



UnB

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA**

Marco Antonio Marques Miranda Júnior

**Restauração e interfaceamento de um monocromador de rede móvel para
utilização em atividades de ensino de instrumentação analítica**

BRASÍLIA, DF

2023

**Restauração e interfaceamento de um monocromador de rede móvel para
utilização em atividades de ensino de instrumentação analítica**

Projeto de trabalho de conclusão do curso de Bacharelado em Química apresentado ao Instituto de Química da Universidade de Brasília como requisito de obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre
Fonseca

BRASÍLIA, DF
2023

RESUMO

Este trabalho visa a restauração e reutilização de um monocromador de rede de difração móvel para emprego no laboratório de ensino de instrumentação analítica do Instituto de Química da Universidade de Brasília. Muitos instrumentos analíticos, como os espectrofotômetros para medidas de absorção molecular na região do visível, sofreram transformações significativas nos últimos anos e acabaram sendo substituídos por instrumentos mais modernos e eficientes. Entretanto, equipamentos antigos podem auxiliar no ensino dos fenômenos físico-químicos envolvidos em uma análise, além de colaborar para a compreensão do funcionamento do próprio instrumento, uma vez que, por estarem em desuso, podem ser abertos e explorados internamente para visualização de seus componentes. De fato, o laboratório de ensino de química analítica do IQ-UnB dispõe de um monocromador que permite a movimentação manual da rede de difração e o ajuste das fendas de entrada e saída de radiação, além da visualização da radiação dispersa com seus diferentes comprimentos de onda na região visível. Contudo, a obtenção de um espectro a partir deste monocromador é dificultada, pois há a necessidade de aquisição das respostas de intensidade de luz para cada comprimento de onda de maneira manual e individual, já que o equipamento é antigo e não permite a comunicação com um computador. Considerando estes aspectos, no presente projeto de TCC foi utilizado um microcontrolador Arduino UNO® para permitir a comunicação do equipamento com um smartphone. Um motor de passos foi acoplado ao mecanismo de movimentação da rede de difração, permitindo estabelecer uma relação entre a posição da rede, e seu comprimento de onda projetado na fenda de saída, com a quantidade de passos dada pelo motor, o que possibilitou a aquisição de espectros de maneira automática. Estudos realizados com soluções de KMnO_4 mostraram que espectros com resolução de 1,0 nm podem ser obtidos na faixa de 430 nm a 630 nm de maneira eficiente e os resultados se assemelham àqueles obtidos com um instrumento comercial de rede fixa e arranjo de diodos.

Palavras-chave: Espectrofotometria, Instrumentação analítica, Microcontroladores.

ABSTRACT

This work aims at the restoration and reuse of a movable diffraction grating monochromator for use in the analytical instrumentation teaching laboratory at the Institute of Chemistry of the University of Brasília. Many analytical instruments, such as spectrophotometers for measuring molecular absorption in the visible region, have undergone significant transformations in recent years and have been replaced by more modern, fast, and efficient instruments. However, besides their historical value, many old pieces of equipment can assist in teaching the physicochemical phenomena involved in an analysis and contribute to the understanding of the instrument's operation itself. Since they are no longer in use, they can be opened and explored internally to visualize their components. In fact, currently, the analytical chemistry teaching laboratory at IQ-UnB has a monochromator that allows manual movement of the diffraction grating, adjustment of the input and output radiation slits, and visualization of dispersed radiation with its different wavelengths in the visible region. However, obtaining a spectrum from this monochromator is challenging because it requires manually acquiring the light intensity responses for each wavelength. This is due to the fact that the equipment is old and does not allow communication with a computer. Considering these aspects, in this undergraduate thesis project, an Arduino UNO® microcontroller was used to enable communication between the equipment and a smartphone. A stepper motor was attached to the diffraction grating's movement mechanism, establishing a relationship between the grating's position and its projected wavelength on the output slit with the number of steps given by the motor. This allowed the acquisition of spectra automatically. Studies conducted with potassium permanganate solutions showed that spectra with a resolution of 1.0 nm could be efficiently obtained in the range of 430 nm to 630 nm using the restored instrument, and the results are similar to those obtained with a commercial fixed grating and diode array instrument.

Keywords: Spectrophotometry, Analytical instrumentation, Microcontrollers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação simplificada do espectro da região do visível.....	9
Figura 2 - Representação de um monocromador de rede	11
Figura 3 - Rede móvel de difração e espelhos côncavos do monocromador MP-1018 antes da restauração	15
Figura 4 - Painel frontal do MP-1018	15
Figura 5 - Parte inferior do arranjo do motor elétrico conectado ao botão de ajuste da rede de difração.....	16
Figura 6 - Painel lateral	17
Figura 7 - Esquema de conexão do driver TB6600 e do motor de passos NEMA 17 ao Arduino UNO	19
Figura 8 - Conexão dos componentes do sistema	20
Figura 9 - Motor de passos acoplado na posição anteriormente destinada ao botão analógico	21
Figura 10 - Visão vertical do motor de passos acoplado	21
Figura 11 - Parte interna do monocromador.....	22
Figura 12 - Chave Allen encaixada no parafuso para movimentação do espelho côncavo.....	22
Figura 13 - Tela inicial do aplicativo de controle	24
Figura 14 - Espectro do branco e liberação do segundo botão	25
Figura 15 - Espectro da amostra e liberação do terceiro botão	26
Figura 16 - Espectro de absorção e liberação do último botão.....	26
Figura 17 - Suporte do motor de passos	28
Figura 18 - Parte frontal do suporte da fonte de radiação (lanterna LED)	28
Figura 19 - Parte lateral do suporte da fonte de radiação	29
Figura 20 - Suporte célula de amostra e detector de intensidade luminosa	29
Figura 21 - Tampa para cédula de amostra.....	30
Figura 22 - Painel frontal do monocromador	30
Figura 23 - Painel lateral com as fendas de entrada e saída de radiação.....	31
Figura 24 - Painel traseiro.....	31
Figura 25 - Painel lateral.....	32
Figura 26 - Caixa adaptada para comportar o sistema do microcontrolador....	33
Figura 27 - Visão final do instrumento restaurado.....	34
Figura 28 - Espectro obtido da fonte de radiação LED	35
Figura 29 - Comparação dos instrumentos.....	35
Figura 30 - Espectros sobrepostos para sete medidas consecutivas de uma solução 40 mg/L de KMnO ₄	36
Figura 31 - Teste de repetibilidade. Sete valores de sinal analítico do primeiro pico analisado.....	37
Figura 32 - Teste de repetibilidade. Sete valores de comprimento de onda do primeiro pico analisado.....	37
Figura 33 - Teste de repetibilidade. Sete valores de sinal analítico do segundo	

pico analisado.....	38
Figura 34 - Teste de repetibilidade. Sete valores de comprimento de onda do segundo pico analisado	38
Figura 35 - Espectro de absorvância das soluções de KMnO_4	39
Figura 36 - Curva analítica para o primeiro pico selecionado	40
Figura 37 - Curva analítica para o segundo pico selecionado	40

SUMÁRIO

Lista de figuras	4
Introdução.....	7
1. Fundamentação teórica.....	8
1.1 – Espectrofotometria na região visível.....	8
1.2 - Instrumentos descontinuados: valor histórico e possibilidades de uso para o ensino.....	12
2. Objetivos.....	13
2.1 - Objetivos específicos.....	14
3. Metodologia.....	14
3.1 - Estado inicial do monocromador.....	14
3.2 - Restauração	17
3.3 - Conexão do motor de passos.....	18
3.4 - Calibração do comprimento de onda.....	21
3.5 - Preparo das soluções de KMnO ₄	23
3.6 - Interfaceamento por aplicativo de smartphone.....	24
4. Resultados e Discussão	27
4.1 – Fabricação de peças via impressão 3D.....	27
4.2 – Envelopamento com vinil adesivo	30
4.3 – Montagem e apresentação final.....	32
4.4 - Avaliação do instrumento.....	34
4.4.1 - Análise do espectro da fonte de radiação.....	34
4.4.2 - Comparação com espectrômetro de referência.....	35
4.4.3 - Repetibilidade de medidas	36
4.4.4 - Construção de curvas analíticas	39
5. Conclusão	41
Referências Bibliográficas	42

Introdução

A instrumentação analítica desempenha um papel fundamental no avanço científico e tecnológico em diversas áreas, desde a química e física até a biologia e ciências ambientais. Um dos principais componentes da instrumentação analítica é o monocromador, um dispositivo utilizado para selecionar uma determinada faixa de comprimentos de onda da luz (SKOOG; WEST; HOLLER, 2015). Essa capacidade de seleção é essencial em muitas técnicas de análise, como a espectrofotometria, que é amplamente utilizada em laboratórios de pesquisa, indústrias e instituições de ensino.

No entanto, o acesso a equipamentos de alta qualidade para atividades de ensino de instrumentação analítica muitas vezes é limitado devido a restrições financeiras. Além disso, alguns equipamentos podem estar desatualizados ou danificados, como é o caso no presente trabalho, o que dificulta ainda mais o ensino efetivo das técnicas e conceitos relacionados. Nesse contexto, a restauração de um instrumento antigo pode representar uma solução promissora para suprir tais limitações, oferecendo aos estudantes a oportunidade de aprender de forma prática e envolvente (FERNANDES, 2020).

O presente trabalho propôs a restauração e o interfaceamento de um monocromador de rede móvel, com o objetivo de torná-lo uma ferramenta funcional e adequada para atividades de ensino em instrumentação analítica. A ideia central é aproveitar os avanços tecnológicos recentes, especialmente na área de dispositivos móveis, para transformar um equipamento obsoleto ou danificado em uma plataforma acessível e eficiente para o aprendizado.

A restauração do monocromador envolve uma análise cuidadosa de seus componentes, identificando peças danificadas ou desgastadas para reparo e substituição. Além disso, foram realizados testes de funcionamento e calibração para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Em seguida, foi realizado o interfaceamento do monocromador com dispositivos móveis, como smartphones ou tablets, utilizando-se aplicativos e sensores disponíveis comercialmente. Esse processo de interfaceamento permitirá que os usuários controlem e monitorem o monocromador por meio de

uma interface intuitiva e amigável, facilitando assim a compreensão de alguns princípios da instrumentação analítica.

Além do aspecto prático, a restauração e o interfaceamento do monocromador de rede móvel apresentam um potencial significativo para aprimorar a experiência educacional dos estudantes. A possibilidade de utilizar dispositivos móveis como parte integrante do processo de aprendizado estimula o engajamento dos alunos e permite que eles explorem conceitos teóricos de forma experimental e interativa (FERNANDES, 2020). Essa abordagem inovadora também pode contribuir para o desenvolvimento de habilidades tecnológicas e promover a integração de diferentes áreas, como Física, Química e Ciência da Computação (CARVALHO, 2018).

1. Fundamentação teórica

Neste item, será apresentado uma síntese acerca da espectrofotometria e aspectos relevantes para que se compreenda melhor o funcionamento do equipamento e as possibilidades de uso em atividades de ensino.

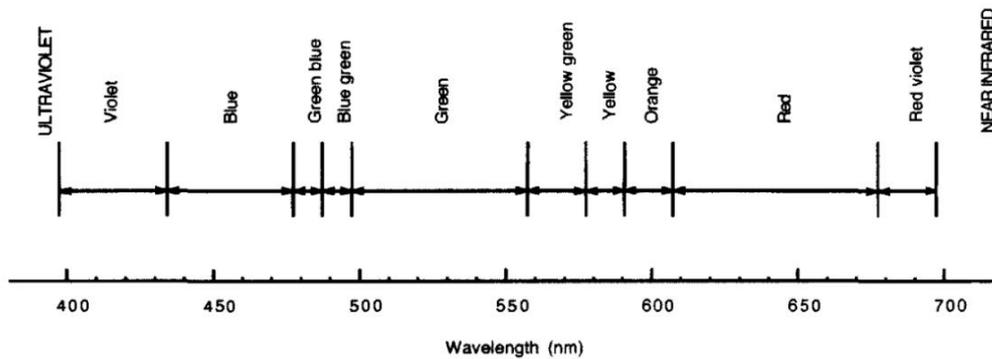
1.1 – Espectrofotometria na região visível

A espectrofotometria se baseia em medidas quantitativas de propriedades óticas de materiais por uma faixa de comprimentos de onda que inclui as regiões espectrais do ultravioleta, visível e infravermelho. As medidas abarcam transmitância, absorvância, emitância, reflectância, espalhamento e fluorescência, sendo uma técnica de vasta contribuição para a ciência e tecnologia (GORE, 2000).

A luz é uma forma de radiação eletromagnética, sendo, usualmente, uma mistura de ondas com diferentes comprimentos de onda. O comprimento de onda da luz, expresso pelo símbolo λ , é definido como a distância de duas cristas (ou vales) de uma onda, medida na direção de sua progressão. A unidade comumente utilizada é o nanômetro (nm, 10^{-9} m) (GORE, 2000; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2006). A luz sensível ao olho humano é chamada de luz visível. Cada cor detectada corresponde a uma banda de comprimento de onda entre 400-700 nm. A espectrofotometria, em suas diversas aplicações, é

geralmente referida às regiões do ultravioleta (UV, 185-400 nm), visível (Vis, 400-700 nm) e infravermelho (IV, 700-15000 nm) do espectro de radiação eletromagnética, representadas na Figura 1, sendo os dois primeiros os mais recorrentes em práticas de laboratório (GORE, 2000; HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009).

Figura 1 - Representação simplificada do espectro da região do visível



Fonte: GORE, 2000.

O comprimento de onda da luz é inversamente proporcional à sua energia (E), de acordo com a equação 1 (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2006):

$$E = ch/\lambda \quad (1)$$

onde c denota a velocidade da luz e h a constante de Planck. Entretanto, a radiação ultravioleta possui maior energia que a visível, e esta possui maior energia que a radiação infravermelha. Luzes de certos comprimentos de onda podem ser seletivamente absorvidas por uma substância, de acordo com sua estrutura molecular (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2006).

A absorção da energia da luz ocorre quando um fóton incidente carrega energia igual à diferença de energia entre dois estados permitidos dos elétrons de valência; o fóton promove a transição de um elétron de um estado de menor energia para um de maior. O elétron perde energia por um processo de radiação térmica e retorna ao estado inicial (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2006). Um espectro de absorção é obtido pelas sucessivas mudanças de comprimento de onda da luz monocromática incidente na substância, ratificando a mudança de absorção de luz. O espectro apresenta, normalmente, a plotagem de comprimento de onda (geralmente nm ou μm) no eixo das abscissas e o grau de

absorção (transmitância ou absorbância) no eixo das ordenadas (SKOOG; WEST; HOLLER, 2015; HARRIS; LUCY, 2005).

O uso mais difundido da espectroscopia UV e visível (UV-Vis) é na determinação quantitativa de espécies absorventes (cromóforos), conhecido como espectrofotometria. Os métodos espectrofotométricos que medem absorção residem em duas leis básicas que combinadas são conhecidas como a lei de Beer-Lambert (SKOOG; WEST; HOLLER, 2015; HARRIS; LUCY, 2005). A lei de Lambert estabelece que a fração de luz absorvida por um meio transparente homogêneo independe da intensidade da luz incidida, e cada camada deste meio absorve igual fração da luz que passa por elas. Isso leva a uma queda exponencial da intensidade da luz ao longo do caminho óptico na amostra, que pode ser expresso matematicamente como pela equação 2 (GORE, 2000).

$$\log_{10} (I_0/I) = k\ell \quad (2)$$

em que I_0 é a intensidade da luz incidente, I é a intensidade da luz transmitida, ℓ é o tamanho do caminho óptico na cubeta do espectrofotômetro e k é uma constante para o meio, que é decifrada pela lei de Beer (SKOOG; WEST; HOLLER, 2015; HARRIS; LUCY, 2005). A lei de Beer enuncia que a quantidade de luz absorvida é proporcional ao número de moléculas do cromóforo em que a luz incide. Ou seja, a constante k é proporcional à concentração (c) do cromóforo: $k = \epsilon c$, sendo ϵ é o coeficiente de absorção molar, próprio do cromóforo, e numericamente igual à absorção de uma solução molar em caminho óptico de 1 cm (GORE, 2000). Portanto, a expressão combinada da lei de Beer-Lambert é descrita pela equação 3 (SKOOG; WEST; HOLLER, 2015; HARRIS; LUCY, 2005).

$$\log_{10} (I_0/I) = \epsilon c\ell \quad (3)$$

O termo $\log_{10} (I_0/I)$ é chamado de absorbância (A), portanto:

$$A = \epsilon c\ell \quad (4)$$

A passagem de luz pela cubeta pode ser descrita em termos de transmitância, geralmente expressa em porcentagem:

$$(T): T = I/I_0 \quad (5)$$

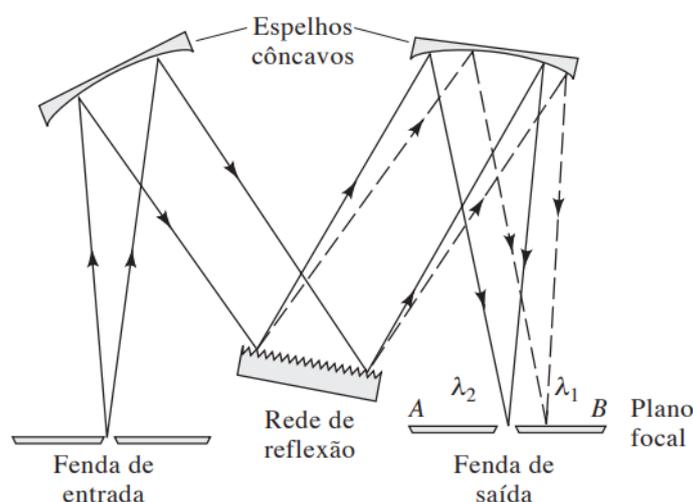
Nota-se que apenas a absorvância é linearmente proporcional à concentração do analito, mas a correlação com a transmitância se dá pela equação 6 (SKOOG; WEST; HOLLER, 2015; HARRIS; LUCY, 2005).

$$A = \log_{10} (1/T) \text{ ou } A = -\log_{10} T = \log (I_0/I) \quad (6)$$

Para o instrumento em questão, faz-se uso de um monocromador que utiliza uma rede de difração para separar comprimentos de onda específicos que serão dirigidos para a fenda de saída. Essa seleção ocorre ao girar a rede, que pode variar continuamente ao longo de uma faixa do espectro. Pela simplicidade com que o comprimento de onda pode ser mudado, tanto análises que necessitam de varredura do espectro quanto comprimentos de onda fixos podem ser executados.

A Figura 2 exibe um esquema de um monocromador de rede análogo ao utilizado neste trabalho. A radiação da fonte luminosa é introduzida no monocromador pela fenda de entrada e atinge um espelho côncavo, dando origem a um feixe paralelo em direção à rede de difração (SKOOG; WEST; HOLLER, 2015). A esquematização ilustra dois comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , sendo o primeiro maior que o segundo. As linhas tracejadas representam o caminho da radiação de comprimento de onda maior. A rede difrata a radiação de λ_2 com ângulo mais agudo em relação a λ_1 .

Figura 2 - Representação de um monocromador de rede



Fonte: SKOOG; WEST; HOLLER, 2015.

A compreensão dos princípios básicos da espectrofotometria com monocromadores de rede móvel é essencial para apreciar a evolução dos instrumentos ao longo do tempo. Explorar os instrumentos do passado não apenas nos permite traçar a trajetória do desenvolvimento tecnológico, mas também abre portas para a utilização criativa desses artefatos no ensino, proporcionando uma perspectiva tangível das raízes da análise espectral e suas aplicações contemporâneas.

1.2 - Instrumentos descontinuados: valor histórico e possibilidades de uso para o ensino

A evolução das estratégias e desenvolvimento tecnológico permite, atualmente, resgatar instrumentos descartados e adaptá-los para fins didáticos em aulas experimentais. Por exemplo, adequar um microcontrolador conectado a um aplicativo de smartphone a um instrumento de medição possibilita tanto a averiguação da forma de funcionamento do aparato quanto a obtenção e interpretação de dados de maneira acessível e facilitada.

A utilização de instrumentos antigos e descontinuados no ensino da química experimental é de suma importância e traz consigo uma relevância inegável. No vasto campo da ciência, especialmente no âmbito da química, a experimentação assume um papel fundamental no desenvolvimento do conhecimento e na compreensão dos fenômenos naturais (CARVALHO, 2018).

Nesse contexto, os espectrofotômetros antigos e em desuso emergem como peças valiosas para o processo de aprendizagem dos estudantes de química. Esses instrumentos, mesmo sendo considerados obsoletos em comparação com as tecnologias mais recentes, carregam consigo um legado histórico e uma carga simbólica que não podem ser negligenciados.

Ao utilizar esses espectrofotômetros antigos, os alunos são imersos em uma experiência que transcende a mera obtenção de dados quantitativos. Eles são levados a compreender o percurso trilhado pela ciência ao longo dos anos e a valorizar a evolução das técnicas e metodologias analíticas (MELO; OLIVEIRA; SOUZA, 2019). Essa apreciação histórica contribui para a formação de uma visão crítica e contextualizada da ciência, permitindo aos estudantes

compreenderem as bases e fundamentos que sustentam as tecnologias atuais (DOS SANTOS; DE MENEZES, 2020).

Além disso, a utilização desses instrumentos antigos oferece aos estudantes a oportunidade de enfrentar desafios e desenvolver habilidades práticas essenciais. A calibração meticulosa, a manipulação cuidadosa dos componentes e a interpretação criteriosa dos resultados demandam atenção aos detalhes e um pensamento analítico apurado. Essas competências são indispensáveis para a formação de futuros profissionais no campo da química e auxiliam na consolidação do método científico como uma abordagem rigorosa e sistemática.

Outro aspecto relevante é a conscientização dos estudantes em relação à importância da sustentabilidade e do reaproveitamento de recursos. Ao utilizar espectrofotômetros antigos e descontinuados, a necessidade de preservação e manutenção desses equipamentos ganha destaque, fomentando a responsabilidade ambiental e o senso de preservação do patrimônio científico.

Portanto, a utilização de instrumentos antigos no ensino da química experimental, como os espectrofotômetros antigos e descontinuados, vai além da mera prática laboratorial. Ela promove uma compreensão histórica, o desenvolvimento de habilidades práticas, a consolidação do método científico e a conscientização ambiental. Esses aspectos convergem para uma formação mais completa e enriquecedora, preparando os estudantes para os desafios e as demandas da ciência contemporânea.

Baseando-se nesse conjunto de informações, foram delineados os objetivos geral, específicos e a metodologia deste Trabalho de Conclusão de Curso.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve por objetivo restaurar um antigo monocromador manual de rede móvel para sua utilização no ensino de química analítica instrumental, assim como realizar o seu controle, via smartphone, para a obtenção de espectros de substâncias.

2.1 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar as condições mecânicas do aparato e realizar a substituição de peças quando necessária;
- Acoplar um motor de passos ao mecanismo de movimentação da rede de difração que permita correlacionar o número de passos do motor com o comprimento de onda da radiação na fenda de saída do instrumento;
- Controlar o sistema por via remota (Arduino/smartphone);
- Construir e acoplar ao monocromador restaurado uma fonte de radiação baseada em diodo emissor de luz (LED) branca;
- Montar um sistema de detecção com suporte para cubeta e fotodiodo de boa sensibilidade para realização da aquisição de espectros;
- Avaliar a possibilidade de uso do instrumento restaurado na obtenção de espectros de soluções aquosas de substâncias coloridas como o permanganato de potássio.

3. Metodologia

Na sequência, será explicitado o estado em que se encontrava o equipamento objeto de recuperação e, descrito o processo de restauração; de acoplamento do motor de passos; a calibração do comprimento de onda; o preparo de soluções para a testagem do equipamento; o interfaceamento por aplicativo de smartphone.

3.1 - Estado inicial do monocromador

As Figuras 3, 4 e 5 mostram fotografias do monocromador do modelo MP-1018 disponível no laboratório de ensino do IQ-UnB antes da restauração e interfaceamento realizados neste trabalho. Na análise do instrumento em questão, percebeu-se que era possível selecionar o comprimento de onda de saída com um botão manual que ajusta o ângulo da rede de difração. Entretanto, notava-se pouca fluidez nessa movimentação, com excesso de travamentos ocasionados pela oxidação das partes e pela falta de lubrificação. Apesar disso, como mostra a Figura 5, a parte mecânica do instrumento, eixos e engrenagens apresentavam-se bem conservados em termos gerais, sendo necessária limpeza e lubrificação adequadas.

Na Figura 3 são mostrados os espelhos côncavos e a rede de difração. Esses componentes estavam em bom estado, necessitando apenas de limpeza. Utilizando uma lanterna LED é possível observar a dispersão da radiação na região da fenda de saída, o que indicou a possibilidade de reutilização desse monocromador.

Figura 3 - Rede móvel de difração e espelhos côncavos do monocromador MP-1018 antes da restauração. Espelhos côncavos (A e B), rede de difração (C), fenda de entrada (E) e saída (D)



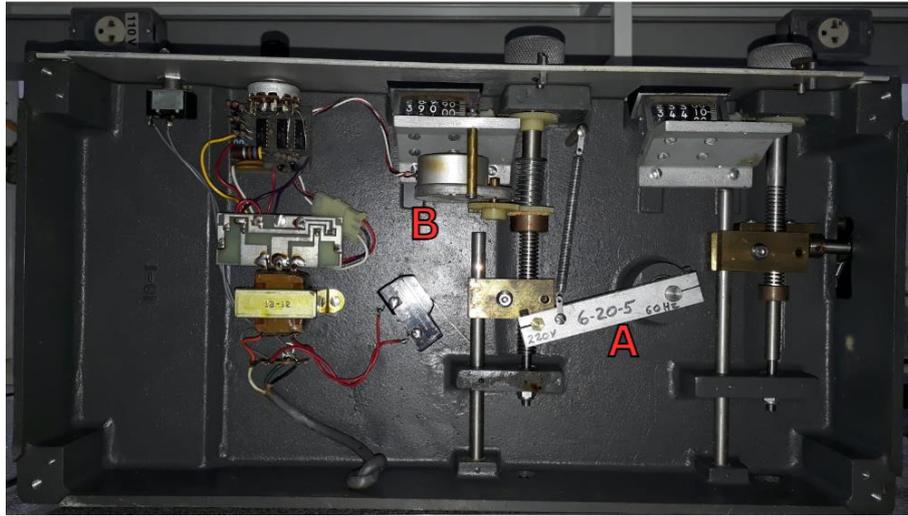
Fonte: acervo pessoal.

Figura 4 - Painel frontal do MP-1018. Visor de comprimento de onda (A), botão analógico para ajuste do ângulo de difração (B), visor de largura da fenda de saída (C), botão analógico para ajuste da fenda de saída (D)



Fonte: acervo pessoal.

Figura 5 - Parte inferior do arranjo do motor elétrico conectado ao botão de ajuste da rede de difração. Posição da rede de difração (A), ponto de desacoplamento da engrenagem do motor antigo (B)

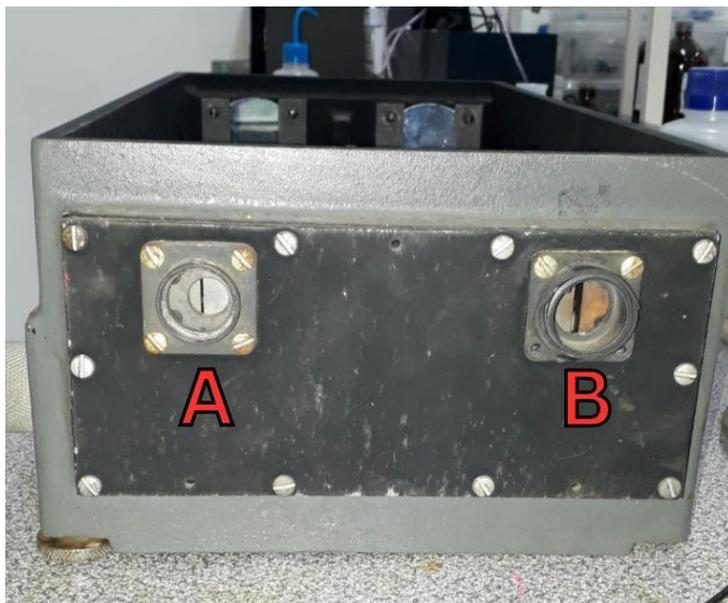


Fonte: acervo pessoal.

Ainda na Figura 5, nota-se a presença de um transformador elétrico, de um circuito eletrônico e de um motor utilizados para a movimentação da rede em diferentes velocidades. De fato, o monocromador permitia a movimentação automática da rede em velocidade constante, além da movimentação manual. Porém, para a obtenção de um espectro deve-se determinar a posição da rede a qualquer momento e empregar um detector que realize medidas da intensidade de luz em intervalos bem definidos e sincronizados com a movimentação da rede. Porém, esse instrumento não possuía pontos de comunicação para o seu interfaceamento, dificultando a obtenção de um espectro a partir dele.

A Figura 6 permite a visualização do estado inicial do painel lateral do instrumento, onde estão localizadas as fendas de entrada e saída de radiação, com sinais claros de oxidação.

Figura 6 - Painel lateral. Fenda de entrada de radiação (A), fenda de saída de radiação (B).



Fonte: Acervo pessoal.

A partir da análise detalhada do estado em que se encontrava o monocromador do modelo MP-1018, foi possível estabelecer as etapas necessárias para o processo de restauração, ou seja, limpeza, lubrificação e fabricação de peças.

3.2 - Restauração

A primeira etapa do processo de restauração envolveu a desmontagem dos painéis e visores do monocromador a fim de acessar suas partes internas e realizar uma limpeza detalhada. Os componentes foram cuidadosamente limpos para remover resíduos de poeira, oxidação e outros detritos acumulados ao longo dos anos. Em seguida, realizou-se a lubrificação adequada das partes para melhorar a fluidez dos movimentos.

Após a etapa de limpeza e lubrificação, a conexão do motor elétrico antigo com a engrenagem do botão de ajuste manual de comprimento de onda foi removida (Figura 5), pois este componente não seria mais utilizado no processo de restauração. Em seguida, foram projetadas e fabricadas peças personalizadas por meio de impressão 3D, utilizando-se a impressora de modelo Cliever CL1 e técnicas de modelagem computacional pelo software Blender. Dentre as peças produzidas, destacam-se o suporte para célula de amostra,

sendo uma cubeta com 1,0 cm de caminho óptico, o suporte para inclusão do detector de intensidade luminosa OPT-101, o suporte para a lanterna utilizada como fonte luminosa e o suporte para o acoplamento do motor de passos. É importante destacar que a utilização de uma lanterna com lente colimada de fábrica oferece uma vantagem significativa, pois a luz já é emitida com feixes paralelos direcionados adequadamente aos componentes ópticos do instrumento. Isso elimina a necessidade de realizar ajustes adicionais para obter a colimação necessária no feixe de luz, tornando a montagem mais simples.

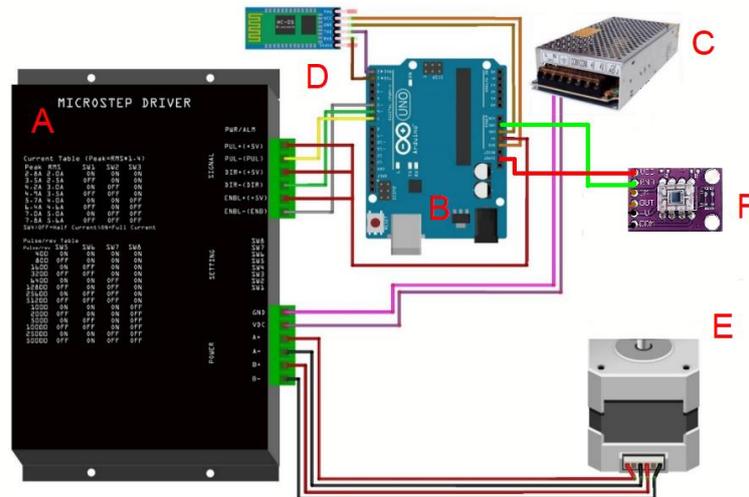
Em vista do estado da pintura do aparelho, que apresentava desgaste considerável, arranhões e falhas, optou-se pelo envelopamento com vinil adesivo de cor preta de boa parte da estrutura. Esta aplicação colabora para a preservação do instrumento, facilita procedimentos de limpeza e proporciona um melhor aspecto visual. A parte interna, representada pela Figura 3, recebeu retoque de pintura em pontos desgastados.

3.3 - Conexão do motor de passos

Para a movimentação mais precisa da rede de difração, utilizou-se um motor de passos da família NEMA 17 em substituição ao motor antigo. O motor de passos gira em pequenos incrementos que podem ser contados e relacionados com a posição da rede de difração a qualquer momento, facilitando a correlação entre o ângulo da rede e o comprimento de onda na fenda de saída do instrumento. Para isso, foi utilizado o sistema de eixos e engrenagens já disponíveis no monocromador (Figura 5), realizando apenas a adaptação do novo motor.

Esta etapa do trabalho consistiu, primeiramente, em estabelecer a conexão entre o motor de passos do modelo NEMA 17 e o microcontrolador Arduino UNO, juntamente com um módulo Bluetooth HC-05. Esse procedimento foi realizado por meio da utilização de um dispositivo driver para motor de passos do modelo TB6600. Para assegurar a correta conexão, foi necessário consultar as instruções detalhadas presentes no manual do driver, conforme exemplificado na Figura 7.

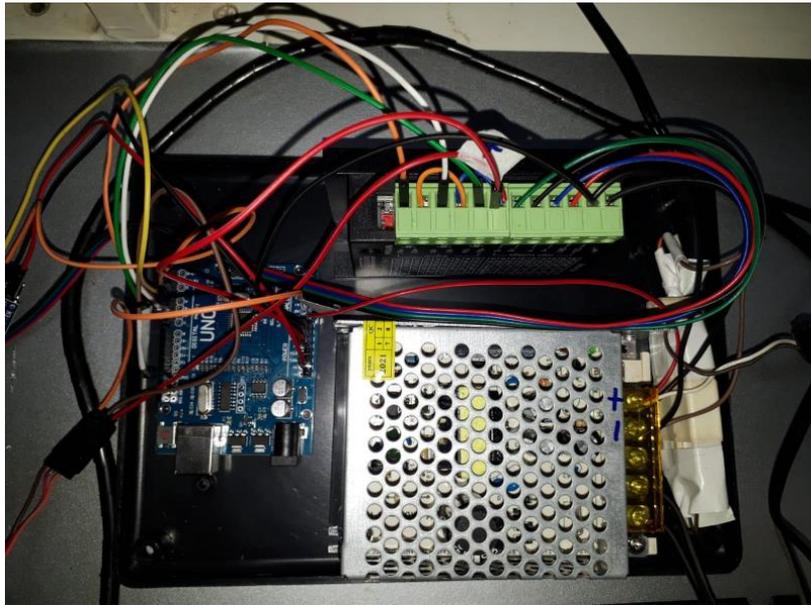
Figura 7 - Esquema de conexão do sistema microcontrolador. Driver para motor de passos (A); microcontrolador Arduino UNO®; fonte de alimentação (C); módulo Bluetooth (D); motor de passos (E), detector de luz (F)



Fonte: Adaptado de TB6600 Stepper Motor Driver User Guide, DFRobot.

Na Figura 8 pode-se observar uma fotografia da interconexão entre os componentes do sistema. A placa do microcontrolador Arduino está conectada a uma fonte de alimentação, ao driver de motor de passos (Figura 7). Também está presente na configuração o módulo Bluetooth HC-05, que possibilita a comunicação sem fio com dispositivos externos, e o fotodiodo OPT-101, que é utilizado em etapas posteriores deste trabalho para a detecção da radiação monocromática.

Figura 8 - Conexão dos componentes do sistema.

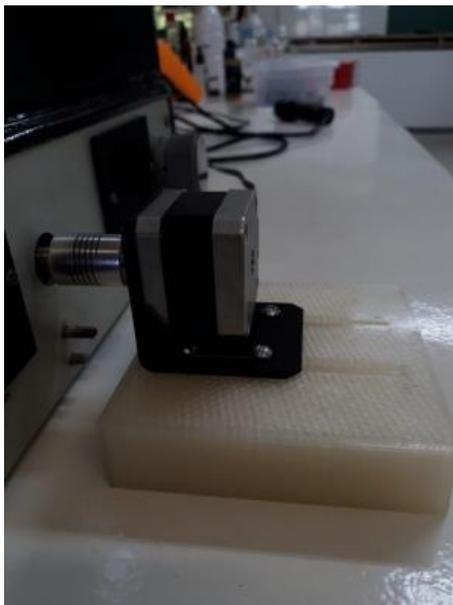


Fonte: Acervo pessoal.

A fim de controlar a rotação do motor de passos, um código de programação foi desenvolvido e gravado no microcontrolador Arduino. Essa programação permitiu definir o número de passos dados pelo motor que se relaciona com o deslocamento angular da rede de difração e, conseqüentemente, com o comprimento de onda de radiação a ser medido. Em outras palavras, foi necessário ajustar a programação para que a radiação da fenda de saída variasse em incrementos de 1,0 nm e que, a cada incremento, fosse realizada a medida de intensidade de sinal. Por conseguinte, foi constatado que 200 micropassos correspondiam à movimentação referente a 1 nanômetro na rede de difração.

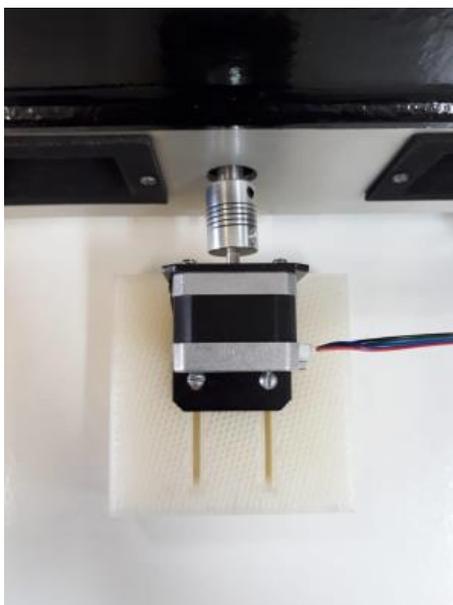
Para que isso fosse possível, o botão de rotação manual B, representado pela Figura 4, foi removido para permitir o acoplamento do motor ao instrumento. Essas modificações podem ser observadas nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 - Motor de passos acoplado na posição anteriormente destinada ao botão analógico



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 10 - Visão vertical do motor de passos acoplado



Fonte: Acervo pessoal.

Por conseguinte, foi constatado que 200 micropassos correspondem à movimentação referente a 1 nanômetro na rede de difração.

3.4 - Calibração do comprimento de onda

No tocante à calibração e verificação do monocromador, houve necessidade de efetuar um ajuste na posição do espelho A, identificado na

Figura 11. Os espelhos possuem um sistema de molas que podem ser submetidos a uma ação de compressão ou flexão mediante o uso de uma chave do tipo Allen, conforme retratado na Figura 12.

Figura 11 - Parte interna do monocromador. Espelhos côncavos (A e B), rede de difração móvel (C)



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 12 - Chave Allen encaixada no parafuso para movimentação do espelho côncavo



Fonte: Acervo pessoal

Com o intuito de realizar a mensuração do comprimento de onda obtido, fez-se uso de um espectrofotômetro de rede fixa e que conta com um arranjo de diodos (Ocean Optics USB 2000), cuidadosamente posicionado na fenda de saída do monocromador a ser restaurado, identificada como B na Figura 6.

Dessa forma, quando a fonte luminosa foi acionada, a posição do monocromador móvel referente a 430 nm foi estabelecida, e então procedeu-se a verificação da correspondência entre o valor de comprimento de onda exibido no visor (Figura 4) e aquele que é detectado na fenda de saída, sendo este 441 nm.

Constatada a disparidade entre o dado fornecido pelo espectrofotômetro de referência e o valor proposto, utilizou-se a chave Allen (Figura 10) para exercer pressão sobre o parafuso, movimentando, assim, o espelho e adaptando o valor exibido no visor ao valor de referência.

Utilizou-se dois valores de comprimento de onda para realizar o ajuste, sendo o segundo correspondente a 560 nm.

3.5 - Preparo das soluções de KMnO_4

Optou-se por utilizar soluções aquosas de permanganato de potássio (KMnO_4) para realizar a avaliação do instrumento. A partir da pesagem precisa do sal disponível em laboratório, preparou-se um volume de 250 mL de uma solução estoque a 1000 mg/L de KMnO_4 . A pesagem foi realizada utilizando uma balança analítica com uma precisão de 0,0001 g.

Para a obtenção das soluções de teste, foram feitas diluições a partir da solução estoque, resultando em soluções de 25 mL cada, com concentrações de 10, 20, 30, 40 e 50 mg/L. Todas as diluições foram realizadas utilizando balões volumétricos, assegurando a precisão necessária na obtenção das concentrações desejadas. Durante o preparo das soluções, foram empregadas micropipetas para transferência das alíquotas.

Os cálculos de diluição foram realizados utilizando a equação da diluição de soluções, onde a concentração final da solução diluída (C_f) é igual ao produto da concentração inicial da solução estoque (C_i) pelo quociente entre o volume inicial e o volume final (HARRIS, *et al*):

$$C_f = C_i \times V_i/V_f \quad (7)$$

Os cálculos foram realizados com base nas concentrações desejadas, resultando nas seguintes diluições:

- Solução de 10 mg/L: fator de diluição 1:100, utilizando 0,25 mL da solução estoque e completando com água destilada até 25 mL.

- Solução de 20 mg/L: fator de diluição 1:50, utilizando 0,5 mL da solução estoque e completando com água destilada até 25 mL.
- Solução de 30 mg/L: fator de diluição 1:33,33, utilizando 0,75 mL da solução estoque e completando com água destilada até 25 mL.
- Solução de 40 mg/L: fator de diluição 1:25, utilizando 1 mL da solução estoque e completando com água destilada até 25 mL.
- Solução de 50 mg/L: fator de diluição 1:20, utilizando 1,25 mL da solução estoque e completando com água destilada até 25 mL.

3.6 - Interfaceamento por aplicativo de smartphone

O interfaceamento do monocromador de rede móvel com um aplicativo para *smartphone*, criado por meio do ambiente de desenvolvimento Android Studio, proporciona uma maneira prática e intuitiva para os usuários controlarem e monitorarem o dispositivo por meio de um celular. O aplicativo foi projetado com uma interface dividida em quatro passos, cada um com uma funcionalidade relacionada às etapas do processo de análise.

Em uma primeira tela do aplicativo, o usuário deve realizar a conexão do smartphone com o módulo Bluetooth do circuito com o Arduino. Feito isso, abre-se uma nova tela, com um layout simples e limpo, onde está desbloqueado apenas o primeiro botão *BLANK* (branco) em azul, responsável pela leitura do branco analítico, representado na Figura 13. O bloqueio dos demais botões de comando evita que o usuário cometa erros na utilização do aplicativo.

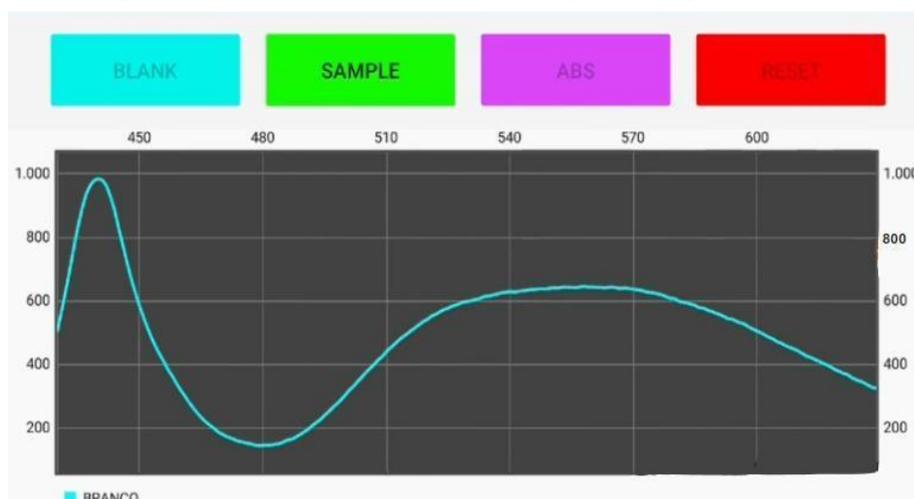
Figura 13 - Tela inicial do aplicativo de controle.



Fonte: Acervo pessoal.

Ao acionar o primeiro botão, o aplicativo envia um comando via Bluetooth-Arduino para que o motor de passos seja acionado e inicialize a varredura do espectro do branco posicionado na célula de amostra. Por meio da instalação do fotodiodo com amplificador operacional integrado OPT-101, o software está programado para realizar 3000 medidas para cada nanômetro percorrido, plotando o ponto correspondente à média das leituras. Obtém-se o gráfico, conforme explicitado na Figura 14.

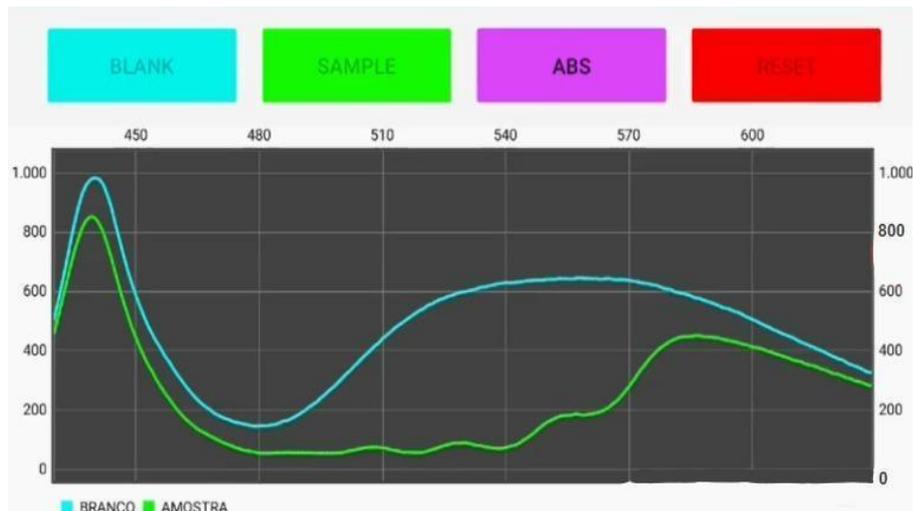
Figura 14 - Espectro do branco e liberação do segundo botão.



Fonte: Acervo pessoal.

Subsequentemente, há a liberação do segundo botão *SAMPLE* (amostra) destinado à leitura de amostras e plotagem de seus espectros. Este processo ocorre da mesma maneira em relação ao branco analítico, como retratado na Figura 15. Entretanto, o gráfico obtido se refere apenas ao sinal bruto de intensidade, ou seja, observa-se a atenuação da intensidade de radiação medida nos diferentes comprimentos de onda quando se adiciona a amostra ao compartimento de medida.

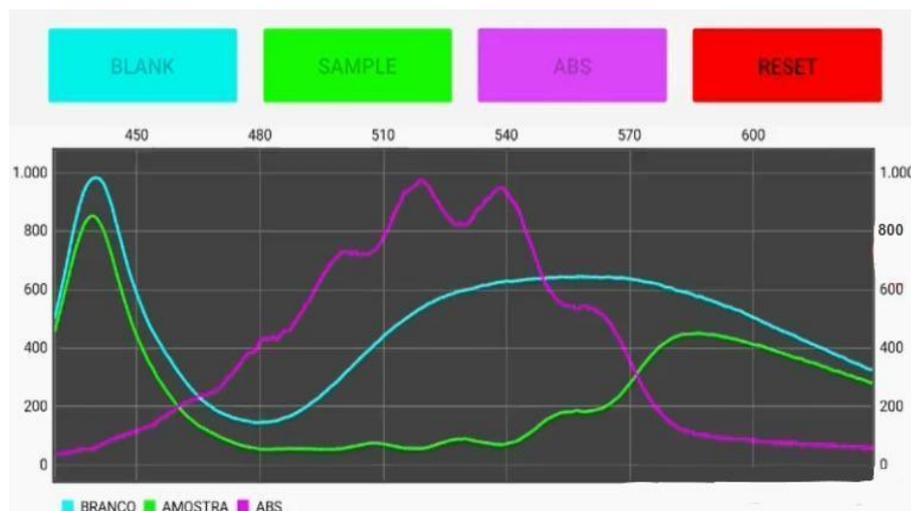
Figura 15 - Espectro da amostra e liberação do terceiro botão.



Fonte: Acervo pessoal.

Com a liberação e acionamento do terceiro botão ABS (absorção), o aplicativo está programado para aplicar a função $A = \log(I_0/I)$ (equação 6), sendo I_0 referente ao sinal de intensidade para o branco analítico e I ao sinal para a amostra. Como resultado, um espectro de absorção é plotado, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Espectro de absorção e liberação do último botão.



Fonte: Acervo pessoal.

O último botão *RESET* (reiniciar) permite o salvamento de todos dados e plotagens gerados no processo, que podem ser acessados no armazenamento de informações da aplicação, além de retornar para a tela inicial (Figura 13) possibilitando que o usuário faça novas leituras. Em adição, o acionamento deste botão está programado para enviar um comando de retorno ao motor de passos.

Dessa forma, o motor aplica o percurso contrário retornando à posição de origem do comprimento de onda da varredura e fica disponível para leituras subsequentes.

4. Resultados e Discussão

A seguir, serão analisados os resultados obtidos ao longo do processo de recuperação do monocromador do modelo MP-1018.

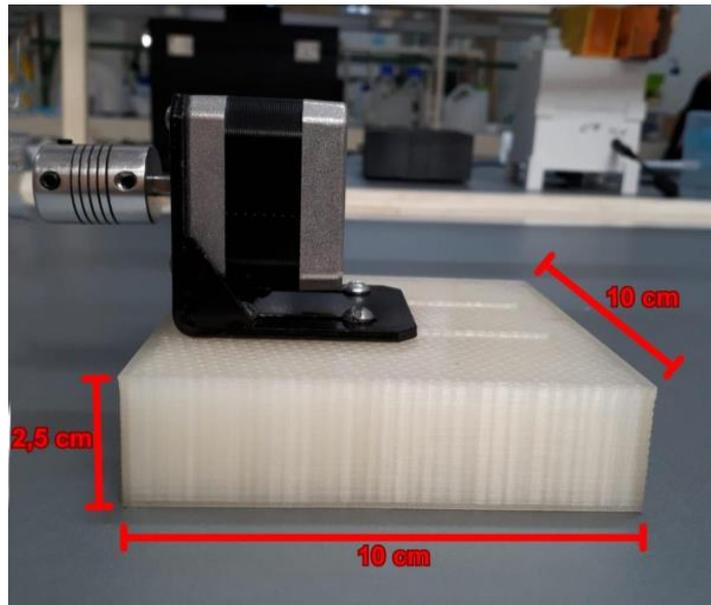
4.1 - Fabricação de peças via impressão 3D

Tendo em vista a necessidade de inserir peças de difícil acesso comercial ao instrumento restaurado no presente trabalho, utilizou-se uma impressora 3D do modelo Cliever CL1 disponível no Laboratório de Instrumentação, Automação e Miniaturização (LIAMA) do Instituto de Química - UnB. Por meio do software Blender, foram realizadas as modelagens tridimensionais dos seguintes componentes, impressos em ácido polilático:

- suporte do motor de passos;
- suporte da fonte de radiação (lanterna com lente acoplada);
- suporte para célula de amostra e detector de intensidade luminosa;
- tampa para célula de amostra.

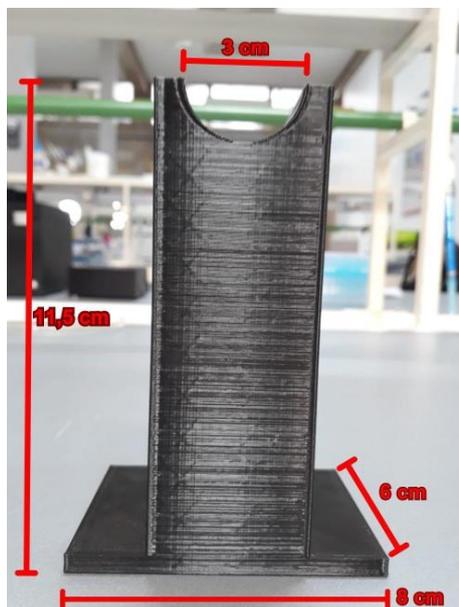
As Figuras 17, 18, 19, 20 e 21 mostram as partes fabricadas e suas dimensões.

Figura 17 - Suporte do motor de passos



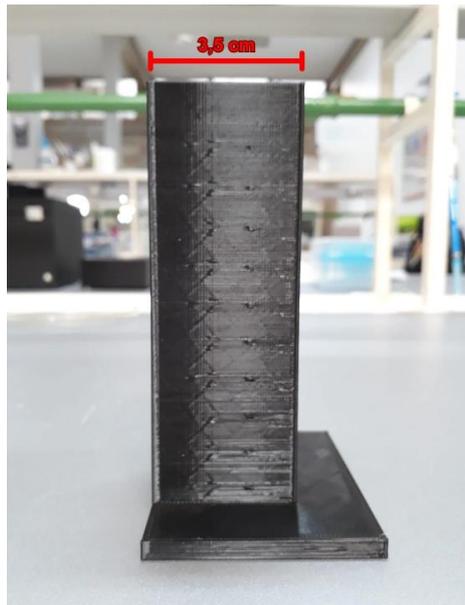
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 18 - Parte frontal do suporte da fonte de radiação (lanterna LED)



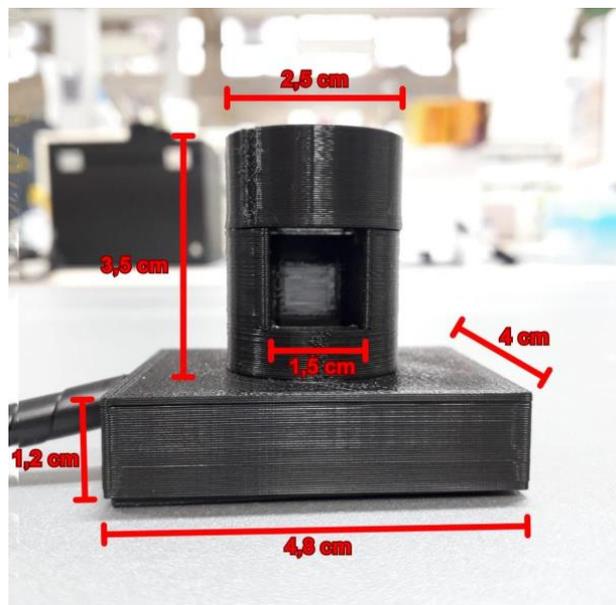
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 19 - Parte lateral do suporte da fonte de radiação



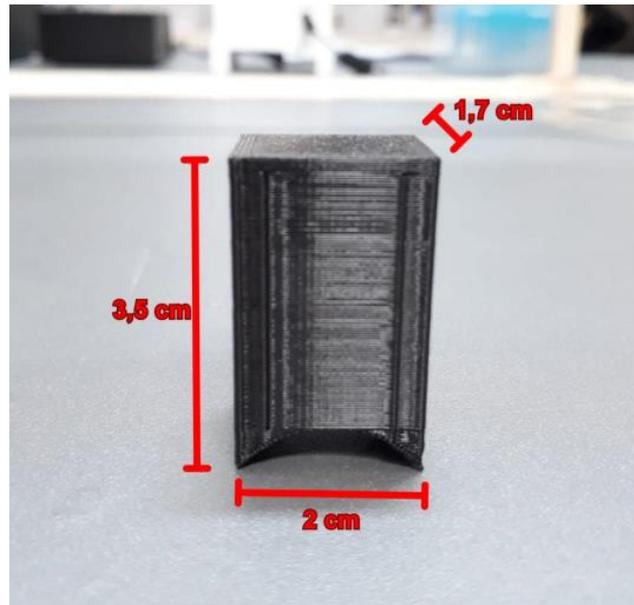
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 20 - Suporte célula de amostra e detector de intensidade luminosa



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 21 - Tampa para cédula de amostra



Fonte: Acervo pessoal.

4.2 - Envelopamento com vinil adesivo

No que diz respeito à aplicação de vinil adesivo no instrumento, destacam-se as melhorias em sua aparência e facilidade de limpeza periódica. As Figuras 22, 23, 24 e 25 mostram as faces do instrumento depois do envelopamento.

Figura 22 - Painel frontal do monocromador



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 23 - Painel lateral com as fendas de entrada e saída de radiação



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 24 - Painel traseiro



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 25 - Painel lateral



Fonte: Acervo pessoal

Além dos benefícios estéticos, o envelopamento com vinil adesivo trouxe uma maior facilidade para a realização da limpeza periódica do instrumento, visto que o material é resistente à umidade e a produtos de limpeza comuns, o que simplifica o processo de higienização. A sujeira e resíduos podem ser facilmente removidos com um pano úmido, mantendo o instrumento limpo e pronto para uso.

4.3 - Montagem e apresentação final

Após as etapas de impressão 3D de novas peças e envelopamento, foi utilizada uma caixa plástica para armazenamento da parte eletrônica, garantindo a segurança das conexões dos componentes do sistema, evitando contato acidental com os fios e acúmulo indesejado de sujeira, conforme ilustra a Figura 26.

Figura 26 - Caixa adaptada para comportar o sistema do microcontrolador. Conexão com o detector OPT-101 (A), conexão com o motor de passos (B), conexão da fonte de radiação (C), conexão com a rede elétrica (D)

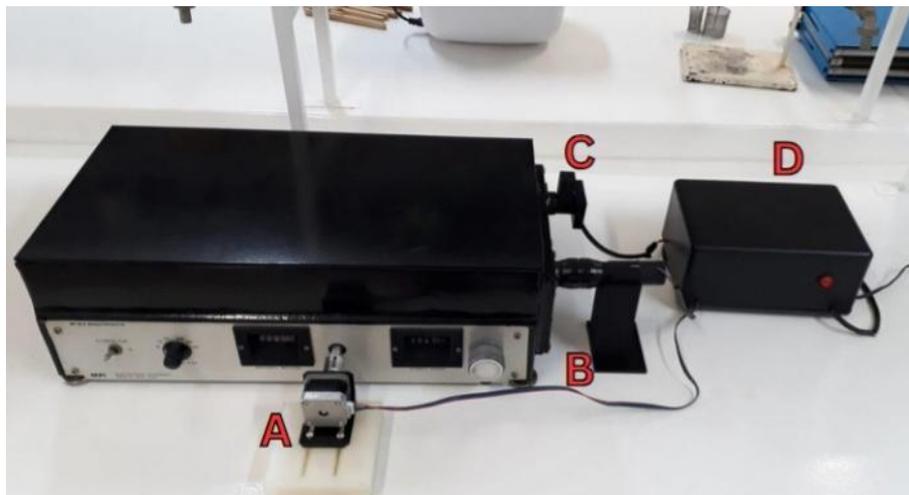


Fonte: Acervo pessoal.

A caixa tem dimensões de 20 cm de comprimento, 15 cm de largura e 11 cm de altura, proporcionando um espaço adequado para acomodar o microcontrolador Arduino, a fonte de alimentação, o driver de motor de passos, o módulo Bluetooth HC-05 e o fotodiodo OPT-101 (Figura 8). Nota-se um botão de chave *on-off* e os fios das conexões com o sistema do instrumento restaurado.

A montagem final da restauração do monocromador com todas as suas partes está exposta na Figura 27, representando as conexões e posições das peças fabricadas e do motor de passos acoplado.

Figura 27 - Visão final do instrumento restaurado. Suporte e acoplamento do motor de passos (A), suporte e posicionamento da fonte de radiação (B), suporte para célula de amostra e detector de intensidade luminosa (C), caixa para comportamento do sistema microcontrolador (D)



Fonte: Acervo pessoal.

4.4 - Avaliação do instrumento

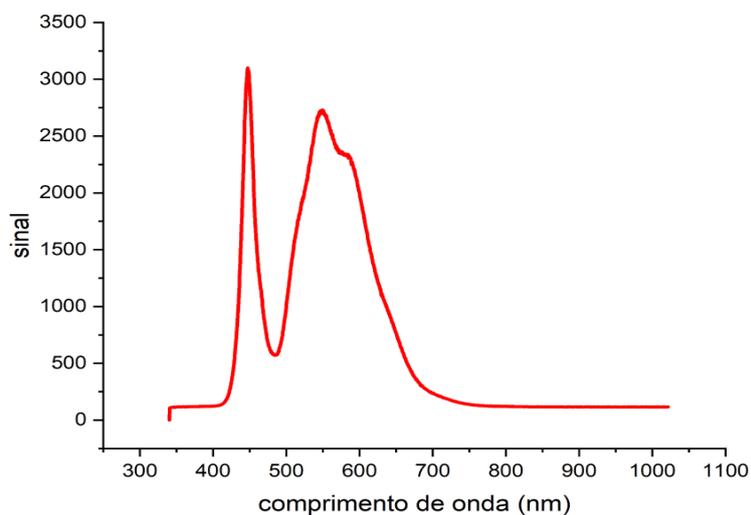
Finalizado o processo de recuperação do monocromador do modelo MP-1018, foi necessário testar seu funcionamento para posterior liberação para ser integrado aos equipamentos disponibilizados para aulas no laboratório de ensino de Química Analítica.

4.4.1 - Análise do espectro da fonte de radiação

Com o objetivo de verificar a faixa de comprimento de onda mensurável da fonte de radiação utilizada e visando a sua testagem com soluções de KMnO_4 , obteve-se um espectro da luz da lanterna LED empregando-se um espectrofotômetro comercial (Ocean Optics USB 2000).

É possível observar na Figura 28 que a fonte utilizada apresenta emissão de radiação com intensidade apreciável entre 430 nm e 630 nm. Para além desses limites, a baixa intensidade de emissão levaria à uma baixa razão sinal/ruído, comprometendo as medidas analíticas, de modo que essa faixa foi utilizada para a realização dos estudos com soluções de permanganato de potássio. Vale destacar que outras fontes podem ser utilizadas para ampliação da faixa de aplicação, mas isso não foi avaliado neste trabalho.

Figura 28 - Espectro obtido da fonte de radiação LED

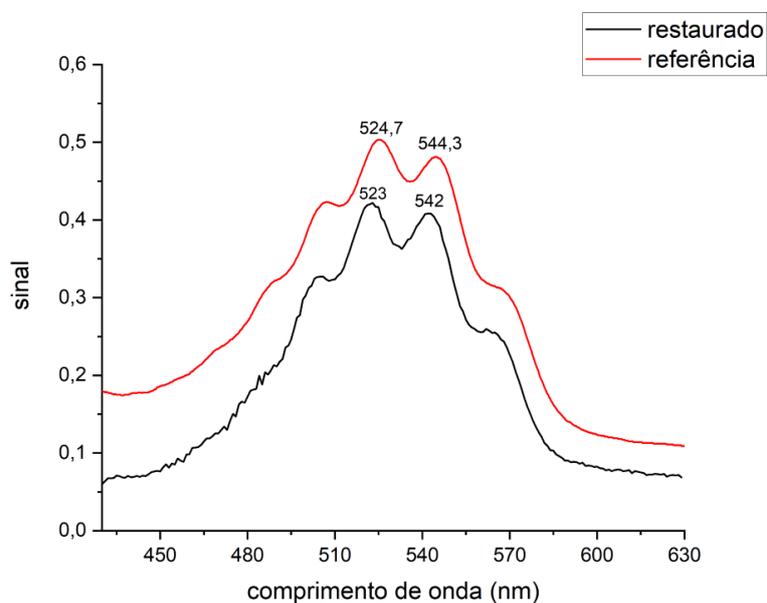


Fonte: Elaboração própria.

4.4.2 - Comparação com espectrômetro de referência

Para avaliar a resposta do instrumento restaurado, foram executadas leituras de uma solução de KMnO_4 , com concentração 30 mg/L, no instrumento restaurado e no espectrômetro de referência, Ocean Optics USB 2000. A Figura 29 mostra o resultado dessa comparação, apresentando os espectros obtidos nos dois instrumentos.

Figura 29 - Comparação dos instrumentos



Fonte: Elaboração pessoal.

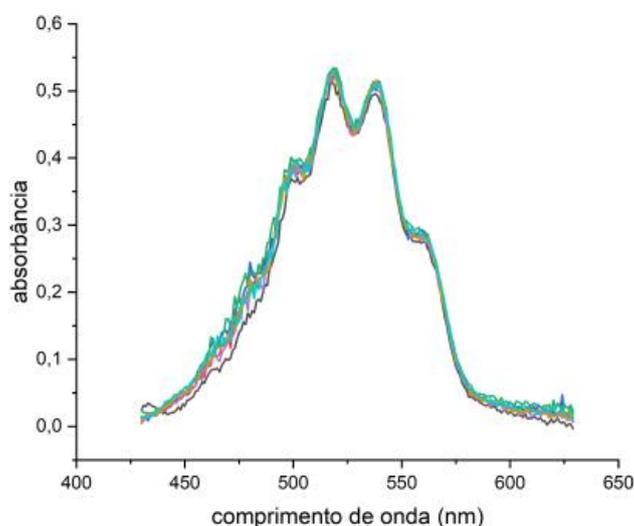
É possível observar que os dois picos de maior intensidade de sinal analítico na referência correspondem a 524,7 nm e 544,3 nm, enquanto no instrumento restaurado, esses picos são medidos em 523 nm e 542 nm, respectivamente. Ao analisar essa diferença de valores entre os picos de intensidade de sinal, calculamos o erro relativo das medidas, obtendo-se erro relativo de 0,19% para o pico de 523 nm e 0,37% para o pico de 542 nm.

Esses valores indicam que as leituras realizadas pelo instrumento restaurado apresentaram uma variação aceitável, se for considerado que a resolução do espectrômetro comercial é menor que 0,1 nm enquanto o proposto apresenta uma resolução de 1,0 nm.

4.4.3 - Repetibilidade de medidas

Com intuito de avaliar a consistência e confiabilidade dos resultados produzidos pelo instrumento restaurado, foi realizado um teste de repetibilidade de sete medidas consecutivas de uma solução de KMnO_4 de concentração igual a 40 mg/L, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Espectros sobrepostos para sete medidas consecutivas de uma solução 40 mg/L de KMnO_4

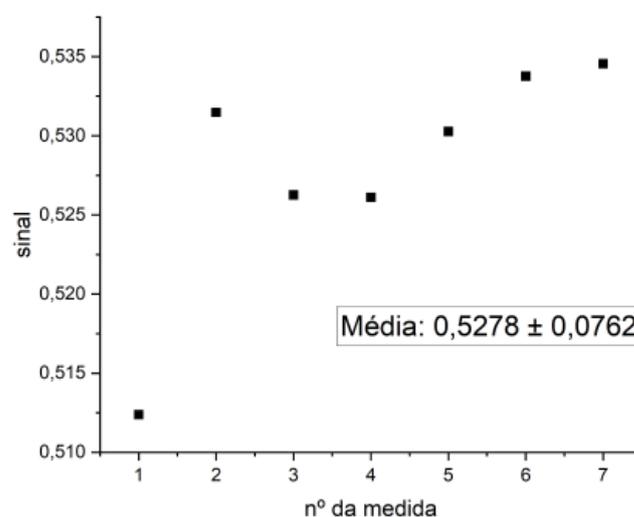


Fonte: Elaboração pessoal.

Optou-se por avaliar a repetibilidade dos resultados dos sinais analíticos dos dois maiores picos do espectro, bem como dos comprimentos de onda a

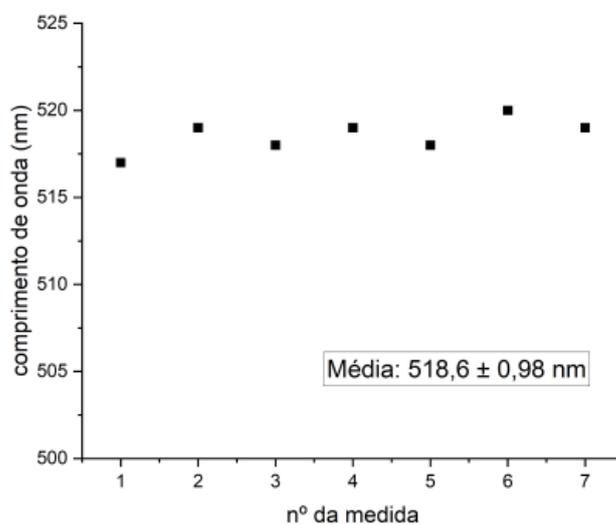
eles associados. Para o primeiro pico, o sinal de absorvância médio detectado pelo fotodiodo OPT-101 foi igual a 0,52781 com desvio padrão igual a 0,076, levando a um desvio padrão relativo de 1,4%, conforme mostrado na Figura 31. A média do valor do comprimento de onda deste pico foi de 518,6 nm, com desvio padrão de 0,98 e desvio padrão relativo de 0,19%, ilustrado na Figura 32.

Figura 31 - Teste de repetibilidade. Sete valores de sinal analítico do primeiro pico analisado



Fonte: Elaboração pessoal.

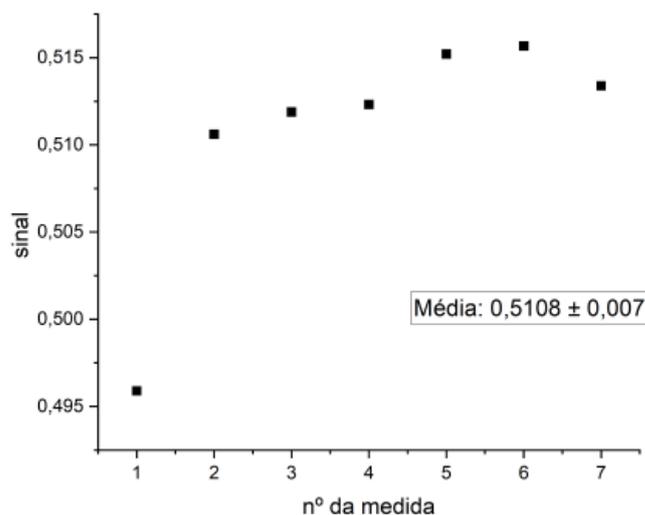
Figura 32 - Teste de repetibilidade. Sete valores de comprimento de onda do primeiro pico analisado



Fonte: Elaboração pessoal.

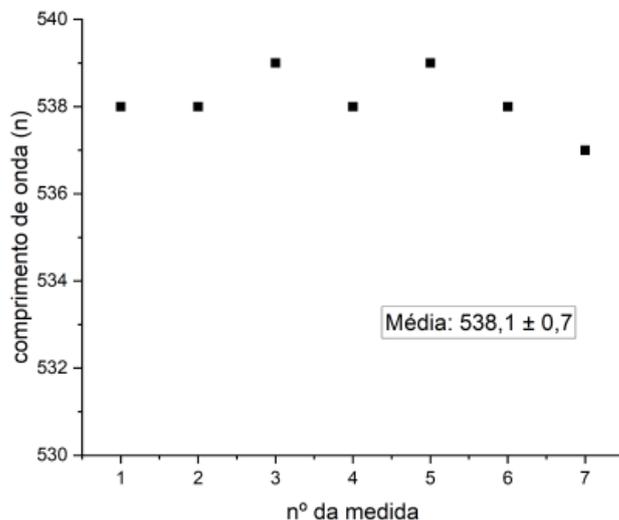
Para o pico seguinte, a análise deu-se de maneira semelhante, obtendo-se média de sinal analítico de 0,5108, com desvio padrão de 0,007 e desvio padrão relativo de 1,3%, explicitado na Figura 33. Em relação ao comprimento de onda do segundo pico, obteve-se média igual a 538,1 nm e desvio padrão de 0,7 nm, com desvio padrão relativo de 0,13%, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 33 - Teste de repetibilidade. Sete valores de sinal analítico do segundo pico analisado



Fonte: Elaboração pessoal.

Figura 34 - Teste de repetibilidade. Sete valores de comprimento de onda do segundo pico analisado



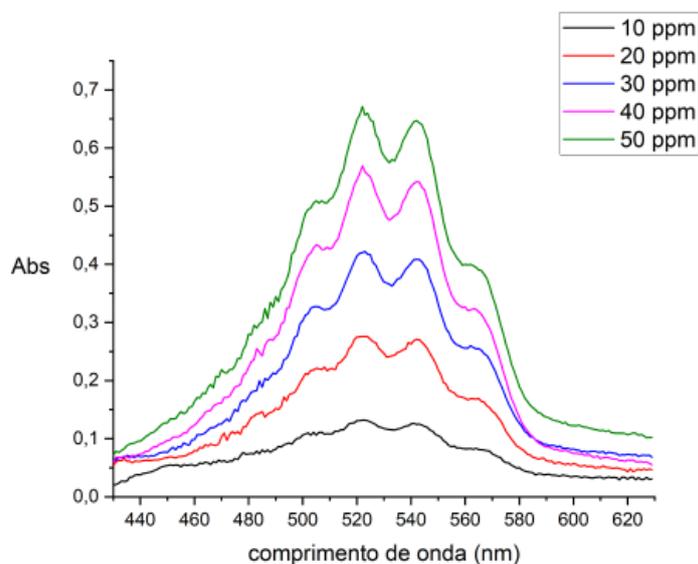
Fonte: Elaboração pessoal.

De maneira geral, o desempenho para ambos os picos demonstra uma boa precisão para as medidas, se considerado o número de variáveis que podem afetar a obtenção do sinal analítico e comprimento de onda, como mau posicionamento da célula de amostra, ruídos na rede elétrica afetando a fonte de radiação e, apesar da alta precisão do motor de passos, é possível que aconteçam variações atípicas em seus padrões de rotação.

4.4.4 - Construção de curvas analíticas

Para melhor avaliação da relação linear entre a concentração das soluções de permanganato de potássio adotadas e o sinal analítico, foram construídas duas curvas analíticas, uma para cada um dos dois picos de maior intensidade de sinal analítico de absorbância. Foi adotada a faixa de concentração de 10 a 50 mg/L, visto que para concentrações superiores não foram obtidas boas respostas do detector OPT-101 utilizado. As leituras das soluções foram intercaladas por aplicações do branco analítico, visando diminuir eventuais erros e disparidades. A Figura 35 mostra o espectro de absorbância de cada uma das soluções de KMnO_4 utilizadas.

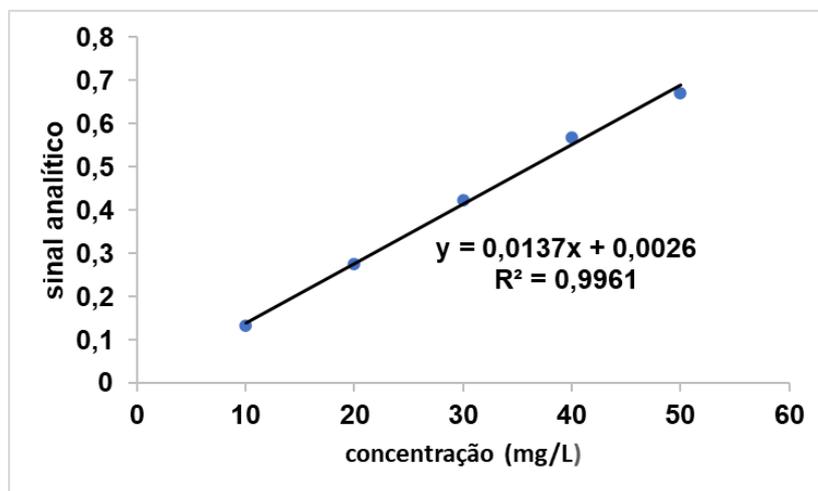
Figura 35 - Espectro de absorbância das soluções de KMnO_4



Fonte: Elaboração pessoal.

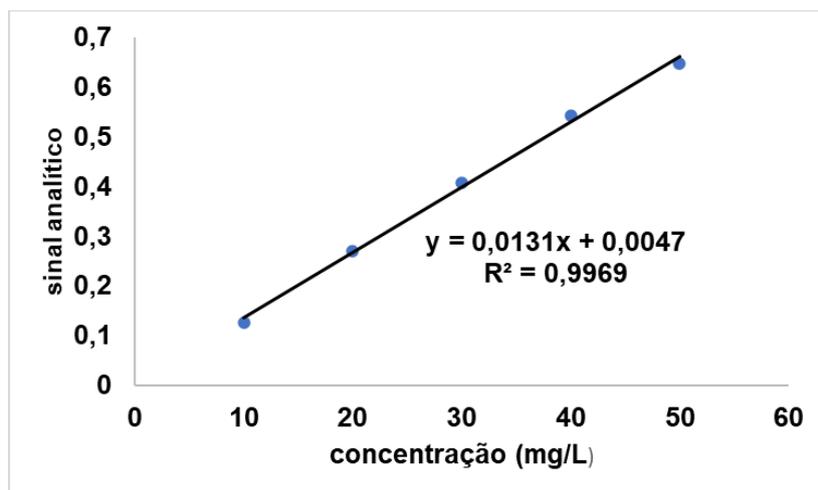
Para a construção das curvas analíticas foram utilizados os pontos de maior valor de sinal analítico nos dois picos de mais alta intensidade de sinal. Como indicado na Figura 36, para o primeiro pico, o coeficiente de determinação R^2 foi estimado em 0,9961. Para o segundo pico, o R^2 foi igual a 0,9969, como representado na Figura 37.

Figura 36 - Curva analítica para o primeiro pico selecionado



Fonte: Elaboração pessoal.

Figura 37 - Curva analítica para o segundo pico selecionado



Fonte: Elaboração pessoal.

Tendo em vista a utilização de componentes comercialmente disponíveis e acessíveis, além da fabricação e adaptação de peças necessárias para realizar a restauração do instrumento, os resultados demonstram comportamento

razoavelmente aceitável e adequado para o emprego do instrumento em atividades de ensino em instrumentação analítica.

5. Conclusão

O trabalho de restauração do monocromador MP-1018 torna possível a sua adequação aos ambientes de ensino de instrumentação analítica. A realização da manutenção de componentes, a fabricação de peças por uso de impressão 3D e o interfaceamento do instrumento via aplicativo de *smartphone* permitiu a obtenção de resultados confiáveis e satisfatórios para a reintegração do equipamento aos laboratórios de ensino do Instituto de Química - UnB. Demais estudos e testagens complementares podem ser desenvolvidos a fim de melhorar o desempenho do instrumento.

Referências Bibliográficas

ABD-EL-KHALICK, Fouad; LEDERMAN, Norman G. Improving science teachers' conceptions of nature of science: a critical review of literature. *International Journal of Science Education*, v. 22, n. 7, p. 665-701, 2000.

ALBERT, Daniel R.; TODT, Michael A.; DAVIS, H. Floyd. A low-cost quantitative absorption spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, v. 89, n. 11, p. 1432-1435, 2012.

CARVALHO, Regina S. Atividades investigativas na formação inicial de professores de química em uma instituição pública de ensino superior. *Scientia Amazonia*, v. 7, n.1, p. 115-121, 2018.

CONDIT, Reston; JONES, Douglas W. *Stepping Motors Fundamentals*. Microchip Technology Inc., 2004.

DOS SANTOS, Júlio Murilo Trevas; STANGE, Carlos Eduardo Bittencourt.; DOS SANTOS, Sandro Aparecido. Instrumentalização, demonstração e experimentação em Química, Física e Biologia. *Revista Publicação*, v. 1, n. 1, p. 21, 2008.

DOS SANTOS, Lucélia Rodrigues; DE MENEZES, Jorge Almeida. A experimentação no ensino de Química: principais abordagens, problemas e desafios. *Revista Eletrônica Pesquiseduca*, v. 12, n. 26, p. 180-207, 2020.

FERNANDES, Julys Pablo Atayde. *Instrumentação eletrônica com materiais alternativos para aulas experimentais de química: uma revisão integrativa*. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GIORDAN, Marcelo. *O Papel da Experimentação no Ensino de Ciências. Química Nova na Escola*, 1999.

GORE, Mike (Ed.). *Spectrophotometry and Spectrofluorimetry: a practical approach*. 1ª ed. Oxford University Press, 2000.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física*. Rio de Janeiro: LTC, 2006, v. 4.

HARRIS, Daniel C.; LUCY, Charles A. *Análise Química Quantitativa*. 6ª ed. LTC, 2005.

HOLLER, F. James; SKOOG, Douglas A., CROUCH, Stanley R. *Princípios de análise instrumental*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

KNAGGE, Kevin; RAFTERY, Daniel. Construction and evaluation of a LEGO spectrophotometer for student use. *The Chemical Educator*, Boise, v. 7, n. 6, p. 371-375, out. 2002.

McROBERTS, Michael. *Beginning Arduino*. 1ª ed. Apress, Inc., 2010

MELO, Carla Carvalho; OLIVEIRA, Regina C'elia Barbosa; SOUZA, Agilson Nascimento. Utilização de experimentação como aporte em atividades

problematizadoras para a significação de conceitos químicos no Ensino Básico. Debates em Educação, v. 11, n. 24, p. 84 -105, 2019.

POH, Jun-Jie; WU, Wei-Ling; GOH, Nicholas Wei-Jie; TAN, Samuel Ming-Xuan; GAN, Samuel Ken-En. Spectrophotometer on-the-go: The development of a 2-in-1 UV-Vis portable Arduino-based spectrophotometer. Sensors and Actuators A: Physical, 325, 112698, 2021. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112698>.

SKOOG, Douglas A.; WEST, Donald M.; HOLLER, James. Fundamentos de Química Analítica: Tradução da 9ª edição norte-americana. 2ª ed. [s.l.]: Cengage Learning Brasil, 2015.

TB6600 Stepper Motor Driver User Guide, DFRobot.

VOGEL, Arthur Israel; MENDHAM, J.; DENNEY, R. C. ; BARNES, J. D.; THOMAS, M. Vogel: análise química quantitativa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.