

# CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTROFOTÔMETRO DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO ARDUINO: FUNDAMENTOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.073112616013>

Daniel Moraes Santos

**RESUMO:** A espectrofotometria é uma técnica para análise química fundamentada na propriedade de absorção de feixes luminosos com determinados comprimentos por parte dos compostos químicos. Sua configuração consiste no posicionamento de uma amostra entre o emissor - cuja luz emitida será difratada por um monocromador em vários comprimentos diferentes - e o receptor. A concentração do analito é determinada de acordo com o sinal detectado, que segue a Lei de Beer-Lambert, apresentando relação diretamente proporcional entre absorbância e intensidade transmitida. Este trabalho propõe a construção de um espectrofotômetro de baixo custo para determinação de concentrações de soluções no espectro da luz visível. A emissão da luz branca, rotação do monocromador e recepção dos sinais de saída são feitos por meio de uma placa Arduino. A fonte de luz branca será um LED, e o fotocromador será um pedaço de DVD, que atua como uma rede de difração. O dispositivo poderá ser aplicado no ensino de técnicas espectroscópicas, em vista de suas limitações na precisão. A validação incluirá testes de reproduzibilidade, determinação do limite de detecção, linearidade da curva analítica e comparação com espectrofotômetros comerciais, a fim de assegurar a confiabilidade do método proposto para análises qualitativas e semiquantitativas.

**PALAVRAS-CHAVE:** arduino, espectrofotômetro, eletrônica, química analítica

# CONSTRUCTION OF A LOW-COST SPECTROPHOTOMETER USING ARDUINO: PHYSICAL AND MATHEMATICAL FUNDAMENTALS

**ABSTRACT:** Spectrophotometry is an analytical technique based on the property of chemical compounds to absorb light beams of specific wavelengths. Its configuration involves placing a sample between an emitter—whose light is diffracted by a monochromator into distinct wavelengths—and a detector. Analyte concentration is determined according to the detected signal, adhering to the Beer-Lambert Law, which establishes a directly proportional relationship between absorbance and transmitted light intensity. This work proposes the development of a low-cost spectrophotometer for determining solution concentrations within the visible light spectrum. White light emission, monochromator rotation, and output signal reception are controlled via an Arduino board. The white light source consists of an LED, while the diffraction grating is fabricated from a DVD segment. Given its precision limitations, the device is suitable for teaching spectroscopic techniques. Validation will include reproducibility testing, detection limit determination, analytical curve linearity assessment, and comparison with commercial spectrophotometers to ensure the reliability of the proposed method for qualitative and semiquantitative analyses.

**KEYWORDS:** arduino, spectrophotometer, electronics, analytical chemistry

## INTRODUÇÃO

A espectrofotometria é uma técnica analítica amplamente utilizada para determinação de concentrações de soluções, de misturas em estado sólido ou mistura de gases. Além disso, por meio do uso dessa técnica no espectro do infravermelho podemos identificar grupamentos orgânicos de forma a conhecer a estrutura da molécula do analito.

Monitorando o espectro de absorção luminosa do composto, é possível identificar com precisão o ponto de virada da cor da solução em uma titulação, conhecer o valor de uma constante de equilíbrio de uma reação e realizar testes colorimétricos com alta precisão (HARRIS, LUCY, 2023). Essa versatilidade faz da espectrofotometria uma ferramenta indispensável em laboratórios de pesquisa científica, análises clínicas, controle de qualidade industrial, monitoramento ambiental, entre diversas outras áreas.

O princípio fundamental da espectrofotometria baseia-se na interação da luz com a matéria. Cada substância apresenta um espectro de absorção característico, como uma “impressão digital óptica”, que permite sua identificação e quantificação (SOLOMONS et al., 2024). A intensidade da radiação absorvida está diretamente

relacionada à concentração do analito na amostra, conforme descrito pela Lei de Beer-Lambert, o que confere à técnica elevado grau de confiabilidade e reproduzibilidade, quando aplicada com rigor técnico.

Historicamente, o desenvolvimento da espectrofotometria coincidiu com avanços importantes na física da luz e na química analítica, consolidando-se como uma das principais formas de análise não destrutiva de materiais (ALTEMOSE, 1986). No entanto, apesar de sua importância e ampla aplicabilidade, os espectrofômetros comerciais ainda apresentam custo elevado, sobretudo aqueles projetados para medições com alto grau de exatidão e resolução espectral. Tal realidade representa uma barreira significativa ao seu uso em contextos de baixa disponibilidade de recursos, como escolas públicas, laboratórios de formação científica ou projetos comunitários de extensão universitária.

Além disso, mesmo em contextos onde há maior disponibilidade orçamentária, pode haver a necessidade de um equipamento mais simples, portátil ou adaptável a experimentos específicos, onde a precisão extrema não seja um requisito crítico. Nesses casos, soluções de baixo custo, baseadas em componentes eletrônicos acessíveis e sensores ópticos comerciais, podem representar uma alternativa viável e funcional.

O projeto aqui desenvolvido objetiva justamente tornar tal equipamento mais acessível para aplicações que não exigem precisão elevada, por meio de uma montagem simplificada com componentes de baixo custo. A proposta busca democratizar o acesso à espectrofotometria, promovendo sua utilização em ambientes educacionais, projetos experimentais, ou mesmo em análises preliminares no campo ou em ambientes remotos, ampliando assim o alcance e a utilidade desta técnica tão relevante.

## REFERENCIAL TEÓRICO

A espectrofotometria consiste em incidir feixes luminosos de determinadas frequências sobre uma amostra translúcida, cujo analito irá absorver algumas dessas ondas com frequências específicas. Dessa forma, a radiação emergente ( $P$ ) terá energia menor do que a incidente ( $P_0$ ). Por fim é traçado um gráfico da absorbância ( $A$ ) ou transmitância ( $T$ ) em função da concentração ( $c$ ), sendo esses parâmetros assim definidos (HARRIS, LUCY, 2023):

$$T = \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

$$A = \log \left( \frac{P_0}{P} \right) = -\log (T) \quad (2)$$

$$A = \log \left( \frac{P_0}{P} \right) = -\log (T) \quad (3)$$

Esses dados estão relacionados pela lei de Beer-Lambert, como se segue:

$$A = \epsilon \cdot b \cdot c \quad (4)$$

Onde  $\epsilon$  representa a “absortividade molar” em  $\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ , o coeficiente angular que depende da substância analisada; e  $b$  representa o caminho óptico em  $\text{cm}^{-1}$ , que é o comprimento interno do recipiente que conterá a solução.

Apesar da lei de Beer relatar que a absorbância é diretamente proporcional à concentração de analito, os dados no gráfico apresentam desvios para concentrações suficientemente grandes, luz policromática, luz difusa ou efeitos químicos (HARRIS, LUCY, 2023).

A configuração simples de um espectrofotômetro é dada na figura 1.

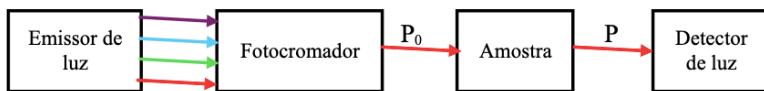


Figura 1 – Esquematização simplificada de um espectrômetro  
(Adaptado de Harrys, Lucy, 2023).

O fotocromador é um separador de comprimentos de luz. Ele pode ser um prisma ou uma rede de transmissão. Esta é um dispositivo óptico que utiliza ranhuras muito próximas entre si para refletir ou transmitir radiação. Cada ranhura atua como uma fonte individual de radiação, fazendo com que os diferentes comprimentos de onda sejam desviados em ângulos distintos. Esse desvio provocado pela rede é chamado de difração (HARRIS, LUCY, 2023). Para esse projeto, um pedaço de disco DVD, cortado com uma pequena serra elétrica, foi utilizado como fotocromador, tendo em vista sua intrincada rede de sulcos com cerca de 700 nm de espessura. Sua utilização para tal finalidade já foi atestada por alguns trabalhos (CHENG, ZHANG, ZHANG, 2024; SHIH, LI, 2007). Alguns aparelhos empregam espelhos côncavos para refletir os raios de luz em direções paralelas ou direcioná-los para um ponto focal, como mostrado na Figura 2 (CORTÉS, 2019).

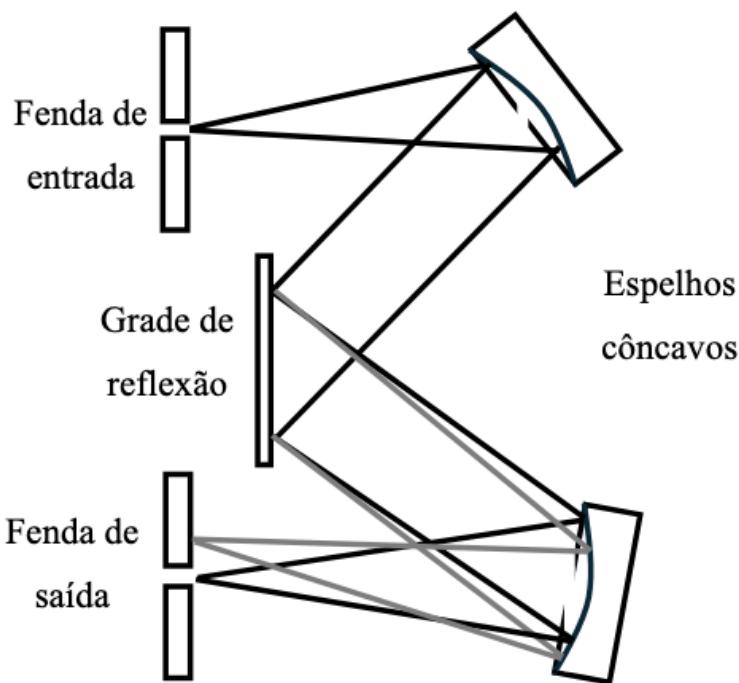


Figura 2 – Esquema da refração da luz (adaptado de Cortés, 2019).

Foi utilizado como detector de luz um sensor de cor TCS34725. Ele é capaz de medir digitalmente a quantidade de luz vermelha, verde, azul e luz total (sem filtragem) que incide sobre ele, usando uma matriz de minúsculos sensores de luz, os fotodiodos, cobertos por um filtro que bloqueia a radiação infravermelha, evitando interferências e garantindo resultados mais confiáveis mesmo em ambientes com iluminação variável. Esses sinais são convertidos em números por quatro conversores internos de alta precisão, armazenados em uma memória temporária para evitar erros de leitura, e controlados por um circuito automatizado que organiza as medições. A comunicação com outros dispositivos ocorre através de um padrão simples de duas conexões elétricas ( $I^2C$ ), muito comum em microcontroladores, e o sensor ainda oferece um sinal de aviso programável que pode ser acionado quando os valores medidos ultrapassarem determinados limites, dispensando a checagem constante do sistema externo. Graças à sua alta sensibilidade, capacidade de medir em ampla faixa de intensidades e a função de economia de energia entre as medições, o TCS3472

pode ser aplicado em controle de cores de telas, iluminação por LEDs, dispositivos médicos, equipamentos industriais dentre outras aplicações (TAOS, 2012).

Diversos trabalhos tiveram êxito em elaborar um espetrômetro funcional com peças de baixo custo, como a elaboração de um espetrômetro de absorção atômica para a medição de mercúrio (CORTÉS, 2019). Um colorímetro com transferência de dados para Android (JUNIOR, 2017) foi criado utilizando a detecção de cores por meio de um sensor e controlado por arduino. O trabalho de Corrêa apresentou uma comparação entre o sensor de cor TCS34725 e o sensor de luz TSL (CORRÊA, 2022). Essa autora, assim como outros, construíram espectrofotômetros funcionais, todos com emissão de feixes únicos de uma das três cores primárias por meio de LEDs (diodo emissor de luz) do tipo RGB (MOREIRA et al, 2016; PONTES, 2014; SANTANA et al, 2019). O presente trabalho propõe uma configuração inovadora ao empregar uma rede de difração de baixo custo a fim de abranger uma maior quantidade de comprimentos de ondas de luz dentro do espectro visível.

## METODOLOGIA

A realização deste trabalho ocorreu em quatro etapas: a pesquisa bibliográfica, a montagem do aparelho, a elaboração dos códigos para seu funcionamento e por fim os testes de validação dos resultados. A configuração básica utilizou componentes de baixo custo, consistindo em:

**Fonte de luz:** Um LED de luz branca foi utilizado como emissor, garantindo um espectro amplo para análise.

**Monocromador:** Um fragmento de DVD foi empregado como rede de difração, responsável pela reflexão e separação dos comprimentos de onda da luz incidente.

**Amostra:** A célula de amostra foi posicionada entre o monocromador e o detector, permitindo a interação da luz com o analito. Ela consiste de uma cubeta de quartzo 1x1 cm contendo a solução líquida.

**Detector:** Um sensor de cor TCS34725 foi utilizado para captar a intensidade luminosa transmitida, conectado ao Arduino para processamento do sinal.

**Controle e Aquisição de Dados:** O Arduino Uno foi programado para controlar a rotação do monocromador (via motor de passo), fornecer tensão para ligar o LED e receber os sinais digitais fornecidos pelo sensor de cor.

A figura 3 apresenta um esquema representativo da montagem do dispositivo:

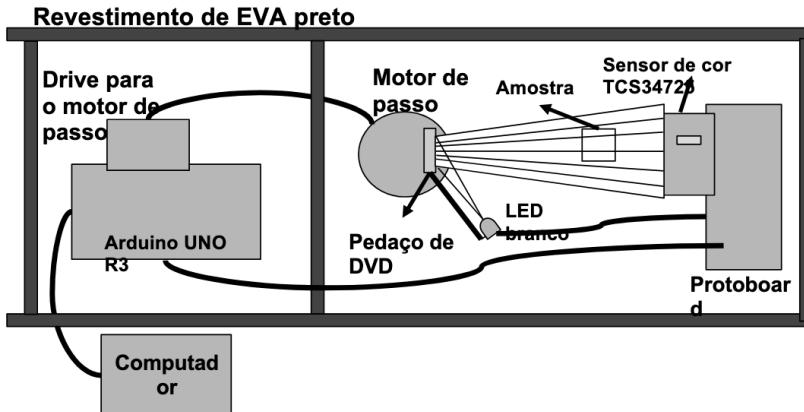


Figura 3 - Esquema do espectrofotômetro com arduino.

O arduino, o motor de passo e a protoboard foram colados com cola quente em uma tábua de madeira (figura 4.a). Na protoboard, foram conectados o sensor TCS34725 diretamente e o led branco por meio de jumpers. Sua alimentação e aterramento se deram pela placa Arduino Uno. O motor de passo foi alimentado diretamente pela placa arduino, enquanto seus canais de sinal digital foram conectados em um drive, que por sua vez foi conectado diretamente nas portas digitais da placa Arduino. O Arduino foi conectado em um computador por meio de um cabo USB. O LED foi encaixado no interior de um cilindro estreito de cola quente e fixado em uma estrutura moldada em cano PVC, de forma que apontasse de forma paralela à tábua de madeira para o pedaço de DVD, também fixado na estrutura, e posicionado perpendicularmente à tábua, com seu lado reflexivo direcionado ao sensor de cor. (Figura 4.b). A tábua foi fixada com fita crepe na base de uma caixa de sapatos que foi revestida inteiramente em suas paredes internas por PVA de cor preta (Figura 4.c), a fim de reduzir significativamente a sua refletividade e consequente interferência no sinal captado pelo sensor. Entre o motor de passo e a placa arduino, foi colocada uma faixa de PVA preto, a fim de impedir a passagem da luz vermelha dos LED's embutidos na placa Arduino e no drive controlador do motor de passo. Para fins de ajuste de posição, foi colocado temporariamente um papel branco graduado, para ver mais claramente o feixe de luz difratado (Figura 4.d).

As figuras 4.a-d mostram a versão finalizada do espectrofotômetro.

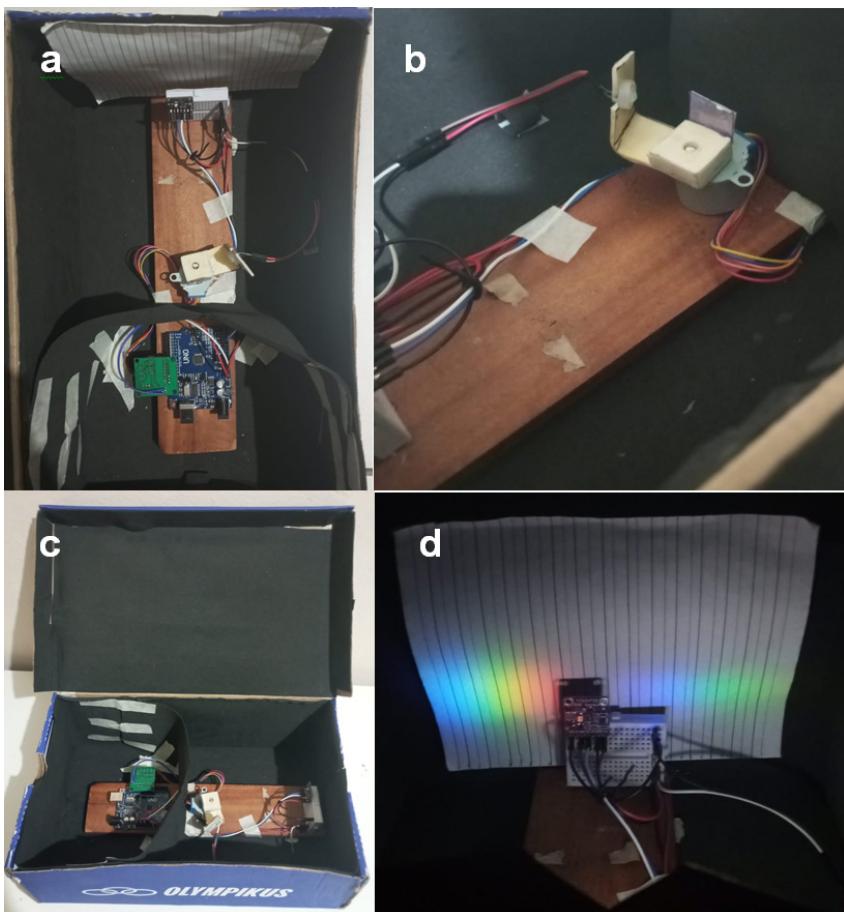


Figura 4 – Espectrofotômetro - 4.a) Sistema Completo visto de cima; 4.b) Estrutura para acoplamento do LED e do DVD; 4.c) Vista do sistema completo do lado de fora; 4.d) Feixe cromático incidindo sobre o sensor e a folha diagramada.

As conexões entre portas estão expostas na tabela 1.

Componente	Porta	Conexão
Sensor de cor TCS34725	LED	Aterramento (GND)
	VIN	Alimentação 3,3V
	GND	Aterramento (GND)
	SDA	Porta analógica A4
	SCL	Porta analógica A5
LED	Pino positivo	Alimentação 3,3V
	Pino negativo	Aterramento (GND)
Motor de passo	Positivo	Alimentação 5V
	GND	Aterramento (GND)
	Bobina azul	OUT1 do driver ULN2003
	Bobina amarela	OUT2 do driver ULN2003
	Bobina rosa	OUT3 do driver ULN2003
	Bobina laranja	OUT4 do driver ULN2003
Driver ULN2003, controlador do motor de passo	IN1	Porta digital D8
	IN2	Porta digital D9
	IN3	Porta digital D10
	IN4	Porta digital D11

Tabela 1 - conexões dos componentes

O programa para controlar o sistema foi feito no Arduino IDE (ambiente de desenvolvimento integrado), com código semelhante à linguagem C++. Ele disponibiliza ao usuário três opções de operação (Figura 5.a): “monitoramento

contínuo”, em que são impressas continuamente na tela as leituras realizadas pelo sensor a cada 50 milissegundos (Figura 5.b); “varredura angular”, em que o motor de passo rotaciona um ângulo determinado, registra um certo número de leituras realizadas pelo sensor de cor a cada 50 ms, e repete essa operação até atingir o número máximo já determinado, para por fim retornar o motor à sua posição inicial (Figura 5.c). São disponibilizadas as opções de exibir os dados em formato CSV (arquivo de texto separado por vírgulas), a fim de exportá-lo para um software de planilhas; e a exibição de dados com uma descrição de seus valores, sem formatação específica. Ainda há a opção “configurações” em que o usuário pode manipular os parâmetros dos modos de operação do sistema, como ângulo máximo de varredura, o número de dados lidos em cada rotação e o ajuste de posição do motor por meio de rotações de 1° em sentido horário ou anti-horário (Figura 5.d). O usuário também pode interromper a operação a qualquer momento e voltar ao menu principal. Essas opções são selecionadas pela entrada de um caractere.

```
-----
Menu

Escolha uma rotina:
[1] Monitoramento continuo
[2] Varredura angular
[3] Configuracoes

(Dê entrada no caractere 'm' durante uma rotina para interromper)
-----
```

Quarta-feira, 2 de julho de 2015

```
-----
Deseja registrar os dados em formato CSV? (s/n)
Registro de dados desativado.

>>> Iniciando Monitoramento Continuo...
      Envie 'h' para girar horario, 'a' para anti-horario, 'm' para
voltar.

R: 44  G: 42  B: 44  C: 125
R: 44  G: 42  B: 44  C: 125
-----
```

```
Deseja registrar os dados em formato CSV? (s/n)
Registro de dados ativado.

>>> Iniciando Varredura...
Angulo(graus);Leitura_N;Vermelho;Verde;Azul;Clear;Relativo_R;Relativo_G;Relativo_B
0.00:1;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
0.00:2;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
0.00:3;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
0.00:4;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
0.00:5;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
0.00:6;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
0.00:7;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
0.00:8;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
0.00:9;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
0.00:10;44;42;44;125;0.3520;0.3360;0.3520
```

```
-----
-- Menu de Configurações ---
[1] Ângulo total da varredura .....: 35 graus
[2] Incremento por leitura .....: 1 graus
[3] Medicões por ângulo .....: 10
[4] Passos no modo de monitoramento : 30 passos
[5] Controle manual do motor (1 grau por passo)
[m] Voltar ao menu principal
```

Figura 5 - Capturas de tela do programa para controlar o arduino. 5.a) Menu inicial; 5.b) Valores de retorno do modo de monitoramento contínuo; 5.c) Valores de retorno do modo de varredura angular; 5.d) Opções do menu de configurações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram registradas 10 leituras com intervalo de 50ms a cada 1° de rotação em sentido horário do motor de passo, sendo 45° o ângulo total percorrido. As posições foram ajustadas para que fosse percorrido todo o espectro cromático do feixe que incide sobre o sensor. Os dados numéricos foram exibidos no terminal separados por ponto e vírgula, copiados e colados manualmente em um arquivo de texto, o qual foi importado em um software de planilhas. Os dados foram devidamente formatados numa tabela, e a partir dela foram plotados gráficos.

Os tipos de dados registrados foram: valores absolutos retornados pelo sensor, correspondentes às parcelas de cor vermelha, verde e azul contidas na luz total, assim como o valor dela; valores relativos entre cada cor e a luz total (dados pela razão entre seus valores numéricos); a média aritmética dos conjuntos de dez desses valores mencionados, medidos para cada ângulo de rotação do monocromador e a absorbância de cada uma dessas componentes de cores (dada pelo logaritmo negativo da razão entre o valor relativo da cor ou luz total, medidos para a amostra, e o valor relativo da cor ou luz total, medidos para a amostra branca).

Os gráficos 1.a-b mostram as medições do sensor para uma cubeta de quartzo contendo apenas água ultra-pura.

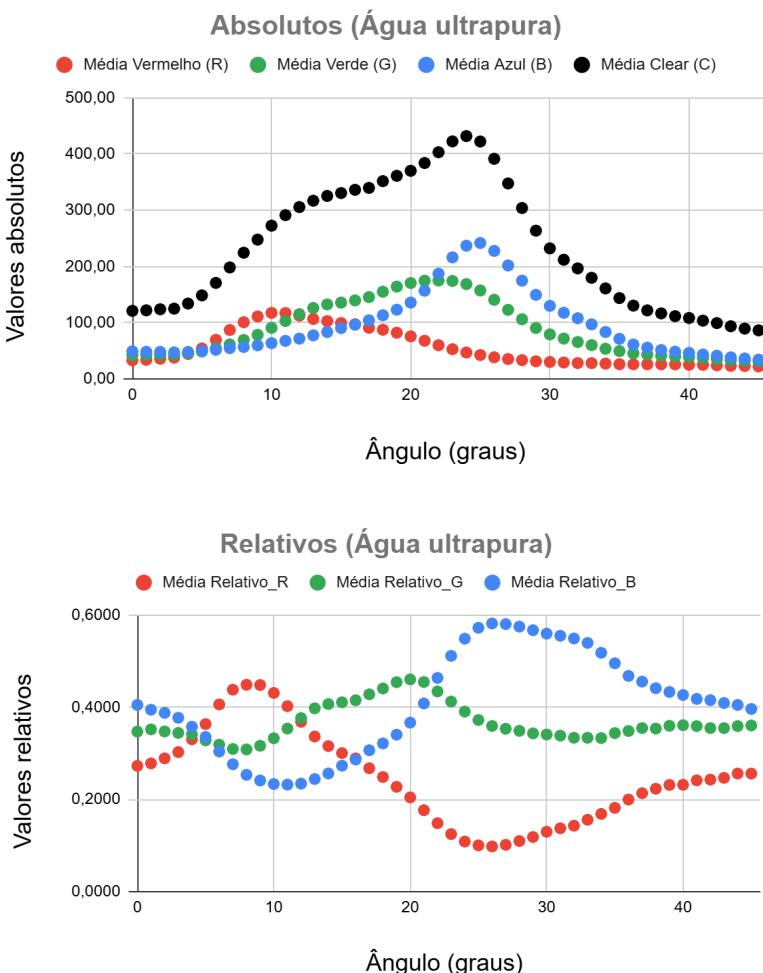


Gráfico 1 - Gráficos para os valores de retorno do sensor, a partir da análise de água ultrapura. 1.a - Valores absolutos. 1.b - Valores relativos

Foram medidos os resultados retornados pelo sensor em modo de varredura e de um espectrofotômetro UV-VIS modelo UV-M51 (tabela 2), usando o comprimento de onda  $\lambda = 463$  nm, para soluções de dicromato de potássio ( $\text{Cr}_2\text{K}_2\text{O}_7$ ) diluído em água ultra-pura. Analisou-se seis amostras com as seguintes concentrações em

mol/L: 0,1, 0,08, 0,06, 0,04, 0,02, 0,01. A curva de calibração foi feita com os dados medidos pelo espectrofotômetro comercial, obtendo-se a equação da reta  $A = 49,3 * c - 0,115$  (gráfico 2). Foram plotados gráficos para a absorbância em relação ao ângulo de rotação do monocromador (Gráfico 3).

Concentração (mol/L)	Absorbância
0,1	3,1599
0,08	3,0017
0,06	2,7873
0,04	1,9615
0,02	0,8338
0,01	0,3651

Tabela 2. Resultados do espectrofotômetro UV-M51 para  $\lambda = 463$  nm

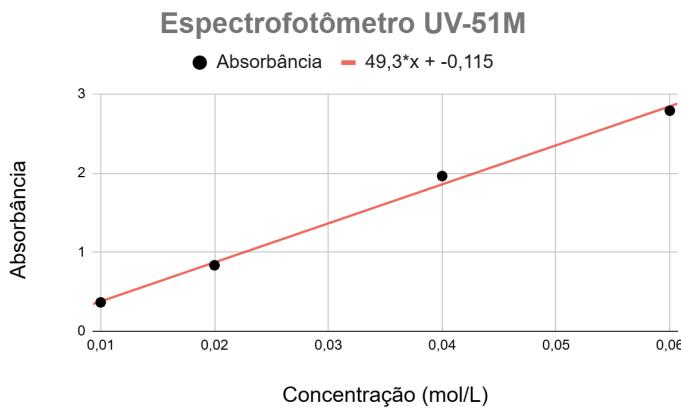


Gráfico 2 - Curva de calibração feita com o espectrofotômetro UV-51M

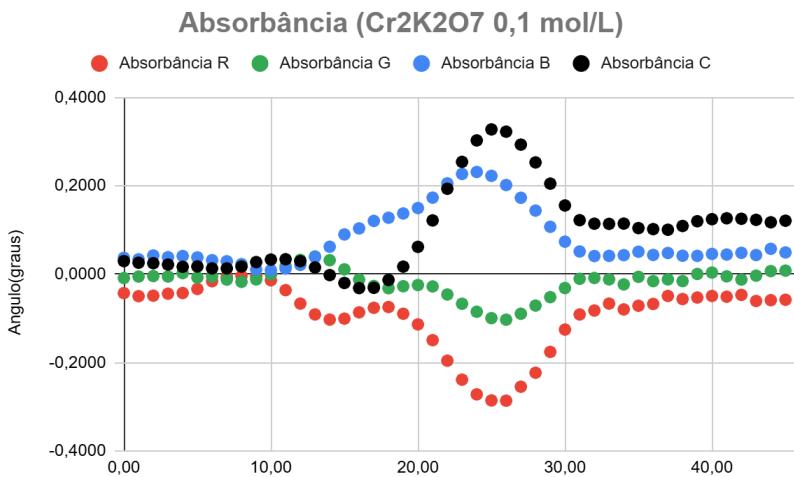


Gráfico 3 - Absorbância versus ângulo para dicromato de potássio a 0,1 mol/L.

Não foi possível construir a curva de calibração e realizar os demais testes de validação para o espectrofotômetro com arduino, pois os valores de absorbância obtidos para as amostras foram irregulares, com formatos de curva e amplitudes não sequenciais, ao contrário do que se esperava. A tabela 3 exibe alguns valores de absorbância calculados para a luz total. Não foi observado nem mesmo um aumento gradual de amplitude nas curvas de absorbância conforme o aumento de concentração.

	0,1 mol/L	0,08 mol/L	0,06 mol/L	0,04 mol/L	0,02 mol/L	0,01 mol/L
0°	0,0297	-0,0176	0,0183	-0,0244	0,0036	0,0000
5°	0,0176	-0,0064	0,0146	-0,0093	0,0134	0,0056
10°	0,0331	0,0352	-0,0343	0,0134	0,0995	-0,0240
15°	-0,0198	0,0298	-0,1017	-0,0323	0,0463	-0,0404
20°	0,0619	-0,0441	-0,0232	-0,0818	-0,0629	0,0205
25°	0,3278	-0,0747	0,2829	-0,0659	-0,0590	0,0274
30°	0,1556	-0,0201	0,1998	-0,0240	0,0062	-0,0009

Tabela 3 - comparação entre os resultados para cada solução

## CONCLUSÃO

A ineficácia do espectrofotômetro com arduino talvez seja devido à refração e reflexão da luz ocorridas pela sua incidência não perpendicular na superfície da cubeta, responsáveis pela grande variação irregular de sinal recebido pelo sensor de cor. Além disso, houveram problemas com mau-contato nos cabos que conectam os componentes, gerando instabilidades em algumas medições e comprometendo os resultados finais. Entretanto, uma vez resolvidos esses problemas com a máxima aproximação da cubeta ao sensor e o uso de lentes biconvexas convergentes que possibilitem o foco e paralelização dos raios de luz, as medições podem apresentar resultados satisfatórios para a medição de concentração de soluções.

## REFERÊNCIAS

- ALTEMOSE, I. R. **Evolution of instrumentation for UV-visible spectrophotometry**. Part I. Journal of Chemical Education, v. 63, n. 9, p. A216–A220, 1986.
- CORRÊA, L. A. **Avaliação de sensores ópticos para determinações de fluoreto em amostras de águas**. Minas Gerais, Brasil. 2022.
- CORTÉS, J. A. L. **Caracterización de una fuente de luz no ionizante para la medición de concentración de Hg mediante espectrometría de absorción atómica**. Medellin, Antioquia. 2019.
- HARRIS, Daniel C.; LUCY, Charles A. **Análise Química Quantitativa**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023. E-book. p.454. ISBN 9788521638544. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521638544/>. Acesso em: 30 mar. 2025.
- JUNIOR, E. B. L. **Aplicação de arduino no desenvolvimento de um colorímetro de baixo custo com transferência de dados para Android**. Mossoró – RN. 2017.
- MOREIRA, A. F.; SANTOS, S. R. B.; COSTA JUNIOR, A. G. **Construção e caracterização de um fotômetro destinado ao uso de aulas experimentais de química sobre a lei de beer-lambert holos**, vol. 2, 2016, pp. 142-151 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Natal, Brasil.
- PONTES, A. S. **Desenvolvimento de um fotômetro LED-Vis portátil e microcontrolado por Arduino**. Paraíba, Brasil. 2014.
- SANTANA, T. S., TELES, R. M., COSTA D. P. **Desenvolvimento e Avaliação de Fotômetro com Diodos Emissores de Luz por meio de Hardware Livre**. X Computer on the beach. p. 81 – 87.

SOLOMONS, T. W G.; FRYHLE, Craig B.; SNYDER, Scott A. **Química Orgânica** Vol.1. 13. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2024. E-book. p.55. ISBN 9788521638889. Disponível em: [https://integrada\[minhabiblioteca.com.br\]/reader/books/9788521638889/](https://integrada[minhabiblioteca.com.br]/reader/books/9788521638889/). Acesso em: 30 mar. 2025.

TAOS. **TCS3472 color light-to-digital converter with IR filter**. Datasheet. TAOS135 – agosto de 2012. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tcs34725.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

CHENG, Yuhang; ZHANG, Li; ZHANG, Yaping. **Optical disc structures and diffraction patterns: theoretical foundations and experimental applications**. European Journal of Physics, v. 45, n. 5, p. 055301, 2024. DOI: 10.1088/1361-6404/ad6cb0.

SHIH, Hsi-Fu; LI, Bo-Wei. **Diffraction grating with dual modes for two-wavelength rewritable optical pickup heads**. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 43, n. 2, p. 900–902, fev. 2007. DOI: 10.1109/TMAG.2006.889557.