

**MARRIETE GONÇALVES SIMÕES**

**CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO MULTIFUNCIONAL DE BAIXO CUSTO  
PARA ANÁLISES FLUORIMÉTRICAS E FOTOMÉTRICAS: UMA OPÇÃO PARA  
ABORDAGENS CONTEXTUALIZADAS NO ENSINO MÉDIO E SUPERIOR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Química em Rede Nacional, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Willian Toito Suarez

**VIÇOSA - MINAS GERAIS**

**2020**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da  
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

S593  
2020

Simões, Marriete Gonçalves, 1985-  
Construção de um equipamento multifuncional de baixo custo para análises fluorimétricas e fotométricas : uma opção para abordagens contextualizadas no ensino médio e superior / Marriete Gonçalves Simões. - Viçosa, MG, 2020.  
83 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Willian Toito Suarez.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.75-81.

1. Fotometria. 2. Fluorimetria. 3. Experimentos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação em Química. II. Título.

CDD 22 ed. 535.220287

**MARRIETE GONÇALVES SIMÕES**

**CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO MULTIFUNCIONAL DE BAIXO CUSTO  
PARA ANÁLISES FLUORIMÉTRICAS E FOTOMÉTRICAS: UMA OPÇÃO PARA  
ABORDAGENS CONTEXTUALIZADAS NO ENSINO MÉDIO E SUPERIOR**

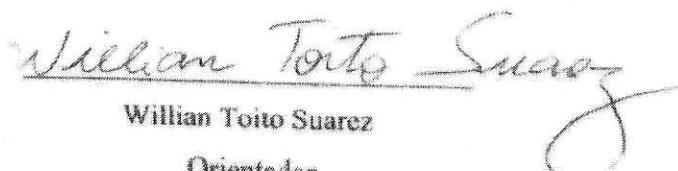
Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Química em Rede Nacional, para  
obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

APROVADA: 31 de julho de 2020

Assentimento:

  
Marriete Gonçalves Simões

Autora

  
Willian Toito Suarez  
Orientador

*Dedico este trabalho à mãe Maria e ao meu filho Leonardo, com os quais aprendo todos os dias a ser alguém melhor, a acreditar em um mundo mais humano e a buscar uma vida mais digna, mais justa e mais colorida pelos seus sorrisos e olhares.*

## AGRADECIMENTOS

Minha gratidão à minha mãe, uma guerreira cujo exemplo de dignidade, honestidade e persistência me acompanham e me inspiram. Meu porto seguro, obrigada por tudo! Agradeço ao meu filho, cujo simples fato de existir e sorrir pelas manhãs me fortaleceu e me entusiasmou na realização deste trabalho. Razão da minha vida, tudo isto é por você, para você e com você!

Ao meu namorado Fran, a quem não tenho palavras para agradecer pela participação ativa em todo este processo, pela paciência infinda nos meus momentos de insegurança e pela serenidade, pela atenção, pelo amor com o qual lidou com as minhas explosões de ansiedade. Eu te amo muito!

À minha sogra, Valéria, acima de tudo uma grande amiga: pela presença, pelo incentivo, pela ajuda, pela paciência, pela bondade e pela cumplicidade que me permitiram frequentar e concluir este curso. Gratidão! Você é muito importante na minha vida!

Ao meu irmão João Miller e à minha cunhada Vanessa, pela presença, pelo auxílio, pelo apoio e pela compreensão dos momentos intensos no percorrer deste caminho;

Ao meu orientador Willian, pelo zelo, pela atenção, pela paciência e pela calma com que me acompanhou, instruiu e orientou no caminho percorrido para a realização deste trabalho. Meu muito obrigada!

Aos coordenadores que participaram deste processo: Regina e Efraim, a quem agradeço profundamente pelo incentivo, pelas palavras dóceis, por acreditarem em mim! Agradeço também a todos os professores que me acompanharam neste processo, em especial ao César e ao Emílio, que impulsionaram esta ideia através de aulas brilhantes que fizeram despertar os questionamentos e o desejo de aprender mais sobre este tema;

Aos colegas de curso pela divisão de emoções durante o curso, pela partilha do conhecimento, pelo companheirismo, pelas risadas e pelas apreensões que vivemos juntos;

A todos que fizeram parte dessa jornada que se iniciou há muito tempo, quando até mesmo a conclusão do Ensino Médio era um sonho. Obrigada a todos os professores que pela minha vida passaram. Vocês estão aqui!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“A minha alucinação é suportar o dia-a-dia  
E meu delírio é a experiência com coisas reais.”  
- Belchior*

*“Mas se Deus é as flores e as árvores  
E os montes e sol e o luar,  
Então acredito nele,  
Então acredito nele a toda a hora,  
E a minha vida é toda uma oração e uma missa,  
E uma comunhão com os olhos e pelos ouvidos.”*

*- Alberto Caeiro, 1925.*

## RESUMO

SIMÕES, Marriete Gonçalves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2020. **Construção de um equipamento multifuncional de baixo custo para análises fluorimétricas e fotométricas: uma opção para abordagens contextualizadas no ensino médio e superior.** Orientador: Willian Toito Suarez.

Este trabalho visa promover a reflexão acerca da necessidade de interconexão entre conteúdos relacionados à luz nas disciplinas de Física e Química na atualidade e oferecer uma alternativa para a correlação dos mesmos através da transposição de abordagens interdisciplinares, de forma experimental, contextualizada e transdisciplinar. Para tal, realiza-se uma retrospectiva histórica abrangendo as principais descobertas acerca da natureza da luz, além da descrição e explicação dos principais conceitos relacionados à fotometria e fluorimetria, de forma multidisciplinar. Para a abordagem experimental, realizou-se a construção de um equipamento multifuncional de baixo custo para a realização de análises fotométricas e fluorimétricas, assim como sua aplicação na determinação do teor de quinino em água tônica e diclofenaco de sódio em medicamentos. Objetivou-se minimizar a lacuna existente no processo de ensino e aprendizagem, visando proporcionar ao discente a possibilidade de compreender como os conceitos teóricos sobre o modelo de Bohr, em Química e as ondas, em Física, estão intimamente relacionados com tecnologias presentes em seu cotidiano e como as análises quantitativas e qualitativas são de fundamental importância nos dias atuais. O equipamento proposto tem sua construção descrita com detalhes e os testes realizados apresentaram resultados correspondentes a 98% do método de comparação na determinação de quinina em água tônica e recuperação acima de 95% no ensaio de adição e recuperação para determinação de diclofenaco em medicamentos, o que indica viabilidade para a sua reprodução no ensino.

**Palavras-chave:** Fotometria. Fluorimetria. Experimentação.

## ABSTRACT

SIMÕES, Mariete Gonçalves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2020.  
**Construction of a low-cost multifunctional equipment for fluorometric and photometric analysis: an option for contextualized approaches in high school and higher education.**  
Adviser: Willian Toito Suarez.

This work aims to promote reflection on the need for interconnection between current content related to light in the disciplines of Physics and Chemistry and to offer an alternative for their correlation through the transposition of interdisciplinary approaches in an experimental, contextualized and transdisciplinary way. To this end, a historical retrospective was carried out covering the main discoveries about the nature of light, in addition to the description and explanation of the main concepts related to photometry and fluorimetry in a multidisciplinary way. For the experimental approach, a low cost equipment was built in order for photometric and fluorimetric analysis, as well as its application in determining the content of quinine in tonic water and sodium diclofenac in medicines. The objective was to minimize the gap in the teaching and learning process, aiming to provide students with the possibility to understand how the theoretical concepts about the Bohr model in Chemistry and waves, in Physics, are closely related to technologies present in their daily lives and to the manner in which quantitative and qualitative analyzes are fundamentally important nowadays. The proposed equipment has its construction described in detail and the tests performed showed results corresponding to 98% of the comparison method in the determination of quinine in tonic water and recovery above 95% in the addition and recovery test for the determination of diclofenac in medicines, which indicates viability for its reproduction in teaching.

**Keywords:** Photometry. Fluorimetry. Experimentation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Decomposição da luz branca por um prisma .....	20
Figura 2: Reprodução do experimento de Herschel .....	21
Figura 3: Demonstração do experimento de Young.....	21
Figura 4: Formação do espectro contínuo, de emissão e absorção.....	22
Figura 5: Primeiros espectroscópios, criados por Bunsen e Kirchoff em 1860 e 1861.....	22
Figura 6: Espectro eletromagnético .....	23
Figura 7: Catástrofe do Ultravioleta .....	24
Figura 8: Espectro de emissão do hidrogênio.....	25
Figura 9: Esquema de níveis e espectro do hidrogênio .....	27
Figura 10: Modelo de Bohr com três estados estacionários .....	28
Figura 11: Relação entre comprimento e frequência de uma onda .....	30
Figura 12: Planos de vibração perpendiculares da luz .....	31
Figura 13: Espectro Eletromagnético .....	32
Figura 14: Experimento de Lenard.....	34
Figura 15: A cor transmitida é complementar à cor absorvida .....	37
Figura 16: Relação entre Absorbância e % Transmitância em função da concentração.....	41
Figura 17: Limite de Linearidade em função da concentração .....	42
Figura 18: Espectro eletromagnético e vibrações eletrônica e molecular .....	43
Figura 19: Influência do solvente na feição espectral de um analito.....	44
Figura 20: Níveis de energia eletrônica molecular .....	45
Figura 21: Principais componentes de um fotômetro.....	47
Figura 22: Estrutura e funcionamento de um diodo .....	48
Figura 23: LDR.....	49
Figura 24: Estados singlete e triplete.....	51
Figura 25: Diagrama de Jablonski e as transições energéticas em processos fotofísicos.....	51
Figura 26: Processos de absorção, fluorescência e fosforescência.....	52
Figura 27: Diagrama do processo de fluorescência.....	52
Figura 28: Relação entre o diagrama de Jablonski e o deslocamento de Stockes .....	53
Figura 29: Geometria entre fonte de radiação e detector em um fluorímetro .....	54
Figura 30: Excitação de moléculas fluorescentes e emissão de energia.....	54
Figura 31: Cinchona calisaya .....	56

Figura 32: Estrutura atribuída à Quinina .....	57
Figura 33: Espectros de excitação/emissão onda para a quinina em meio ácido .....	58
Figura 34: Estruturas do Diclofenaco de Sódio e Diclofenaco de Potássio .....	59
Figura 35: Oxidação do diclofenaco pelo íon ferricianeto em meio alcalino.....	60
Figura 36: Componentes e medidas do equipamento: suporte vedador para instalação do LED e suporte para cubeta com orifícios para inserção do LDR.....	62
Figura 37: Gancho auxiliar para manuseio da cubeta .....	63
Figura 38: Modelo de suporte para cubeta e adaptação necessária .....	63
Figura 39: LED roxo/UV 395-400 nm .....	64
Figura 40: Estrutura Final do Equipamento: Multímetro conectado ao LDR a 180° da fonte de radiação (função fotometria, à esquerda); Multímetro conectado ao LDR em posição de 90° da fonte de radiação (função fluorimetria, à direita) .....	65
Figura 41: Circuitos elétricos dos fotorresistores (à esquerda) e LED ( à direita) .....	65

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
3.1	Objetivo Geral .....	17
3.2	Objetivos específicos.....	17
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
4.1	O ensino de Físico-Química Contemporânea na atualidade .....	18
4.2	Um recorte sobre a natureza da luz .....	20
4.2.1	Do prisma de Newton aos primeiros passos da Física Moderna.....	20
4.2.2	Da catástrofe do Ultravioleta ao modelo de Bohr .....	23
4.3	Princípios teóricos de métodos fotoanalíticos e fluorimétricos .....	29
4.3.1	Métodos ópticos e a natureza ondulatória da luz .....	29
4.3.2	Métodos ópticos e a natureza corpuscular da luz.....	33
4.3.3	A importância do comprimento de onda adequado em análises ópticas.....	35
4.3.4	Absorbância e Transmitância molecular no UV- Vis .....	36
4.3.5	Espécies Absorventes .....	43
4.4	Princípios práticos de análises ópticas .....	47
4.4.1	Análises Fotométricas .....	47
4.4.2	LED como fonte de radiação.....	48
4.4.3	LDR e Multímetro: Fotodeteção e medida de resistência .....	49
4.5	Fluorimetria.....	50
4.5.1	O fenômeno da fluorescência.....	50
4.5.2	Análises Fluorimétricas.....	53
4.6	Quinina.....	55
4.6.1	Aspectos Históricos.....	55
4.6.2	Quinina e análise fluorimétrica .....	57
4.7	Diclofenaco .....	59
4.7.1	Aspectos Gerais.....	59
4.7.2	Diclofenaco e análise fotométrica .....	60
4.8	Equipamentos similares descritos na literatura .....	61
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
5.1	Visão geral dos métodos e da pesquisa .....	61
5.2	Construção do equipamento .....	62
5.2.1	Estrutura do equipamento.....	62
5.2.2	Fonte de radiação .....	64

5.2.3	Fonte de alimentação.....	64
5.2.4	Detector da radiação atenuada.....	64
5.3	Procedimento Experimental .....	65
5.3.1	Estrutura final do equipamento construído .....	65
5.3.2	Reagentes e amostras .....	66
5.3.3	Soluções e amostras utilizadas na Análise Fluorimétrica .....	66
5.3.4	Soluções e amostras utilizadas na Análise Fotométrica.....	66
5.3.5	Determinação da concentração de quinina em água tônica.....	67
5.3.6	Determinação da concentração de diclofenaco em medicamentos .....	67
5.4	Validação dos resultados .....	68
5.4.1	Validação da função fluorimétrica: Método Comparativo.....	68
5.4.2	Validação da função fotométrica: Ensaio por adição e recuperação.....	68
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>68</b>
6.1	Aplicação e validação da função fluorimétrica do equipamento .....	68
6.1.1	Determinação e validação da concentração de quinina em água tônica .....	68
6.2	Aplicação e validação da função fotométrica .....	70
6.2.1	Concentração ideal de reagentes para complexação de diclofenaco.....	70
6.2.2	Determinação da concentração de diclofenaco em medicamentos .....	70
6.2.3	Validação através de ensaio por adição e recuperação .....	72
6.3	Custos gerais da construção do equipamento.....	73
6.4	Sugestões de melhoria no equipamento e futuros trabalhos .....	73
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na antiguidade, os gregos acreditavam que a natureza da luz poderia ser explicada pela emissão de partículas provenientes de um objeto iluminado ou dos próprios olhos, o que explicaria o fenômeno da visão. Este modelo influenciou profundamente Isaac Newton (1642-1727), que formulou a teoria da natureza corpuscular da luz. Em seus experimentos, Isaac Newton observou que a luz branca, ao incidir sobre um prisma triangular, se decompunha formando todas as cores em um espectro (FILGUEIRAS, 1996). Estas descobertas, seguidas pelos estudos da radiação infravermelha (IR) e da radiação ultravioleta (UV), permitiram o desenvolvimento de inúmeros equipamentos voltados para o estudo da estrutura atômica/molecular e da composição quantitativa e qualitativa dos materiais, revolucionando o campo científico em todos os níveis, da teoria atômica à Física Quântica, impactando de forma inimaginável o desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia.

O primeiro contato do estudante com teorias sobre a natureza da luz ocorre, muitas vezes, nos anos finais do Ensino Fundamental ou nos anos iniciais do Ensino Médio. A abordagem geralmente ocorre de forma rápida, como o modelo atômico de Bohr, seguida por uma demonstração no livro didático do espectro de linhas do átomo de hidrogênio (PEDUZZI, 2002). Em Física, destacam-se atividades relacionadas à óptica geométrica, que explica fenômenos como reflexão e refração da luz em espelhos e lentes (SILVA; MARTINS, 2010; ROGOVSKI, 2014). A natureza ondulatória da luz, a difração, as interferências, as frequências, os comprimentos de onda, assim como fenômenos de luminescência, geralmente se resumem a cálculos pouco contextualizados em sala de aula, o que pode desencadear um decréscimo no interesse do aluno diante de um assunto complexo, mas de beleza e aplicabilidade imensuráveis (SOUZA et. al., 2015).

Silva et. al. (2014) destacam que os fenômenos de fotoluminescência, como fluorescência, fosforescência, bioluminescência e quimiluminescência estão presentes no cotidiano dos alunos e podem ser fundamentados, de uma forma geral, através de transições eletrônicas e postulados de Bohr. Desta forma, apresentam-se como um interessante tema para interconexão de conceitos, correlação de conteúdos e articulação do saber diante de situações-problema provenientes de diversos componentes curriculares.

Nota-se que, apesar da importância e da aplicabilidade de métodos ópticos, o ensino deste conteúdo, além de tantos outros nas áreas de Química e Física, é limitado a aulas expositivas

com pouca ou nenhuma experimentação e contextualização (MACHADO, 2004; ROGOVSKI, 2014). Desta forma, o aluno memoriza a teoria sem compreender sua aplicação prática, o que se reflete em uma aprendizagem pouco significativa, sem problematização, investigação ou questionamentos, sem conexão com a realidade, não ressignificando conceitos equivocados e não estimulando o interesse e o entusiasmo pela ciência (MORAIS, 2007).

Segundo Rogovski (2014), a associação entre o conhecimento científico e as tecnologias relacionadas, tópico essencial dos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (BRASIL, 2000), não se reflete na realidade do aluno quando o ensino estanca, limitado e defasado norteia o processo de ensino e aprendizagem. De acordo com Wesendonk (2015), o ensino atual se mostra totalmente desvinculado da vida dos discentes, já que estes não encontram aplicabilidade no conteúdo que lhes é apresentado e saem da escola com o conhecimento fragmentado e repleto de lacunas. Além disso, segundo Tenório et. al. (2015) a abordagem histórica da evolução da Físico-Química Quântica e dos conceitos que as entrelaçam são necessários para a compreensão do contexto em todas as suas variáveis, pois demonstram aos alunos como o saber se constrói, como se aplica e que implica em suas vidas cotidianas.

Para Ostermann e Moreira (2000), a relação de princípios da Física Moderna com a Química auxilia no reconhecimento da ciência como empreendimento humano, atualiza as concepções que nos livros didáticos atuais estão sistematizadas de forma extremamente resumida e/ou ultrapassadas e despertam interesse pela carreira científica. As incoerências de algumas propostas tendem a apresentar os cientistas como seres vivos, humanos e reais, tantas vezes mostrados apenas como nomes ou rostos em livros didáticos, sem a devida ênfase em seu trabalho inventivo, em sua criatividade, em sua investigação metódica e na inspiradora realidade da ciência viva e humana (SÉRGIO, 2006).

Desta forma, o professor deve mediar o conhecimento visando desenvolver no aluno um novo olhar para o mundo, ultrapassando os limites impostos pelas propostas pedagógicas que se restringem a exames de aprovação para ingresso em universidades, estruturando a capacidade de tomada de decisão, com ênfase na humanização da ciência e na aproximação entre o indivíduo e o conhecimento científico, para que se promova a harmonia entre o que se aprende na escola, o poder de transformação do mundo pelas mãos do ser humano e a realidade social em que se encontram (SANTOS e SCHNETZLER, 1996).

Neste contexto, cabe uma análise de como se dá o processo de ensino e aprendizagem, das limitações de alunos, professores e escola, de recursos disponibilizados e de que estratégias precisamos para driblar todas as dificuldades que permeiam as escolas e universidades (SILVA; ZANON, 2000). No ensino básico das escolas públicas, atualmente,

os professores dispõem, semanalmente, de no máximo duas aulas de cinquenta minutos para os conteúdos de Física ou Química. Trabalham, geralmente, em duas ou mais escolas para manterem de forma digna sua subsistência. Desta forma, a necessidade de se cumprir o currículo escolar, comprometido principalmente com o desenvolvimento de habilidades relacionadas à cognição da leitura, matemática e teorias científicas, sem destaque significativo para a experimentação, é citada como um outro empecilho para a aplicação de aulas práticas (CARRASCOSA et. al., 2006). Além disso, embora em sua maioria, os docentes reconheçam a necessidade e a importância de aulas experimentais como atividades complementares do ensino (GALIAZZI et. al., 2001), não dispõem de recursos para realizá-las ou de preparo para elaborá-las, visto que sua formação muitas vezes também é escassa do ponto de vista científico (GONÇALVES, 2005).

A escassez de recursos e equipamentos de laboratórios interfere diretamente no ensino de fotometria e fluorimetria, a nível médio e superior. O custo de fotômetros e fluorímetros é, em geral, inacessível para as escolas públicas e se traduzem em um valor extremamente alto se considerarmos a grande quantidade necessária para suprir as necessidades de escolas, universidades e institutos de nosso país. Além disso, a manutenção destes equipamentos apresenta custos elevados e requerem mão de obra especializada, na maioria das vezes indisponível para a maioria das comunidades e escolas brasileiras (OLIVEIRA, 2015).

A busca pelo desenvolvimento de equipamentos que auxiliem didaticamente as aulas práticas no ensino das Ciências em geral é ampla e incessante, e apresentam opções diante da significativa limitação de recursos às quais muitos países são impostos, com o intuito de fornecer qualidade em análises e experiências voltadas para o ensino.

Diante desta problemática, este trabalho busca minimizar os desafios relacionados ao alto custo de aparelhos de instrumentação analítica relacionados à óptica, apresentando uma alternativa que possibilite a professores do Ensino Médio e Superior a construção e desenvolvimento de um equipamento simples e de baixo custo voltado para análises fotométricas e fluorimétricas, com a finalidade de substituir aqueles instrumentos comerciais que atualmente lhes são inacessíveis.

No equipamento proposto neste trabalho, foram desenvolvidos dois métodos, o primeiro para a determinação do teor de quinina em água tônica por fluorimetria e o segundo a determinação de diclofenaco de sódio em medicamentos por fotometria.

Segundo Avalos (2008), a água tônica é uma bebida cujo sabor amargo se deve à presença de quinina (entre 25 e 60 ppm). O quinino, ou sulfato de quinina, é uma droga antimalárica com propriedades analgésicas e antitérmicas utilizada para a doença causada pelo

*Plasmodium falciparum* e é capaz de emitir luz visível ao absorver radiação quando submetido a comprimentos de onda menores, fenômeno conhecido como fluorescência, onde a diferença de energia entre a energia absorvida e emitida pelas moléculas é dissipada em forma de calor (AVALOS, 2008). De acordo com Oliveira et al. (2015), o fenômeno da fluorescência desperta interesse e curiosidade devido ao brilho emitido pelas soluções em análise, tornando-se uma ferramenta poderosa para o estímulo à investigação e à abordagem interdisciplinar.

Já o diclofenaco é um princípio ativo pertencente ao grupo de anti-inflamatórios não esteroides (AINE), amplamente prescrito e muitas vezes utilizado sem orientação médica, o que pode trazer prejuízos incontáveis para a saúde humana (GOMES, 2014; GOUDA et. al., 2013; SILVA, NERY E FREGONEZI, 2017). Por se tratar de um composto farmacêutico conhecido por grande parte das famílias brasileiras, o estudo deste princípio ativo constitui uma proposta de abordagem contextualizada e interdisciplinar para alunos do Ensino Médio. A alta demanda pelo mesmo em comércios farmacêuticos e a facilidade de acesso ao diclofenaco indicam a necessidade de um estudo aprofundado e da conscientização dos riscos a ele inerentes. Além disso, uma abordagem que utiliza de tecnologias interessantes e acessíveis aliada a reações químicas que se destacam pelas cores tendem a despertar o interesse e o entusiasmo do aluno, estimulando o interesse pelos conteúdos transversais e pela ciência, de uma forma geral.

Outras abordagens em torno deste assunto podem contribuir para a aprendizagem. Enquanto os cálculos envolvidos se aliam à Matemática e Física, o estudo mais aprofundado sobre as substâncias se aplica a diversos conteúdos, aplicáveis às áreas de Biologia, Sociologia, História, Geografia, entre outros. Como exemplo, temos a abordagem sobre a interação do diclofenaco com o organismo, assim como seus efeitos colaterais e impactos sociais da automedicação e o contexto histórico no qual a quinina foi descoberta e popularizada, fatores que contribuem para a ampliação do processo de ensino e aprendizagem através da apresentação de perspectivas que se entrelaçam e se complementam.

Busca-se, portanto, também contribuir para a ampliação das possibilidades de contextualização e interdisciplinaridade, auxiliando na formação de cidadãos que se vejam no cenário científico, compreendendo o mundo à sua volta e desenvolvendo o potencial para transformar a sociedade em que vivem.

## 2 JUSTIFICATIVA

O ensino de conteúdos científicos relacionados à natureza da luz e a sua aplicação nas novas tecnologias ocorre de forma fragmentada: na Química, menciona-se que o modelo atômico de Bohr envolve absorção e liberação de energia nas transições eletrônicas e na Física, que os estudos das ondas, dos espectros e das lentes estão interligados. Observa-se que poucas experiências práticas são aplicadas durante estas abordagens, que ocorrem muitas vezes de maneira superficial e pouco contextualizadas, potencializando a dicotomia no ensino de Química e Física (SANTOS, 2017).

Para desenvolver as habilidades e competências necessárias à formação de um cidadão crítico e participativo não somente em sala de aula, mas também na sua comunidade, é preciso despertar a curiosidade dos jovens, tornando possível a compreensão do conteúdo e aplicando-o ao seu dia a dia. Segundo Santos (2017), grande parte dos professores ainda se restringe ao ensino da Física Clássica, por considerar o desenvolvimento da Física Contemporânea excessivamente complexo. Trata-se de um equívoco, já que através da transposição didática, podemos adaptar o conteúdo, sintetizando e fornecendo as principais informações relacionadas à Química e Física Quântica de forma interdisciplinar e contextualizada. Talvez este seja o momento de deixarmos de nos perguntar sobre “quais” tópicos devem ser abordados para nos questionarmos “como” podemos mediar até mesmo o conhecimento mais complexo, destacando sua importância e aplicação, ao mesmo tempo em que estimulamos o interesse e o senso investigativo do aluno.

Uma forma de abordar tópicos de Física e Química contemporâneas aliadas à tecnologia de forma contextualizada é utilizar equipamentos a elas associados, explicando seu funcionamento e apresentando sua aplicação cotidiana (CARRASCOSA et al., 2006). Devido ao alto custo de um fotômetro e de equipamentos fluorimétricos, este trabalho visa propor aos docentes a construção de um equipamento com ambas as funções, visando a redução do custo e a realização de sua aplicação em sala de aula. Para a contextualização do tema, torna-se necessária uma abordagem acerca da história da luz e dos métodos ópticos. Também é imprescindível apresentar uma utilidade prática e viável para o equipamento construído. Por este motivo, buscou-se aplicações com abordagens simples e interdisciplinares: a quantificação de quinina em água tônica por fluorimetria e de diclofenaco de sódio em fármacos por fotometria, assuntos que possibilitam a quebra do paradigma da Física e da Química como disciplinas isoladas, além de viabilizar a inserção de conteúdos da Ciência Contemporânea no currículo do ensino atual.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Este trabalho teve como objetivo geral oferecer uma alternativa de aplicação e correlação de conteúdos interdisciplinares, através da construção de um equipamento multifuncional compacto, portátil e de baixo custo, para análises fotoanalíticas e fluorimétricas no Ensino Médio e Superior.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Apresentar uma retrospectiva histórica do desenvolvimento de estudos relacionados à radiação eletromagnética;
- Abordar os princípios teóricos da natureza dual da luz;
- Associar estes conceitos à cromóforos e a absorção de radiação eletromagnética;
- Identificar os princípios teóricos de análises fotoanalíticas e fluorimétricas
- Apresentar e explicar as funções dos principais componentes de um fotômetro;
- Relacionar o funcionamento do equipamento à fluorimetria;
- Construir um equipamento multifuncional acessível e de baixo custo para determinação fluorimétrica do teor de quinina em amostras de água tônica e do teor de diclofenaco em medicamentos por fotometria

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 O ensino de Físico-Química Contemporânea na atualidade

Os documentos oficiais que norteiam o ensino de ciências no Brasil destacam a necessidade da mediação da construção do conhecimento científico de forma contextualizada, quebrando o paradigma da dicotomia entre as disciplinas que buscam compreender os fenômenos naturais. As Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Básica (BRASIL, 2013), os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2000) e as Orientações Curriculares (BRASIL, 2006) estruturam propostas pedagógicas baseadas na aprendizagem através de abordagens e didáticas que permitam ao aluno desenvolver autonomia para a correlação de ideias, conceitos e informações em diferentes situações-problema.

Uma alternativa para estimular este desenvolvimento é a abordagem experimental, que promove a interação dos alunos com materiais que lhe permitem observar e verificar fatos, levantar hipóteses, realizar testes, elaborar conclusões e realizar previsões (LEWIN e LOMASCÓLO, 1998). A Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2015) ressalta a importância da investigação e a submissão de teorias a provas empíricas para o processo de ensino e aprendizagem, visto que representam a capacidade humana de compreensão de fenômenos naturais. Assim, o aluno conhece o método científico vivenciando-o, relacionando-o com situações de seu cotidiano, observando que na beleza da ciência e das leis da natureza, ele próprio está incluído. Tal conclusão é corroborada por Freire (2006), Patrono da Educação Brasileira, que nos diz que a experiência aproxima o aluno da teoria, trazendo a vivência e a compreensão do conteúdo abordado de forma efetiva e crítica através da leitura do universo que precede a compreensão dos cálculos. Assim, pode-se concluir que o ensino que se estrutura apenas em livros didáticos e não correlaciona o conteúdo com a prática, com a natureza e com o mundo, condena o aluno à passividade e à recepção de informações, o que aprisiona a sua capacidade de criar, questionar, interagir e modificar (MOREIRA, 2007).

Embora a Física Quântica tenha se estabelecido como ponto de partida para as tecnologias de última geração, presente nas áreas de Tecnologia da Informação e Comunicação, na medicina, nos dispositivos ópticos e na nanotecnologia, percebe-se que o atual Ensino Médio prioriza majoritariamente os estudos da Física Clássica, restringindo os conteúdos à ciência de mais de 100 anos atrás (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007), raramente citando fenômenos quânticos e, quando o faz, os apresenta como tópicos de curiosidade. Para Moreira (2007), a inclusão de tópicos de Física Quântica nos currículos é necessária e urgente, sendo inadmissível que os jovens da atualidade desconheçam os princípios básicos que regem as

tecnologias que fazem parte de suas vidas. Atualmente o que se observa é a formação de alunos que não relacionam os desenvolvimentos tecnológicos com o que aprendem sobre ciência em sala de aula, o que é enfatizado por Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007, p. 447):

[...] Um dos fatores que contribuem para esse quadro é a defasagem em termos de conteúdo do atual currículo de física e aquilo que o aluno é informado, pela mídia escrita e falada, sobre os avanços e descobertas científicas no campo da física no Brasil e no mundo.

Conclui-se, portanto, que a inserção de tópicos de Física Quântica, relacionados à Química e a tantos outros conteúdos, deve ocorrer o quanto antes nos currículos nacionais do Ensino Médio, com a devida importância. Além disso, as atividades experimentais podem ser muito úteis para complementar, fixar e apresentar conteúdos que apenas em teoria são considerados demasiadamente complexos ou inacessíveis, em um múltiplo espaço heurístico, capaz de atualizar e informar sobre as tecnologias utilizadas atualmente. Toda esta construção deve ser realizada de forma cautelosa, através da transposição didática, ou seja, respeitando a capacidade cognitiva dos alunos, através de uma metodologia que selecione e adapte o conhecimento científico de acordo com o público ao qual se destina (SIQUEIRA E PIETROCOLA, 2006).

Desta forma, a articulação do saber pelo docente deve romper as barreiras que delimitam o processo de ensino e aprendizagem, como o tempo escasso e a falta de recursos. A busca é contínua e os desafios são muitos, mas para cada dificuldade contornada ou minimizada, estaremos contribuindo para que os horizontes da ciência, o espírito investigativo e a exploração das várias formas de construção do saber se ampliem nas aulas de sala. Segundo Terrazan (1992) e Bachelard (1996), a compreensão dos conceitos e leis gerais através da experimentação e vivência é que auxiliam o aluno na relação dos dados quantitativos à resolução de desafios cotidianos, ou seja, é através da observação e do questionamento que a curiosidade se aflora, abrindo espaço para a explicação teórica e para a matematização do conteúdo.

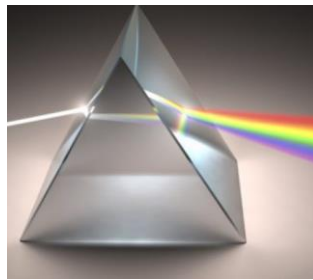
A transformação do processo de ensino e aprendizagem, que visa a ampliação do conhecimento científico nas escolas, universidades e instituições requer, portanto, uma análise crítico-reflexiva por parte do docente. Mesmo diante de todos os desafios vivenciados em diversos aspectos, é possível mediar o conhecimento estimulando o aluno a pensar com autonomia, a articular informações para a resolução de desafios e mediar a formação de cidadãos conscientes da sua responsabilidade no mundo em que vivem (FREIRE, 2006).

## 4.2 Um recorte sobre a natureza da luz

### 4.2.1 Do prisma de Newton aos primeiros passos da Física Moderna

No fim do século XVII, através de experimentos de óptica, Isaac Newton (1666-1672) descobriu a decomposição da luz branca dispersada em um prisma, conforme representado na Figura 1 (FILGUEIRAS, 1996). Este fenômeno, chamado de dispersão, mostrava que a luz solar é constituída de todas as cores. Newton publicou, no início do século XVIII, sua obra *Opticks* detalhando a reflexão, a refração, dispersão e a relação da cor da luz com o índice de refração (MOURA et. al. 2015). Embora sua teoria sobre a natureza corpuscular da luz tenha sido questionada e refutada ao longo do tempo, pode-se dizer que a descoberta da composição da luz branca tenha sido o primeiro passo para uma grande revolução na Ciência e na Tecnologia.

**Figura 1: Decomposição da luz branca por um prisma**

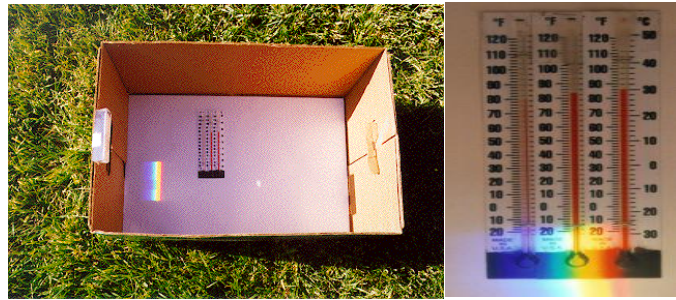


Fonte: Artigos Técnicos Chambril <sup>1</sup>

O reconhecimento de radiações invisíveis a olho nu ocorreu mais de um século após as publicações de Newton. A descoberta das regiões do infravermelho em 1800 por William Herschel (1738-1822) e do ultravioleta em 1801 por Johann Wilhelm Ritter (1776-1810), foram de fundamental importância para o desenvolvimento de métodos analíticos relacionados à emissão e absorção de radiação (SANTANA; SANTOS, 2017). Em ambas, foram utilizados métodos empíricos: o experimento de Herschel consistiu em colocar o bulbo de um termômetro nas várias regiões do espectro solar, o que lhe permitiu observar que quanto maior a aproximação do vermelho, maior a temperatura registrada. Ao medir a temperatura da parte não iluminada, subsequente à cor vermelha, percebeu ainda maior aumento na temperatura, conforme representado na Figura 2 (FILGUEIRAS, 1996; LEITE; PRADO, 2012). Esta região de radiação invisível e cuja energia fazia vibrar os átomos sem que ocorresse uma reação química, deu-se o nome de infravermelho.

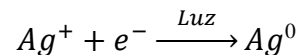
---

<sup>1</sup> Disponível em: < <https://www.portalchambril.com.br/artigos-tecnicos/espaco-cor/> > Acesso 04 jun 2019

**Figura 2: Reprodução do experimento de Herschel**

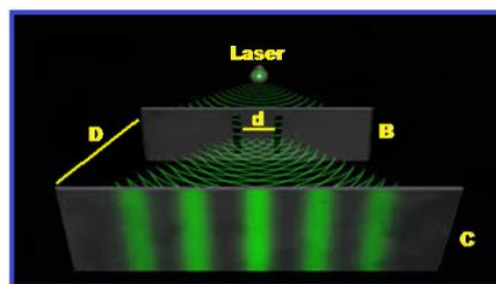
Fonte: Notas de Aulas UFRGS <sup>2</sup>

Em experimento semelhante, Johann Ritter observou que próximo à cor azul, o cloreto de prata escurecia mais facilmente. Assim, testou esta reatividade na região não iluminada próxima à cor violeta, e pôde observar que a reação ocorria de forma muito mais rápida e intensa. Hoje sabemos que a reação observada se tratava da redução da prata, representada por:



A esta região de radiação invisível “além do violeta”, energética a ponto de promover transições eletrônicas, chamou-se de Ultravioleta (FILGUEIRAS, 1996).

Em 1802, Thomas Young (1773-1829) realizou uma série de experimentos sobre a interferência da luz, contrapondo-se à teoria corpuscular da luz, de Isaac Newton. Young realizou a experiência da dupla fenda. Na Figura 3, é representada a experiência, que consistia em incidir a radiação eletromagnética por um pequeno orifício, difratando-a posteriormente ao passá-la por duas fendas separadas por uma distância  $d$  em um anteparo (B). O resultado era o surgimento de duas novas ondas projetadas em um segundo anteparo (C), a uma distância  $D$  do primeiro: regiões escuras indicavam a interferência destrutiva e as claras, as construtivas.

**Figura 3: Demonstração do experimento de Young**

Fonte da: Site Física e Vestibular<sup>3</sup>

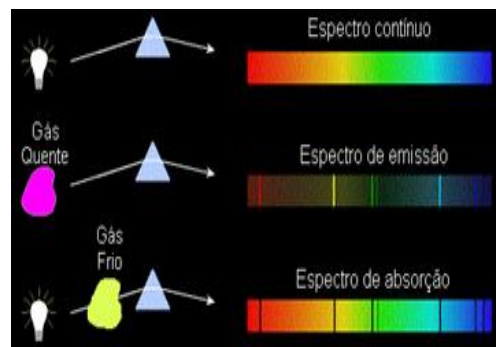
A identificação de 574 linhas escuras no espectro solar por Joseph von Fraunhofer (1727-1826) em 1814 levou-o a construir as primeiras redes de difração para medição de comprimentos de onda de cores e linhas escuras específicas no espectro solar (FILGUEIRAS,

<sup>2</sup> Disponível em: < [http://www.if.ufrgs.br/~riffel/notas\\_aula/ensino\\_astro/roteiros/](http://www.if.ufrgs.br/~riffel/notas_aula/ensino_astro/roteiros/) > Acesso 04 jun, 2019

<sup>3</sup> Disponível em < <http://fisicaevestibular.com.br/novo/ondulatória/ondas> > Acesso 04 jun, 2019.

1996). Em 1859, Gustav Kirchhoff (1824-1887) realizou pesquisas utilizando o bico de gás de chama limpa inventado por Robert Bunsen (1811-1899) e publicou que corpos incandescentes emitiriam espectros contínuos e corpos excitados em forma de vapor emitiriam espectros discretos, ou seja, em linhas. Concluía ainda que ao incidir a luz branca sobre vapores de elementos, o espectro obtido mostraria linhas escuras de absorção na frequência em que o vapor emitiria luzes brilhantes (BRAGA & FILGUEIRAS, 2013). Os diferentes espectros são representados na Figura 4:

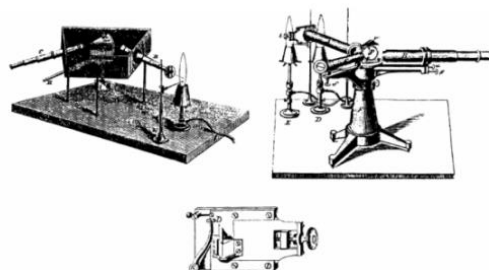
**Figura 4: Formação do espectro contínuo, de emissão e absorção**



Fonte da imagem: Site Brasil Escola <sup>4</sup>

Posteriormente, Kirchhoff e Bunsen, associaram as linhas escuras à absorção da radiação por elementos nas camadas mais externas do sol (SANTANA; SANTOS, 2017). Assim, descobriu-se que cada elemento traz a si associado um espectro de absorção e emissão de luz que torna possível a sua identificação, desencadeando o reconhecimento da composição das estrelas e a análise por absorções atômicas (LEITE; PRADO, 2012). Anos depois criaram juntos equipamentos que lhes permitiam verificar as linhas espectrais de gases aquecidos, conhecidos como espectroscópios, representados na Figura 5:

**Figura 5: Primeiros espectroscópios, criados por Bunsen e Kirchhoff em 1860 e 1861.**



Fonte :Notas de aula IFSC/USP <sup>5</sup>

<sup>4</sup> Disponível em < <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/espectros-emissao-absorcao-leis-kirchhoff.htm>. > Acesso 04 jun, 2019.

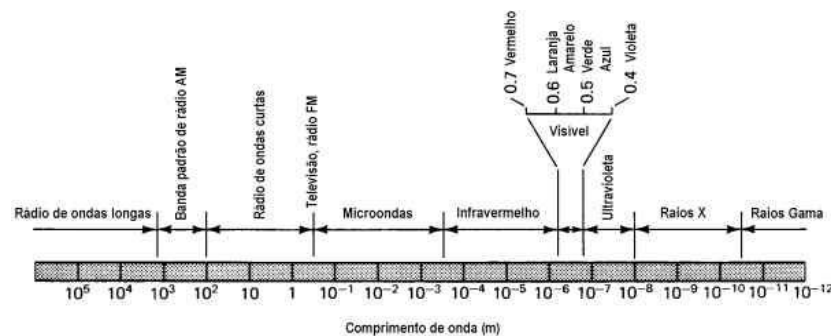
<sup>5</sup> Disponível em < <http://www.ifsc.usp.br/~donoso/espectroscopia/Historia.pdf> Acessado em 05/05/2019>. Acesso 04 jun, 2019.

Segundo Filgueiras (1996), Kirchoff e Bunsen posteriormente viriam a descobrir elementos como o céσιο (do latim *caesius*, azul celeste) e o rubídeo (do latim *rubidus*, cor de rubi), cujo nome corresponde à cor das linhas observadas em seu espectro de emissão. Através deste método, muitos outros elementos foram descobertos, inclusive o hélio, cujo espectro indicou sua existência no Sol vinte e sete anos de ser encontrado na Terra.

A relação entre a radiação e o eletromagnetismo foi proposta em 1845 por Michael Faraday (1791-1867), quando através de seus estudos empíricos descobriu que o campo magnético influenciava a direção de polarização da luz, fenômeno hoje conhecido como Efeito Faraday.

Quinze anos mais tarde, James Maxwell (1831-1879) utilizou equações para descrever as propagações dos campos elétrico e magnético, cujos cálculos teóricos indicavam que para ambos a velocidade das ondas era igual à velocidade da luz, levando-o a concluir que a própria luz seria uma radiação eletromagnética (BEZERRA, 2006). Suas equações permitiram-lhe prever a existência de número infinito de frequências, o que estimulou o aumento de pesquisas nesta área e as consequentes descobertas das ondas de rádio por Heinrich Rudolph Hertz (1857 – 1894), de raio-X por Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) e novas ondas que compunham o espectro eletromagnético, representado na Figura 6.

**Figura 6: Espectro eletromagnético**



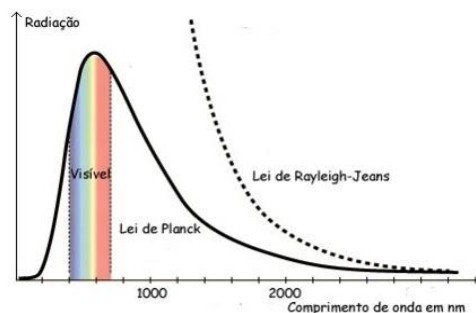
Fonte: Site Física UFPR

#### 4.2.2 Da catástrofe do Ultravioleta ao modelo de Bohr

Na metade do século XIX, sabia-se que cada temperatura estava relacionada com uma frequência, a um comprimento de onda e a uma cor. Kirchoff aprofundava seus estudos sobre a radiação do corpo negro, um objeto ideal que absorveria toda a radiação nele incidida, enquanto sua emissão de radiação ocorreria em função de sua frequência, com intensidade

definida pela temperatura do material. Os físicos Rayleigh e James Jeans complementaram a ideia com o conceito de ondas no interior da cavidade de um corpo negro, e apresentaram um modelo que se adequava muito bem a baixas frequências. Entretanto, para frequências mais altas, ocorria um desacordo que violava as leis de conservação da energia, indicando na região do ultravioleta infinita emissão de radiação, conforme mostrado na Figura 7. Isto resultaria na emissão de radiação em altíssimas frequências por objetos em temperaturas não nulas, fato claramente não físico. Esta falha na teoria ficou conhecida como “catástrofe do ultravioleta” ou Catástrofe de Rayghley-Jeans. (HALLIDAY & RESNICK, 1991).

**Figura 7: Catástrofe do Ultravioleta**



Fonte: UFRS<sup>6</sup>

A solução deste problema ultrapassou as barreiras da Física Clássica, dando origem à Física Quântica. Max Planck (1858-1947), analisou este problema do ponto de vista dos comprimentos de onda, descrevendo matematicamente um modelo que se adequava às observações empíricas, em 1899. Para isso, Planck considerou que os comprimentos de onda fossem constantes e finitos, chegando à conclusão de que a luz é descontínua, composta por pequenos pacotes de energia mínima, denominados quantum (OLIVEIRA, 2011):

$$E(\nu) = nh\nu \quad \text{Equação (1)}$$

Onde  $E$  é a energia do fóton,  $\nu$  é a frequência da radiação e  $n$ , um número inteiro. O valor da constante de Planck ( $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J s.) é pequeno, porém suficientemente relevante para a solução da catástrofe do ultravioleta. Se seu valor fosse nulo, a energia seria contínua conforme sugerido anteriormente e as leis físicas de conservação de energia continuariam sendo contrariadas.

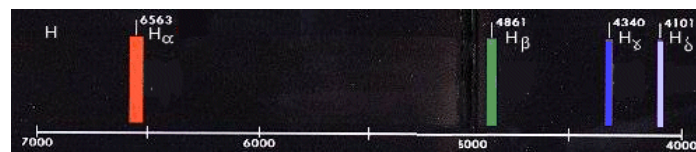
Cinco anos depois, Albert Einstein (1859-1955) postulava sobre o efeito fotoelétrico, que trata da emissão de elétrons em superfícies metálicas quando expostos a radiação

<sup>6</sup> Disponível em < [https://lief.if.ufrgs.br/pub/cref/n25\\_Alvarenga/corpo\\_negro.htm](https://lief.if.ufrgs.br/pub/cref/n25_Alvarenga/corpo_negro.htm) >. Acesso em 05 jun, 2019.

eletromagnética com frequência adequada (BRAGA & FILGUEIRAS, 2013). Einstein utilizou o conceito de fóton, proposto por Planck, para explicar que elétrons são ejetados a frequências suficientemente altas, cujos valores dependem do material. Como comprimentos de onda específicos – e não a intensidade da radiação – definiam a maior ou menor ejeção de elétrons, Einstein trouxe novamente à tona a natureza corpuscular da luz, cuja combinação de evidências sugeria a dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética.

Ainda no fim do século XIX, quando a catástrofe do Ultravioleta intrigava os cientistas da época, Johann Jakob Balmer (1825-1898) se dedicava ao estudo do espectro de emissão do hidrogênio (Figura 8). Até então não se sabia o que representavam os valores de energia correspondentes às emissões ou absorções dos elementos, e porque para tais fenômenos eram necessários comprimentos de onda (ou energia) específicos (FILGUEIRAS,1996). Sabia-se que um gás atravessado por uma corrente elétrica emitia radiação que se revelava em um espectro descontínuo devido à excitação da nuvem eletrônica e posterior emissão de fótons pelos elétrons no retorno ao nível de menor energia (FILGUEIRAS,1996).

**Figura 8: Espectro de emissão do hidrogênio**



Fonte: Física UFPR<sup>7</sup>

Analisando estas linhas em diferentes comprimentos de onda, Balmer propôs uma série para relacioná-los:

$$\lambda_n = 3644 \left( \frac{n^2}{n^2-2} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

onde  $n$  = número inteiro maior ou igual a 3 e  $\lambda_n$ , o comprimento, em Angstroms, da raia de número  $n$ . Outras séries foram derivadas da série de Balmer, através da substituição do fator 2 por 1 (série de Lyman) ou por 3, 4 ou 5 para séries de Paschen, de Brackett e de Pfund para o infravermelho, respectivamente (OLIVEIRA; FERNANDES, 2006). A síntese de todos estes cálculos foi realizada por Johannes Rydberg (1854-1919):

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad \text{Equação (3)}$$

Onde  $n_f$  é um inteiro cujo valor indica que série de linhas a fórmula representa,

<sup>7</sup> Disponível em < <http://fisica.ufpr.br/LE/roteiros/balmer.htm> > Acesso: 03 jun 2019.

dependente da região em que se deseja obter o comprimento de onda,  $n_i$  é o número da raia e  $R_H$  é a constante de Rydberg ( $R_H = 0,0010968 \text{ A}^{-1}$ ).

Para detalhar os motivos pelos quais o espectro do hidrogênio poderia ser explicado por expressões tão simples e para justificar porque no modelo atômico de Rutherford não ocorria uma aniquilação do átomo devido ao colapso de elétrons com o núcleo, Niels Bohr (1885-1962) utilizou-se dos recentes estudos de Max Planck. Postulou, em 1913, o modelo revolucionário de átomo que, para os alunos de Ensino Médio, é a porta de entrada para a Física Moderna.

Em seu modelo, Bohr descreveu órbitas circulares para os átomos, os estados estacionários e a quantização da energia, explicando o salto eletrônico para níveis de energia mais externos ao receberem um quantum de energia e a emissão deste quantum em forma de energia luminosa ao retornarem ao estado fundamental. Em seus cálculos teóricos, Bohr deduziu a equação para os raios das órbitas de um átomo, que se restringia a apenas alguns valores:

$$r_n = \frac{a_0 n^2}{Z} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde  $a_0$  é a constante do raio de Bohr,  $n$  é o número inteiro relacionado ao estado de energia e  $Z$  é o número atômico. Para o hidrogênio  $Z=1$ , logo:

$$r_n = a_0 n^2 \quad \text{Equação (5)}$$

A constante do raio de Bohr tem o valor de 52,91 pm (OLIVEIRA.; FERNANDES, 2016) e pode ser obtida através da relação entre a constante de permissividade do vácuo, a constante de Planck, a massa e a carga do elétron:

$$a_0 = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi e^2 m_e} \quad \text{Equação (6)}$$

De acordo com Oliveira e Fernandes (2016), a energia de um elétron em uma órbita de Bohr é dada por:

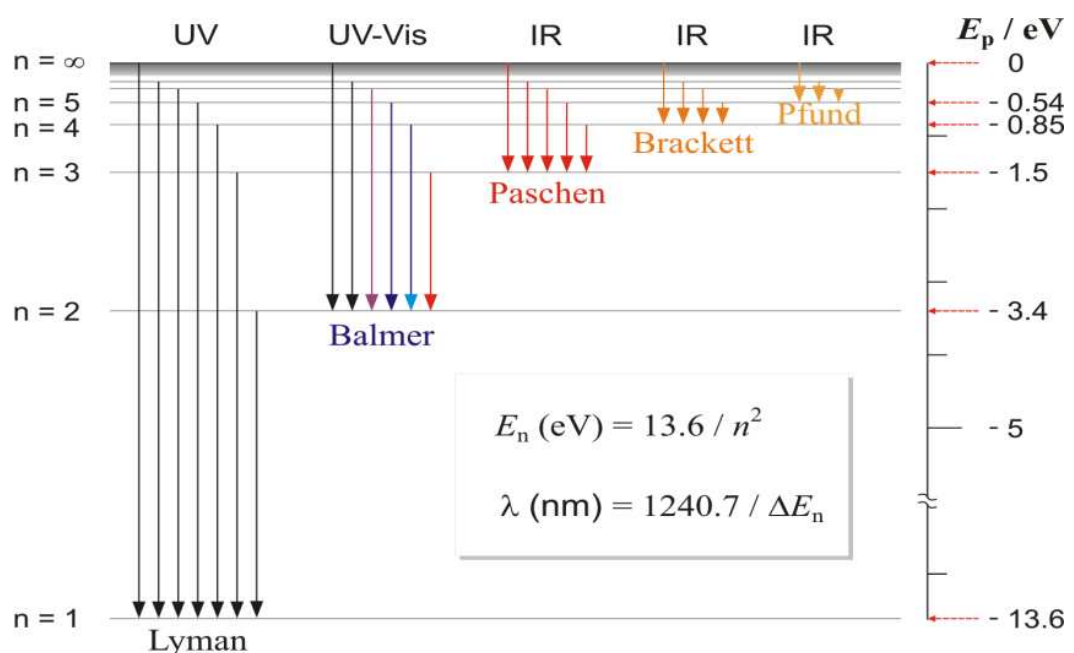
$$E = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{n^2 8\pi \varepsilon_0^2 h^2} \quad \text{ou} \quad E = -A \frac{Z^2}{n^2}, \quad \text{se} \quad A = \frac{e^4 m_e}{8\pi \varepsilon_0^2 h^2} = 2,18 \times 10^{-18} \text{ J} \quad \text{Equação (7)}$$

Portanto, para a energia da órbita de menor raio possível ( $E_1$ ) com  $Z=1$  e  $n=1$ , obtemos que o valor de  $2,18 \times 10^{-18} \text{ J}$ , ou realizando a conversão,  $-13,6 \text{ eV}$ . O sinal negativo indica

proximidade com o núcleo, ou seja, o “confinamento” do elétron. Um sinal positivo indicaria o “desligamento” do elétron do átomo.

Bohr ousou em afirmar que o elétron, em uma órbita definida, não emitiria nem absorveria energia, pois até então não havia nenhum embasamento matemático para tal proposição. Estruturava-se apenas na evidência do não colapso do elétron com o núcleo, e com isso, desafiava toda a teoria do eletromagnetismo. A Figura 9 apresenta a transição dos níveis de energia do hidrogênio que dão origem às linhas observadas em seu espectro de emissão e as respectivas séries relacionadas:

**Figura 9: Esquema de níveis e espectro do hidrogênio**



Fonte: Site UFRGS<sup>8</sup>

Em  $n = 1$ , nível chamado fundamental, ocorre forte atração núcleo-elétron, com energia igual a  $-13,6 \text{ eV}$ . À medida em que o elétron ocupa níveis mais afastados do núcleo, a atração é menor e a energia a ele associada diminui em módulo. Considerando o salto eletrônico do nível 3 ( $-1,5 \text{ eV}$ ) para o 2 ( $-3,4 \text{ eV}$ ), a energia do elétron diminuiria em  $1,9 \text{ eV}$ , ou seja, ocorreria emissão de radiação na forma de quantum ou fóton. Neste caso específico, o fóton liberado apresenta frequência idêntica à raia vermelha apresentada no espectro do hidrogênio. As transições do estado fundamental a níveis mais externos são identificadas no espectro de absorção, enquanto o processo inverso pode ser observado no espectro de emissão. Desta forma, a análise dos espectros de emissão e absorção nos permitem concluir que as cores que visualizamos são, na realidade, provenientes dos comprimentos de onda que não foram

<sup>8</sup> Disponível em < <http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm> Acesso 03 jun 2019.

absorvidos pelos átomos ou moléculas da amostra. De acordo com Oliveira e Fernandes (2016), a variação de energia na transição de um elétron de um nível a outro, no modelo de Bohr, é a diferença entre a energia entre os dois estados:

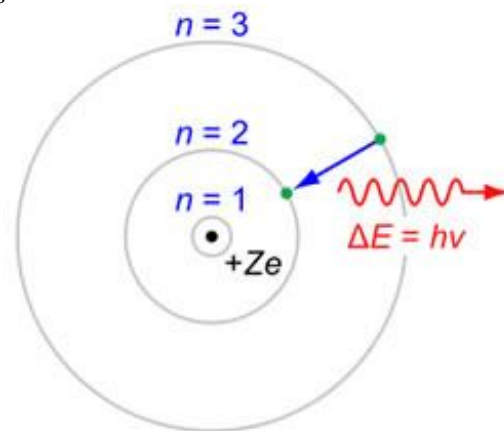
$$E = E_f - E_i \quad \text{Equação (8)}$$

A combinação das equações 1, 7 e 8 levou Bohr a deduzir matematicamente a constante de Rydberg, até então obtida apenas empiricamente.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = E_f - E_i = -A \frac{Z^2}{n_f^2} + A \frac{Z^2}{n_i^2} = AZ^2 \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \therefore \frac{1}{\lambda} = \frac{AZ^2}{hc} \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad \text{Equação (9)}$$

Onde  $\frac{A}{hc}$ , com as devidas substituições, resulta em  $1,096776 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ , valor muito próximo à  $1,0977373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ , valor associado à constante de Rydberg. Assim Bohr propôs seu modelo (Figura 10), fundamentando teoricamente a constatação Rydberg, explicando as raias do espectro de hidrogênio (OLIVEIRA; FERNANDES, 2016).

**Figura 10: Modelo de Bohr com três estados estacionários**



Fonte: <http://www.sbfisica.org.br> ; In “Modelo de Bohr completa 100 anos”

Os postulados de Bohr descrevem, portanto, um átomo onde o elétron se apresenta em órbitas circulares, ocupando estados estacionários com energia fixa e definida e com momento angular quantizado. Somente através da transição eletrônica poderia ocorrer absorção ou liberação de um quantum de energia, de acordo com a diferença energética entre estes estados. Embora o modelo de Bohr também apresente limitações, sua contribuição para a Ciência é imensurável e foi um dos pontos de partida que impulsionaram o desenvolvimento da Física Moderna (OLIVEIRA; FERNANDES, 2016). As restrições apontadas para seu modelo foram solucionadas cerca de dez anos mais tarde, com o desenvolvimento dos conceitos e cálculos

sobre o princípio da incerteza de Heisenberg, orbitais atômicos, nuvens eletrônicas, entre outros, que relacionados na mecânica quântica permitem a compreensão dos espectros de todos os demais elementos ou substâncias.

Diante da tecnologia desenvolvida, desde o início do século XX, o espectro do sol e das estrelas tornaram-se interessantes fontes de estudo. Galáxias foram descobertas, assim como a absorção de raios UV pelas moléculas de ozônio. A espectroscopia, o eletromagnetismo e a Física Quântica se entrelaçavam, trazendo inovações e permitindo estudos até então inimagináveis. Segundo Braga & Filgueiras (2013), no ano de 1968 descobriu-se através do espectro de absorção solar que o hidrogênio era o elemento predominante, mas não único, na estrela que rege a vida em nosso planeta. Um elemento ainda não identificado apresentava um espectro diferente e recebeu o nome de Hélio, como referência ao deus grego. Sua descoberta na terra só aconteceu 27 anos depois.

Muito do que se sabe atualmente sobre a natureza dos átomos ainda é consequência destas análises de emissão e absorção da luz pelas substâncias (BROWN et al., 2005). De posse deste conhecimento e analogamente à identificação do elemento hélio no sol, a composição das estrelas pode ser estudada, apesar da distância, possibilitando maior compreensão de fenômenos astronômicos.

### **4.3 Princípios teóricos de métodos fotoanalíticos e fluorimétricos**

#### **4.3.1 Métodos ópticos e a natureza ondulatória da luz**

Segundo a física clássica, a luz é uma forma de radiação eletromagnética, assim como também o são as ondas infravermelha e ultravioleta, ondas de rádio, micro-ondas, raios X, entre outras (BROWN et al., 2005), onde o movimento ondulatório e a característica corpuscular (fótons) se complementam. Leite e Prado (2012) corroboram esta afirmação:

As ondas eletromagnéticas são geradas a partir do movimento de cargas elétricas aceleradas ou durante transições (eletrônicas, nucleares, vibracionais) entre dois níveis de energia quantizados, e isso remete ao universo atômico. Alguns elétrons de cada átomo estão fortemente ligados ao núcleo, enquanto outros estão praticamente livres para circular pelo material. Quanto mais elétrons livres um material possuir, maior será a capacidade desse material em refletir a luz, justamente porque esses elétrons estão livres para vibrar e interagir com a luz (onda eletromagnética) incidente. (LEITE; PRADO, 2012, p. 4)

Leite e Prado (2012) apresentam como exemplo o funcionamento de antenas transmissoras, cuja vibração controlada dos elétrons que compõem o material geram as ondas de rádio, que por sua vez produzem novas e idênticas vibrações que são convertidas em sinais elétricos e ampliadas, resultando no som. Ressaltam ainda que da mesma forma que a oscilação

de cargas elétricas podem gerar radiação eletromagnética, a radiação eletromagnética também interage com as cargas (elétricas, atômicas, moleculares, intermoleculares), provocando maior oscilação.

De acordo com Oliveira (2015) a amplitude ( $A$ ) de uma onda eletromagnética está relacionada com seu vetor elétrico máximo, o período ( $T$ , em segundos) é dado pelo tempo em que ocorrem a passagem de dois mínimos ou dois máximos e os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) correspondem à distância entre as cristas consecutivas de uma onda, medidos linearmente e geralmente expressos em nanômetros ( $10^{-9}$  m). A frequência de uma onda é o número de oscilações por segundo e é expressa em Hertz ( $s^{-1}$ ). A Figura 11 ilustra a inversa proporcionalidade entre frequência e o comprimento de onda.

**Figura 11: Relação entre comprimento e frequência de uma onda**

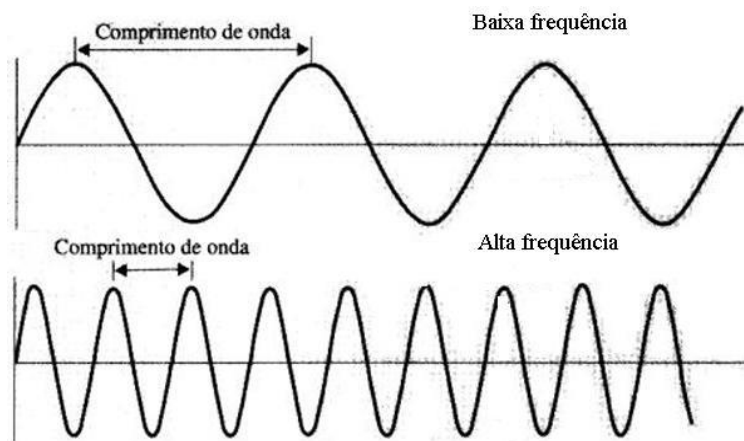


Imagem obtida no site: [http://crv.educacao.mg.gov.br/sistema\\_crv/imagens/md\\_ef\\_ci/2009-03-10\\_22/image016.jpg](http://crv.educacao.mg.gov.br/sistema_crv/imagens/md_ef_ci/2009-03-10_22/image016.jpg)

Onde  $c$  é igual à velocidade de propagação de uma onda no vácuo, que corresponde a  $2,99 \times 10^8$  m/s. Quando a propagação se dá através de meios materiais, a velocidade sofre um decréscimo devido ao índice de refração ( $n$ ), que está relacionado à interferências na trajetória e na própria velocidade da radiação (OLIVEIRA, 2015). Seu cálculo é dado como a razão entre a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e a velocidade da luz no meio ( $v$ ). O valor obtido indica quantas vezes a velocidade de propagação no vácuo é maior que a propagação no meio em questão.

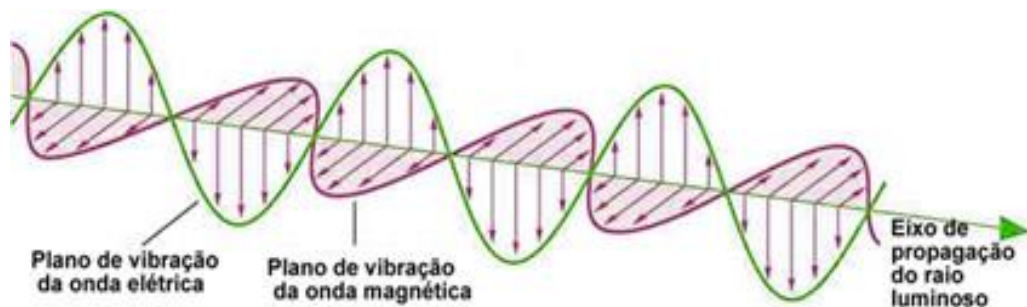
$$n_i = \frac{c}{v} \quad \text{Equação (10)}$$

De acordo com Santos Neto e Carrilho (2017), a relação entre os ângulos de propagação, os índices de refração e a velocidade de propagação nos meios é dada pela lei de Snell:

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{Equação (11)}$$

Conforme representado na Figura 12, o movimento ondulatório da luz natural é caracterizado pela vibração em diversas direções perpendiculares à direção pela qual ela se propaga, ou seja, não é polarizado. A polarização restringe a vibração a apenas uma direção, igualmente perpendicular à propagação.

**Figura 12: Planos de vibração perpendiculares da luz**



Fonte: Scielo – Revista Brasileira do Ensino de Física<sup>9</sup>

A polarização da luz por reflexão através de um material transparente atinge seu máximo quando o raio refletido e refratado são perpendiculares, no ângulo (conhecido como ângulo de Brewster), obtido através de uma relação derivada da Lei de Snell e dada pela função arco tangente da razão entre  $n_2$  e  $n_1$ , que são respectivamente o índice de refração do segundo e primeiro meio:

$$\theta_B = \text{arctg} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad \text{Equação (12)}$$

A reflexão da radiação que ultrapassa dois meios com diferentes índices de refração depende apenas dos próprios índices de refração ( $I_r$ ) e do ângulo de incidência ( $I_o$ ). A fração da radiação refletida em ângulos retos é dada por:

$$\frac{I_r}{I_o} = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad \text{Equação (13)}$$

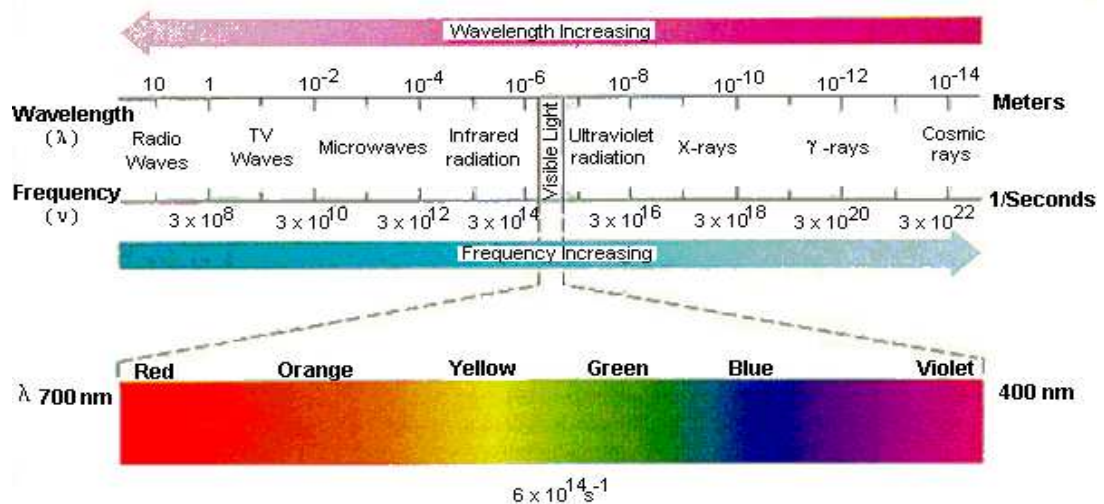
As ondas são transportadoras de energia e ao encontrarem um obstáculo (ou uma fenda), em um mesmo meio material, tendem a interagir com o mesmo, alterando sua direção e dividindo-se em variados comprimentos de onda. A recombinação destas ondas pode resultar em interferências construtivas ou destrutivas, de acordo com a combinação entre os máximos e

<sup>9</sup> Disponível em < [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172016000100602&lng=en&nrm=iso](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172016000100602&lng=en&nrm=iso) > Acesso em 03 de agosto 2020

mínimos da sua amplitude. Este fenômeno é chamado de difração e possibilita a decomposição da luz em variadas frequências, assim como a seleção de pequenas faixas de comprimentos de onda em equipamentos espectroanalíticos, através de monocromadores, possibilitando uma ampla gama de análises.

Nossa visão é caracterizada pela interação entre os olhos e a frequência da luz, cuja variação permite enxergar diferentes cores. A faixa de radiação detectável por nossos olhos, chamada espectro da luz visível, encontra-se no intervalo espectral de 400 nm, correspondente à luz violeta e a 700 nm, que corresponde à luz vermelha (ATKINS & JONES, 2006). O espectro eletromagnético, tal qual como conhecemos atualmente, é representado na Figura 13.

**Figura 13: Espectro Eletromagnético**



Fonte: Site UFRS <sup>10</sup>

Análises ópticas nos permitem realizar o estudo da interação da radiação eletromagnética com a matéria, das medidas de absorção ou emissão de luz, quando sobre uma amostra é submetida a incidência de radiação. As interações nas porções do espectro visível e ultravioleta dependem principalmente do número e do arranjo de elétrons nas espécies absorventes, resultando espectros característicos com picos de absorção que possibilitam a identificação do tipo de ligação, grupos funcionais, assim como a identidade e a quantidade em termos de concentração de substâncias desconhecidas presentes em uma amostra (OLIVEIRA, 2011). Segundo Leite e Prado (2012), estas informações possibilitam a elaboração de modelos, a identificação de estruturas e o cálculo da massa específica de materiais a nível microscópico,

<sup>10</sup> Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20032/Marco/espectro.htm>> Acesso 19 nov. 20

abrindo caminho para caracterização quantitativa e qualitativa de substâncias em escalas atômica e molecular.

#### 4.3.2 Métodos ópticos e a natureza corpuscular da luz

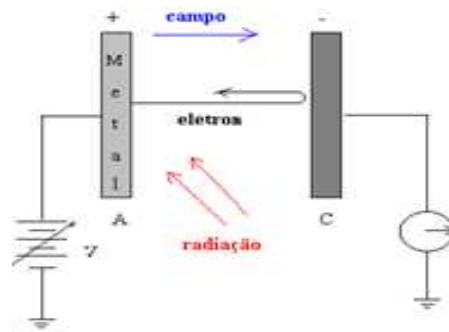
A ideia da composição da radiação por partículas microscópicas popularizou-se no século XVII quando Isaac Newton explicou a refração e a reflexão através de um experimento onde incidia um feixe de luz sobre dois prismas, realizando consecutivamente, a decomposição e a recomposição da luz branca. Sua teoria falhava, entretanto, na explicação de fenômenos como a difração, a interferência e a polarização da luz. Posteriormente, para apresentar respostas a estes fenômenos, a natureza ondulatória da luz tornou-se o objeto de estudo de muitos cientistas, que buscavam a invalidação da teoria vigente. Isto ocorreu quando James Clerk Maxwell (1831-1879), deduziu em suas equações que um feixe de luz fosse a propagação de ondas eletromagnéticas (BEZERRA, 2006).

De acordo com Teixeira (2008), no ano de 1887, Heinrich Hertz (1857-1894) já havia descoberto que a produção de descargas elétricas sobre uma de duas superfícies metálicas distintas gerava na outra uma faísca secundária. Evitando a dispersão da luz, esta faísca secundária era reduzida, confirmando sua suspeita de que a luz (especialmente a ultravioleta) poderia gerar faíscas.

Em continuidade ao trabalho de Hertz, em 1888, Whillem Hallwachs (1859-1920) descobriu que metais adquiriam carga positiva ao serem submetidos à incidência de luz ultravioleta, o que levou à especulação sobre a possibilidade de que, nestas condições, elétrons deixarem a superfície metálica.

Philipp Lenard (1862-1947), assistente de Hertz, realizou um experimento (Figura 14) que consistia em focalizar luz de frequência constante em um cátodo (metal A) e baixo potencial no anodo (placa C), obtendo fotocorrente (V) proporcional à intensidade da radiação aplicada, cujo registro é feito por um amperímetro. A variação positiva no potencial levava, a certo momento, a um potencial  $V_0$  que anula a corrente fotoelétrica, chamado potencial de freamento. Assim, os elétrons se aproximariam da placa coletora C, indicando que  $V_0$  corresponde à máxima energia cinética dos elétrons ( $eV_0$ ) provenientes do metal A (TEIXEIRA, 2008).

**Figura 14: Experimento de Lenard**



Fonte: Teixeira (2008)

Os resultados deste experimento indicavam a independência da energia cinética dos elétrons em relação à intensidade da luz incidente e a dependência da mesma com a frequência da luz, o que intrigou os cientistas da época já que não havia na Física Clássica uma explicação lógica para estes fenômenos. As teorias relacionadas à natureza ondulatória da luz indicavam que a emissão de elétrons deveria variar de acordo com a intensidade da radiação incidida enquanto o que se observava é que, independente da intensidade, para a maioria das frequências visíveis não ocorria emissão de elétrons em metal algum. O efeito era observado em apenas algumas faixas de comprimento de onda que dependiam da natureza do metal analisado. De acordo com Teixeira (2008, n.p.), o efeito fotoelétrico apresenta as seguintes características principais:

Para cada metal, existe uma frequência mínima da radiação eletromagnética abaixo da qual não são produzidos fotoelétrons, por mais intensa que seja a radiação; (2) A emissão eletrônica aumenta quando se aumenta a intensidade da radiação que incide sobre a superfície do metal, ou seja, o número de fotoelétrons aumenta com o aumento da intensidade da radiação; (3) A energia dos fotoelétrons depende da frequência da radiação incidente, não dependendo da intensidade desta.

A descoberta da quantização da energia por Max Planck estruturou o pilar para que Einstein explicasse estes fenômenos experimentais, supondo que um quantum de luz fornecesse energia para apenas um elétron. Assim, a incidência de radiação sobre um metal forneceria fótons (pacotes de energia com massa de repouso nula e carga zero) aos elétrons da superfície, que se ejetam quando recebem a energia mínima (função trabalho,  $\Phi$ ), específica para cada material (SANTOS NETO; CARRILHO, 2017; TEIXEIRA, 2008):

$$eV_0 = h\nu - \varphi \quad \text{Equação (14)}$$

Onde  $eV_0$  é a energia cinética de elétron dada pela subtração entre a energia do fóton  $h\nu$  e a função trabalho do metal ( $\varphi$ ). Desta forma, conclui-se que a intensidade da luz é proporcional à sua energia e conseqüentemente, ao número de fótons. A emissão ou não de elétrons está

relacionada com a natureza do metal e a energia dos fótons, independentemente de sua quantidade.

A incidência de luz sobre um composto resulta na absorção da energia dos fótons emitidos pela estrutura molecular das substâncias que o compõem. Se um elétron recebe energia  $h\nu$  igual à diferença entre o orbital em que ele se encontra e o orbital subsequente de maior energia, ocorre o aumento dos movimentos moleculares translacionais, vibracionais e rotacionais. Esta excitação das moléculas absorventes para um estado de maior energia não lhe confere estabilidade, resultando no retorno ao estado fundamental, com consequente liberação de energia (OLIVEIRA, 2015).

A luz apresenta, portanto, propriedades ondulatórias e quânticas, já que os fótons são partículas cujo conteúdo energético emite ondas com frequência e comprimento de onda característicos. As descobertas acerca da interação entre a radiação e a matéria permitiram o desenvolvimento de inúmeras técnicas e métodos ópticos. Entre eles, podemos destacar a espectroscopia, termo geral para o estudo da interação da matéria com os diversos tipos de radiação através da correlação entre comprimento de onda e energia absorvida ou emitida; a espectrometria, que envolve um amplo número métodos analíticos a nível molecular e atômico através da medida de intensidade de radiação através de transdutores fotoelétricos; a fotometria que analisa a quantificação por intensidade de luz e a espectrofotometria, que trabalha com determinações de substâncias químicas através de informações espectrais por meio da incidência de fótons (SKOOG; HOLLER; NIEMAN.; 2002); (OLIVEIRA, 2011).

#### **4.3.3 A importância do comprimento de onda adequado em análises ópticas**

A estabilidade de moléculas, átomos e íons está condicionada aos discretos estados de energia postulados pela Teoria Quântica. A emissão ou absorção de radiação por átomos ou moléculas estão relacionadas com a quantidade exata de energia da radiação envolvida, com determinada frequência e comprimento de onda, necessária para a transição energética de um estado a outro. De acordo com Santos Neto e Carrilho (2017), a excitação de partículas pode ocorrer por meio de bombardeamento de elétrons ou outras partículas elementares (raio X), por corrente elétrica, faíscas arco voltaico, calor e chama (UV, VIS, IV), por radiação eletromagnética (fluorescência) ou por reações químicas (quimiluminescência), enquanto a emissão ocorre devido ao retorno destas partículas de estado excitado ao estado de menor energia.

Segundo Gonçalves et. al. (2017), através do comprimento de onda relacionado à absorção máxima de energia, é possível reconhecer a energia necessária para que ocorram as transições eletrônicas. Quanto menor a variação das faixas de comprimento de onda selecionados, denominadas bandas, maior a precisão na medida da sua relação com a absorbância ou transmitância (GONÇALVES et. al., 2017)

De acordo com Santos Neto e Carrilho (2017), o fenômeno de emissão de energia por átomos e moléculas pode ocorrer por retorno a um nível menos energético, resultando em fluorescência quando o tempo de emissão é de aproximadamente  $10^{-5}$  segundos ou fosforescência, através de retorno ao estado intermediário metaestável, quando o tempo de emissão ultrapassa este valor. A fluorescência ressonante, onde a radiação emitida tem frequência igual à absorvida, é comum em átomos gasosos devido à baixa sobreposição da energia vibracional, enquanto a fluorescência não ressonante é observada em moléculas, que transitam entre diferentes níveis energéticos de acordo com suas vibrações e apresentam radiação emitida menor que a radiação absorvida (SANTOS NETO; CARRILHO, 2017).

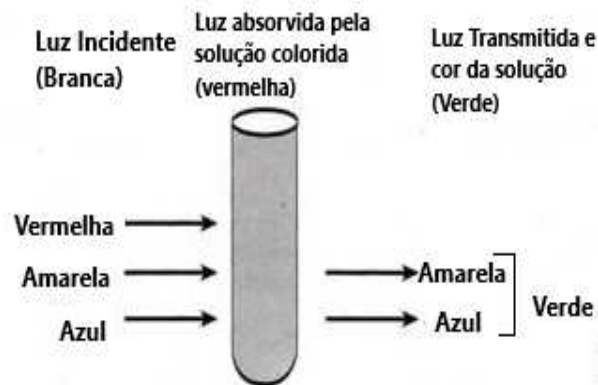
#### **4.3.4 Absorbância e Transmitância molecular no UV- Vis**

Uma grande quantidade de informações pode ser obtida através da análise da interação da matéria com radiações eletromagnéticas na faixa do ultravioleta e do visível. Isto acontece devido à presença de grupos químicos como complexos metálicos ou sistemas conjugados, caracterizados por grande capacidade de absorver fótons. Estes grupos são denominados cromóforos e originam a cor das substâncias. (OLIVEIRA, 2015).

Ao incidirmos luz sobre uma solução contendo moléculas capazes de absorver a radiação eletromagnética, parte da energia é absorvida e o restante é transmitida, devido ao absorvedor ou à diferença do índice de refração entre o meio da solução e o meio onde a radiação se propaga (CUSTODIO; KUBOTA; ANDRADE, 2018). Quanto mais concentrada esta solução, menor a energia resultante após da absorção da radiação pelas moléculas absorventes. A espessura da solução também interfere na absorção da luz: se considerarmos que a solução se encontra em um recipiente onde o caminho percorrido pela luz será maior, a absorção tenderá ao aumento, resultando em menor emissão de luz após a passagem da radiação incidente (BASQUES, 2010). Além disso, pode-se concluir que em uma solução concentrada, a absorção será maior que na mesma solução diluída. Isto explica a maior intensidade da tonalidade na primeira, quando enxergamos a cor por ela transmitida (MENDES; BENFATO, 2010).

A Figura 15 representa uma solução colorida sobre a qual se incide luz branca e cujo analito absorve a radiação correspondente à cor vermelha. Desta forma, a luz transmitida será composta pelas cores amarela e azul, sendo percebida pela nossa visão na coloração verde:

**Figura 15: A cor transmitida é complementar à cor absorvida**



Fonte: Mendes e Benfato (2010)

Desta forma, a luz branca emite todas as cores, ao passo em que a cor preta apresenta o fenômeno oposto. De acordo com Leite e Prado (2012), a diferença entre as cores que enxergamos se deve à variação da percepção fisiológica com relação a cada comprimento de onda. A cor da luz absorvida pode ser relacionada com a sua cor complementar, de acordo com a Tabela 1:

**Tabela 1: Cores absorvidas e cores complementares**

$\lambda$ (nm)	Cor	Cor complementar
400 – 465	Violeta	Verde – amarelo
465 – 482	Azul	Amarelo
482 – 487	Azul – esverdeado	Alaranjado
487 – 493	Turquesa	Vermelho alaranjado
493 – 498	Verde	Vermelho
498 – 530	Verde azulado	Vermelho púrpura
530 – 559	Verde amarelado	Púrpura avermelhado
559 – 571	Amarelo – verde	Púrpura
571 – 576	Amarelo esverdeado	Violeta
576 – 580	Amarelo	Azul
580 – 587	Laranja amarelado	Azul
587 – 597	Alaranjado	Azul esverdeado
597 – 617	Laranja avermelhado	Turquesa
617 – 780	Vermelho	Turquesa

Fonte: JUDD (1950) apud REIS (2014, p.20)

A absorção de energia por uma solução se dá quando o fóton fornece exatamente a energia necessária para excitar a molécula ou átomo. Por isso, o feixe de luz utilizado em uma dosagem colorimétrica deve ser analisado, sendo indicada a escolha daquele que apresentar o comprimento de onda ideal para que se promova maior absorção.

Custodio, Kubota e Andrade (2018) afirmam que a quantidade de radiação absorvida por uma amostra é chamada potência radiante e corresponde à quantidade de energia por unidade de tempo, medida em Watt. Como a direção influencia na medição, é indicada a definição desta grandeza em um plano perpendicular à direção do fluxo da luz monocromática. Pode-se concluir, portanto, que “a radiação absorvida por uma amostra é determinada comparando-se a potência radiante do feixe transmitido na ausência de espécies absorventes com a potência radiante transmitida na presença destas espécies” (CUSTODIO; KUBOTA; ANDRADE, 2018, p.1).

A intensidade da radiação é dada pela razão entre a potência radiante e o ângulo sólido de incidência. Se este denominador apresenta valor muito baixo, podemos considerar a potência radiante como sendo a intensidade da radiação. Como ao atravessar uma solução, parte da radiação é absorvida, a intensidade da luz inicial ( $I_0$ ) será sempre maior que a radiação transmitida ( $I_t$ ). Assim, de acordo com Custodio, Kubota e Andrade (2018) e Oliveira (2011), temos que a radiação absorvida não é simplesmente a diferença entre a radiação incidente e a radiação transmitida:

$$I_0 = I_r + I_e + I_a + I_t \quad \text{Equação (15)}$$

Onde,  $I_r$  é a intensidade da radiação refletida devido à diferença no índice de refração do meio e da solução,  $I_e$  é a intensidade do feixe espalhado devido a um meio não homogêneo composto por partículas na solução,  $I_a$  é a radiação absorvida pela solução.

Para minimizar a intensidade da radiação refletida ( $I_r$ ), de acordo com Oliveira (2015) calibramos o equipamento preparando duas cubetas, uma contendo a substância de análise (Solução 1) e outra com todos os componentes, exceto a substância de interesse (Solução 2, também chama de “branco”), para obtenção do espectro de ruído de fundo. Através deste procedimento é possível obter um parâmetro, onde subtraindo-se da transmitância da solução 1 a transmitância da solução 2, obtém-se a transmitância do composto desejado.

A intensidade da radiação espalhada ( $I_e$ ) é considerada desprezível na maioria dos métodos de análise espectrofotométricos, já que em geral, utilizam-se de soluções homogêneas e transparentes (CUSTODIO; KUBOTA; ANDRADE, 2018). Podemos sintetizar, portanto, a equação da intensidade da luz inicial com a aproximação:

$$I_0 = I_a + I_t \quad \text{Equação (16)}$$

Desta forma, é possível medir as intensidades do feixe inicial ( $I_0$ ) e do feixe transmitido ( $I_t$ ) e, através destes dados, calcular a intensidade da radiação absorvida.

Em estudos individuais, Pierre Bouguer (1698-1758), estudava as propriedades de absorvência da luz e publicou sua obra relacionada ao assunto em 1729. Em 1760, Johann Heindrich Lambert (1728-1777) também se aprofundou nessa área e a combinação destes dois estudos estruturam matematicamente os fenômenos observados de forma empírica. Segundo Custodio, Kubota e Andrade (2018, p.3), duas leis fundamentais podem ser enunciadas:

A intensidade de luz (monocromática) transmitida por um corpo homogêneo é proporcional à intensidade de luz incidente. Isto é:  $I_t = k I_0$ . A intensidade de luz (monocromática) transmitida decresce exponencialmente com o aumento da espessura da camada do corpo homogêneo.

De acordo com Oliveira (2015, p.24) podemos dizer que “a magnitude da atenuação da radiação incidente é uma função da concentração dos centros absorventes e da extensão do caminho sobre o qual ocorre a absorção (caminho óptico)”. Desta forma, a lei de Bourguer-Lambert pode ser expressa matematicamente como:

$$I_t = I_0 e^{-k'b} \quad \text{Equação (17)}$$

Onde  $k$  é o coeficiente de absorção,  $e$  é a base dos logaritmos neperianos e  $b$  é o caminho óptico da cubeta, em cm. Se convertermos  $e^k$  em  $10^a$ , onde  $a$  é a absortividade, teremos:

$$I_t = I_0 10^{-ab} \quad \text{Equação (18)}$$

De acordo com Mendes e Benfato (2010) e Basques (2010), no século seguinte, August Beer (1825-1863) dedicou-se ao estudo das propriedades de absorção e transmissão da luz de acordo com a concentração das soluções, chegando à conclusão de que a absortividade ( $a$ ) de uma solução dependerá do caminho óptico ( $b$ ) e será tanto maior quanto for a sua concentração ( $c$ ), o que originou a expressão matemática conhecida como Lei de Beer:

$$I_t = I_0 10^{-acb} \quad \text{Equação (19)}$$

A absortividade depende também do comprimento de onda da radiação incidente, da natureza do cromóforo e do solvente, além da temperatura. Um valor significativo para a absortividade indica grande capacidade de um cromóforo absorver radiação naquele comprimento de onda específico (OLIVEIRA, 2015). De acordo com Custodio, Kubota e Andrade (2018), se a concentração for expressa em  $\text{mol L}^{-1}$  e o caminho óptico em centímetros, a constante pode ser considerada como sendo a absortividade molar, representada pelo símbolo épsilon ( $\epsilon$ ), indicada para análises quantitativas e comparativas entre a absorbância de várias substâncias, e que pode ser obtida através do cálculo do coeficiente angular da reta obtida na

curva de calibração. Para a realização de análises de substâncias de natureza e massa molar desconhecidas, é mais adequada a análise da absorvância (a), onde a concentração é expressa em gramas por litro. A radiação monocromática é a mais indicada em análises espectrofotométricas por ser proporcional à sensibilidade do método, já que a absorvância molar depende do comprimento de onda, além da substância, da temperatura e do solvente. Para definir o comprimento de onda ideal, é necessário variar a radiação incidente até obtê-lo para o resultado de maior absorção (CUSTÓDIO, KUBOTA E ANDRADE, 2018).

De acordo com Oliveira (2011) a razão entre a intensidade da radiação transmitida e da radiação inicial  $I_t/I_0$  é chamada transmitância ( $T$ ) e a relação  $\log_{10}(I_0/I_t)$  ou  $\log(I/T)$  é chamada a absorvância ( $A$ ). A transmitância pode ser obtida através da Equação:

$$T = \frac{I_t}{I_0} = 10^{-\varepsilon cb} \quad \text{Equação (20)}$$

Esta demonstração matemática indica claramente que a transmitância de uma solução sobre a qual incide uma radiação monocromática diminui exponencialmente com o aumento da concentração e da espessura da solução (BASQUES, 2010). Para alcançarmos a linearidade na comparação entre transmitância e concentração, podemos aplicar o logaritmo em ambos os lados da equação (GONÇALVES et. al., 2017; GOMES et.al., 2006):

$$\log T = \log_{10} 10^{-\varepsilon cb} \therefore -\log_{10} T = \varepsilon cb = A \quad \text{Equação (21)}$$

Já a absorvância ( $A$ ), pode ser obtida através da manipulação das mesmas equações que nos fornecem a transmitância, já que é proporcional ao caminho percorrido pelo feixe de luz (b), à concentração (c) e a absorvidade (a) ou  $\varepsilon$ , no caso da absorvidade molar (KICH; BÖCKEL, 2017).

$$I_t = I_0 \cdot 10^{-\varepsilon cb} \therefore 10^{\varepsilon cb} = \frac{I_0}{I_t} \quad \text{Equação (22)}$$

Igualmente, para a preservação da linearidade com a concentração, utilizamos a função logaritmo (GONÇALVES et.al., 2017):

$$\log_{10} \frac{I_0}{I_t} = \log_{10} 10^{\varepsilon cb} \therefore A = \varepsilon cb \quad \text{Equação (23)}$$

Segundo Basques (2010), a absorvância ( $A$ ) também pode ser escrita em termos de logaritmos na base 10, e como  $I_0$  corresponde a 100% da energia que incide sobre a solução, conclui-se que:

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I_t} \therefore A = \log_{10} I_0 - \log I_t \therefore A = \log_{10} 100 - \log I_t \therefore A = 2 - \log I_t \quad \text{Equação (24)}$$

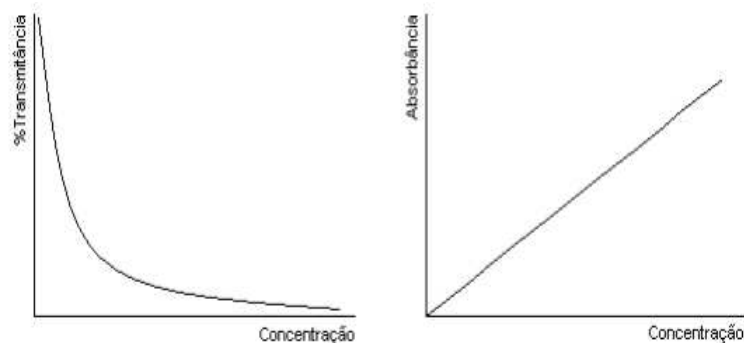
Para uma solução que não absorve radiação eletromagnética, os valores de  $I_0$  e  $I_t$  serão os mesmos, conseqüentemente resultando em  $A = \log_{10} 1$ , indicando absorvância nula, com transmitância com valor igual a 1, ou seja, 100%. Se alguma parcela de energia é absorvida,  $I_t < I_0$ , resultando em transmitância (T) com valor menor que 1, ou seja,  $T < 100\%$ . De acordo com Oliveira (2011) e Gonçalves et. al. (2017), a transmitância é usualmente representada em termos percentuais:

$$\%T = \frac{I_t}{I_0} 100$$

Equação (25)

As deduções matemáticas aqui demonstradas são de extrema importância para as análises ópticas, já que a relação linear obtida entre absorvância (ou transmitância) e concentração nos permite a quantificação do analito através de uma curva analítica, se mantido o caminho óptico constante. Através da lei hoje conhecida como Lambert – Beer é possível a construção de uma curva analítica (curva de calibração externa), onde determinada faixa de concentração apresenta-se relacionada linearmente com a absorvância. A Figura 16 mostra a relação entre a absorvância e a transmitância com a concentração:

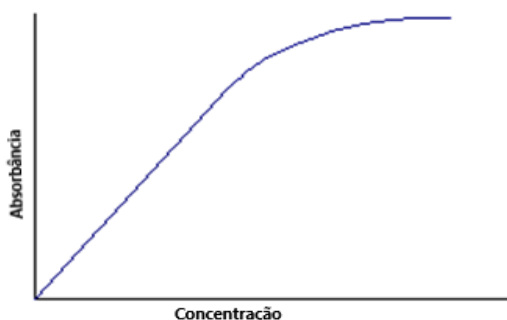
**Figura 16: Relação entre Absorvância e % Transmitância em função da concentração**



Fonte: Basques (2010)

Segundo Mendes e Benfato (2010) e Oliveira (2011), as leis de Lambert-Beer apresentam restrições que as limitam a apenas alguns tipos de análises colorimétricas, dentre elas a necessidade da utilização de luz aproximadamente monocromática e a da diluição das soluções. Esta última deve-se ao fato de que, para soluções concentradas, além de uma possível variação no índice de refração, existe um limite de linearidade, um ponto a partir do qual a lei de Lambert-Beer deixa de ser válida, conforme representado na Figura 17.

**Figura 17: Limite de Linearidade em função da concentração**



Fonte: Plato - Página de disciplinas da USP<sup>11</sup>

Isto acontece por que ao aplicarmos a Lei de Beer, admitimos que os centros absorventes não apresentam interação entre si ou com outras espécies, o que só se aproxima do sentido real em soluções muito diluídas. Em soluções com concentrações maiores que  $10^{-2} \text{ mol L}^{-1}$ , a distribuição de cargas é alterada e a energia envolvida na excitação interferindo na banda de absorção (OLIVEIRA, 2011). Até o limite de linearidade, pode-se utilizar um fator de calibração que possibilite o cálculo da concentração. Dado que a absorvidade molar é um coeficiente de proporcionalidade entre a absorbância e o produto da concentração da solução pelo caminho óptico ( $\varepsilon = \frac{A}{bc}$ ), e o caminho óptico para o calibrador e para a amostra desconhecida não variam, temos que:

$$\frac{A_c}{c_c} = \frac{A_d}{c_d} \therefore c_d = \frac{A_d c_c}{A_c} \quad \text{Equação (26)}$$

Onde  $A_c$ ,  $A_d$ ,  $c_c$  e  $c_d$  são, respectivamente, a absorbância do calibrador e da amostra desconhecida, e a concentração do calibrador e da amostra desconhecida. A razão entre a concentração e a absorbância do calibrador ( $\frac{c_c}{A_c}$ ) é a constante denominada Fator de Calibração, cuja multiplicação pela absorbância da amostra desconhecida resulta em sua concentração (BASQUES, 2010).

Desta forma, embora seja extremamente útil na determinação quantitativa e qualitativa de cromóforos e grupos absorventes, as medições podem vir acompanhadas de desvios reais que comprometem os resultados, como a variação do índice de refração com a concentração e a interação de centros absorventes. Também podem ocorrer desvios aparentes devido à falta de monocromaticidade, resposta não linear da fotocélula, flutuações na fonte, associações moleculares ou deslocamento de equilíbrios (OLIVEIRA, 2011).

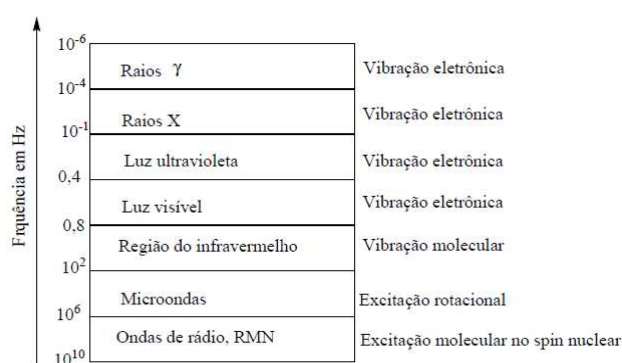
<sup>11</sup> Disponível em <<http://plato.if.usp.br/1-2004/fap0181n/Lei%20de%20Beer.htm>> Acesso 03 de agosto de 2020.

### 4.3.5 Espécies Absorventes

A interação da radiação eletromagnética com a matéria resulta em transições energéticas eletrônicas, vibracionais, rotacionais ou translacionais (GOMES et. al., 2006). A grandeza da energia incidente é determinante para o tipo de transição: enquanto nas transições eletrônicas praticamente não ocorre variação nos núcleos da molécula, nas demais ocorre alteração na posição dos átomos nas estruturas moleculares. Como apenas alguns níveis energéticos são permitidos para átomos e moléculas, a faixa do comprimento de onda envolvida nestas transições nos permite a diferenciação destes fenômenos (OLIVEIRA., 2001).

Oliveira (2001) destaca que as transições entre níveis energéticos rotacionais ocorrem quando a radiação eletromagnética incidente apresenta frequência na região de micro-ondas, sendo indicada para análises de geometria molecular a partir de amostras de moléculas na fase gasosa. Também menciona que para análises na região do infravermelho é necessário que o movimento vibracional de uma molécula varie seu momento dipolo, o que resulta em absorção de energia. Quando a radiação apresenta comprimentos de onda na faixa do ultravioleta e do visível ocorrem transições eletrônicas, desde que a energia fornecida seja igual à diferença entre os níveis de energia dos orbitais envolvidos. Este fenômeno se deve ao fato de que o elétron do orbital de maior nível de energia ocupado (HOMO) tende a ser “promovido” ao orbital de menor energia não ocupado (LUMO) se houver simetria entre os orbitais. A Figura 18 mostra a relação entre as faixas do espectro magnético com a excitação molecular:

**Figura 18: Espectro eletromagnético e vibrações eletrônica e molecular**



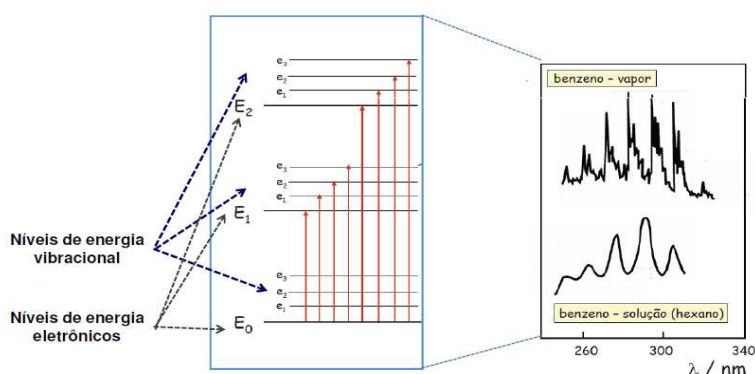
Fonte: Site Êxito Certo <sup>12</sup>

Segundo Oliveira, (2011) moléculas que contenham elétrons  $\pi$ ,  $\sigma$  e  $n$  podem absorver radiação, sendo restrita a absorção de comprimentos de onda mais longos do ultravioleta e visível a grupos funcionais que recebem o nome de cromóforos. De acordo com Sousa (2013),

<sup>12</sup> Disponível em <<https://www.doraci.com.br/downloads/engenharia/espectroscopia-infravermelho.pdf>> Acesso em 10 de junho de 2019.

cromóforos com vários grupos funcionais apresentarão absorção em diversos comprimentos de onda, onde cada transição se revelará em bandas que podem ser alteradas devido ao meio no qual se encontra o analito. Assim, pode-se concluir que cromóforos iguais apresentarão absorbância nos mesmos comprimentos de onda, desde que o fenômeno não seja influenciado por heteroátomos presentes na estrutura molecular. Promovem a absorção os elétrons que participam da associação entre átomos ou sejam desemparelhados ou antiligantes. Os procedimentos de determinação qualitativa envolvem seleções do comprimento de onda, do pH, da temperatura, da natureza do solvente e análise de possíveis substâncias interferentes. A Figura 19 exemplifica a interferência de um solvente na espectral de um analito:

**Figura 19: Influência do solvente na feição espectral de um analito**



Fonte: Sousa (2013)

De acordo com Skoog et. al. (2006), espécies absorvedoras podem conter elétrons ligantes ( $\sigma$  e  $\pi$ ), não-ligantes ( $n$ ) e antiligantes ( $\sigma^*$  e  $\pi^*$ ). Assim, quatro transições são possíveis:

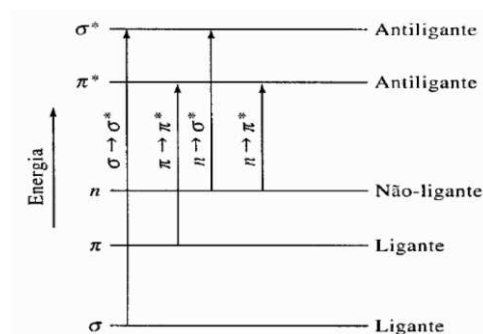
$\sigma \rightarrow \sigma^*$ : Elétrons são excitados de um orbital ligante a um antiligante através da absorção de alta energia, caracterizada por menores comprimentos de onda (abaixo de 150 nm), consequentemente não levando à observação de máximos de absorção na região UV.

$n \rightarrow \sigma^*$ : Realizada por compostos saturados contendo pares de elétrons desemparelhados. Requerem menos energia e apresentam comprimentos de onda por volta de 200 nm. Os máximos de absorção tendem a se deslocar para menores comprimentos de onda na presença de solventes polares.

$n \rightarrow \pi^*$  e  $\pi \rightarrow \pi^*$ : Transições entre 200 e 700 nm, envolvem menores energias, maiores comprimentos de onda, o que os torna experimentalmente convenientes. O grupo funcional insaturado é requerido em ambas para prover os orbitais  $\pi$  (SKOOG et. al., 2006).

A Figura 20 mostra as variações de energia necessárias para estas transições eletrônicas:

**Figura 20: Níveis de energia eletrônica molecular**



Fonte: SKOOG (2006)

De acordo com Oliveira (2011) a transição  $n \rightarrow \pi^*$  é observada em íons inorgânicos, como nitrato, nitrito, carbonato, entre outros, em compostos com elétrons nos orbitais d e f, como lantanídeos, actinídeos e alguns metais de transição, além de complexos com alta absorção por transferência de carga. Os compostos totalmente saturados não absorvem radiação do visível e ultravioleta, enquanto compostos que intercalam ligações duplas e simples em suas estruturas tendem a absorver energia em menores frequências. Assim, quanto maiores forem os sistemas contendo ligações conjugadas, mais longos serão os comprimentos de onda absorvidos, podendo inclusive atingir a faixa espectral visível.

Estes sistemas conjugados são chamados cromóforos e podem ser identificados de acordo com o comprimento de onda máximo no qual absorvem energia. Substâncias que apresentam o mesmo cromóforo tendem a apresentar a mesma feição espectral desde que não tenham suas bandas alteradas por heteroátomos presentes na sua estrutura molecular. Existem ainda grupos funcionais que, embora não absorvam radiação na região do ultravioleta, apresentam a capacidade de deslocar picos dos cromóforos para comprimentos de onda mais longos, deslocamento denominado batocrômico ou para comprimentos de onda mais curtos, deslocamento denominado hipsocrômico (OLIVEIRA, 2011; SKOOG et. al., 2006). A relação entre as transições eletrônicas e alguns grupos correspondentes são indicados no Quadro 1:

**Quadro 1: Relação entre transições eletrônicas e algumas estruturas moleculares**

Transições	Características	Exemplos
$\sigma \rightarrow \sigma^*$	Não apresentam elétrons não ligantes e ligações $\pi$	Alcanos
$n \rightarrow \sigma^*$	Apresentam elétrons não ligantes e não possuem ligações $\pi$	Haletos e cadeias carbônicas com heteroátomos
$n \rightarrow \pi^*$	Apresentam elétrons não ligantes e ligações $\pi$	Nitrocompostos, compostos carbonilados, amidas e azocompostos, íons inorgânicos
$\pi \rightarrow \pi^*$	Não apresentam elétrons não ligantes e possuem ligações $\pi$	Alcenos e alcinos

Fonte: SKOOG; HOLLER; NIEMAN (2002)

As ligações interatômicas podem ainda ser identificadas individualmente através da posição e intensidade das bandas espectrais, que se baseiam principalmente na investigação comparativa entre as informações de um espectro e os valores aproximados das frequências nas quais ocorrem as vibrações. A análise destas ligações ou grupamentos descobertos através de um espectro permite a identificação da estrutura molecular, conforme exemplificado na Tabela 2:

**Tabela 2: Cromóforos e comprimento de onda máximo**

Nome	Cromóforo	Solvente	$\lambda_{max}$ (nm)
Aromático	Núcleo benzênico	n-hexano	204
			256
Alceno	$C_6H_{12}CH=CH_2$	n-heptano	177
Alceno conjugado	$CH_2=CHCH=CH_2$	n-heptano	217
Alcino	$C_3H_4C\equiv C-CH_3$	n-heptano	178
			196
			225
			214
Amido	$CH_3\overset{O}{\parallel}CNH_2$	Água	214
Azo	$CH_3N=NCH_3$	Etanol	339
Carbonil	$CH_3\overset{O}{\parallel}CCH_3$	n-hexano	186
			280
			180
			293
Carboxil	$CH_3\overset{O}{\parallel}COH$	Etanol	204
Nitro	$CH_3NO_2$	Iso-octano	280
Nitroso	$C_6H_5NO$	Éter etílico	300
Nitrato	$C_2H_5ONO_2$	Dioxano	270

Fonte: SKOOG; HOLLER; NIEMAN (2002)

Em suma, a espectrofotometria se baseia na absorção molecular proveniente das transições de níveis energéticos atômicos e moleculares. A relação entre o comprimento de onda onde ocorre este fenômeno com a intensidade da absorbância se revela em um espectro que possibilita a identificação de substâncias. As características espectrais observadas dependem também do meio no qual se encontra o analito, ou seja, o espectro obtido sofrerá alteração de acordo com a absorbância do solvente no qual o mesmo se encontra diluído.

Embora o fotômetro não forneça diretamente o espectro de absorção do analito como um espectrômetro, é possível, através da variação do comprimento de onda da radiação incidente e conversão de valores em absorbância, construir a curva espectral e conseqüentemente realizar análises quantitativas e qualitativas.

Analogamente aos cromóforos, os fluoróforos são grupos presentes nas estruturas moleculares que absorvem energia em um comprimento de onda específico (mais energético) e posteriormente a reemitem em um outro comprimento de onda (maior e menos energético), fenômeno denominado fluorescência (RANGEL; MERÇON, 2012).

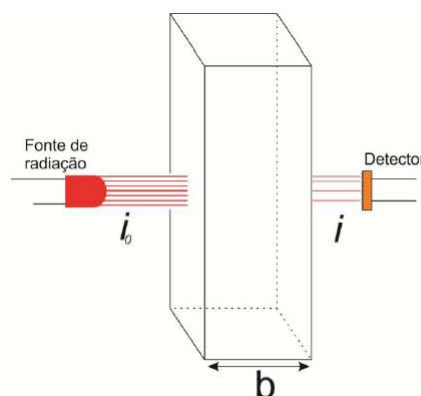
## 4.4 Princípios práticos de análises ópticas

### 4.4.1 Análises Fotométricas

Segundo Oliveira e Leite (2016), para a realização de uma análise fotométrica, é necessária uma fonte de radiação com emissão na faixa espectral do UV- VIS. Embora a região do visível esteja entre 400 e 800 nm no espectro eletromagnético, é possível ainda utilizar a faixa entre 200 e 400 nm nos casos em que se tenha por objetivo a excitação molecular de analitos no estado gasoso ou em solução. É indicada a escolha do comprimento de onda no qual a absorbância seja mais significativa, pois desta forma se obtém maior grau de sensibilidade (MENDES & BENFATO, 2010). Apesar disto, existem situações onde trabalha-se com comprimento de onda diferente daquele no qual se obtém maior absorção, como em casos de interferência. Com a comparação desta absorção em diversas faixas espectrais, é possível identificar o mais adequado para a análise. Para melhor resultado, é indicada a construção de uma curva espectral, que relaciona cada comprimento de onda com a absorbância ou transmitância nele observada (BASQUES, 2010).

Um fotômetro é constituído basicamente pelos componentes: fonte de radiação, um monocromador ou seletor de comprimento de onda que possibilite a escolha do comprimento de onda adequado, um compartimento para a cubeta e um detector da radiação atenuada pela amostra. A Figura 21 representa os componentes principais de um fotômetro, com a fonte de radiação emitindo radiação na faixa espectral adequada para a análise:

**Figura 21: Principais componentes de um fotômetro**



Fonte: REIS (2014, p. 18)

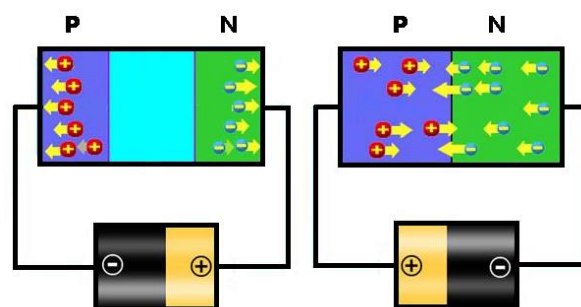
A seleção dos comprimentos de onda pode ser realizada através da utilização de um filtro de interferência que isole o comprimento de onda requerido. Como fontes de emissão são comumente utilizadas lâmpadas LED (diodo emissor de luz), enquanto o compartimento para

a cubeta pode ser construído com diversos materiais de baixo custo, como madeira, plástico, entre outros (OLIVEIRA e LEITE, 2016). A detecção da radiação atenuada pela solução da amostra pode ser realizada através de um LDR (Resistor dependente de luz, do inglês, *Light Dependent Resistor*), cujos valores podem ser visualizados através de um multímetro. Desta forma, os dados de resistência obtidos em cada análise podem ser convertidos em absorbância através de cálculos simples.

#### 4.4.2 LED como fonte de radiação

De acordo com Reis (2014), o LED é um diodo emissor de luz constituído por materiais semicondutores compostos por lacunas e elétrons livres, a partir dos quais se adicionam, de forma controlada, impurezas que modificam a estrutura eletrônica ocasionando a produção de semicondutores com excesso de elétrons livres (semicondutores do tipo N) e de lacunas (semicondutores do tipo P). Este processo, denominado dopagem, permite o controle sobre a condução ou bloqueio de corrente elétrica, de acordo com a conexão nos terminais da bateria. Quando o semicondutor P é ligado ao polo positivo da bateria e N ao polo negativo, a junção N-P é submetida a diferença de potencial negativa em N e positiva em P, o que resulta no deslocamento dos elétrons livres e lacunas em direção à junção. Neste processo de recombinação, representado na Figura 22, ocorre a emissão de luz devido à expressiva liberação de fótons (REIS, 2014).

Figura 22: Estrutura e funcionamento de um diodo



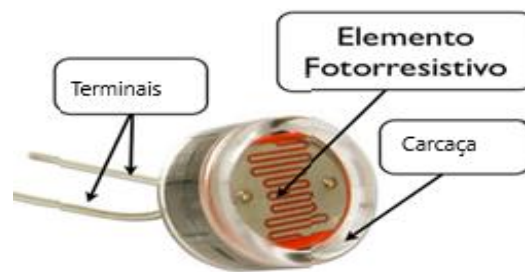
Fonte: [http://www.mecaweb.com.br/electronica/content/e\\_diodo](http://www.mecaweb.com.br/electronica/content/e_diodo) Acesso em 02/03/2020

Os comprimentos de onda emitidos estão relacionados com a natureza do semicondutor e com a natureza do material de dopagem. Atualmente, LEDs são encontrados em variadas cores e modelos a preços acessíveis. A utilização de LED como fonte de radiação em fotômetros e outros equipamentos de análise óptica mostra-se eficaz pela portabilidade, pela eficiência, pela economia, pela durabilidade e pelo rendimento.

#### 4.4.3 LDR e Multímetro: Fotodeteção e medida de resistência

O LDR, representado na Figura 23, é um componente eletrônico tem sua resistência alterada conforme ocorre a variação da intensidade da energia luminosa incidente. Construído a partir de semicondutores com alta resistência, apresenta menor resistência quando exposto a maior intensidade da luminosidade. Seu funcionamento baseia-se no fato de que, sob incidência de luz em frequência adequada, seus elétrons são ejetados para a banda condutora, diminuindo a resistência e aumentando a sua condutividade (VASCONCELOS, 2014).

**Figura 23: LDR: material fotossensível, terminais e camada exposta à incidência luminosa**



Fonte: <https://ingenieriaelectronica.org/fotorresistencia-definicion-caracteristicas-y-tipos/> Acesso mar 2020.

Um multímetro tem como parte integrante um ohmímetro, através do qual mede-se a oposição à corrente elétrica (resistência) e voltímetros, para medida de corrente contínua e alternada e amperímetro, para medida de corrente elétrica. A relação entre resistência ( $R$ ), tensão ( $U$ ) e corrente ( $i$ ) é dada pela Lei de Ohm:

$$U = Ri \quad \text{Equação (27)}$$

Observa-se que o deslocamento de elétrons da camada de valência para a camada de condução disponibiliza mais elétrons para a condutância, resultando conseqüentemente na redução da resistência. Desta forma, na ausência de luz, o multímetro emite uma resposta com altíssima resistência e na presença de luz, com resistência menor e conseqüentemente, maior condutância. Esta proporcionalidade inversa entre corrente e resistência é facilmente observada através da Lei de Ohm. Desta forma, a utilização da função ohmímetro através do multímetro nos permite quantificar a resistência do LDR quando sobre ele incide a radiação atenuada (REIS, 2014).

De acordo com Reis (2014), como a condutância ( $G$ ) é dada pela equação inversa da resistência ( $G = \frac{1}{R}$ ). Considerando que o branco é dado pela transmitância máxima (menor resistência), temos que:

$$A = -\log \frac{T}{T_0} = -\log \frac{G_{amostra}}{G_{branco}} \quad \text{Equação (28)}$$

Logo, uma montagem experimental que possibilite a obtenção das medidas de resistência da incidência da radiação incidente e atenuada pela solução contendo o analito é adequada, ressaltando-se as interferências, para a análise fotométrica e fluorimétrica.

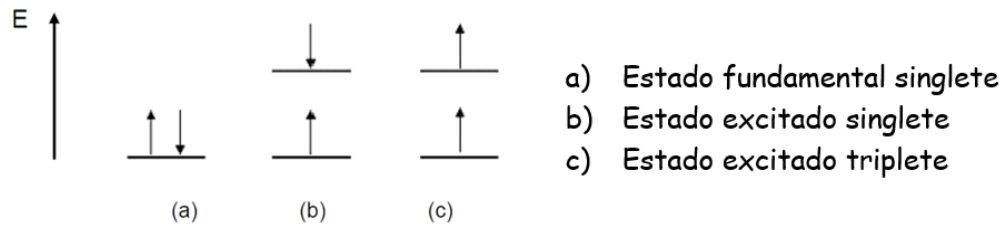
## 4.5 Fluorimetria

### 4.5.1 O fenômeno da fluorescência

De acordo com Oliveira et al. (2015), o fenômeno da luminescência ocorre através da excitação molecular, possibilitando análises quantitativas e qualitativas. Enquanto na quimiluminescência, os dados são geralmente obtidos através de uma reação química entre o analito e um reagente específico para a obtenção de uma espécie excitada, na fotoluminescência (fluorescência e fosforescência), os fótons que excitam a molécula são provenientes de uma fonte externa de radiação (JULIANO, 2012).

A diferença fundamental entre fluorescência e fosforescência está relacionada ao tempo de emissão após a excitação molecular, fator que se vincula diretamente à perda energética nas transições eletrônicas: enquanto na primeira a emissão cessa-se logo após a interrupção do fornecimento de radiação externa (cerca de  $10^{-5}$  segundos), na segunda fótons são emitidos por um período de tempo muito maior ( $10^{-4}$  s a 10 s ou mais). Tal fenômeno é explicado pelo fato de que na fluorescência não ocorre mudança de spin eletrônico: ocorre apenas o relaxamento vibracional que não ocasiona spins desemparelhados. Esta transição de spins é conhecida como singlete-singlete e refere-se a elétrons emparelhados e sem separações nos níveis de energia. Já na fosforescência, ocorre a alteração nos spins e desemparelhamento eletrônico, alcançando um estado de baixa energia e maior estabilidade (transição singlete-triplete) ocasionando, portanto, uma emissão de radiação mais duradoura. (JULIANO, 2012; LENZ, 1997; OLIVEIRA et al., 2015). Os estados singlete e triplete são representados no Figura 24:

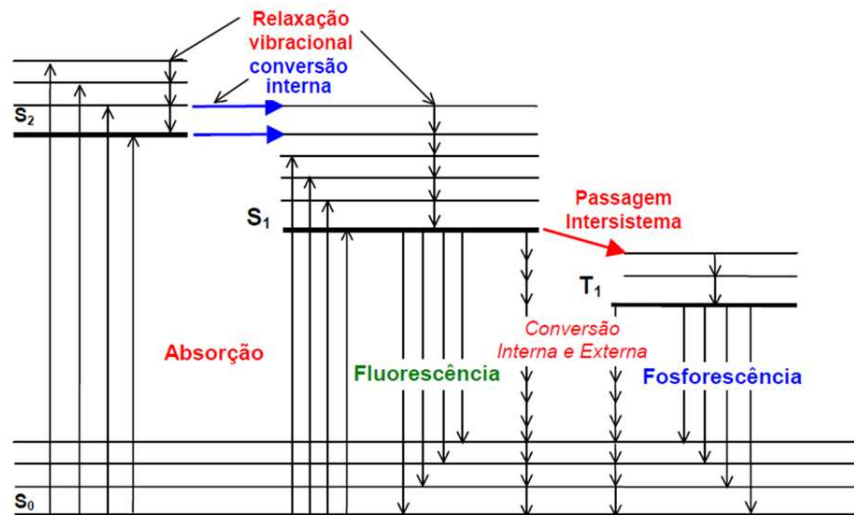
**Figura 24: Estados singlete e triplete**



Fonte: JULIANO, 2012

O retorno eletrônico ao estado fundamental em fenômenos fotoluminescentes é detalhado por Juliano (2012), que nos mostra como se dão processos de desativação radiativos (fluorescência e fosforescência) ou não radiativos. Nestes últimos, a perda energética se dá por relaxação vibracional devido à colisão entre as moléculas, por conversão interna devido a interações moleculares que resultam na redução do nível de energia sem emissão energética ou por conversão externa, que ocorre devido à transferência de energia entre a molécula excitada e outros componentes da solução. Estas transições energéticas são representadas pelo Diagrama de Jablonski (Figura 25):

**Figura 25: Diagrama de Jablonski e as transições energéticas em processos fotofísicos**

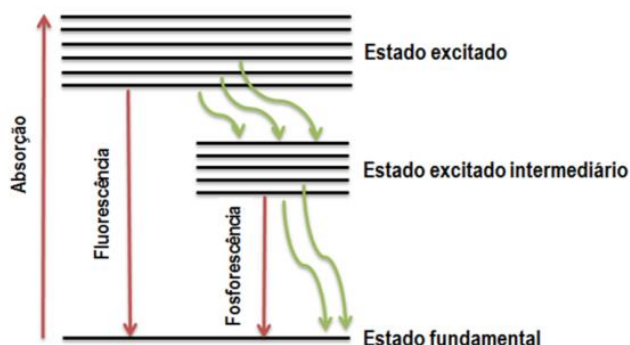


Fonte: JULIANO, 2012

Oliveira et al. (2015) explicam que a excitação eletrônica em métodos fotoluminescentes geralmente se dá através de comprimentos de ondas menores (mais energéticos) que aqueles que serão emitidos. Normalmente a luz ultravioleta é absorvida pelas espécies, que emitem radiação em comprimentos de ondas maiores (menos energéticos) na região do espectro visível. Não há, porém, violação das leis de conservação da energia, visto que as colisões entre as moléculas e transições entre os estados vibracionais acarretam perda de energia, o que explica

a diferença energética entre o fóton de absorção e o fóton de emissão. A Figura 26 representa as transições energéticas nos fenômenos de fluorescência e fosforescência:

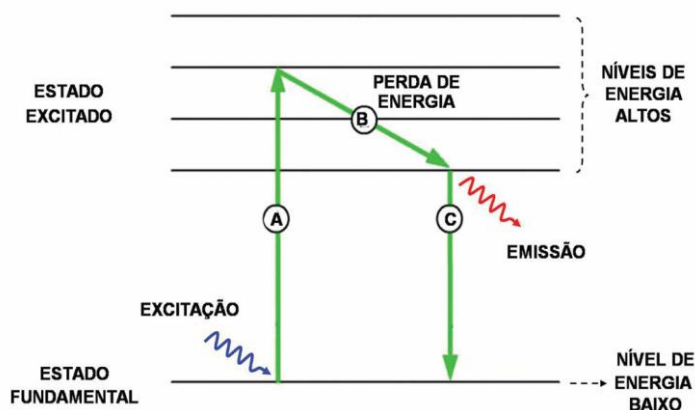
**Figura 26: Processos de absorção, fluorescência e fosforescência**



Fonte: <http://www.ufjf.br/quimica/files/2015/06/2018-QUI126-AULA-5> Acesso fev. 2020.

Na fluorescência molecular (Figura 27), a instabilidade dos elétrons excitados resulta no decaimento em aproximadamente um bilionésimo de segundo ( $10^{-9}$ s), com a emissão de fótons com comprimento de onda maior e conseqüentemente menor energia que o fóton absorvido no processo de excitação (SARTORI; LORETO, 2009).

**Figura 27: Diagrama do processo de fluorescência**

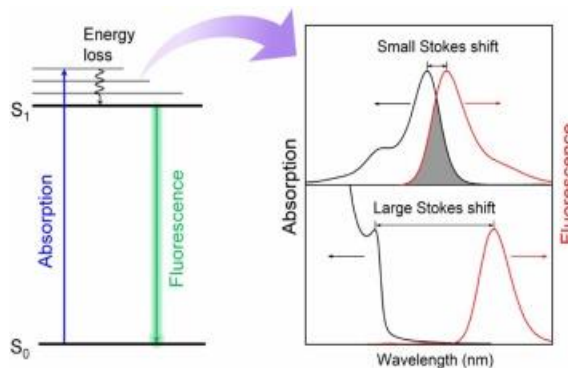


Fonte: SARTORI; LORETO, 2009

Em outras palavras, a fluorescência ocorre quando moléculas são excitadas com fótons de frequências apropriadas e, conforme colidem-se com outras moléculas perdem energia vibracional, retornando a um nível instável de menor de excitação. Para alcançar a estabilidade, voltam deste ponto a um nível fundamental emitindo energia fluorescente. Desta forma, como o fóton de fluorescência é menos energético que o fóton de excitação, é possível distinguir para cada espécie que fluoresce o seu comprimento de onda de excitação e seu comprimento de onda

de emissão característicos. A distância entre eles é chamada deslocamento de Stokes, conforme representado na Figura 28 (OLIVEIRA et al., 2015; PAVONI et al., 2014).

**Figura 28: Relação entre o diagrama de Jablonski e o deslocamento de Stokes**



Fonte: <http://html.rhhz.net/zghxkb/20191018.htm> Acesso em 13 fev. 2020

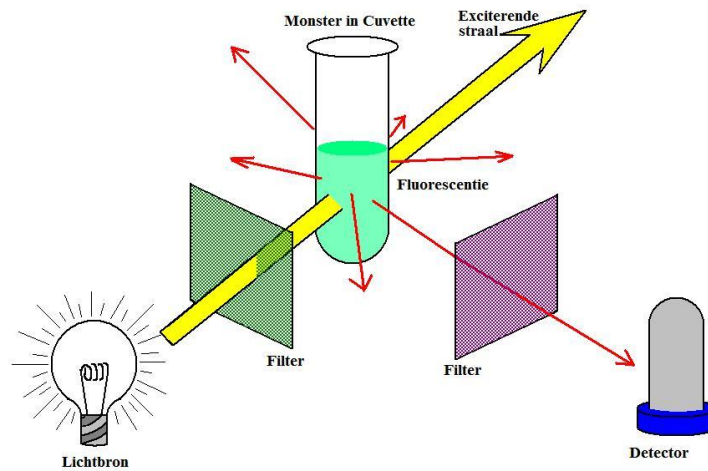
Desta forma, o fenômeno pode ser explicado como a reemissão de parte da energia absorvida sob a forma de radiação visível (SARTORI; LORETO, 2019). Cabe ainda ressaltar que em espécies atômicas é possível observar o fenômeno da fluorescência com mesmo comprimento de onda de absorção e emissão, fenômeno denominado fluorescência de ressonância (JULIANO, 2012).

Rangel e Merçon (2012) caracterizam a fluorescência como o “processo inverso da absorção de radiação eletromagnética” classificando-o como um “método seletivo”, visto que nem todos os compostos fluorescem. Embora a predição sobre a fluorescência de uma molécula seja difícil, observa-se que algumas características são comuns em estruturas de substâncias que apresentam tal fenômeno. A maioria destes compostos são aromáticos, com transição eletrônica  $\pi \rightarrow \pi^*$  de baixa energia. Existem também compostos com estruturas alifáticas que fluorescem, fato que se deve à alta energia para as transições  $\sigma \rightarrow \sigma^*$  e à rigidez da estrutura que reduz a liberdade vibracional molecular (RANGEL; MERÇON, 2012).

#### 4.5.2 Análises Fluorimétricas

Uma diferença fundamental entre um fluorímetro e um fotômetro convencional encontra-se na angulação entre a detecção da luz e a fonte. Em análises de fluorescência, este ângulo deve ser de  $90^\circ$ , geometria que favorece a detecção minimizando a interferência proveniente da transmitância (LENZ, 1997; STEWART, GIANNINI; 2016). Na análise da fluorescência a radiação de interesse é aquela originada pelo brilho do analito em solução (Figura 30), que irradia em todas as direções a partir da amostra (STEWART, GIANNINI; 2016).

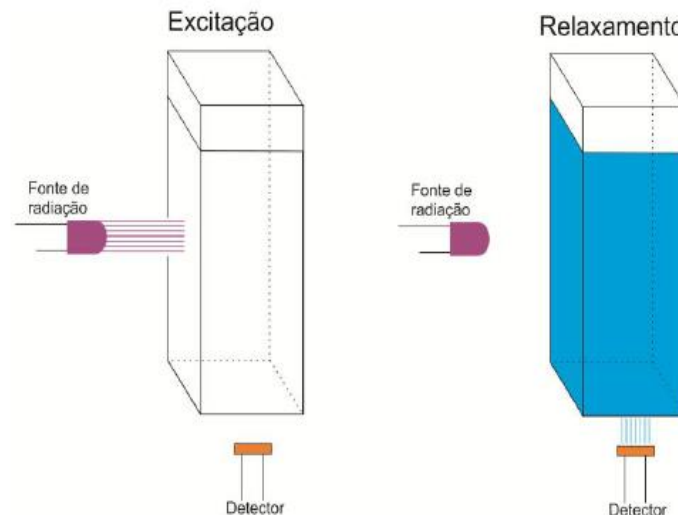
**Figura 29: Geometria entre fonte de radiação e detector em um fluorímetro**



Fonte: Banco de imagens da Internet- Domínio Público

Reis (2014) destaca que para fins quantitativos, a concentração de um analito fluorescente é relacionado apenas à intensidade de emissão de radiação após a excitação, processo denominado relaxamento (Figura 30):

**Figura 30: Excitação de moléculas fluorescentes e emissão de energia em forma de luz**



Fonte: REIS (2014)

Oliveira et al. (2015) nos mostram que a intensidade da fluorescência molecular ( $I_f$ ) é proporcional à intensidade de energia absorvida ( $I_0 - I_t$ ):

$$I_f = K (I_0 - I_t) \therefore I_f = K I_0 \left(1 - \frac{I_t}{I_0}\right) \quad \text{Equação (29)}$$

Onde K é uma constante relacionada ao meio e ao rendimento quântico. O rendimento quântico nada mais é que a razão entre os fótons de excitação e de emissão. A intensidade da fluorescência se relaciona exponencialmente com a concentração do analito (c) e com sua absorvidade ( $\epsilon$ ):

$$\frac{I_t}{I_0} = 10^{-\epsilon cb} \text{ Equação (30)}$$

Substituindo os termos da Equação 31 na Equação 30, temos que:

$$I_f = K I_0 (1 - 10^{-\epsilon cb}) \text{ Equação (31)}$$

Observa-se, portanto, que em soluções muito concentradas e com alta absorvidade molar, deverá ocorrer absorção de praticamente toda a radiação incidente na parte mais externa da solução, aproximando-se de um valor constante dado por  $I_f = K I_0$ . Por este motivo, a análise de fluorescência mostra maior eficácia em soluções diluídas (REIS, 2014) (OLIVEIRA et al., 2015).

De acordo com Pavoni et al. (2014) e Lenz (1997), análises de fluorescência são viáveis devido à sua importância para inúmeras áreas do conhecimento e sobretudo pela alta sensibilidade intrínseca do fenômeno, a nível de traços, que permite a detecção e estudo do analito ainda que se encontre nas soluções em baixas concentrações (JULIANO, 2012). Além disso, Oliveira et al. (2015) ressaltam que a intensidade da fluorescência de uma espécie é proporcional à sua massa, fator primordial para análises quantitativas. Sartori e Loreto (2009) ressaltam que a fluorescência é uma ferramenta extremamente importante para investigação em inúmeras áreas, como em processos fotossintéticos, sequenciamento de DNA, estruturas celulares e expressão gênica, além da identificação, separação, purificação e quantificação de diversos compostos.

## 4.6 Quinina

### 4.6.1 Aspectos Históricos

No século XVII, a quinina já era conhecida pelos índios peruanos como ingrediente da infusão chamada “quina-quina” (Figura 31), tendo curado de febres intensas membros da realeza espanhola em Chinchón, no Peru. Em homenagem à condessa de Chinchón, que ao ser curada da doença que hoje conhecemos como malária, passou a distribuir a infusão para os enfermos, criou-se o gênero *Cinchona* (AMURRIO, 2001).

**Figura 31: Cinchona calisaya. Ilustração de Hermann A. Köhler ( XIX) e sua casca (à dir.)**



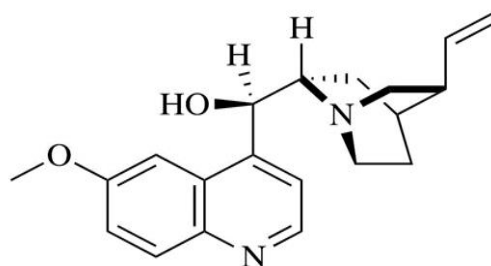
Fonte: Química Nova interativa, disponível em < <http://qnint.sbg.org.br>> Acesso fev/2020

A substância, até então um pó feito com as raízes da árvore, passou a ser vendida na Europa pelos padres jesuítas. Em um momento histórico de grandes divergências religiosas, houve rejeição ao “medicamento católico”: O Rei Charles II da Inglaterra, acometido por forte febre, recusou o medicamento e só foi medicado quando, sem saber, recebeu a substância em outra formulação pensando se tratar de um “medicamento protestante” (OLIVEIRA; SZCZERBOWSKI, 2009).

Em 1820, extraiu-se do pó o alcaloide que viria a atuar como princípio ativo em medicamentos. De acordo com Oliveira e Szczerbowski (2009), divergências e conflitos delinearão este processo, com as proibições das exportações de sementes da árvore, disputas comerciais que levaram ao Peru a perda do controle do mercado e ascensão da Alemanha no comércio de quinina. Até hoje a síntese da quinina é envolta por polêmicas, visto que a complexidade de sua estrutura (Figura 32) desencadeou processos de obtenção que após publicados, não foram reproduzidos de forma a se obter o produto desejado.

De acordo com Camargo (1995), a quinina foi, por mais de três séculos, a única substância eficaz no tratamento da malária (*malária*, ar ruim ou nocivo; do latim, *palus*, pântano). Estabeleceu-se como o sabor mais amargo conhecido pelo paladar humano, já que uma molécula poderia ser reconhecida sensorialmente entre 36 milhões (AMURRIO, 2001).

**Figura 32: Estrutura atribuída à Quinina**



### **Quinina**

Fonte: Scielo <sup>13</sup>

Atualmente, a quinina pode ser encontrada em bebidas como a água tônica, geralmente em uma concentração máxima de  $60 \text{ mg L}^{-1}$ , conferindo ao produto o sabor amargo característico em contraste com o sabor adocicado proporcionado pela sacarose (MINIM, 2009). Segundo Oliveira et al. (2015), o próprio nome da bebida refere-se aos efeitos terapêuticos associados ao soluto em questão.

#### **4.6.2 Quinina e análise fluorimétrica**

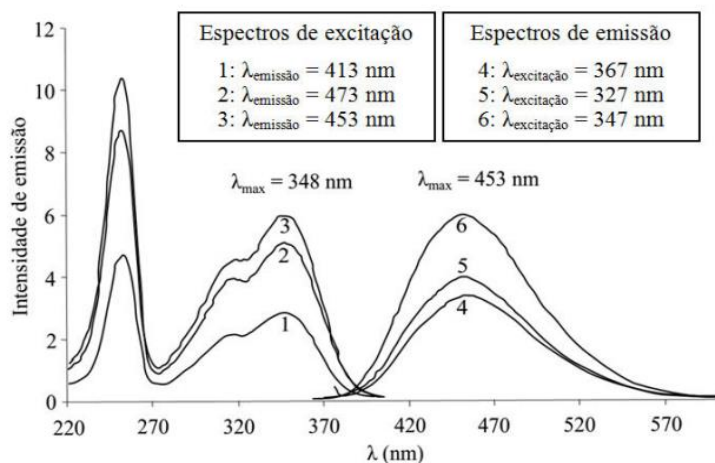
O meio ácido favorece a fluorescência do quinina porque favorece a sua protonação, estabilizando-a, e geralmente é obtido através da adição de ácido sulfúrico:

A quinina é um composto que apresenta alta fluorescência em soluções ácidas diluídas, podendo ser determinado em quantidades traço. O sulfato de quinina é utilizado como padrão pelos fabricantes de fluorímetros e espectrofluorímetros para indicar a sensibilidade de seus equipamentos. (Oliveira et al., 2015, p. 2449)

Através da análise do espectro de excitação e emissão do quinina em meio ácido em diferentes comprimentos de onda mostrado a seguir (Figura 33), identifica-se um pico no espectro de excitação do quinina na região de  $240 \text{ nm}$ , mas uma fonte com este comprimento de onda máximo, além de encarecer consideravelmente o equipamento, poderia resultar em erros de medição devido à pequena faixa de trabalho (aproximadamente  $15 \text{ nm}$ ). Oliveira et al. (2015) ressaltam que é interessante a utilização de radiação incidente com pico máximo na faixa de  $400 \text{ nm}$  ( $350\text{-}450 \text{ nm}$ ), embora para alguns casos onde se necessite de maior energia menores comprimentos de onda), seja indispensável a troca da fonte.

<sup>13</sup> Disponível em <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422017000700791&lng=p&nrm=iso](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422017000700791&lng=p&nrm=iso)> Acesso em 03/08/2020

**Figura 33: Espectros de excitação/emissão onda para a quinina em meio ácido**



Fonte: Aucejo, Estellés e Hernández (2010) apud Oliveira et. al. (2015)

De acordo com Juliano (2012), a absorção de radiação pela quinina em 250 nm ou 350 nm resultam na mesma emissão a 450 nm, fato que se deve ao processo de desativação por conversão interna.

Outro fator importante, enfatizado por Oliveira et al. (2015) é o efeito supressor provocado geralmente por haletos. O fenômeno ocorre porque estes agentes desativadores recebem energia da molécula excitada por processos não radioativos, fazendo com que estas retornem ao nível fundamental de energia sem emissão de radiação, conseqüentemente reduzindo o rendimento quântico. A regularidade deste efeito, chamado *quenching*, torna possível até mesmo a quantificação de cloreto (ânion não fluorescente) por meio de uma curva analítica de supressão de fluorescência por diferentes concentrações de cloreto. De acordo com Oliveira, a curva analítica neste caso, é obtida através do logaritmo da concentração de cloreto versus o sinal de intensidade de fluorescência, que resulta em uma curva com coeficiente linear negativo, visto que “a magnitude da supressão da fluorescência da quinina é proporcional à quantidade de cloreto na mistura” (OLIVEIRA et.al., 2015, p. 2452).

Desta forma, a determinação do teor de quinina em água tônica através de um equipamento de fácil construção abre possibilidades para outras análises e abordagens, como estruturas e funções de compostos orgânicos, análise do contexto histórico de sua descoberta, entre outras. Tais abordagens, se trabalhadas de forma interdisciplinar, poderão tornar o processo de ensino e aprendizagem ainda mais amplos, eficaz e atrativo para os discentes.

## 4.7 Diclofenaco

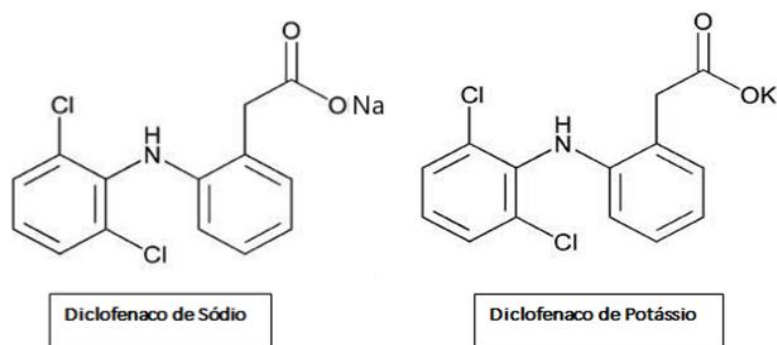
### 4.7.1 Aspectos Gerais

As inflamações são fenômenos complexos desencadeados por lesões celulares e representam uma resposta do organismo. Geralmente são tratadas através da administração de anti-inflamatórios não esteroides (AINE), substâncias químicas de composição química variada e diferentes potenciais terapêuticos que inibem a enzima cicloxigenase e podem ser encontrados nas mais variadas formas de administração: oral, parenteral, dermatológica, retal, oftalmológica, etc. (GOMES, 2014; GOUDA et. al., 2013; SILVA, NERY E FREGONEZI, 2017).

Um medicamento muito utilizado no tratamento das inflamações é o diclofenaco (de potássio ou sódio), um AINE da classe do ácido fenilacético sintetizado através de modelagem molecular, rapidamente absorvido pelo organismo (GOMES, 2014). Adotado para o tratamento a curto prazo de dores agudas, é um pó cristalino branco, com características ácidas, cuja solubilidade depende do pH do meio. Silva, Nery e Fregonezi (2017) descrevem-no como ligeiramente solúvel em água e bastante solúvel em etanol e metanol.

GOUDA et. al. (2013) destaca que, assim como outros AINE's, a estrutura do diclofenaco apresenta grupos hidrofílicos (grupos carboxílicos ou enólicos) e lipofílicos (anéis aromáticos, halogênios).

**Figura 34: Estruturas do Diclofenaco de Sódio e Diclofenaco de Potássio**



Fonte: Curso de Farmácia – URI <sup>14</sup>

<sup>14</sup> Disponível em <http://cursodefarmaciauri.blogspot.com/2016/11/diclofenaco-sodico-vs-potassico.html> Acesso 02/02/20

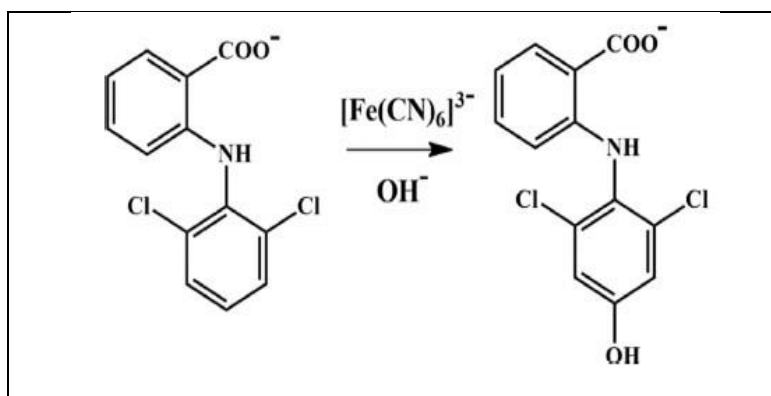
Geller et. al. (2012) ressalta que embora este medicamento seja largamente prescrito em todo o mundo e efetivamente proporcione alívio da dor, o tratamento com o mesmo é frequentemente associado a lesões, que vão de sangramentos e ulcerações até, em casos mais graves, a perfuração da parede gastrointestinal. Tal fato é corroborado por Gouda et. al. (2013), que aponta o fato de que os AINE's são absorvidos pelo sistema gástrico em sua forma protonada (lipofílica). Estes autores mencionam ainda que, em sua maioria, os anti-inflamatórios não esteroides são metabolizados no fígado, podendo ocorrer o acúmulo dos mesmos nos organismos mesmo quando o tratamento é realizado através da administração de doses normais (GOUDA et. al., 2013).

A determinação da concentração de diclofenaco em medicamentos abre uma ampla possibilidade de abordagens, dentre as quais podemos destacar a estruturas de compostos orgânicos, reações químicas, interação do princípio ativo com o organismo e temas como automedicação e suas consequências.

#### 4.7.2 Diclofenaco e análise fotométrica

Gouda et. al. (2013) e Pochivalov et. al. (2017) propõem métodos de determinação da concentração de diclofenaco em amostras de medicamento baseadas em sua reação com ferricianeto de potássio em meios de hidróxido de sódio. A reação é possível porque, segundo Pochivalov et. al. (2017, p.160), “o hidróxido de sódio promove a reação de oxidação do diclofenaco, melhorando as propriedades oxidantes do ferricianeto de potássio e estabiliza adicionalmente o produto colorido de acordo com o mecanismo de reação”. A reação, visualizada através da alteração da cor da solução de incolor para alaranjado, é mostrada na Figura 35:

Figura 35: Oxidação do diclofenaco pelo íon ferricianeto em meio alcalino



Fonte: Pochivalov et. al. (2017)

García et. al. (1998) destacam ainda que a curva de calibração do complexo formado é linear na faixa de concentração de 02- 20 mg, sendo o limite de detecção  $0,05\text{mg L}^{-1}$ . O produto da reação apresenta absorvância máxima em 453 nm e decompõe-se com o passar do tempo (POCHIVALOV et. al., 2017).

#### **4.8 Equipamentos similares descritos na literatura**

Muitos equipamentos voltados para a determinação fluorimétrica e fotométrica vem sendo propostos, com o intuito de oferecer uma alternativa de aplicação dos métodos com um custo acessível e obtenção de dados quantitativos com desempenhos analíticos bastante significativos. Rogovski (2014) propõe a construção de um espectrofotômetro utilizando o Arduíno para a obtenção dos dados; Reis (2014) desenvolve um equipamento multifuncional para análises turbidimétricas, fotométricas, nefelométricas e fluorimétricas utilizando um cilindro de nylon; Oliveira (2015) propõe a construção de um detector cuja acoplagem ao smartphone possibilita o tratamento de imagens para obtenção de dados quantitativos, entre outros.

Para a construção do equipamento multifuncional descrito neste trabalho, foi realizada a impressão da estrutura do mesmo em 3D e utilizou-se componentes eletrônicos de baixo custo (LED, LDR, resistor). Buscou-se também proporcionar, através do texto deste trabalho, um material para complemento e suporte para professores que optarem por abordagens interdisciplinares sobre a interação da luz com a matéria.

## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **5.1 Visão geral dos métodos e da pesquisa**

A metodologia utilizada envolveu a pesquisa bibliográfica e exploratória sobre a importância da experimentação em sala de aula, a necessidade de abordar conceitos contemporâneos das áreas de Química e Física, além de materiais e métodos para a construção do equipamento proposto e alternativas para a aplicação do equipamento. Optou-se por partir de uma abordagem histórica, possibilitando a análise dialética das teorias, a humanização do cientista, a compreensão sobre as constantes transformações no mundo e o desenvolvimento do interesse do aluno pelo conhecimento científico.

O plano de trabalho subsequente à pesquisa bibliográfica consistiu na exploração da literatura em termos de recursos viáveis e de baixo custo para a construção de um equipamento compacto, portátil, robusto, de fácil construção e aplicação.

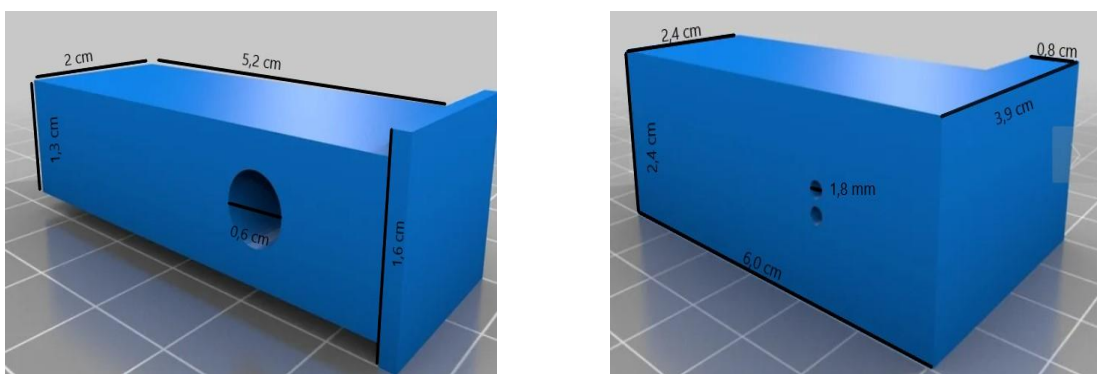
Este trabalho apresenta características descritivas e explicativas, visto que objetiva também a sua aplicação no Ensino Médio e Superior. Para tal, realizou-se uma pesquisa bibliográfica e posteriormente, a organização de dados e informações em uma sequência de procedimentos que possibilitem ao docente a construção de um equipamento multifuncional e o desenvolvimento de abordagens com ampla possibilidade para transposição didática e interdisciplinaridade.

## 5.2 Construção do equipamento

### 5.2.1 Estrutura do equipamento

O equipamento foi construído a partir do modelo disponível no site *Thingiverse*<sup>15</sup>. O modelo em questão é composto por dois elementos principais: um compartimento para cubeta, no qual é inserido o LDR e um anteparo que tem por função vedar a entrada de luminosidade no primeiro (Figura 36). Nele, é inserido o LED, cuja radiação atenuada pela solução será detectada pelo fotorresistor, fixado a 180°, possibilitando as análises fotométricas.

**Figura 36: Componentes e medidas do equipamento: suporte vedador para instalação do LED (à esquerda); e suporte para cubeta com orifícios para inserção do LDR (à direita)**

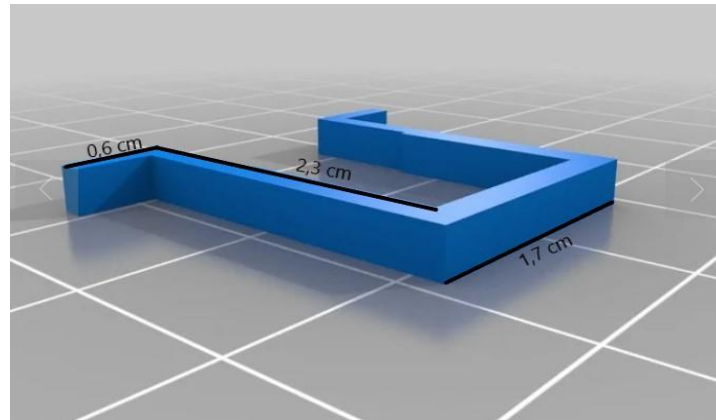


Fonte: Adaptado de <https://www.thingiverse.com/thing:2760937> Acesso em 13 fev 2020.

O equipamento conta ainda com um gancho removível (Figura 37) que se encaixa no compartimento da cubeta, o que descarta a necessidade de colocar o equipamento na horizontal para a remoção da mesma.

<sup>15</sup> Disponível em <https://www.thingiverse.com/thing:2760937> Acesso em 13 fev 2020.

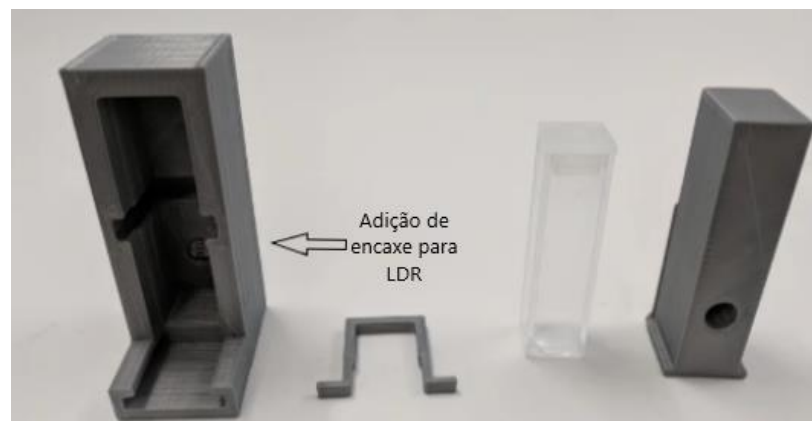
**Figura 37: Gancho auxiliar para manuseio da cubeta**



Fonte: Adaptado de <https://www.thingiverse.com/thing:2760937> Acesso em 13 fev 2020.

Para ampliação da gama de análises possíveis através do equipamento, adicionou-se um novo encaixe, com dois orifícios para inserção de outro LDR a 90° do feixe de luz. Tal modificação foi realizada através do site *Tinkercad*<sup>16</sup>. Desta forma, o aparelho teve sua função ampliada ( Figura 38), podendo ser utilizado como fotômetro ou como fluorímetro, de acordo com a posição do LDR no qual é realizada a medida de resistência através de um multímetro.

**Figura 38: Modelo de suporte para cubeta e adaptação necessária**



Fonte: *Thingiverse*

A impressão do modelo deu-se através de uma impressora 3D *Creativity Ender 3 Pró*, utilizando-se do programa fatiador *Ultimaker Cura 4.5*. Atualmente muitos estabelecimentos realizam trabalhos envolvendo impressão 3D a um custo acessível, mas cabe ressaltar que o modelo também pode ser facilmente replicado utilizando a madeira, materiais recicláveis, entre outros, em substituição ao ácido polilático (filamento PLA).

<sup>16</sup> Disponível em <https://www.tinkercad.com/> Acesso em 20/02/2020.

### 5.2.2 Fonte de radiação

Como fonte de radiação foi utilizado um LED roxo/UV alto brilho 3,2V de 5 mm com emissão na faixa espectral 395-400 nm, corrente 20mA e potência 0,05 W.

**Figura 39: LED roxo/UV 395-400 nm**



Fonte: Banco de imagens da internet

Cabe salientar que, para medidas de fluorescência, o LED em questão geralmente se mostra eficaz, embora para a função fotométrica é possível que sejam necessária a troca do mesmo de acordo com o comprimento de onda adequado para cada análise, ou seja, naquele onde a solução com o analito apresente maior (ou significativa) absorvância.

### 5.2.3 Fonte de alimentação

Utilizou-se uma fonte de alimentação de corrente e tensão contínuas, com saída de respectivamente 1A e 5V, provenientes de um carregador de smartphone. Uma das extremidades do cabo foi ligada diretamente ao LED. Dada a diferença entre a tensão da fonte de radiação e da fonte de alimentação, tornou-se necessária a adição de um resistor de 100  $\Omega$  ligado em série no circuito. A extremidade USB, com adaptador removível, garantiu a portabilidade do equipamento, ao apresentar a possibilidade de ser conectada à rede elétrica, a um notebook ou a uma bateria externa. Nestes dois últimos, a corrente pode ser reduzida para a metade (0,5A), o que não interfere no correto funcionamento do LED (0,02A).

### 5.2.4 Detector da radiação atenuada

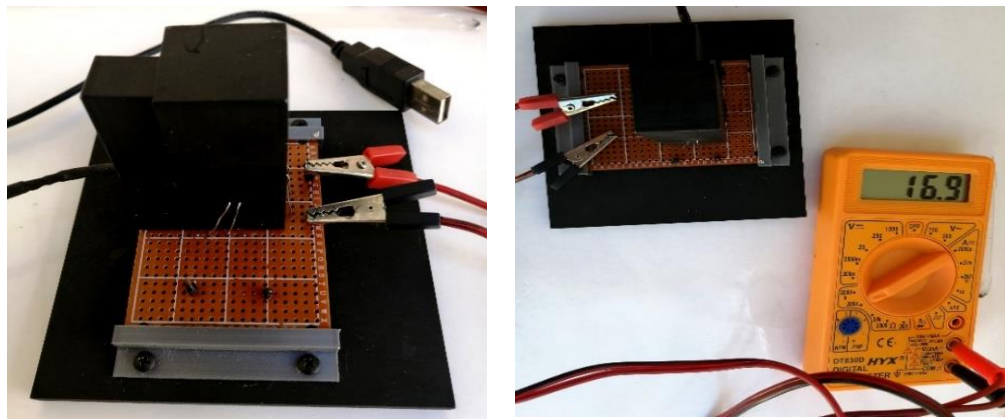
Inseriu-se um LDR 5mm como célula fotossensível para detecção da radiação atenuada na posição de 90° ao feixe de radiação para as análises fluorimétricas e outro a 180° para análises fotométricas. A leitura dos dados quantitativos de resistência foi realizada através de um multímetro digital e posteriormente convertida em condutância e absorvância.

## 5.3 Procedimento Experimental

### 5.3.1 Estrutura final do equipamento construído

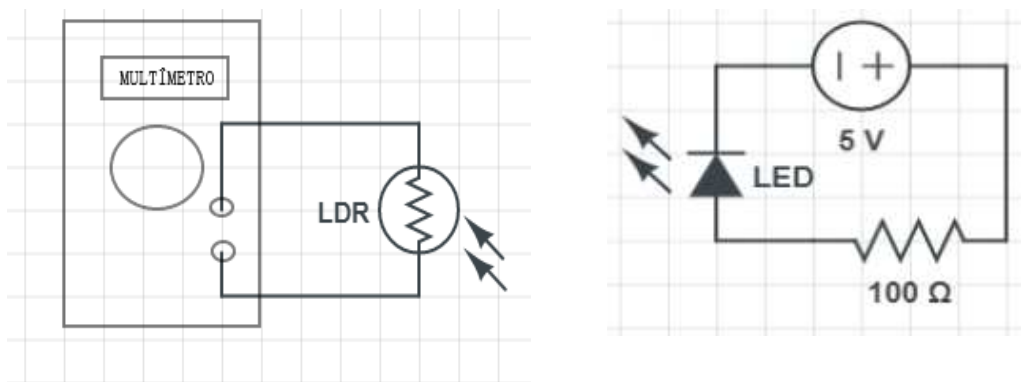
De acordo com as etapas já descritas na Seção 5.2 deste trabalho, pintou-se toda a estrutura do equipamento com uma tinta spray multiuso de cor preta fosca. Os componentes foram inseridos, conforme anteriormente descrito e em seguida, buscou-se uma forma de ajustar os circuitos e o equipamento para melhor organização e para maior estabilidade durante os experimentos. A Figura 40 mostra a estrutura final do equipamento:

**Figura 40: Estrutura Final do Equipamento:** Multímetro conectado ao LDR a 180° da fonte de radiação (função fotometria, à esquerda); Multímetro conectado ao LDR em posição de 90° da fonte de radiação (função fluorimetria, à direita)



Para isso, utilizou-se uma placa de fenolite perfurada 5 x 7 cm à qual foi acoplado o equipamento construído e pela qual foram inseridos os terminais do LDR e do LED.

**Figura 41: Circuitos elétricos dos fotorresistores (à esquerda) e LED (à direita)**



Ao fim deste processo, utilizou-se uma placa de MDF preta para afixação de todo o conjunto, com o intuito de reduzir possíveis interferências e dificuldades de manuseio advindas do movimento e oscilação do mesmo.

### 5.3.2 Reagentes e amostras

As soluções foram preparadas com água ultrapura (resistividade  $> 18,0 \text{ M}\Omega \text{ cm}$ ) obtida de um sistema Millipore Milli-Q (EUA). Todos os reagentes utilizados neste trabalho foram de grau analítico e todas as soluções foram preparadas a partir da diluição em água ultrapura.

### 5.3.3 Soluções e amostras utilizadas na Análise Fluorimétrica

A solução estoque de cloreto de quinino padrão 45 ppm (m/v) foi preparada dissolvendo-se massa adequada deste sal em água ultrapura, em meio de  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  e diluição até o volume de 100 mL. As demais soluções de cloreto de quinino padrão foram preparadas por meio de diluições adequadas com água ultrapura em meio de ácido sulfúrico  $1 \text{ mol L}^{-1}$ .

Para a determinação da concentração de quinino em água tônica, adquiriu-se uma amostra de água tônica da marca Antartica® em supermercado da cidade de Viçosa-MG, através da qual foram preparadas alíquotas transferindo-se 5 mL da mesma para um balões volumétricos de 10 mL, adicionando-se em seguida 1 mL da solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  e água até completar o volume, obtendo-se assim, soluções com metade da concentração original.

### 5.3.4 Soluções e amostras utilizadas na Análise Fotométrica

Com a finalidade de realizar um estudo para averiguar as concentrações ideais dos reagentes, fixou-se a concentração de NaOH em  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  em quatro soluções de diclofenaco  $20 \text{ mg L}^{-1}$  e variou-se a concentração de  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  entre  $0,01$ -  $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ . Repetiu-se o procedimento através da fixação da concentração de  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  em  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  e variação da concentração de NaOH entre  $0,01$  -  $1,5 \text{ mol L}^{-1}$ .

A solução estoque de diclofenaco de sódio padrão  $100 \text{ mg L}^{-1}$  foi preparada a partir da dissolução da massa adequada do princípio ativo em água, em meio de NaOH  $1 \text{ mol L}^{-1}$  e  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . As demais soluções de diclofenaco padrão foram preparadas a partir da diluição de volumes adequados da solução estoque em água.

Para a determinação da concentração de diclofenaco em medicamentos, amostras de Belfaren® e Sodix®, ambos rotulados com concentração de 50 mg de diclofenaco por comprimido, foram adquiridas em farmácias da cidade de Astolfo Dutra-MG.

As soluções dos medicamentos nas análises foram preparadas a partir da trituração de um comprimido de cada marca, solubilização em água, filtração, transferência para balão volumétrico de 500 mL, adição de massa adequada de NaOH e  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  para obtenção das

concentrações de  $1 \text{ mol L}^{-1}$  e  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , respectivamente. Em seguida, realizou-se a filtração para remoção de concomitantes insolúveis em água indicados na bula dos medicamentos e o acerto do volume do solvente, obtendo-se a solução de cada medicamento com concentração teórica de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  de diclofenaco. As demais amostras com os medicamentos foram preparadas a partir da diluição de volumes adequados da solução estoque.

### **5.3.5 Determinação da concentração de quinina em água tônica**

A curva de calibração foi construída através das análises de soluções de quinino no intervalo de concentração entre 0 – 45 ppm. Para tal, realizou-se a medida de resistência, em triplicata, e posteriormente realizou-se a conversão dos valores obtidos em condutância, cujos resultados teóricos deveriam demonstrar proporcionalidade em relação à fluorescência emitida pelas alíquotas analisadas.

A análise das amostras de água tônica foi realizada de forma análoga, os resultados obtidos para condutância foram tabelados e através deles realizou-se a conversão dos valores obtidos em concentração de quinino, por meio da equação da reta ajustada na curva de calibração.

### **5.3.6 Determinação da concentração de diclofenaco em medicamentos**

Realizou-se inicialmente um estudo para verificação das concentrações ideais de NaOH e  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  para obtenção da complexação efetiva de diclofenaco de sódio, conforme descrito no item 5.3.3, através do qual buscou-se a realização dos ajustes para a obtenção de maior resistência (ou maior absorvância).

Desta forma, foi possível realizar a reação química entre diclofenaco na faixa de concentração 0-20  $\text{mg. L}^{-1}$  e NaOH e  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  nas concentrações de mais indicadas. As medidas foram realizadas em triplicata e os valores de resistência convertidos em condutância e absorvância, com posterior construção da curva de calibração.

Os testes com as amostras foram realizados em triplicata, em duas diferentes concentrações para cada medicamento. Os resultados foram convertidos em absorvância e através da equação da reta fornecida pela curva de calibração ajustada, calculou-se a concentração de diclofenaco nos medicamentos analisados.

## 5.4 Validação dos resultados

### 5.4.1 Validação da função fluorimétrica: Método Comparativo

Os espectros de emissão de fluorescência foram registados por um espectrofotômetro de fluorescência Avaspec-HS2048XL (Avantes, Holanda). Uma cubeta de quatro faces polidas com caminho óptico de 1cm foi utilizada para a realização das medições.

### 5.4.2 Validação da função fotométrica: Ensaio por adição e recuperação

A validação do método fotométrico foi realizada através do ensaio de recuperação, que consiste na mistura de duas soluções com concentrações conhecidas, sendo uma delas a solução padrão utilizada para a construção da curva de calibração e a outra, a amostra de análise para a qual se busca uma resposta quantitativa. Os cálculos teóricos indicam a concentração esperada após processo, enquanto a análise através do método em questão apresenta a concentração obtida.

$$\text{Recuperação (\%)} = \frac{\text{Concentração obtida}}{\text{Concentração esperada}} \times 100 \quad \text{Equação (32)}$$

O ensaio de recuperação foi realizado através da mistura de diferentes volumes da solução padrão de diclofenaco e da solução do medicamentos, a saber: volumes de 1 mL, 2,5 mL e 25 mL da solução padrão de diclofenaco a 50 mg L<sup>-1</sup> adicionados, respectivamente, a 200 mL, 50 mL e 50 mL das soluções de Belfaren® e Sodix® a 5 mg L<sup>-1</sup>.

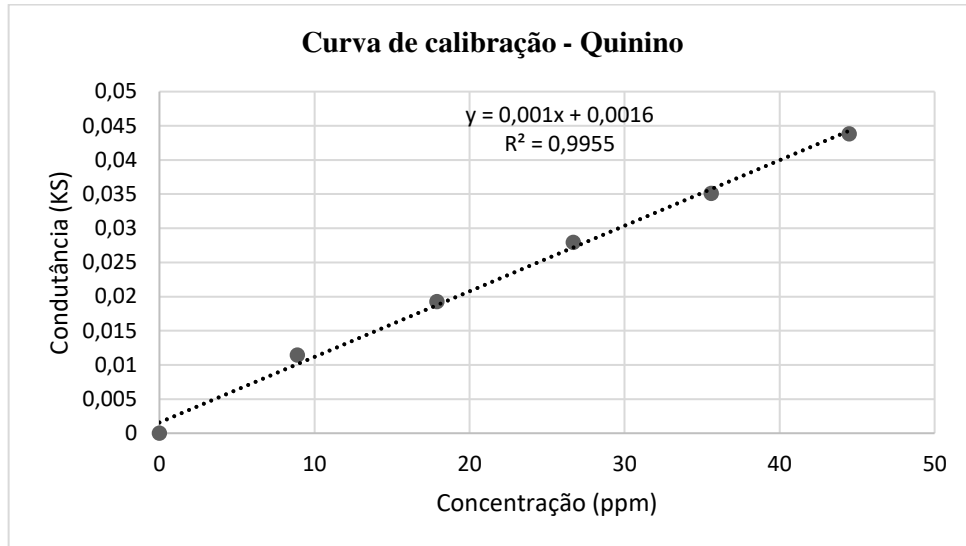
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Aplicação e validação da função fluorimétrica do equipamento

#### 6.1.1 Determinação e validação da concentração de quinina em água tônica

Através do equipamento construído, a resistência referente a cada solução foi mensurada em triplicata e convertida em condutância ( $G = \frac{1}{R}$ ), cujos valores são proporcionais à luminosidade detectada e podem ser utilizados como sinais de fluorescência. Para as medidas de fluorescência, optou-se por utilizar os valores de condutância devido à proporcionalidade linear com relação à fluorescência. Para obtenção da curva analítica, o valor de condutância mensurado para o branco foi subtraído dos demais resultados. A faixa linear para a concentração

de cloreto de quinino foi observada no intervalo entre 0 e 45 ppm (0 a 0,138 mol L<sup>-1</sup>), sendo representada pela equação  $y = 0,001x + 0,0016$ , com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9955, onde  $y$  representa a medida de condutância, em kS e  $x$ , a concentração do analito em ppm:



A repetibilidade do procedimento foi determinada para concentrações de soluções de referência de cloreto de quinino de 5 e 40 ppm, obtendo-se desvios padrões relativos de 0,8 e 3,1%, respectivamente. Para a análise quantitativa do quinino em água tônica, as soluções acidificadas e diluídas à metade da concentração original foram submetidas à análise e os resultados estão apresentados na tabela a seguir:

**Tabela 3: Respostas do equipamento à análise de concentração de quinino em água tônica**

Amostra	Resistências obtidas (kΩ)	Condutâncias obtidas (kS)	Conc. alíquotas diluídas (ppm)	Conc. (ppm) alíquota concentrada/ método proposto	Concentração/ método comparativo	RSD% *
Antartica®	23,8 ± 0,8	0,04 ± 0,02	22,8 ± 1,4	45,6 ± 2,8	46,5 ± 1,2	1,8

\* Erro relativo entre método proposto e método comparativo

A análise, realizada em triplicata, apontou uma concentração média da água tônica em 45,65 ppm de quinino. Observou-se que a variação da luminosidade externa apresentou uma pequena influência nas medidas de resistência.

A validação dos resultados obtidos foi realizada através do método comparativo empregando-se um espectrofotômetro de fluorescência, conforme descrito na seção 5.4.1. Os resultados obtidos, provenientes das medições em triplicata, indicaram a concentração média de 46,50 ppm de quinino na água tônica. Desta forma, o valor obtido através da análise realizada no equipamento construído corresponde a 98,17% do resultado das medições em equipamento comercial.

## 6.2 Aplicação e validação da função fotométrica

### 6.2.1 Concentração ideal de reagentes para complexação de diclofenaco

A curva de calibração para a determinação da concentração de diclofenaco em medicamentos foi obtida a partir da oxidação do diclofenaco de sódio padrão por ferricianeto de potássio em meio alcalino. As análises foram realizadas em triplicata (RSD 1,9%). A determinação da concentração ideal de NaOH e  $K_3[Fe(CN)_6]$  deu-se através da fixação das concentrações do analito e de uma das variáveis ( Tabela 4).

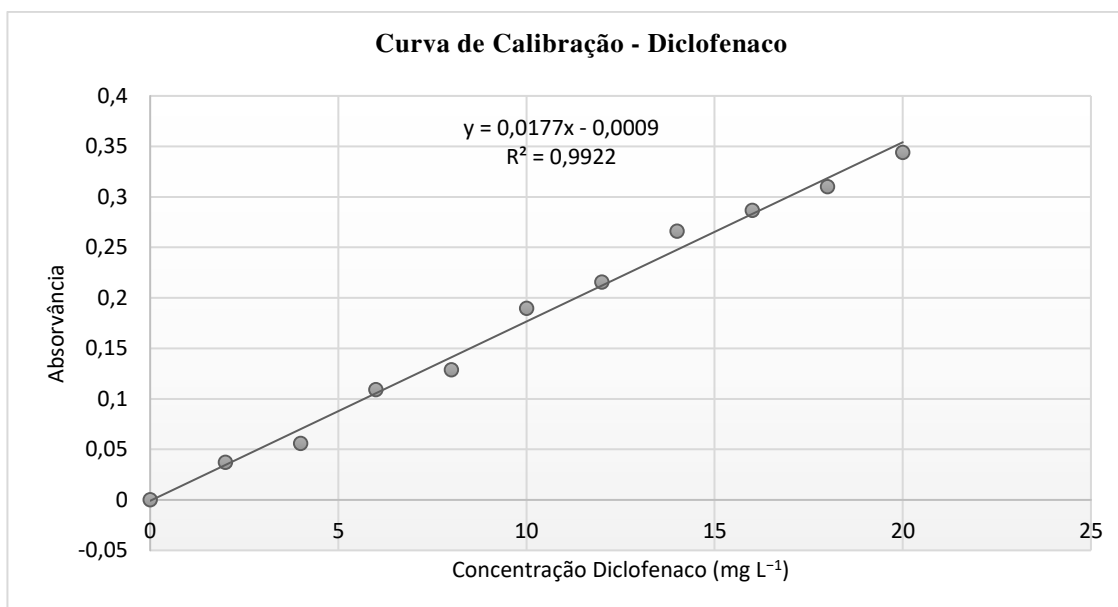
**Tabela 4: Resultados obtidos para diferentes concentrações de NaOH e  $K_3[Fe(CN)_6]$**

Diclofenaco ( $mg L^{-1}$ )	NaOH ( $mol L^{-1}$ )	$K_3[Fe(CN)_6]$ ( $mol L^{-1}$ )	Resistência ( $K\Omega$ )	Absorbância
20	<b>0,1</b>	0,01	2,78	0,22
20		0,05	3,19	0,28
20		<b>0,1</b>	<b>3,57</b>	<b>0,32</b>
20		0,2	3,57	0,32
20	0,01	<b>0,1</b>	3,18	0,27
20	0,5		3,32	0,29
20	<b>1</b>		<b>3,71</b>	<b>0,34</b>
20	1,5		3,62	0,33

Os valores que resultaram em maior resistência foram condizentes com a literatura (GARCÍA et. al., 1998; POCHIVALOV et. al., 2017), estabelecendo-se, portanto, em NaOH  $1 mol L^{-1}$  e  $K_3[Fe(CN)_6]$   $0,1 mol L^{-1}$ . Empregando-se as concentrações supracitadas, obteve-se maior resistência, o que indica menor condutância, traduzindo-se em maior complexação e consequentemente maior absorbância.

### 6.2.2 Determinação da concentração de diclofenaco em medicamentos

A análise consistiu na mensuração da resistência associada a cada solução, em triplicata, com posterior conversão dos resultados em condutância e na obtenção dos valores de absorbância. A curva analítica obtida apresenta faixa linear no intervalo de concentração de diclofenaco no intervalo entre 0 e  $25 mg L^{-1}$  ( $0$  a  $8,45 \times 10^{-5} mol L^{-1}$ ) e pode ser descrita pela equação  $y = 0,0177x + 0,0009$ , com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9922, onde  $y$  representa a absorbância e  $x$ , a concentração do analito em  $mg L^{-1}$ :



A repetibilidade do procedimento foi determinada para concentrações de soluções de referência de diclofenaco de 5 e 15 mg, obtendo-se desvios padrões relativos de 0,6 e 2,8%, respectivamente.

Os testes foram realizados em dois medicamentos comerciais que têm como princípio ativo o diclofenaco: Belfaren® e Sodix®. Amostras com diferentes concentrações foram preparadas por diluição e submetidas à análise em triplicata através do equipamento.

Através da mensuração da resistência, conversão em condutância ( $G = \frac{1}{R}$ ) e cálculo da absorvância, através da equação  $A = -\log \frac{G_{amostra}}{G_{branco}}$ . Utilizou-se a equação da reta da curva de calibração ajustada para a obtenção da concentração das soluções. Os resultados obtidos para diferentes concentrações foram multiplicados pelos fatores de diluição de forma a se obter os valores teóricos para a concentração de um comprimido. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5:

**Tabela 5: Concentração de diclofenaco calculada em comprimidos de Sodix® e Belfaren®**

Amostras	Conc. Rotulada (mg/comp.)	Conc. teórica alíquotas diluídas (mg/comp)	Conc. alíquotas diluídas (mg/ comp)	Conc. Obtidas (mg/ comp)	RSD%*
Belfaren ®	50	10	10,16 ± 0,51	50,8 ± 2,6	-1,6
Sodix ®	50	10	10,86 ± 2,67	54,3 ± 1,6	-8,6

\* Erro relativo entre método proposto e concentração rotulada

Para validação dos resultados encontrados para as concentrações de Belfaren® e Sodix®, realizou-se o ensaio por adição e recuperação.

### 6.2.3 Validação através de ensaio por adição e recuperação

Para validação dos resultados obtidos para a concentração de diclofenaco em medicamentos, realizou-se o procedimento de preparo de soluções a partir da adição entre solução padrão de diclofenaco e solução de análise, em três etapas, visando estabelecer concentrações finais próximas às extremidades das curvas e calibração e em um ponto intermediário da mesma. As concentrações esperadas foram calculadas considerando a concentração da solução com o analito de acordo com as informações do rótulo do medicamento, ou seja, 50 mg por comprimido.

Após o cálculo das concentrações teóricas cada uma das misturas de solução padrão com soluções de Belfaren® foi submetida à análise no equipamento proposto, em triplicata, tendo a resistência a cada uma delas associada convertida em condutância. A absorvância foi calculada e através dela, obteve-se a concentração por substituição das variáveis na curva de calibração, conforme indicado na Tabela 6:

**Tabela 6: Resultados do Ensaio por Adição e Recuperação- Belfaren®**

Amostra	Conc. Teórica (50mg/comp)	Absorvância	Concentrações obtidas	Recuperação
<b>I</b>	5,22 mg L <sup>-1</sup>	0,086 ± 0,001	4,96 mg L <sup>-1</sup> ± 0,001	95,2%
<b>II</b>	7,14 mg L <sup>-1</sup>	0,121 ± 0,001	6,8 mg L <sup>-1</sup> ± 0,3	96,3%
<b>III</b>	20 mg L <sup>-1</sup>	0,336 ± 0,001	19,0 mg L <sup>-1</sup> ± 0,7	95,1%

Repetindo-se o procedimento com as amostras de Sodix®, em triplicata, obteve-se os resultados apresentados na tabela a seguir:

**Tabela 7 – Resultado do Ensaio por Adição e Recuperação - Sodix®:**

Amostra	Conc. Teórica (50mg/comp)	Absorvância	Concentrações obtidas	Recuperação
<b>I</b>	5,22 mg L <sup>-1</sup>	0,084 ± 0,001	5,12 mg L <sup>-1</sup> ± 0,001	98,08%
<b>II</b>	7,14 mg L <sup>-1</sup>	0,120 ± 0,001	6,7 mg L <sup>-1</sup> ± 0,4	95,09%
<b>III</b>	20m mg L <sup>-1</sup>	0,337 ± 0,001	19,1 mg L <sup>-1</sup> ± 0,5	95,5%

A média dos valores obtidos nos testes em triplicata através de soluções de Belfaren® e Sodix® indicam boa aproximação com os resultados esperados, visto que em ambos os ensaios de recuperação e adição obteve-se recuperação média acima de 95%.

### 6.3 Custos gerais da construção do equipamento

Para a impressão utilizou-se filamento PLA (ácido polilático), com o consumo aproximado de 21 gramas do material. O custo, nesta produção, foi equivalente a R\$3,00, visto que 1 Kg do material pode ser comprado em lojas especializadas por aproximadamente R\$150,00. Cabe ressaltar que alguns dos componentes utilizados foram reaproveitados, não sendo necessária a compra de um produto novo, como por exemplo, o carregador de smartphone e a tinta multiuso. Os preços médios dos componentes utilizados estão descritos na Tabela 8:

**Tabela 8: Preços de componentes utilizados para a construção do equipamento**

Componente	Quantidade	Preço total (em R\$)
Ácido polilático	21 gramas	3,00
LED 5mm 3,2V	1 unidade	2,50
Resistor 100 $\Omega$	1 unidade	0,20
Carregador Smartphone	1 unidade	30,00
LDR 5 mm	2 unidades	2,00
Placa de fenolite 5x7cm	1 unidade	2,00
Multímetro	1 unidade	25,00
Placa MDF 10x 10 cm	1 unidade	1,00
Tinta spray multiuso	1 unidade	10,00
Custo total médio		<b>75,70</b>

O preço de um equipamento comercial novo varia entre R\$ 1000 entre R\$3000, valores inacessíveis para muitas escolas brasileiras. Desta forma, é possível concluir que o objetivo de construir um equipamento de baixo custo para a aplicação no ensino foi alcançado.

### 6.4 Sugestões de melhoria no equipamento e futuros trabalhos

Para aumentar a sensibilidade do equipamento e reduzir interferências externas, algumas modificações podem ser realizadas. Entre elas, destaca-se o isolamento da porta cubetas, que pode ser potencializado com a adequação de uma caixa externa, preferencialmente preta. Outras modificações podem surtir efeitos desejáveis, como alterações no design do mesmo de forma que a cubeta seja inserida na parte superior do equipamento e posteriormente isolada com uma tampa vedadora. Também podem ser inseridos “clicks” de fechamento para evitar variações nos resultados entre as medições.

Para trabalhos futuros, pretende-se buscar maior eficácia através das melhorias acima citadas, assim como a realização de testes turbidimétricos e nefelométricos, além de adaptações para a expansão da funcionalidade do mesmo. Pretende-se, ainda, realizar a produção de um material que oriente e auxilie docentes na aplicação do mesmo em aulas práticas, descrevendo roteiros simples e abordagens contextualizadas.

## 7 CONCLUSÃO

Diante dos incontáveis desafios presentes na educação pública brasileira atualmente, especificamente na área de ciências exatas, torna-se necessário inovar através de abordagens que permitam ao aluno o reconhecimento da correlação entre os conteúdos e a aplicação dos mesmos em seu cotidiano. Através de materiais de baixo custo é possível construir um equipamento que auxilie para um ensino e aprendizado amplo, reduzindo a distância e estabelecendo conexões entre tópicos relevantes dos conteúdos de Química, Física e Matemática, entre tantos outros.

O equipamento construído possibilita o aprofundamento dos conceitos e práticas relacionados ao modelo de Bohr e fenômenos de luminescência, absorvância e transmitância, abrindo espaço para abordagens com noções de Física Quântica e análises espectrofotométricas. O método apresentado tem como fundamento principal a conexão entre conteúdos já presentes no Ensino por meio da Física Clássica (resistência, condutância, circuitos simples) e assuntos que deveriam ser inseridos no currículo, mas não o são por falta de recursos ou receio por parte do docente quanto à complexidade dos mesmos.

Os resultados apresentados indicam que o equipamento pode ser construído com poucos recursos, mostrando eficácia relevante para o ensino. Adaptações podem ser realizadas para aperfeiçoamento da sua sensibilidade, como uma caixa protetora que isole ao máximo a influência da luminosidade externa. Embora possa ser considerado desde já como um equipamento acessível, com relação aos recursos necessários para sua construção, acredita-se que a construção do mesmo em madeira tornaria o custo de todo o processo ainda menor.

Ressalta-se que os experimentos podem e devem ser simplificados, de acordo com o público ao qual se destina. A transposição didática é a peça chave para o avanço gradativo do ensino de Ciências em geral. Uma simples diluição de um suco em pó ou concentrado ou ainda de bebidas de coloração/ fluorescência detectável podem ser utilizadas para realizar a construção da curva de calibração e posteriormente serem aplicadas não só para a determinação da concentração do analito, mas também para apresentar a correlação entre os conceitos físicos, matemáticos e químicos neste trabalho abordados, de forma transdisciplinar.

## 8 REFERÊNCIAS

ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

AMURRIO, David. La quinina. Historia y Síntesis. **Acta Nova**, San Pablo, Bolívia, v. 1, n. 3, p.241-244, 2001.

AVALOS, Santiago Heredia. Experiencias para observar el fenómeno de fluorescencia con luz ultravioleta. **Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias**, Cádiz, España, v. 5, n. 3, p.377-381, set. 2008.

AZEVEDO, Aissa L.; SOUSA, Anderson K.S.; CASTRO, Tiago J. Espectroscopia óptica de baixo custo: uma estratégia para a introdução de conceitos de física quântica no ensino médio. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 41, n. 4, e20180349, 2019. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172019000400602&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000400602&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 26 Dez. 2019. Pub. Abr 29, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0349>.

BASQUES, J.C. **Fotometria e Padronização**. Lagoa Santa, MG: Labtest Publicações, 2010.

BACHELARD, G. **A formação do Espírito Científico**. Trad. E. S. Abreu. Rio de Janeiro. Ed. Contraponto, 1996.

BATISTA, T.P. **Experimentos de fluorescência utilizando Leds**. 2013. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Industrial, Ciências Exatas, Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, Assis, 2013.

BEZERRA, V. A. Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física. **Scientiae Studia**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.177-220, jun. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-31662006000200003>.

BRAGA, J. P.; FILGUEIRAS, C. A. L. **O centenário da Teoria de Bohr**. Quím. Nova .2013, vol.36, n.7, pp.1073-1077.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto no. 2314, de 04 de setembro de 1997. Publicado no **Diário Oficial da União** de 05/09/1997, Brasília, seção 1, p.19549.

BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. Secretaria da Educação Básica. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio: Ciências da Natureza e Matemática**. Brasília, 2000.

BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. Secretaria da Educação Básica. **Orientações Curriculares para o Ensino Médio**. Brasília, 2006.

BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. Secretaria da Educação Básica. **Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Básica**. Brasília, 2013.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**. Versão 1, outubro 2015. Brasília.

BROWN, Theodore; LEMAY, H. Eugene; BURSTEN, Bruce E. **Química: a ciência central**. 9 ed. Prentice-Hall, 2005.

CAMARGO, E.P. A malária encenada no grande teatro social. **Estudos Avançados. Doença e Sociedade** 9: 3-9, 1995.

CARRASCOSA, J.; PÉREZ, D.G.; VILCHES, A.; VALDÉS, P. **Papel de la actividad experimental en la educación científica**. Caderno Brasileiro de Ensino Física, v. 23, n. 2: p. 157-181, ago. 2006.

CARVALHO, A. M. P. **Ensino de Ciências-unindo a pesquisa e a prática**. São Paulo. Cengage Learning Editores, 2004

CUSTODIO, R.; KUBOTA, L. T.; ANDRADE, J. C. Lei dos processos de absorção da radiação. **Revista Chemkeys**, [s.l.], n. 3, p.1-5, 17 set. 2018. Universidade Estadual de Campinas. <http://dx.doi.org/10.20396/chemkeys.v0i3.9615>.

FILGUEIRAS, C. A. L. A espectroscopia e a química: da descoberta de novos elementos ao limiar da teoria quântica. **Química nova na escola**, São Paulo, v. 3, mai. 1996

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

GALIAZZI, M. C.; ROCHA, J. M. B.; SCHIMITZ, L. C.; SOUZA, M. L; GIESTA, S.; GONÇALVES, F. P. Objetivos das atividades experimentais no Ensino Médio: a pesquisa coletiva como modo de formação de professores de Ciências. **Ciência & Educação**, Bauru/BR, v.7, n.2, p.249-263, 2001.

GARCÍA, M.S; SOLEDAD; ALBERO, M. ISABEL; SÁNCHEZ-PEDREÑO, CONCEPCIÓN; MOLINA, JOSÉ. Flow-injection spectrophotometric determination of diclofenac sodium in pharmaceuticals and urine samples. **Journal Of Pharmaceutical And Biomedical Analysis**, [s.l.], v. 17, n. 2, p.267-273, jun. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0731-7085\(97\)00195-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0731-7085(97)00195-7).

GELLER, M.; KRYMCHANTOWSKI, Abouch Valenty ; STEINBRUCH Márcio, CUNHA; Karin Soares RIBEIRO , Márcia Gonçalves; OLIVEIRA, Lisa , OZERI, David , DAHER, João Paulo Lima . Utilização do diclofenaco na prática clínica: revisão das evidências terapêuticas e ações farmacológicas. **Revista Brasileira de Clínica Médica**, v. 10, n. 1, p. 29-38, 2012.

GOMES, M. S. ; TREVISAN, L.C.; NÓBREGA, J.A; GOUVEIA, S.T; ROCHA, F. R. P. Integração de técnicas analíticas e proposta de experimentos para cursos de graduação em análise instrumental: uso de espectrômetro de absorção atômica para medidas de absorção molecular. **Quím. Nova** [online]. 2006, vol.29, n.4, pp.868-871. ISSN 0100 4042. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422006000400041>.

GOMES, Paulo Roberto Barros. **Determinação Espectrofotométrica de Diclofenaco de sódio em formulação farmacêutica empregando o conceito de fia-**

**multicomutação.** 2014. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Química Analítica, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2014.

GONÇALVES, D. E. F. et. al. **Importância da calibração de espectrofotômetros UV-VIS nas análises químicas.** Visomes Comercial Metrológica LTDA. São Paulo: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), 2017. 15 p.

GONÇALVES, F. P. e MARQUES, C. A. Contribuições pedagógicas e epistemológicas em textos de experimentação no ensino de química. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 11, n. 2, p. 219-238, 2006.

GOUDA, Ayman A. ; EL-SAYED, Mohamed I. Kotb ; AMIN, Alaa S. ; EL SHEIKH , Ragaa. Spectrophotometric and spectrofluorometric methods for the determination of non-steroidal anti-inflammatory drugs: A review. **Arabian Journal Of Chemistry**, [s.l.], v. 6, n. 2, p.145-163, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.12.006>

HALLIDAY, D., RESNICK, R. **Fundamentos de Física, Ótica e Física Moderna.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v.4, 1991.

JULIANO, Valmir F. **Introdução aos métodos espectroanalíticos II.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 38 slides, color.

KICH, M.; BÖCKEL, W. J. Análise de óleos e graxas em efluentes por espectrofotometria. **Estação Científica (UNIFAP)**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.61-67, 13 out. 2017. Universidade Federal do Amapa. <http://dx.doi.org/10.18468/estcien.2017v7n3.p61-69>.

LEITE, D. O.; PRADO, Rogério Junqueira. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 34, n. 2, p.1-9, jun. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11172012000200015>

LENZ, Guido. **Métodos fotométricos.** Biofísica, UFRGS, 1997

LEWIN, A.M.F e LOMASCÓLO, T.M.M. La metodología científica en la construcción de conocimientos. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 20, n. 2, p. 147-510, 1998

MACHADO, H. A. MORTIMER, F. E. Química para o ensino médio: fundamentos, pressupostos e o fazer cotidiano. In: **Fundamentos e propostas de ensino de química para a educação básica no Brasil.**Org. ZANON, B. L. MALDANER, A. O. – Ijuí: Ed.UNIJUÍ, 2007.-2004 p.-(coleção educação em química)

MENDES, M. F. A.; BENFATO, M. S. **Espectrofotometria.** 2010.. Disponível em <[http://www.ufrgs.br/leo/site\\_espec/bibliografia.html](http://www.ufrgs.br/leo/site_espec/bibliografia.html)> Acesso em 09/05/2019.

MININ, V. P. R.; RIBEIRO, M. M.; VIDIGAL, M. C. T. R.; SANTOS, M. M.; GONÇALVES, M. M. Água tônica: aceitação e análise tempo-intensidade do gosto amargo. **Ciênc. Tecnol. Aliment.** [online]. 2009, vol.29, n.3, pp.567-570. ISSN 0101-2061. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612009000300018>.

MORAES, M. C. **O paradigma educacional emergente**. 13.ed. Campinas/BR: Papirus, 2007. (Coleção Práxis”). ISBN 85-308-0478-3.

MOREIRA, M. A. Quark physics and epistemology. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 29, n. 2, p. 161–173, 2007.

MOURA, J. F. C.; TEIXEIRA, R. M. R.; SILVEIRA, F.L. **Textos de apoio ao professor de física**. Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, 2015.

OLIVEIRA, Alfredo Ricardo Marques de; SZCZERBOWSKI, Daiane. Quinina: 470 anos de história, controvérsias e desenvolvimento. **Química Nova**, Curitiba, v. 32, n. 7, p.1971-1974, 2009.

OLIVEIRA, D. M.; NOVAES, C. G.; SILVA JUNIOR, L. J. C.; PEREIRA, R. S.; BEZERRA, M. A; Desenvolvimento de um Fluorímetro Artesanal e Propostas para sua Aplicação nas Aulas Práticas de Disciplinas de Química Analítica Instrumental nos Cursos de Graduação. **Revista Virtual de Química**, Jequié-B, Brasil, v. 7, n. 6, p.2438-2456, 2015.

OLIVEIRA, L. F. C. Espectroscopia Molecular. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 4, p. 24-30, 2001

OLIVEIRA., M. A. L. **Fundamentos da Espectrofotometria**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011. 55 slides, color.

OLIVEIRA, O.A.; FERNANDES, J. D. G. **Arquitetura Atômica e Molecular: Quantização de energia e o modelo de Bohr**. Natal: Editora da UFRN, 2016. 280 p.

OLIVEIRA, Paulo C. C.; LEITE, Marcos A. P. Espectrofotometria no Ensino Médio: Construção de Um Fotômetro de Baixo Custo e fácil Aquisição. **Química Nova na Escola**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.181-184, 2016. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/0104-8899.20160024>.

OLIVEIRA, F. F. de; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 29, n. 3, p. 447–454, 2007

OLIVEIRA, H.J.S. **Desenvolvimento de um espectrofotômetro para medidas de absorção/emissão na região do visível utilizando mini lâmpada incandescente, mídia de dvd e smartphone**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

OSTEMANN, F.; MOREIRA, M.A. Física Contemporânea em la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. **Enseñanza de las Ciencias**. Barcelona, v.18, n.3, p.391-404, dez. 2000

PAVONI, J.F.; NEVES-JUNIOR, W.F.P.; SPIROPULOS, M.A. ; ARAUJO, D.B. de. **Uma montagem experimental para a medida de fluorescência**. *Rev. Bras. Ensino Fís.* [online].

2014, vol.36, n.4, pp.01-09. ISSN 18061117. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172014000400018>.

PEDUZZI, L.O.Q. **Tópicos de Física Moderna: Introdução à Mecânica Quântica**. Programa de Formação Continuada à Distância. Curso de Complementação para a Licenciatura em Física (Secretaria de Estado da Educação da Bahia, Ba, 2002).

POCHIVALOV, A.; VAKH, C. ANDRUCH, V.; MOSKVIN, L.; BULATOV, A. **Automated alkaline-induced salting-out homogeneous liquid-liquid extraction coupled with in-line organic-phase detection by an optical probe for the determination of diclofenac**. *Talanta*, v. 169, p.156-162. 2017.

RANGEL, Herllaine de Almeida; MERÇON, Fábio. Estudo da emissão por fluorescência de ultravioleta na quantificação de um inibidor de corrosão do tipo sal de amônio quaternário em água. *Química Nova*, [s.l.], v. 35, n. 7, p.1287-1293, 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422012000700002>.

REIS, Rodrigo Alexandre. **Desenvolvimento de equipamento multifuncional portátil de baixo custo para determinações fotométricas, turbidimétricas, nefelométricas e fluorimétricas**. 2014. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araquara, São Paulo, 2014.

ROGOVSKI, R. F. **Construção de Um Espectrofotômetro Como Metodologia Didática**. 2014. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Licenciatura em Matemática, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop-MT, 2014.

SANTANA, F. B.; SANTOS, P. J. S. Espectroscopia e modelos atômicos: uma proposta para a discussão de conceitos de Física Moderna no ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, ago. 2017

SANTOS, A.C. **Abordagem histórica da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão - SE, 2017.

SANTOS NETO, Á. J.; CARRILHO, E. **Curso: Análise Instrumental I**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2017. 72 slides, color.

SARTORI P.H. S, LORETO E.L.S. Medidor de fluorescência caseiro. **Química Nova na Escola**. 2009; 31(2): 150-154. [http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31\\_2/13-EEQ-4508.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31_2/13-EEQ-4508.pdf)

SÉRGIO, A. POMBO, O.; REIS, M. B.; CORDOVIL, J. L. Cartas de problemática. In: (Ed.). **As cartas de problemática de António Sérgio**. Lisboa: CFCUL, 2006

SILVA, B. V. C.; MARTINS, A. F. P. A natureza da luz e o ensino da óptica: uma experiência didática envolvendo o uso da história e da filosofia da ciência no ensino médio. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 2, p. 71-91, 2010.

SILVA, G. S.; BRAIBANTE, M. E. F; BRAIBANTE, H. T. S.; PAZINATO, M. S.;

TREVISAN, M. C. (2014). Oficina temática: uma proposta metodológica para o ensino do modelo atômico de Bohr. **Ciência & Educação (Bauru)**, 20(2), 481-495. <https://dx.doi.org/10.1590/1516-73132014000200014>

SILVA, J. C. J. **Aula 2 – Espectrometria Molecular UV-VIS**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016. 43 slides, color.

SILVA, Fernando Cesar Queiroz da.; NERY, Marlene Maria Fregonezi; FREGONEZI, Marlene Maria. Avaliação da Qualidade Físico-Química dos Medicamentos Contendo Diclofenaco de Potássio; **Visão Acadêmica**, Curitiba, v. 18, n. 4, p.74-83, out. 2017

SILVA, L. D. A.; ZANON, L. B. A experimentação no ensino de Ciências. In: SCHNETZLER, R.P.; ARAGÃO, R. M. R. De (Org.). **Ensino de ciências: fundamentos e abordagens**. São Paulo, Ed. CAPES/UNIMEP, p.120- 153, 2000

SIQUEIRA, M.; PIETROCOLA, M. **A transposição didática aplicada a teoria contemporânea: A física de partículas elementares no ensino médio**. X Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Londrina, 2006.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A., **Princípios de Análise Instrumental**, 5ª ed., Bookman: São Paulo, 2002.

SKOOG, D. A. et.al. **Fundamentos de Química Analítica**, Tradução da 8ª Edição norte-americana, Editora Thomson, São Paulo, 2006.

STEWART, Chris; GIANNINI, John. **Inexpensive, Open Source Filter Fluorometers for Measuring Relative Fluorescence**. Biology Department, St. Olaf College, 1520 St. Olaf Avenue, Northfield, MN 55057, 2016. Disponível em: <<http://pages.stolaf.edu/opn-lab/equipment/>>. Acesso em: 24 fev. 2020.

SOUSA, R. **Espectrofotometria no UV-Vis.**, Juiz de Fora: Departamento de Química - Ice, universidade Federal de Juiz de Fora, 2013. 21 slides, color.

SOUZA, L.A.; SILVA, L. da; HUGUENIN, J.A.O.; BALTHAZAR, W.F.. **Discutindo a natureza ondulatória da luz e o modelo da óptica geométrica através de uma atividade experimental de baixo custo**. *Rev. Bras. Ensino Fís.* [online]. 2015, vol.37, n.4, pp.4311-1-4311-6. ISSN 1806-1117. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11173742013>.

TEIXEIRA, R. M. R. **Roteiros de aula de Física**. 2008. Departamento de Física, Instituto de Física UFRGS. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/tex/fis01101/>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

TENÓRIO, A.; QUINTANA, L. S.; NUNES, W. V.; TENÓRIO, T. Análise de conteúdos de física nuclear em livros escolares brasileiros. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, vol. 14, nº 2, p. 175-199, 2015.

TERRAZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de Ensino médio, **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Santa Catarina - RS. 1992.

VASCONCELOS, E. R. S. (2014). **Detector para raios X usando sensor LDR para**

**mensurar a energia dos fótons emitidos e testar a eficiência de aparelhos hospitalares.**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Biomédica, Publicação N°./2014, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, Faculdade Gama, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104 páginas.

VARELLA, Kawã Gabriel de Almeida; MELO, Jéssica Estevam de; FERREIRA, Caio Toldo; ROTONDO, Marília do Nascimento; OLIVEIRA, Patricia Cristina de. **Iniciativa educacional com materiais de baixo custo.** In: CONGRESSO NACIONAL DE EDUCAÇÃO, 7., 2015, Paraná: PIBID, 2015. p. 11880 - 11887.

**WESENDONK, F. S. O uso da experimentação como recurso didático no desenvolvimento do trabalho de professores de física no ensino médio.** 2015. 297 f.

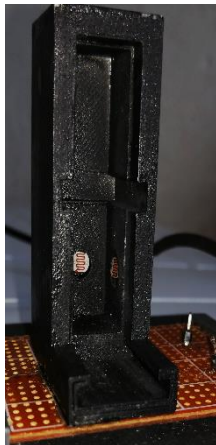
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/154720>>.

## 9 APÊNDICES

### APENDICE I

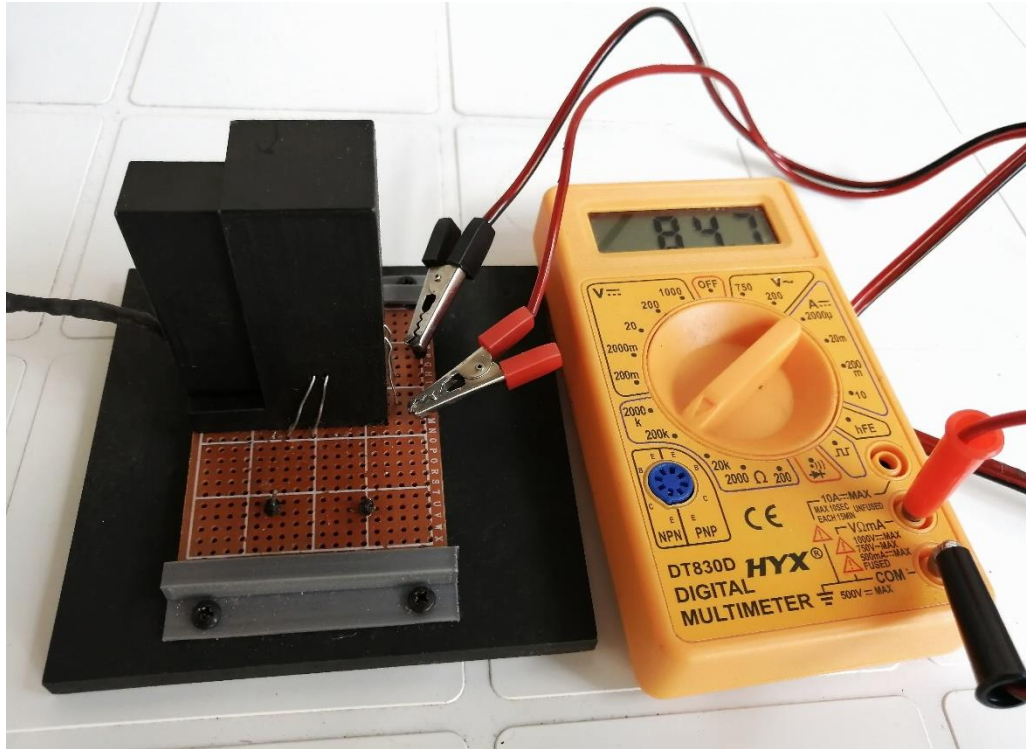
#### Roteiro para construção do equipamento multifuncional

- 1- Acesso ao modelo disponibilizado pelo site Thingiverse em <<https://www.thingiverse.com/thing:2760937>>
- 2- Inserção de 2 orifícios para acréscimo de mais um LDR a 90° da fonte de radiação através do programa *Tinkercad* (< <https://www.tinkercad.com/>>);
- 3- Impressão da estrutura do equipamento;
- 4- Pintura com tinta spray de uso geral, cor fosca preta;
- 5- Inserção dos fotorresistores nos orifícios a 90° e a 180° da fonte de radiação, conforme mostrado na seção 5.2.1 deste trabalho;
- 6- Fixação da estrutura em placa de fenolite, na qual são inseridos os terminais do LDR;
- 7- Fixação deste conjunto em placa de MDF;
- 8- Inserção do LED no anteparo que se encaixa na estrutura descrita no item 5;
- 9- Ligação em série da fonte de alimentação do carregador de smartphone com o resistor e o LED.



## APÊNDICE II

### PRODUTO EDUCACIONAL



O equipamento multifuncional construído é voltado para análises fotoanalíticas e fluorimétricas no processo de ensino e aprendizagem. Seu desempenho mostrou-se satisfatório nos testes realizados: determinação da concentração de quinina em água tônica e diclofenaco em medicamentos.

Os cálculos realizados nas determinações são bastante simples, com ampla possibilidade de abordagens. A construção de curvas analíticas, assim como os cálculos de condutância a partir da resistência e de absorbância a partir da condutância possibilitam ampla interdisciplinaridade entre Química, Física e Matemática. Além disso, de acordo com o analito a ser determinado, novas alternativas de correlação de conteúdos podem ser incorporadas, como contexto histórico, impactos sociais e ambientais, entre outros.