor vítreo	5,41-27,06 mg/L	0,4 mmol/L	9,3%	(Musile et al., 2019)

A metodologia proposta, fundamentada na reação de Berthelot, apresentou desempenho analítico comparável ao de outros estudos voltados à determinação de amônio, bem como a aplicações envolvendo diferentes métodos e reações químicas. Entretanto, o sistema Smart-PAD apresenta vantagens relevantes. Trata-se de uma abordagem totalmente mecanizada e de alta produtividade, que elimina a necessidade da etapa de conversão de imagem em sinal RGB, comumente exigida em dispositivos baseados em câmeras.

Essa etapa de conversão, embora útil, pode resultar em perda de informação e redução da eficiência do processo, comprometendo a taxa de análises. Assim, o Smart-PAD representa um avanço significativo em relação aos dispositivos analíticos em papel convencionais, oferecendo uma alternativa mais rápida, eficiente e parcialmente automatizada para a detecção colorimétrica de amônio. Além disso, essa metodologia apresenta elevado potencial para aplicação na quantificação de outros analitos em diferentes matrizes de amostras.

Dois fertilizantes comerciais foram analisados utilizando o Smart-PAD desenvolvido, baseado na reação de Berthelot, e um espectrofotômetro UV–Vis como método de referência para a quantificação de amônio. O teor de amônio determinado para a Amostra 1 foi de 16,7 % $\pm$ 0,9 (m/m), enquanto o método espectrofotométrico UV–Vis forneceu o valor de 16,2 % $\pm$ 0,1 (m/m). Para a Amostra 2, o Smart-PAD indicou uma concentração de 21,1 % $\pm$ 1,1 (m/m), ao passo que o método UV–Vis resultou em 21,5 % $\pm$ 0,1 (m/m).

Para a comparação estatística dos resultados obtidos por ambos os métodos, foi aplicado o teste t. Para a Amostra 1, o valor de t foi 0,960 com p-valor de 0,393, enquanto para a Amostra 2 o valor de t foi 0,940 com p-valor de 0,405. Como ambos os p-valores são superiores a 0,05, não há diferença estatisticamente significativa entre os resultados obtidos pelos dois métodos.

Esses resultados confirmam que os valores fornecidos pelo Smart-PAD não diferem estatisticamente daqueles obtidos pelo método UV–Vis, considerando um nível de confiança

de 95 % ($p > 0,05$), demonstrando a confiabilidade do método proposto para a quantificação de amônio em fertilizantes.

4.5.Conclusões

Os resultados obtidos demonstraram que a mecanização do processo de leitura, aliada ao uso direto de um sensor espectral multicanal (AS7341), permitiu a obtenção de sinais altamente reprodutíveis, com baixos valores de desvio padrão relativo entre diferentes posições de leitura. A avaliação estatística confirmou a ausência de erros sistemáticos associados ao posicionamento das amostras, viabilizando o arranjo mecânico e geométrico adotado no dispositivo. Além disso, os estudos sobre a secagem dos PAD's evidenciaram a influência crítica da umidade residual na resposta analítica, permitindo a definição de um tempo ótimo de secagem capaz de maximizar a estabilidade e a precisão dos sinais obtidos.

A capacidade analítica do Smart-PAD foi comprovada por meio da obtenção de respostas lineares, precisas e com bons limites de detecção para diferentes corantes, distribuídos ao longo de ampla faixa do espectro visível, reforçando a versatilidade da plataforma para aplicações colorimétricas em papel.

A aplicação do Smart-PAD na determinação de amônio em fertilizantes, utilizando a reação de Berthelot modificada, demonstrou que o sistema é capaz de fornecer resultados confiáveis e estatisticamente equivalentes aos obtidos por espectrofotometria UV-Vis de bancada. A mecanização do controle temporal das medições mostrou-se essencial para lidar com a instabilidade do cromóforo formado, evidenciando uma vantagem clara do sistema mecanizado em relação a abordagens manuais. Os valores de precisão, faixa linear e limite de detecção obtidos são compatíveis com aqueles reportados na literatura para PADs, com o diferencial de eliminar completamente a etapa de aquisição e processamento de imagens.

De forma geral, o Smart-PAD representa um avanço significativo no campo dos dispositivos analíticos baseados em papel, ao integrar mecanização, sensoriamento espectral direto e conectividade, resultando em uma plataforma compacta, de baixo custo e elevada produtividade. O sistema desenvolvido amplia as possibilidades de aplicação de PADs em análises quantitativas confiáveis, especialmente em contextos que demandam portabilidade, simplicidade operacional e automação, como análises de campo, monitoramento ambiental e controle de qualidade. Além disso, a arquitetura modular e a flexibilidade do sistema abrem perspectivas promissoras para sua adaptação à determinação de outros analitos e à integração com estratégias mais avançadas de automação e Internet das Coisas.

5. Conclusões gerais

Os resultados apresentados ao longo deste trabalho demonstram que a integração de sensores digitais de cor com sistemas embarcados e plataformas inteligentes constitui uma abordagem promissora para o desenvolvimento de dispositivos analíticos portáteis, de baixo custo e com desempenho compatível ao de instrumentos espectrofotométricos convencionais. A comparação entre diferentes sensores evidenciou que dispositivos multicanais, como o AS7341, apresentam vantagens significativas em termos de seletividade e capacidade de lidar com sistemas multicomponentes, como observado na quantificação do corante amarelo crepúsculo na presença de interferentes espectrais.

Em conjunto, os dispositivos e metodologias propostos contribuem para a evolução da instrumentação analítica moderna, evidenciando que sensores de cor e sistemas embarcados podem desempenhar papel relevante no avanço das análises químicas, no fortalecimento da IoAT e no desenvolvimento de soluções analíticas sustentáveis, acessíveis e alinhadas às demandas contemporâneas da química analítica.

6. Referências

ABDELFATTAH, Yasmeeen M. *et al.* Point-of-care colorimetric biosensor for H₂O₂ and glucose detection utilizing the peroxidase-like activity of 2D bimetallic metal organic framework nanosheets. **Analytica Chimica Acta**, v. 1356, 22 jun. 2025.

ASHOURI, Majid *et al.* **Edge computing simulators for iot system design: An analysis of qualities and metrics.** **Future Internet**MDPI AG, 1 nov. 2019.

BANDARA, Y. M. Nuwan D. Y. *et al.* Nanopore Fabrication Made Easy: A Portable, Affordable Microcontroller-Assisted Approach for Tailored Pore Formation via Controlled Breakdown. **Analytical Chemistry**, v. 96, n. 5, p. 2124–2134, 6 fev. 2024.

BEYAZ, Abdullah. **Comparison of Arduino Based Inexpensive Colormeters Effectiveness at Some Agricultural Products.** *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/322294536>>.

BOHR, N. I. On the constitution of atoms and molecules. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 26, n. 151, p. 1–25, jul. 1913.

BOTELHO, Bruno G.; DE ASSIS, Luciana P.; SENA, Marcelo M. Development and analytical validation of a simple multivariate calibration method using digital scanner images for sunset yellow determination in soft beverages. **Food Chemistry**, v. 159, p. 175–180, 15 set. 2014.

CADEADO, Alegre N. S. *et al.* **Internet of Things as a Tool for Sustainable Analytical Chemistry: A Review.** **Journal of the Brazilian Chemical Society**Sociedade Brasileira de Química, , 1 jul. 2022a.

CADEADO, Alegre N. S. *et al.* A palm-sized wireless device for colorimetric nitrite determination in water. **Microchemical Journal**, v. 183, 1 dez. 2022b.

CADEADO, Alegre N. S.; MACHADO, Caio C. S.; SILVA, Sidnei G. Simultaneous reflectance and fluorescence measurements for portable formaldehyde determination in milk using a multi-channel spectrometer sensor. **Food Chemistry**, v. 464, 1 fev. 2025.

CADEADO, Alegre N. S.; SILVA, Sidnei G. Development of a portable optical device with a multi-channel spectrometer sensor for quantification of glycerol in wine: a maker approach for on-site analysis. **Analytical Methods**, v. 15, n. 35, p. 4477–4484, 26 jul. 2023.

CANO, David Vargas *et al.* ‘Ataulfo’ mango maturity index prediction using the AS7262 spectral sensor. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 46, 2024.

CAPELLA, J. V. *et al.* A new application of internet of things and cloud services in analytical chemistry: Determination of bicarbonate in water. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 24, 2 dez. 2019.

CAPITÁN-VALLVEY, Luis Fermín *et al.* **Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: A tutorial review.** *Analytica Chimica Acta* Elsevier B.V., , 29 out. 2015.

CATE, David M. *et al.* **Recent developments in paper-based microfluidic devices.** *Analytical Chemistry* American Chemical Society, , 6 jan. 2015.

CESAR SOUZA MACHADO, Caio; DA SILVEIRA PETRUCI, João Flávio; G. SILVA, Sidnei. An IoT optical sensor for photometric determination of oxalate in infusions. **Microchemical Journal**, v. 168, 1 set. 2021.

CHENG, Rumei *et al.* Aminophenylboronic acid-modified nitrogen-doped graphene quantum dots and their applications in lysine sensing based on interplaying fluorescent mechanisms. **Microchimica Acta**, v. 191, n. 9, 1 set. 2024.

CHO, Yeong Beom *et al.* Selective colorimetric detection of dissolved ammonia in water via modified Berthelot’s reaction on porous paper. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 256, p. 167–175, 1 mar. 2018.

COGAN, Deirdre *et al.* The development of an autonomous sensing platform for the monitoring of ammonia in water using a simplified Berthelot method. **Analytical Methods**, v. 6, n. 19, p. 7606–7614, 7 out. 2014.

COLIN N. BARNWELL; ELAINE M. MCCASH. **Fundamentals of Molecular Spectroscopy.** 4^a ed. [S.l.: S.n.].

COMEJINA, Prathan; KANNA, Miki; SOMNAM, Sarawut. Development of an ESP32 Microcontroller-based Colorimeter with an Android App for the Verification of Roasting Degree of Coffee Beans. **Chiang Mai Journal of Science**, v. 51, n. 5, 1 set. 2024.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE. **CIE Colorimetry**. [S.l.: S.n.].

DANIEL C. HARRIS. **Análise Química Quantitativa**. 9ª ed. [S.l.: S.n.].

DASGUPTA, Purnendu K. *et al.* Light emitting diode-based detectors: Absorbance, fluorescence and spectroelectrochemical measurements in a planar flow-through cell. *In*: Elsevier, 19 dez. 2003.

DE CARVALHO OLIVEIRA, Geandre *et al.* RGB color sensor for colorimetric determinations: Evaluation and quantitative analysis of colored liquid samples. **Talanta**, v. 241, n. January, 2022.

DE L. M. DE MORAIS, Camilo *et al.* A low-cost microcontrolled photometer with one color recognition sensor for selective detection of Pb²⁺ using gold nanoparticles. **Analytical Methods**, v. 7, n. 18, p. 7917–7922, 21 set. 2015.

DE ROSSO, Veridiana Vera; MERCADANTE, Adriana Z. Evaluation of colour and stability of anthocyanins from tropical fruits in an isotonic soft drink system. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 8, n. 3, p. 347–352, set. 2007.

DINÇ ZOR, Şule *et al.* Simultaneous Determination of Potassium Sorbate, Sodium Benzoate, Quinoline Yellow and Sunset Yellow in Lemonades and Lemon Sauces by HPLC Using Experimental Design. **Journal of Chromatographic Science**, v. 54, n. 6, p. 952–957, 1 jul. 2016.

DONALD L. PAVIA *et al.* **Introdução à Espectroscopia**. 4ª ed. [S.l.: S.n.].

DOUGLAS, A. Skoog; F. JAMES HOLLER; STANLEY R. CROUCH. **Princípios de Análise Instrumental**. 6ª ed. [S.l.: S.n.].

EWARD HERING. **Outlines of a Theory of the Light**. Ilustrada ed. [S.l.: S.n.]. v. 1

FATONI, Amin; ANGGRAENI, Mekar Dwi; RAHMAWATI, Eni. Non-Invasive Wearable Sensor for Real-Time Neonatal Jaundice Monitoring Using Forehead Skin Tone Analysis. **Analytica**, v. 6, n. 1, 1 mar. 2025.

FERNANDES, Gabriel Martins *et al.* **Novel approaches for colorimetric measurements in analytical chemistry – A review**. **Analytica Chimica Acta** Elsevier B.V., , 23 out. 2020.

FERREIRA, Francisca T. S. M.; MESQUITA, Raquel B. R.; RANGEL, António O. S. S. On-hand tool for ammonium and urea determination in saliva to monitor chronic kidney disease – Design of a couple of microfluidic paper-based devices. **Microchemical Journal**, v. 193, 1 out. 2023.

FIROOZBAKHTIAN, Ali *et al.* Boosting Electrochemiluminescence Immunoassay Sensitivity via Co-Pt Nanoparticles within a Ti3C2 MXene-Modified Single Electrode Electrochemical System on Raspberry Pi. **Analytical Chemistry**, v. 95, n. 40, p. 15110–15117, 10 out. 2023.

FITZPATRICK, Daniel E.; BATTILOCCHIO, Claudio; LEY, Steven V. A Novel Internet-Based Reaction Monitoring, Control and Autonomous Self-Optimization Platform for Chemical Synthesis. **Organic Process Research and Development**, v. 20, n. 2, p. 386–394, 2016.

FU, Lung Ming; WANG, Yao Nan. **Detection methods and applications of microfluidic paper-based analytical devices**. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry** Elsevier B.V., , 1 out. 2018.

FYFE, Calum *et al.* RGB color correction and gamut limitations in smartphone-based kinetic analysis of chemical reactions. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 417, n. 25, p. 5753–5770, 1 out. 2025.

GRAZIOLI, Cristian *et al.* A 3D printed Do-It-Yourself miniaturized device with a sensor responsive at six different wavelengths for reflectance measurements on paper-based supports. **Microchemical Journal**, v. 182, 1 nov. 2022.

GRAZIOLI, Cristian; ABATE, Michele; DOSSI, Nicolò. PySpectro: A modular 3D printed, machine learning assisted optical device for recognition and quantification of samples. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 336, 5 ago. 2025.

GREENAWALD, Lee A. *et al.* Development of an Inexpensive RGB Color Sensor for the Detection of Hydrogen Cyanide Gas. **ACS Sensors**, v. 2, n. 10, p. 1458–1466, 27 out. 2017.

GUNTER WYSZECKI; W. S. STILES. **Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae**. 2^a ed. [S.l.: S.n.].

GUTAV KORTUM. **Reflectance Spectroscopy: Principles, Methods, Applications**. 1^a ed. [S.l.: S.n.].

HEO, Gisu *et al.* Developing an RGB - Arduino device for the multi-color recognition, detection and determination of Fe(III), Co(II), Hg(II) and Sn(II) in aqueous media by a terpyridine moiety. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 297, 15 out. 2019.

HOLLER, F. James; SKOOG, Douglas A.; CROUCH, Stanley R. **Princípios de Análise Instrumental**. 6^a Edição ed. [S.l.]: Bookman, 2009.

HUSSEIN, Ola G. *et al.* Arduino-based portable point-of-care colorimetric glucose biosensor using nanozyme with enhanced peroxidase-like activity. **Talanta Open**, v. 12, 1 dez. 2025.

IQBAL, Zafar; ERIKSSON, Mats. Classification and quantitative optical analysis of liquid and solid samples using a mobile phone as illumination source and detector. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 185, p. 354–362, 2013.

JAIKANG, Pheeraya; PAENGNAKORN, Pathinan; GRUDPAN, Kate. Simple colorimetric ammonium assay employing well microplate with gas pervaporation and diffusion for natural indicator immobilized paper sensor via smartphone detection. **Microchemical Journal**, v. 152, 1 jan. 2020.

Ji, Liudi *et al.* Facile synthesis of Fe-BTC and electrochemical enhancement effect for sunset yellow determination. **Talanta Open**, v. 5, 1 ago. 2022.

KAUR, Amandeep *et al.* Synthesis of highly fluorescent carbon dots from spices for determination of sunset yellow in beverages. **Microchemical Journal**, v. 170, 1 nov. 2021.

KUBELKA, Paul; MUNK, Franz. **An Article on Optics of Paint Layers**. [S.l.: S.n.].

LIAO, Yu Hsiang *et al.* Portable device for quick detection of viable bacteria in water. **Micromachines**, v. 11, n. 12, p. 1–9, 1 dez. 2020.

LIU, Feng Jie *et al.* Dispersive solid-phase microextraction and capillary electrophoresis separation of food colorants in beverages using diamino moiety functionalized silica nanoparticles as both extractant and pseudostationary phase. **Talanta**, v. 132, p. 366–372, 15 jan. 2015.

LOPEZ-RUIZ, Nuria *et al.* Smartphone-based simultaneous pH and nitrite colorimetric determination for paper microfluidic devices. **Analytical Chemistry**, v. 86, n. 19, p. 9554–9562, 7 out. 2014.

LOPIN, Prattana *et al.* Evaluation of Low-Cost Multi-Spectral Sensors for Measuring Chlorophyll Levels Across Diverse Leaf Types. **Sensors**, v. 25, n. 7, 1 abr. 2025.

MACHADO, Caio C. S. *et al.* Evaluation of the performance of 3D printed (spectro)photometers based on multi-channel color sensors for colorimetric determinations. **Analytical Methods**, 2024.

MAEJIMA, Kento; HIRUTA, Yuki; CITTERIO, Daniel. Centrifugal Paperfluidic Platform for Accelerated Distance-Based Colorimetric Signal Readout. **Analytical Chemistry**, v. 92, n. 7, p. 4749–4754, 7 abr. 2020.

MANORI JAYAWARDANE, Badra; MCKELVIE, Ian D.; KOLEV, Spas D. **Subscriber access provided by UNIV OF NEBRASKA-LINCOLN Development of a gas-diffusion microfluidic paper-based analytical device (μPAD) for the determination of ammonia in wastewater samples**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://pubs.acs.org>>.

MARK D. FAIRCHILD. **Color Appearance Models**. 3^a ed. [S.l.: S.n.].

MAYER, Michael; BAEUMNER, Antje J. A Megatrend Challenging Analytical Chemistry: Biosensor and Chemosensor Concepts Ready for the Internet of Things. **Chemical Reviews**, v. 119, n. 13, p. 7996–8027, 2019.

MCCRACKEN, Katherine E. *et al.* Multimodal imaging and lighting bias correction for improved μ pAD-based water quality monitoring via smartphones. **Scientific Reports**, v. 6, 10 jun. 2016.

MORBIOLI, Giorgio Gianini *et al.* **Technical aspects and challenges of colorimetric detection with microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs) - A review.** **Analytica Chimica Acta** Elsevier B.V., , 1 jun. 2017.

MUSILE, Giacomo *et al.* Thanatochemistry at the crime scene: a microfluidic paper-based device for ammonium analysis in the vitreous humor. **Analytica Chimica Acta**, v. 1083, p. 150–156, 20 nov. 2019.

NEVADO, J. J. Berzas; FLORES, J. Rodriguez; LLERENA, M. J. Villaseaor. Simultaneous determination of quinoline yellow and sunset yellow by derivative spectrophotometry and ratio spectra derivative. **Analytical Letters**, v. 27, n. 5, p. 1009–1029, 1 mar. 1994.

OZER, Tugba; MCMAHON, Catherine; HENRY, Charles S. Annual Review of Analytical Chemistry Advances in Paper-Based Analytical Devices. 2025.

PATEL, Keyur K.; PATEL, Sunil M.; SCHOLAR, P. G. Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges. **International Journal of Engineering Science and Computing**, 2016.

PATTON, Charles J.; CROUCH, S. R. Spectrophotometric and Kinetics Investigation of the Berthelot Reaction for the Determination of Ammonia. **Analytical Chemistry**, v. 49, n. 3, 1977.

PETER ATKINS; JÚLIO DE PAULA. **Físico-Química**. 10ª ed. [S.l.: S.n.]. v. 2

PETERS, Jonathan J. *et al.* Development of a micro-distillation microfluidic paper-based analytical device as a screening tool for total ammonia monitoring in freshwaters. **Analytica Chimica Acta**, v. 1079, p. 120–128, 4 nov. 2019.

QIU, Xinlan *et al.* An enhanced electrochemical platform based on graphene oxide and multi-walled carbon nanotubes nanocomposite for sensitive determination of Sunset Yellow and Tartrazine. **Food Chemistry**, v. 190, p. 889–895, 22 jun. 2016.

R. S. SHARMA. **The Reproduction of Colour**. 6^a ed. [S.l.: S.n.].

R. W. G. HUNT; MICHAEL R. POINTER. **Measuring Colour**. 4^a ed. [S.l.: S.n.].

RAHBAR, Mohammad *et al.* Geometrical Alignment of Multiple Fabrication Steps for Rapid Prototyping of Microfluidic Paper-Based Analytical Devices. **Analytical Chemistry**, v. 89, n. 22, p. 11918–11923, 21 nov. 2017.

ROGGE, Christian *et al.* Transmitted light pH optode for small sample volumes. **Journal of Sensors and Sensor Systems**, v. 6, n. 2, p. 351–359, 16 out. 2017.

ROJAS, Daniel *et al.* 3D-Printed Transducers for Solid Contact Potentiometric Ion Sensors: Improving Reproducibility by Fabrication Automation. **Analytical Chemistry**, v. 96, n. 39, p. 15572–15580, 1 out. 2024.

ROY S. BERNS. **Principles os Color Technology**. 3^a ed. [S.l.: S.n.].

S, Arunraj *et al.* Design, development and validation of a handheld colourimeter for the quantification of colourimetric assays on paper analytical devices. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 375, 1 set. 2024.

SHEN, Li; HAGEN, Joshua A.; PAPAUTSKY, Ian. Point-of-care colorimetric detection with a smartphone. **Lab on a Chip**, v. 12, n. 21, p. 4240–4243, 7 nov. 2012.

SILVA-NETO, Habledias A. *et al.* **Recent developments on aerial lab-on-a-drone platforms for remote environmental monitoring: A review**. **Analytica Chimica Acta** Elsevier B.V., , 1 fev. 2025.

SINGH, Harupjit *et al.* A low-cost device for rapid ‘color to concentration’ quantification of cyanide in real samples using paper-based sensing chip. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 322, 1 nov. 2020.

SRIVASTAVA, Satyam; SHARMA, Vinay. Ultra-portable, smartphone-based spectrometer for heavy metal concentration measurement in drinking water samples. **Applied Water Science**, v. 11, n. 11, 1 nov. 2021.

SRIVASTAVA, Satyam; VANI, B.; SADISTAP, Shashikant. Handheld, smartphone based spectrometer for rapid and nondestructive testing of citrus cultivars. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 15, n. 1, p. 892–904, 1 fev. 2021.

THANGJITSIRISIN, Kanyapak; SEEHARAJ, Panpailin; CHOENGCHAN, Nathawut. Superhydrophobic eggshell for fabrication of hydrophobic barrier of paper-based analytical device for colorimetric determination of ammonium ion in water. **Microchemical Journal**, v. 200, 1 maio 2024.

THEPCHUAY, Yanisa *et al.* Micro-PAD card for measuring total ammonia nitrogen in saliva. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 412, n. 13, p. 3167–3176, 1 maio 2020.

THONGKAM, Thinikan; RUNGSIRISAKUN, Ratana; HEMAVIBOOL, Khuanjit. A simple paper-based analytical device using UV resin screen-printing for the determination of ammonium in soil. **Analytical Methods**, v. 12, n. 38, p. 4649–4656, 14 out. 2020a.

THONGKAM, Thinikan; RUNGSIRISAKUN, Ratana; HEMAVIBOOL, Khuanjit. A simple paper-based analytical device using UV resin screen-printing for the determination of ammonium in soil. **Analytical Methods**, v. 12, n. 38, p. 4649–4656, 14 out. 2020b.

TOMINAGA, Shoji; NISHI, Shogo; OHTERA, Ryo. Measurement and estimation of spectral sensitivity functions for mobile phone cameras. **Sensors**, v. 21, n. 15, 1 ago. 2021.

TONELLI, Alessandro *et al.* A Portable and Low-Cost Single Board Computer-Based Spectrophotometric Platform for Optical Analysis in the UV and Visible Range. **Advanced Sensor Research**, v. 4, n. 4, abr. 2025.

UHLIKOVA, Natalie *et al.* Microfluidic paper-based analytical device for the speciation of inorganic nitrogen species. **Talanta**, v. 271, 1 maio 2024.

VARGAS MEDINA, Deyber Arley; MACIEL, Edvaldo Vasconcelos Soares; LANÇAS, Fernando Mauro. **Modern automated sample preparation for the determination of organic compounds: A review on robotic and on-flow systems.** **TrAC - Trends in Analytical Chemistry** Elsevier B.V., , 1 set. 2023.

VARGAS-MUÑOZ, M. A. *et al.* Paper sensor-based method using a portable 3D-printed platform and smartphone-assisted colorimetric detection for ammonia and sulfide monitoring in anaerobic digesters and wastewater. **Microchemical Journal**, v. 188, 1 maio 2023.

WANG, Xiaolin *et al.* High resolution 3D NanoImprint technology: Template fabrication, application in Fabry-Pérot-filter-array-based optical nanospectrometers. **Microelectronic Engineering**, v. 110, p. 44–51, 2013.

WATSON, Amanda *et al.* Lumos: An Open-Source Device for Wearable Spectroscopy Research. **Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies**, v. 6, n. 4, 11 jan. 2023.

YAFIA, Mohamed *et al.* Ultra-portable smartphone controlled integrated digital microfluidic system in a 3D-printed modular assembly. **Micromachines**, v. 6, n. 9, p. 1289–1305, 2015.

YANG, Yuanyuan *et al.* **Paper-Based Microfluidic Devices: Emerging Themes and Applications.** **Analytical Chemistry** American Chemical Society, , 3 jan. 2017.

YU, Zhicheng *et al.* An open-source handheld spectrometer for colorimetric and fluorescence analyses. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 287, 15 fev. 2023.

YUAN, Yusheng *et al.* Determination of sunset yellow in soft drinks based on fluorescence quenching of carbon dots. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 167, p. 106–110, 5 out. 2016.

YUDHANA, Anton *et al.* Identification of glucose levels in urine based on classification using k-nearest neighbor algorithm method. **International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems**, v. 16, n. 1, 1 jan. 2023.