



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

WLLYSSES GUSTAVO MELO NASCIMENTO

A FÍSICA E OFTALMOLOGIA: DO DIAGNÓSTICO Á CORREÇÃO DA VISÃO.

**CAMPINA GRANDE
2025**

WLLYSSES GUSTAVO MELO NASCIMENTO

A FÍSICA E OFTALMOLOGIA: DO DIAGNOSTICO À CORREÇÃO DA VISÃO

Trabalho de Conclusão de Curso Licenciatura Plena em Física apresentado à Coordenação do Departamento do Curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Física Geral.

Orientador: Prof. Dr. Jean Paulo Spinelly da
Silva

**CAMPINA GRANDE
2025**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

N244f Nascimento, Wilysses Gustavo Melo.
Física e oftalmologia: do diagnóstico à correção da visão
[manuscrito] / Wilysses Gustavo Melo Nascimento. - 2025.
52 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) -
Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 2025.

"Orientação : Prof. Dr. Jean Paulo Spinelly da Silva,
Departamento de Física - CCT".

1. Tecnologia óptica. 2. Oftalmologia. 3. Física Médica. I.
Título

21. ed. CDD 530

WLLYSSES GUSTAVO MELO NASCIMENTO

FÍSICA E OFTALMOLOGIA: DO DIAGNÓSTICO À CORREÇÃO DA VISÃO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física

Aprovada em: 13/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **Tâmara Pereira Ribeiro de Oliveira Lima e Silva** (***.421.524-**), em **26/06/2025 08:47:40** com chave **5d109bac528311f08bd51a1c3150b54b**.
- **Ruth Brito de Figueiredo Melo** (***.934.704-**), em **26/06/2025 09:16:04** com chave **54f8b09a528711f092692618257239a1**.
- **Jean Paulo Spinelly da Silva** (***.685.684-**), em **26/06/2025 08:29:37** com chave **d7c2ed1c528011f086e006adb0a3afce**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QrCode ao lado ou acesse https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Folha de Aprovação do Projeto Final

Data da Emissão: 26/06/2025

Código de Autenticação: ea9750



Dedico esse trabalho à minha esposa Fabricia Lira e à minha mãe Elisete Melo, em reconhecimento a todo o amor, apoio e dedicação que me trouxeram até este momento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar em cada passo, por sustentar minha força nos momentos mais difíceis e por me permitir concluir mais uma etapa da minha vida com saúde e fé.

À Fabricia Lira, minha esposa e meu porto seguro. Obrigado por estar ao meu lado com paciência, carinho e palavras de encorajamento quando tudo parecia mais difícil. Sua presença foi essencial para que eu não desistisse.

À minha mãe, Elisete Melo, minha maior inspiração de força e dedicação. Obrigado por cada sacrifício, por cada conselho e por todo amor que me trouxe até aqui. Este trabalho também é seu.

Aos meus amigos de vida, que me acompanharam com amizade sincera, apoio verdadeiro e, principalmente, com alegria nos momentos em que eu mais precisei respirar. Vocês foram luz nos meus dias escuros.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jean Paulo Spinelly da Silva, pela paciência, orientação firme e pela confiança em meu trabalho. Sua dedicação fez toda a diferença no meu caminho acadêmico.

Aos professores do curso de Física da UEPB, por cada aula que despertou minha curiosidade e ampliou meu olhar sobre a ciência e a vida.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse possível: minha eterna gratidão. Levo cada gesto de apoio no coração.

“O universo não foi feito à medida do ser humano, mas tampouco lhe é adverso: é-lhe indiferente.” Carl Sagan.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar a contribuição da Física para o desenvolvimento da Oftalmologia, desde as teorias clássicas da luz até as tecnologias ópticas modernas aplicadas ao diagnóstico e correção da visão. Por meio de uma abordagem histórico-bibliográfica, analisa-se a evolução das teorias ópticas, destacando pensadores como Ibn al-Haytham, Newton, Huygens, Maxwell e Einstein, cujas contribuições foram fundamentais para a compreensão da luz, da visão e da construção de instrumentos ópticos. Explora-se o funcionamento do olho humano como sistema óptico, relacionando suas estruturas a conceitos de refração, reflexão e formação de imagem. São abordados também instrumentos oftálmicos como o oftalmoscópio, o *laser* e a tomografia de coerência óptica (OCT), explicando seus princípios físicos e aplicações clínicas. A pesquisa ainda resgata a história dos óculos e sua importância social, com base na obra de Vincent Ilardi. Conclui-se que a Física tem papel central não apenas na explicação dos fenômenos visuais, mas também no desenvolvimento de tecnologias que promovem a saúde ocular e melhoram a qualidade de vida da população.

Palavras-chave: óptica; visão; física médica; oftalmologia; tecnologia.

ABSTRACT

This work aims to investigate the contribution of Physics to the development of Ophthalmology, from classical theories of light to modern optical technologies applied to the diagnosis and correction of vision. Through a historical and bibliographical approach, it analyzes the evolution of optical theories, highlighting thinkers such as Ibn al-Haytham, Newton, Huygens, Maxwell, and Einstein, whose contributions were fundamental to understanding light, vision, and the construction of optical instruments. The functioning of the human eye as an optical system is explored, relating its structures to concepts of refraction, reflection, and image formation. Ophthalmic instruments such as the ophthalmoscope, laser, and optical coherence tomography are also addressed, explaining their physical principles and clinical applications. The research also revisits the history of spectacles and their social importance, based on Vincent Ilardi's work. It is concluded that Physics plays a central role not only in explaining visual phenomena but also in the development of technologies that promote eye health and improve quality of life.

Keywords: optics; vision; medical physics; ophthalmology; technology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Tabela de Óptica.....	13
Figura 2 –	Diagrama da grande obra de Kamal al-Din al-Farisi.....	15
Figura 3 –	Ângulo de reflexão.....	23
Figura 4 –	A lente plano-convexa do tratado de Ibn Sahl.....	24
Figura 5 –	Retrato simbólico de Ibn Al-Haytham.....	25
Figura 6 –	Anatomia do olho humano	27
Figura 7 –	Processo de formação de imagem visual.....	30
Figura 8 –	Papiro de Ebers.....	33
Figura 9 –	Oftalmoscópio.....	34
Figura 10 –	Método PRK e LASIK.....	37
Figura 11 –	Tomografia de coerência óptica (OCT)	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBM	A International Business Machines Corporation
LASIK	Laser-Assisted In Situ Keratomileusis
MS	Manuscrito
OCT	Tomografia de coerência óptica
PRK	Photorefractive Keratectomy
QED	Eletrodinâmica Quântica.
s.d.	Sem data

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 FUNDAMENTOS DA ÓPTICA	13
2.1 Caminhando um pouco sobre a história da óptica física	14
2.1.1 Outras Teorias	16
2.1.2 Os Experimentos	18
2.2 Propagação da Luz	22
3 O OLHO HUMANO COMO SISTEMA ÓPTICO	27
3.1 Componentes Ópticos do Olho Humano: Uma Análise Funcional para a Formação da Imagem Retiniana	27
4 INSTRUMENTOS ÓPTICOS NA MEDICINA	32
4.1 Oftalmoscopia: funcionamento e aplicações.....	34
4.2 Laser em oftalmologia: tipos e usos (cirurgia refrativa, glaucoma, etc.).....	35
4.3 Tomografia de coerência óptica (OCT)	38
5 A INVENÇÃO DOS ÓCULOS REVISITADA	40
5.1 Pisa e Veneza: Disputa pela Prioridade	40
5.2 Difusão Inicial dos Óculos.....	41
6 A TRANSFORMAÇÃO DA ÓPTICA NO RENASCIMENTO: FUNDAMENTOS FÍSICOS, AVANÇOS TECNOLÓGICOS E IMPACTOS NA MEDICINA E ASTRONOMIA SEGUNDO VINCENT ILARDI	43
6.1 Lentes de óculos no Renascimento: A Gênese da Óptica Aplicada	43
6.2 A Invenção e Aplicação Científica do Telescópio: O Salto da Visão Natural à Visão Cósmica	44
6.3 A Expansão da Óptica: Medicina, Engenharia e Artes.....	44
7 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Desde suas origens na Grécia Antiga, a Óptica se destacou entre as disciplinas científicas, impulsionada pela busca por compreender o mundo natural. Considerada uma via crucial para desvendar os fenômenos da natureza e do universo, atraiu contribuições de matemáticos, filósofos, médicos, teólogos e cientistas em geral. Segundo Lindberg (2008), desde o período clássico, a óptica foi tratada não apenas como uma ciência matemática, mas também como uma via para compreender a alma e a percepção sensorial.

Inicialmente, o escopo da Óptica concentrou-se nos mecanismos da visão, abordando o funcionamento do olho humano e suas patologias, a natureza e propagação da luz, a formação das cores, as propriedades dos espelhos, os princípios da refração e da reflexão, bem como fenômenos atmosféricos como o arco-íris. Conforme exposto por Sabra (2003), esses elementos estavam presentes nas obras de Euclides, Ptolomeu e Galeno, refletindo uma concepção multifacetada da visão.

A diversidade desses temas gerou múltiplas abordagens teóricas — físicas, matemáticas e fisiológicas — que se transformaram ao longo do tempo. Da Antiguidade à Idade Média, o conhecimento óptico foi preservado e ampliado, especialmente graças à mediação do mundo islâmico. A partir do século IX, as teorias gregas foram traduzidas, comentadas e expandidas por estudiosos muçulmanos como Al-Kindi, Hunayn ibn Ishaq e Averróis (Gutas, 2012). Por volta do século XII, essas ideias já circulavam na Europa, influenciando pensadores cristãos como Roger Bacon e Alberto Magno (Lindberg, 2008).

No período medieval islâmico, destacou-se Ibn al-Haytham (Alhazen), considerado por muitos o "pai da óptica moderna". Em sua obra *Kitab al-Manazir (Livro de Óptica)*, escrita no século XI, ele rompeu com a teoria da emissão visual e propôs a teoria da intromissão, segundo a qual a luz refletida pelos objetos entra nos olhos. De acordo com Tbakhi (2010), essa reformulação marcou uma transição crítica na história da ciência da visão, introduzindo conceitos que seriam fundamentais para o desenvolvimento futuro da óptica. Além de suas inovações teóricas, Alhazen foi pioneiro na aplicação sistemática do método experimental à investigação óptica. Seus estudos com lentes, espelhos e câmaras escuras representaram um marco metodológico ao integrar observação, hipótese e verificação empírica. Sabra (2003) destaca que esse enfoque experimental influenciou diretamente os trabalhos de estudiosos posteriores como Kepler e Newton, sendo considerado um precursor do método científico moderno.

A transmissão desse saber para o Ocidente, por meio de traduções feitas sobretudo na Península Ibérica e na Sicília, teve impacto profundo não apenas no desenvolvimento teórico da óptica, mas também em sua aplicação prática. Entre os principais campos beneficiados estava a medicina ocular, que passou a integrar conhecimentos ópticos mais precisos no diagnóstico e na correção da visão. Segundo Dunlop e Smith (2020), essa interface entre óptica e medicina foi decisiva para os avanços no entendimento das funções visuais e no desenvolvimento de instrumentos como os óculos e, posteriormente, o telescópio.

Este trabalho tem como objetivo examinar a evolução histórica da óptica desde a Antiguidade até o Renascimento, com ênfase no papel da Física na formação dos conceitos visuais e na interface com a Medicina. Pretende-se evidenciar como os avanços teóricos e experimentais da óptica foram essenciais para o progresso da oftalmologia, incluindo a compreensão do funcionamento do olho, o desenvolvimento de instrumentos ópticos e o tratamento de distúrbios da visão. Essa abordagem também contribui para reconhecer a importância de figuras frequentemente marginalizadas pela historiografia tradicional.

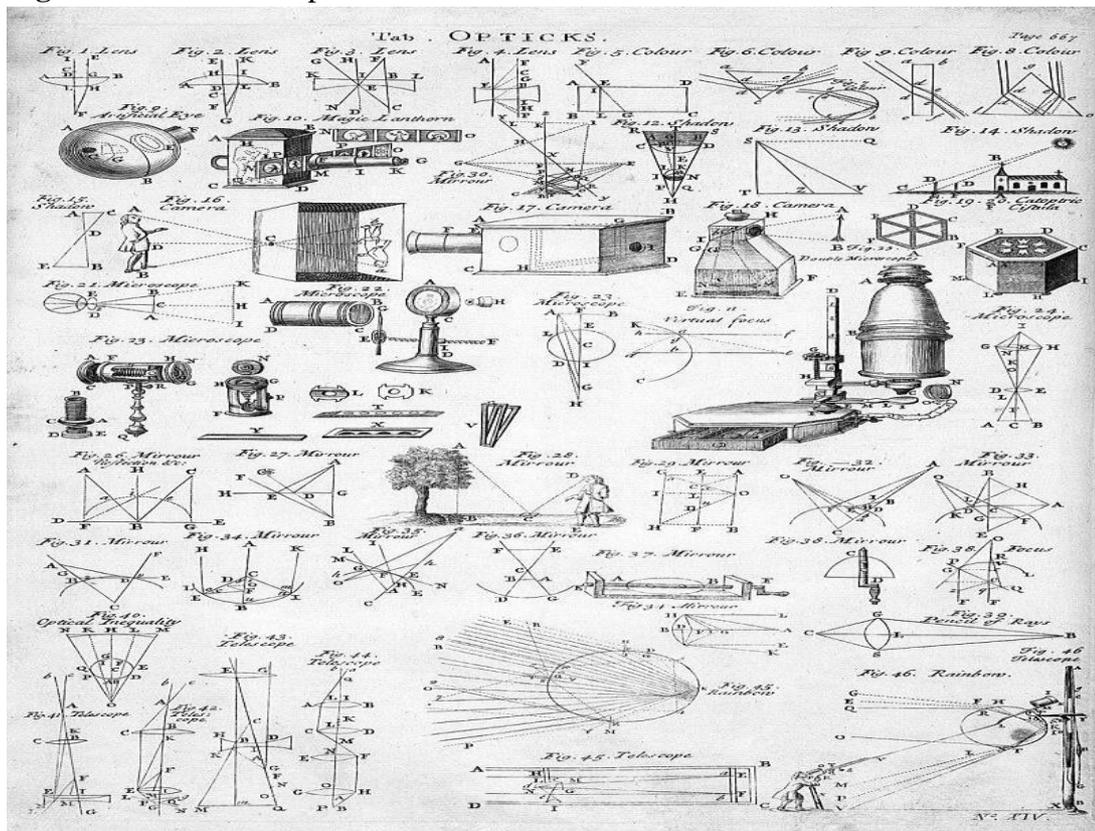
2 FUNDAMENTOS DA ÓPTICA

A beleza das cores que observamos no mundo natural – como o azul do céu ou o verde das folhas – sempre fascinou a humanidade. Fenômeno de complexidade e importância estudado pela óptica, a luz é a base dessas cores. Desde a Antiguidade, pensadores como Euclides e Ptolomeu já buscavam entender a natureza da luz e da visão, estabelecendo as primeiras teorias ópticas baseadas em princípios geométricos (Lindberg, 2008).

Com o passar dos séculos, a óptica evoluiu para além da especulação filosófica, incorporando métodos experimentais, como os desenvolvidos por Ibn al-Haytham no século XI. Sua obra *Livro de Óptica* marcou uma virada na história da ciência ao propor experimentações rigorosas para estudar a propagação da luz, sua reflexão e refração (Sabra, 2003).

Com base nesses conceitos fundamentais, o campo da óptica desvendou uma riqueza de aplicações tecnológicas que remodelaram a sociedade. Do uso inicial de lentes em óculos e telescópios às inovações mais modernas de *lasers* e *fibras ópticas*, o impacto é inegável. Você pode ver uma visão geral histórica na Tabela de Óptica da Enciclopédia de 1728, apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Tabela de Óptica



Fonte: Tabela de Óptica, da Enciclopédia de 1728, Volume 2

Com isso, a óptica consolidou-se como um campo de estudo essencial, presente em áreas tão diversas quanto a astronomia, a engenharia e a medicina. No âmbito da medicina ocular, por exemplo, o conhecimento óptico é indispensável para o entendimento dos mecanismos da visão, o diagnóstico de patologias visuais e o desenvolvimento de dispositivos para correção visual, como lentes e cirurgias refrativas (Dunlop & Smith, 2020).

2.1 Caminhando um pouco sobre a história da óptica física

A natureza da luz, um dos mais cativantes enigmas da física, tem intrigado os cientistas por séculos. Para desvendar essa intricada questão, faremos uma viagem histórica pelas principais teorias que buscaram explicar a natureza da luz, desde as antigas concepções corpusculares até os modelos mais modernos. Ao longo dessa jornada, veremos como a evolução da física óptica ampliou nossa compreensão do universo, com foco especial no extraordinário sistema olho-cérebro e sua capacidade de interpretar a luz.

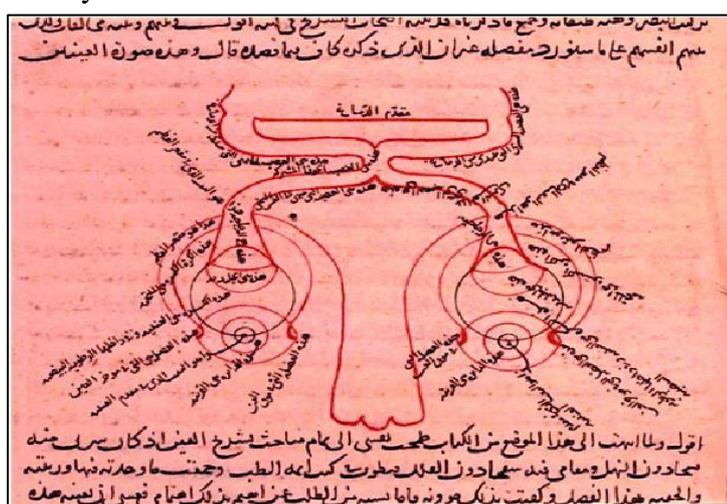
A história da luz é tão antiga quanto a humanidade. No Antigo Egito, a luz era associada ao poder divino, sendo considerada o 'fogo ocular' do deus sol Rá. Na Grécia Antiga, filósofos como Demócrito acreditavam que tudo no universo, incluindo a matéria, era composto por pequenas partículas indivisíveis chamadas átomos. Tais partículas seriam eternas e indestrutíveis, movimentando-se em um vazio infinito (LINDENBERG, 2008).

Aplicando essa mesma ideia à luz, Demócrito propôs que a luz também seria composta por partículas. Ele as chamava de "eidola" (LINDENBERG, 2008). Estas eidola seriam como pequenas películas que se desprendem dos objetos, carregando informações sobre sua forma e cor. Ao atingirem nossos olhos, essas partículas transmitiriam essas informações, permitindo-nos enxergar. Para alguns gregos, incluindo Empédocles, a luz era vista como algo projetado pelos olhos. Aristóteles, no que lhe diz respeito, propôs que a luz era uma atividade do que é transparente, mais uma forma do que uma substância. No entanto, nenhuma dessas teorias explicava satisfatoriamente fenômenos como a visão na escuridão.

Em 965 d.C. o estudioso árabe muçulmano Abu Ali al Hasan ibn al-Haytham, conhecido no Ocidente como Alhacen ou Alhazen, nasceu na cidade de Basra, no sul do Iraque, por isso também é conhecido como Al-Basri (TBAKHI, 2010). Ele foi educado em Basra e Bagdá, e morreu no Cairo, Egito, no ano de 1040. Pouco conhecido hoje no Ocidente, Ibn al-Haytham foi como um Isaac Newton árabe. Produzindo mais de 200 obras, sobre uma ampla gama de assuntos, das quais pelo menos 96 de suas obras científicas são conhecidas, e aproximadamente 50 delas sobreviveram até hoje. Quase metade de suas obras sobreviventes são sobre

matemática, 23 delas são sobre astronomia e 14 delas são sobre óptica, com algumas sobre outras áreas da ciência. Ele compreendeu profundamente o método científico, fundamentando suas conclusões em observações e experimentos inteligentes, em vez de se limitar ao raciocínio abstrato. Em sua obra seminal, "Kitab Al Manazer", um diagrama importante ilustrada na (Figura 2) destaca uma percepção crucial. Argumentando que a visão ocorre quando nossos olhos recebem luz refletida em objetos, opondo-se fundamentalmente às crenças de longa data de seus contemporâneos, como Ptolomeu e Euclides, que postulavam que os olhos emitiam luz.

Figura 2 - Diagrama da grande obra de Kamal al-Din al-Farisi, *Kitab Tanqih al-Manazir li-dhawi al-absar wa-'l-basa'ir*, na qual ele editou o famoso desenho do sistema nervoso de *Kitab al-Manazir*, de Ibn al-Haytham.



Fonte: <https://muslimheritage.com/influence-of-al-haytham-on-al-farisi/>

Em conformidade com a maioria dos historiadores, al-Haytham foi o pioneiro do método científico moderno. Com seu livro, ele mudou o significado do termo “óptica” e estabeleceu experimentos como a norma de prova no campo. Suas investigações não eram baseadas em teorias abstratas, mas em evidências experimentais. Seus experimentos eram sistemáticos e repetíveis.

De acordo com Tbakhi e Amr (s.d.), a teoria de luz e visão de Ibn al-Haytham distinguiu-se radicalmente das concepções previamente existentes tanto no Oriente quanto no Ocidente. Aproximadamente no final do século XIII, que os óculos foram inventados, representando o primeiro uso prático da ampliação na sociedade. Ibn al-Haytham fez um exame completo da passagem da luz por vários meios e descobriu as leis da refração. Ele também realizou os primeiros experimentos sobre a dispersão da luz em suas cores constituintes. O *Kitab al-Manazir* (Livro de Óptica) de Ibn al-Haytham, uma obra de sete volumes escrita durante seu encarceramento entre 1011 e 1021, revolucionou a compreensão da luz e da visão.

Sua importância é tamanha que foi classificado ao lado do *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton como um dos livros mais influentes da física.

Sendo o primeiro a descrever com precisão as várias partes do olho e a dar uma explicação científica do processo da visão, com contribuições notáveis na medicina e oftalmologia, ele foi pioneiro em avanços na cirurgia ocular e, pela primeira vez, desvendou corretamente os processos da visão e da percepção visual. De forma que, “A visão percebe a luz e a cor existentes na superfície do objeto contemplado. A visão, por definição, capta todos os objetos através de supostas linhas retas que espalham-se entre os objetos e os pontos centrais da visão” (SABRA, 2003).

2.1.1 Outras Teorias

No final do século XVII, Isaac Newton propôs uma teoria revolucionária para a natureza da luz, defendendo que ela era composta por partículas, ou corpúsculos. Seus experimentos com prismas e a descoberta da decomposição da luz branca em um espectro de cores fortaleceram essa ideia. A teoria corpuscular de Newton dominou a física óptica por mais de um século, mas tinha algumas limitações, como a dificuldade em explicar fenômenos como a interferência e a difração. Apesar dessas limitações, o trabalho de Newton foi fundamental para o desenvolvimento da óptica e inspirou futuras pesquisas, que culminaram na teoria ondulatória da luz (YOUNG, 2016).

Em 1678, Christiaan Huygens apresentou a primeira teoria ondulatória da luz a ganhar ampla aceitação. Seu postulado principal afirma que cada ponto em uma frente de onda em movimento atua como uma fonte de novas ondas esféricas (Huygens, 1885). Essas ondas secundárias se expandem em todas as direções, e a posição subsequente da frente de onda é determinada pela envoltória dessas ondas secundárias. Esse conceito fundamental, conhecido como princípio de Huygens, revolucionou a compreensão da natureza da luz.

Entre 1815 e 1821, Augustin-Jean Fresnel propôs uma nova teoria ondulatória da luz, que revolucionou a compreensão da natureza da luz, até então dominada pela teoria corpuscular de Newton (FRENCH, 1979). Siméon Poisson, um forte defensor da visão corpuscular, analisou matematicamente a teoria de Fresnel. Como um teste decisivo, Poisson previu um resultado que considerou paradoxal e absurdo: a existência de um ponto luminoso no centro da sombra de uma esfera iluminada. Sua intenção era desacreditar a teoria ondulatória.

Contudo, o experimento realizado por Dominique Arago confirmou a previsão de Fresnel, revelando o ponto luminoso exatamente no local previsto. Essa observação

experimental marcou um ponto de inflexão na aceitação da natureza ondulatória da luz, desbancando a teoria corpuscular e consolidando a teoria de Fresnel (DE OLIVEIRA; DA SILVA; MARTINS, 2021). O ponto luminoso, inicialmente visto como uma aberração pela teoria corpuscular, passou a ser conhecido como ponto de Fresnel, ponto de Arago ou, ironicamente, ponto de Poisson, em homenagem ao cientista que tentou refutar a teoria que acabou por confirmar.

No ano de 1900, Max Planck inovou a física ao incorporar a definição de quantização da energia da radiação eletromagnética. Ao investigar o problema da radiação do corpo negro, um fenômeno inexplicável pela física clássica, Planck postulou que a energia só pode ser emitida ou absorvida em pacotes discretos, chamados "quanta". Derivando uma fórmula que concordava com os dados experimentais, assumindo que a energia E de cada quantum é proporcional à sua frequência ν pela relação $E = h\nu$, onde h é a constante que hoje leva seu nome. Inicialmente, Planck considerou essa quantização um mero artifício matemático (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011).

Em 1905, Albert Einstein aprofundou esse conceito ao explicar o efeito fotoelétrico, observado por Heinrich Hertz em 1887 (ISAACSON, 2007). Esse fenômeno — a emissão de elétrons por um material ao ser iluminado — contrariava a teoria ondulatória clássica de Maxwell, que previa uma dependência da energia dos elétrons na intensidade da luz incidente. No entanto, os experimentos mostravam que essa energia dependia da frequência da luz. Einstein propôs, então, que a luz se comporta como um fluxo de partículas discretas, os fótons, cada um com energia $E = h\nu$.

A interação de um único fóton com um elétron transfere toda a energia do fóton para o elétron, resultando em sua emissão se a energia do fóton exceder a função trabalho do material. A explicação de Einstein não só elucidou o efeito fotoelétrico, mas também forneceu a primeira evidência concreta da natureza quantizada da luz, pavimentando o caminho para o conceito de dualidade onda-partícula. A famosa frase de Einstein em seu artigo de 1905, “A energia, durante a propagação de um raio de luz, não é continuamente distribuída por espaços em constante aumento, mas consiste em um número finito de quanta de energia localizados em pontos no espaço, movendo-se sem se dividir e capazes de serem absorvidos ou gerados apenas como entidades”, resume essa ideia. Por meio deste trabalho, Einstein obteve o Prêmio Nobel de Física em 1921 (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011).

2.1.2 Os Experimentos

No ano de 1676, Ole Rømer realizou a primeira medição da velocidade da luz ao cronometrar os eclipses de Io, uma das luas de Júpiter. Ele observou que os intervalos entre esses eclipses não eram constantes. Quando a Terra estava mais próxima de Júpiter, os eclipses aconteciam em intervalos regulares e previsíveis. Contudo, à medida que a Terra se afastava de Júpiter, os eclipses pareciam ocorrer com um pequeno atraso em relação ao esperado. Após diversas observações, Rømer concluiu que essa diferença de tempo se devia ao fato de a luz levar um tempo finito para percorrer a distância entre Júpiter e a Terra (KUHN, 2005).

Na ocasião que a Terra estava mais longínqua, a luz precisava percorrer uma distância maior e, conseqüentemente, levava mais tempo para chegar até nós. Sua descoberta foi revolucionária, pois até então se acreditava que a luz se propagava instantaneamente. A medida da velocidade da luz, embora não fosse precisa pelos padrões atuais, abriu caminho para novas pesquisas e experimentos na área da óptica e da física (KUHN, 2005).

O experimento de Young com a dupla fenda, realizado em 1803, representou mais um marco fundamental na história da física. Ao demonstrar de maneira direta e sucinta a natureza ondulatória da luz, esse experimento superou a teoria corpuscular de Newton e consolidou a teoria ondulatória. A observação de um padrão de interferência na tela, resultado da superposição das ondas luminosas provenientes das duas fendas, forneceu evidências experimentais incontestáveis. Embora o experimento de Young tenha sido, por muito tempo, a prova definitiva da natureza ondulatória da luz, ele ainda guardava grandes surpresas. As implicações desse experimento se estenderam muito além da óptica clássica, abrindo caminho para o desenvolvimento da mecânica quântica e revelando a dualidade onda-partícula da luz (FRENCH, 1979).

No ano de 1865, James Clerk Maxwell, em seu revolucionário trabalho *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, unificou os conceitos de eletricidade e magnetismo, apresentando um conjunto de equações que descrevem de forma completa o comportamento dos campos elétrico e magnético. Uma das mais importantes implicações dessas equações foi a predição de que perturbações eletromagnéticas se propagam no espaço na forma de ondas, com uma velocidade igual à da luz. Essa descoberta representou um marco fundamental na física, pois estabeleceu uma conexão direta entre a luz — fenômeno até então estudado de forma isolada — e os fenômenos elétricos e magnéticos. Em outras palavras, Maxwell propôs que a luz nada mais é do que uma onda eletromagnética. Essa afirmação, expressa de forma elegante e concisa, revolucionou nossa compreensão da natureza da luz e dos campos eletromagnéticos,

abrindo caminho para o desenvolvimento da teoria da relatividade especial de Einstein (JACKSON, 1999).

No final da década de 1880, Heinrich Hertz realizou uma série de experimentos cruciais que confirmaram a existência das ondas eletromagnéticas previstas por James Clerk Maxwell. Por volta de 1886 e 1889, Hertz demonstrou a produção e detecção dessas ondas, conhecidas hoje como ondas de rádio. Seus experimentos não apenas validaram as equações de Maxwell, mas também revelaram propriedades dessas ondas, como a capacidade de se propagarem pelo espaço e de serem refletidas e refratadas, comportando-se de forma análoga à luz. Após esta descoberta das ondas de rádio, Hertz também observou o efeito fotoelétrico, um fenômeno que mais tarde seria fundamental para o desenvolvimento da física quântica. A confirmação experimental de Hertz, juntamente com o experimento da dupla fenda de Young e a confirmação de Arago das previsões de difração de Fresnel, forneceram uma forte evidência da natureza ondulatória da luz, consolidando a teoria ondulatória em detrimento da teoria corpuscular de Newton, pelo menos até o surgimento da mecânica quântica no século XX (HEWITT, 2002).

Apesar do sucesso da explicação de Einstein, a ideia de que a luz se comporta como partículas encontrou forte resistência, pois a teoria ondulatória, exemplificada pelo experimento da dupla fenda de Young e pelas equações de Maxwell, explicava satisfatoriamente diversos fenômenos ópticos, como difração e interferência. Curiosamente, no ano de 1905 foi o *annus mirabilis* de Einstein, com a publicação de outros três trabalhos seminais: sobre a relatividade restrita, o movimento browniano (fornecendo evidências da existência de átomos) e a equivalência massa-energia ($E=mc^2$). A combinação de ideias tão radicais poderia tê-lo marginalizado, mas o sucesso em explicar diversos fenômenos garantiu a aceitação gradual de suas teorias. O Prêmio Nobel de 1921 reconheceu formalmente 'seus serviços à Física Teórica e especialmente sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico', refletindo a controvérsia em torno da relatividade na época (ISAACSON, 2007).

Em 1923, Arthur Compton realizou um experimento crucial, o espalhamento Compton, que forneceu ainda mais evidências da natureza corpuscular da luz (FERREIRA; MARSHALL, 2018). Ao direcionar raios X para elétrons, Compton observou um aumento no comprimento de onda (e, conseqüentemente, uma diminuição na frequência e energia) dos raios X espalhados. Este efeito, inexplicável pela teoria ondulatória clássica (que previa apenas o espalhamento Thomson, sem alteração no comprimento de onda), foi explicado por Compton considerando os raios X como partículas (fótons) com energia $E = h\nu$ e momento $p = h\nu/c = h/\lambda$. Ao aplicar as leis de conservação de energia e momento relativísticos para a colisão fóton-

elétron, Compton derivou a equação que relaciona a variação no comprimento de onda ($\Delta\lambda$) com o ângulo de espalhamento (θ): $\Delta\lambda = (h/m_e c)(1 - \cos \theta)$, onde m_e é a massa do elétron. A concordância entre a teoria e os resultados experimentais confirmou a natureza corpuscular da luz e que os fótons possuem momento. Em 1927, Compton compartilhou o Prêmio Nobel de Física com Charles Thomson Rees Wilson (FERREIRA; MARSHALL, 2018).

Em 1926, o termo "fóton" foi criado por Gilbert N. Lewis, em um contexto diferente (sua teoria da ligação química), mas acabou sendo adotado para designar o quantum de luz de Einstein (FRANKLIN, 2015).

As décadas de 1910 a 1930 foram cruciais para o desenvolvimento da mecânica quântica. A coexistência de evidências do comportamento ondulatório (experimento da dupla fenda de Young, difração, interferência, ondas de Hertz) e corpuscular (efeito fotoelétrico, espalhamento Compton, radiação do corpo negro) da luz levou à formulação da dualidade onda-partícula, estendida posteriormente para toda a matéria. A ideia central é que a luz (e outras partículas) exhibe ambas as naturezas, com a manifestação de uma ou outra dependendo do experimento. Experimentos que medem propriedades ondulatórias (como interferência) revelam o comportamento ondulatório, enquanto experimentos que envolvem interação com a matéria (absorção ou emissão) revelam o comportamento corpuscular (FRANKLIN, 2015).

É essencial entender que a dualidade onda-partícula não significa que a luz *é* ora onda, ora partícula. A mecânica quântica descreve a luz como uma entidade que transcende essas categorias clássicas. Os físicos Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Dirac e outros desenvolveram a mecânica quântica para descrever o comportamento da matéria em escala atômica. A absorção e emissão de energia em frequências específicas por átomos e moléculas são explicadas pela quantização de seus níveis de energia. No entanto, a radiação em si não precisa ser *inerentemente* quantizada para explicar esses fenômenos. A quantização dos níveis de energia da matéria é que determina as frequências de absorção e emissão da radiação. Mesmo com sua natureza complexa — que transcende as definições de 'onda' ou 'partícula' — a luz interage com a matéria de modo quantizado. A mecânica quântica oferece uma descrição probabilística que unifica esses aspectos aparentemente contraditórios, descrevendo a luz como uma entidade quântica que se manifesta de diferentes maneiras dependendo da interação observada (FRANKLIN, 2015).

Em meados de 1947, Willis Lamb e Robert Retherford realizaram um experimento crucial que revela uma discrepância no espectro do átomo de hidrogênio (LAMB; RETHERFORD, 1947). Eles mediram uma pequena diferença nas energias dos estados $2S_{1/2}$ e $2P_{1/2}$, que, segundo a teoria de Dirac, deveriam ser degenerados. A 'mudança de Lamb', como

ficou conhecida essa diferença, apresentava um comprimento de onda de aproximadamente 30 cm, situando-se na região de micro-ondas. Tal resultado desafiou as teorias então vigentes, tanto a mecânica quântica não relativística quanto a teoria relativística de Dirac, impulsionando a busca por uma nova formulação teórica.

Uma teoria quântica de campos que descreve a interação entre luz e matéria, a Eletrodinâmica Quântica (QED) surgiu no final da década de 1940. Nela, o campo eletromagnético é quantizado, e a interação entre partículas carregadas é mediada pela troca de fótons virtuais. Richard Feynman, Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga, independentemente, desenvolveram formulações consistentes da QED (FEYNMAN, 1949; SCHWINGER, 1948; TOMONAGA, 1946). Esses trabalhos demonstraram que o campo elétrico de um elétron, por exemplo, surge da emissão e reabsorção contínuas de fótons virtuais, flutuações quânticas do vácuo¹. A explicação precisa da QED forneceu uma mudança de Lamb, mostrando que a interação do elétron com esses fótons virtuais altera ligeiramente sua energia, resultando na separação observada entre os níveis $2S_{1/2}$ e $2P_{1/2}$. Em reconhecimento às suas contribuições, Feynman, Schwinger e Tomonaga dividiram o prêmio em 1965. Lamb recebeu o prêmio Nobel de Física em 1955.

Intrinsecamente conectado ao princípio da incerteza de Heisenberg (HEISENBERG, 1927), está o conceito de fótons virtuais. A relação $\Delta t \Delta E \geq \hbar/2$ permite a violação temporária da conservação de energia, desde que essa violação ocorra dentro de um intervalo de tempo Δt suficientemente curto. Assim, um elétron pode emitir um fóton virtual com energia ΔE , violando a conservação de energia, desde que o fóton seja reabsorvido em um tempo $\Delta t \leq \hbar/2\Delta E$. Essa troca constante de fótons virtuais é a base da interação eletromagnética na QED.

Originalmente conduzido por Thomas Young (1804) para demonstrar o caráter ondulatório da luz, o experimento da dupla fenda guarda uma surpresa maior com fótons individuais. Mesmo quando os fótons são disparados um de cada vez, um padrão de interferência se forma na tela de detecção ao longo do tempo. Esse fenômeno sugere que cada fóton, individualmente, atravessa ambas as fendas simultaneamente e, de alguma forma, interfere consigo mesmo (YOUNG, 1804). Richard Feynman descreveu esse fenômeno como "o único mistério" da mecânica quântica, destacando a dificuldade de conciliar esse comportamento com a nossa intuição clássica (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 1965). A observação do padrão de interferência mesmo com fótons individuais implica que:

¹ Flutuações quânticas, são oscilações temporárias na quantidade de energia em um ponto do espaço, mesmo no vácuo. Elas surgem da incerteza inerente à mecânica quântica, que afirma que não se pode conhecer com precisão total certas propriedades de uma partícula ao mesmo tempo.

- Fótons não são partículas localizadas no sentido clássico.
- Fótons não seguem um único caminho bem definido.

A QED, através do formalismo das integrais de caminho de Feynman, descreve a propagação de um fóton como a soma de todas as trajetórias possíveis entre o ponto de emissão e o ponto de detecção. Este conceito desafia a noção clássica de trajetória e reforça a natureza probabilística da mecânica quântica.

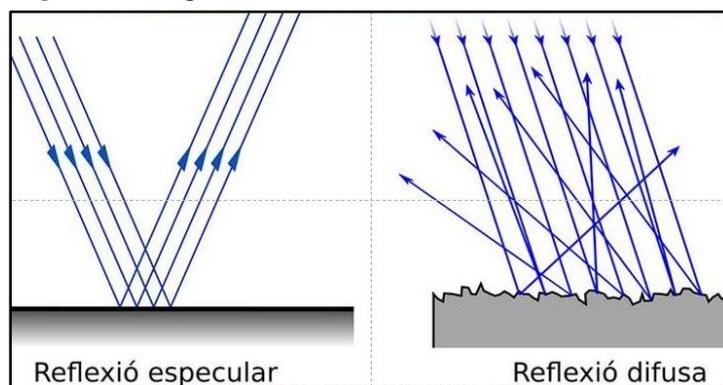
A "mudança de Lamb" e o experimento da dupla fenda ilustram a complexidade da física quântica, com a QED emergindo como uma teoria de grande sucesso na descrição das interações entre luz e matéria. O experimento da dupla fenda, em particular, desafia a intuição clássica ao revelar a natureza não-clássica do mundo quântico. Este contexto histórico nos prepara para a exploração dos conceitos matemáticos que fundamentam a óptica da visão humana, tema central deste trabalho.

2.2 Propagação da Luz

A interação da luz com a matéria exhibe um comportamento intrigante no ponto em que uma onda luminosa encontra a fronteira entre meios transparentes, como ar e vidro ou água e vidro. Nesse caso, a luz se divide: uma porção é refletida, permitindo-nos observar reflexos na superfície, e outra é refratada, possibilitando a visão através do material. Na análise da interação da luz com a matéria, a descrição das direções dos raios incidentes, refletidos e refratados (ou transmitidos) em uma interface lisa que separa dois meios transparentes é fundamental.

Convencionalmente, essas direções são definidas em relação aos ângulos que os raios formam com a normal, ou seja, a linha perpendicular à superfície no ponto de incidência. Contudo, a natureza da superfície impacta significativamente o comportamento da luz. Quando a superfície apresenta rugosidade, os raios transmitidos e refletidos não seguem uma direção única, sendo espalhados em múltiplas direções. Nesse cenário, não se observa um ângulo de reflexão ou refração específico" (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

Essa distinção leva à classificação dos tipos de reflexão. A reflexão especular, cujo nome deriva do latim "speculum" (espelho), caracteriza-se por um único ângulo de reflexão e ocorre tipicamente em superfícies lisas e polidas. A luz incidente é refletida de forma organizada, preservando a imagem do objeto refletor. Em contraste, a reflexão difusa ocorre em superfícies rugosas, onde os raios refletidos são espalhados em diversas direções (representada na Figura 3). A luz incidente é dispersa, e nenhuma imagem nítida é formada.

Figura 3: Ângulo de reflexão

Fonte: Imagem gerada por IA.

Sendo importante ressaltar que ambos os tipos de reflexão, especular e difusa, podem ocorrer tanto em materiais transparentes quanto em materiais opacos, ou seja, aqueles que não transmitem luz. A diferença crucial reside na capacidade do material de transmitir luz, não no tipo de reflexão que ele pode exibir. A reflexão especular em materiais transparentes produz imagens nítidas, similar à de um espelho, enquanto sua contraparte difusa confere a esses materiais uma aparência turva ou translúcida. Para materiais opacos, a reflexão especular resulta em brilho ou reflexos pontuais, sendo a reflexão difusa o mecanismo essencial para a visibilidade dos objetos.

A maioria dos objetos que nos cercam, incluindo seres vivos como plantas e pessoas, além de objetos inanimados como livros e móveis, tornam-se visíveis justamente devido à reflexão difusa da luz em suas superfícies. A luz incidente é espalhada em várias direções, permitindo que nossos olhos capturem essa luz refletida de diferentes ângulos e construam a percepção da forma, cor e textura dos objetos. Portanto, a reflexão difusa é essencial para a nossa interação visual com o mundo cotidiano.

O índice de refração (n) de um material óptico é um elemento-chave na óptica geométrica. A lei que o relaciona com os ângulos de incidência e refração foi formulada no século X pelo cientista persa Ibn Sahl (Abū Sa'd al-'Alā' ibn Sahl أبو سعد العلاء ابن سهل; c. 940–1000), um físico e matemático conhecido por ter escrito um tratado óptico por volta de 984 (HOGENDIJK; SABRA, 2003).

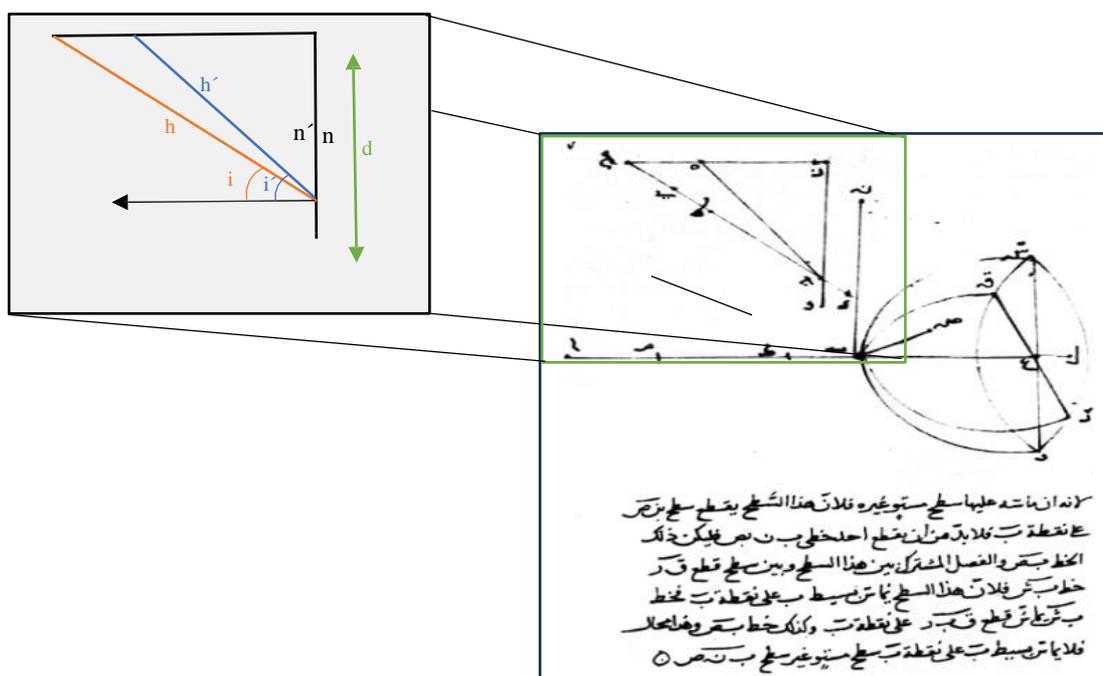
O texto desse tratado foi reconstruído por Roshdi Rashed a partir de dois manuscritos: Damasco, al-Zāhirīya MS 4871, com 3 fôlios, e Teerā, Millī MS 867, com 51 fôlios. O manuscrito de Teerā é mais extenso, porém apresenta consideráveis danos, enquanto o manuscrito de Damasco contém uma seção ausente no manuscrito de Teerā. O manuscrito de Damasco tem o título *Fī al-'āla al-muḥriqa* ("Sobre os instrumentos de queima"), enquanto o

manuscrito de Teerã recebeu posteriormente o título *Kitāb al-harrāqāt* ("O livro dos queimadores").

Ibn Sahl é reconhecido como o primeiro estudioso muçulmano a estudar a *Óptica* de Ptolomeu, sendo um importante precursor do *Livro de Óptica* de Ibn al-Haytham (Alhazen), escrito cerca de trinta anos depois. Ele investigou as propriedades ópticas de espelhos e lentes curvas e é considerado o descobridor da lei da refração, posteriormente conhecida como lei de Snell. Utilizando essa lei, Ibn Sahl derivou as formas de lentes que focalizam a luz sem aberrações geométricas, as chamadas lentes anaclásicas. O restante do tratado aborda espelhos parabólicos, espelhos elipsoidais, lentes biconvexas e técnicas para desenhar arcos hiperbólicos.

Recordamos esta lei: $n \sin(i) = n' \sin(i')$, onde n e n' são os índices de refração no primeiro e segundo meio e i e i' são, respectivamente, os ângulos de incidência e refração. Para pequenos valores de i (expressos em radianos e não em graus), a lei pode ser aproximada da seguinte forma: $ni \cong ni'$

Figura 4: A lente plano-convexa do tratado de Ibn Sahl - Sobre os Instrumentos de Queima. A lente plano-convexa do manuscrito Milli MS 867, fólio 7r; cortesia da Biblioteca Milli, Teerã.



Fonte: https://files.backyardbrains.com/retired/files/Rashed_1990_Ibn_Sahl.pdf

Quando examinamos a Figura 4, a tese de Rashed parece muito defensável. Analisando de perto a parte superior esquerda da Figura, onde vemos dois ângulos retos. A linha que

representa o caminho de um raio incidente e sua trajetória. Podemos dizer que seu comprimento é h e o ângulo de incidência em relação à linha horizontal é i . A hipotenusa externa, com comprimento h' e ângulo i' , mostra uma extensão do caminho do raio refratado. Então, o raio incidente encontra um cristal cuja face é vertical no ponto onde as duas hipotenusas se cruzam. De acordo com R. Rashed (1990), a razão entre o comprimento da hipotenusa menor e a maior é o inverso do índice de refração do cristal. Em termos matemáticos, $\frac{h}{h'} = \frac{1}{n'}$ ou, $\frac{h}{h'} = \frac{n}{n'}$ com ($n=1$ sendo o índice de refração do ar). A partir desta relação, encontramos a lei da refração:

$$\frac{h}{h'} = \frac{\text{sen}(i')}{\text{sen}(i)} = \frac{n}{n'} \quad (1)$$

O tratado de Ibn Sahl foi usado posteriormente por Ibn Al-Haytham. R. Rashed, que remonta as partes do manuscrito, dispersas por duas bibliotecas, o traduziu para o francês.

Quatro séculos após as demonstrações inovadoras de Ibn Al-Haytham (conforme ilustrado na Figura 5), Willebrord Snell (também conhecido como Snellius) fez um avanço crucial em 1621. Ele conseguiu formular a lei matemática que descreve a relação precisa entre os ângulos de incidência e refração e os índices de refração dos meios. Atualmente, essa formulação é universalmente reconhecida e consagrada como a Lei de Snell. No entanto, seus resultados permaneceram em grande parte desconhecidos até 1703, quando Christiaan Huygens os publicou, juntamente com suas próprias pesquisas sobre óptica, em sua obra póstuma *Dioptrica* (BRITANNICA, 2025).

Figura 5: Retrato simbólico de Ibn Al-Haytham em uma nota iraquiana de 10.000 dinares.



Fonte: https://opg.optica.org/directpdfaccess/808b5680-af1b-4078-a18aec0178c022ad_180580/etop-2007-esb2.pdf?da=1&id=180580&uri=ETOP-2007-ESB2&seq=0&mobile=no

Enquanto isso, em 1637, René Descartes publicou sua obra seminal, o “Discurso sobre o Método”. Neste trabalho, Descartes incluiu uma formulação da lei dos senos aplicada à

refração, chegando à mesma relação matemática que Snell havia descoberto anteriormente. Contudo, Descartes propôs uma explicação para a refração baseada na teoria corpuscular da luz, argumentando que as partículas de luz se moviam mais rapidamente em meios mais densos (PLATO, 2024). Essa explicação, apesar de incorreta, ganhou ampla aceitação devido à grande autoridade intelectual de Descartes na época, levando muitos a tentar justificar essa explicação filosófica sem o devido embasamento físico.

Essa coincidência de descobertas e a influência de Descartes geraram uma disputa histórica sobre a autoria da lei. Consequentemente, em países de língua francesa, a lei da refração é frequentemente referida como Lei de Descartes, enquanto em países de língua inglesa, na Espanha e em grande parte reconhecida pela comunidade científica, a prioridade de Snell é honrada na designação da lei, hoje formulada como Lei de Snell (HECHT, 2017):

$$n \sin(i) = n \sin(r) \quad (2)$$

Considerando o vácuo (ou ar, com índice de refração valendo 1) como o primeiro meio, o ângulo do raio incidente e o ângulo do raio refratado são aqueles formados pelos raios de luz com a normal à superfície de separação entre os dois meios transparentes. O ângulo de desvio do raio de luz, ao passar de um meio para outro, depende do índice de refração de cada material. Esse índice, representado por n , é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e a velocidade da luz no material analisado (v) (HECHT, 2017).

Matematicamente, isso é expresso como:

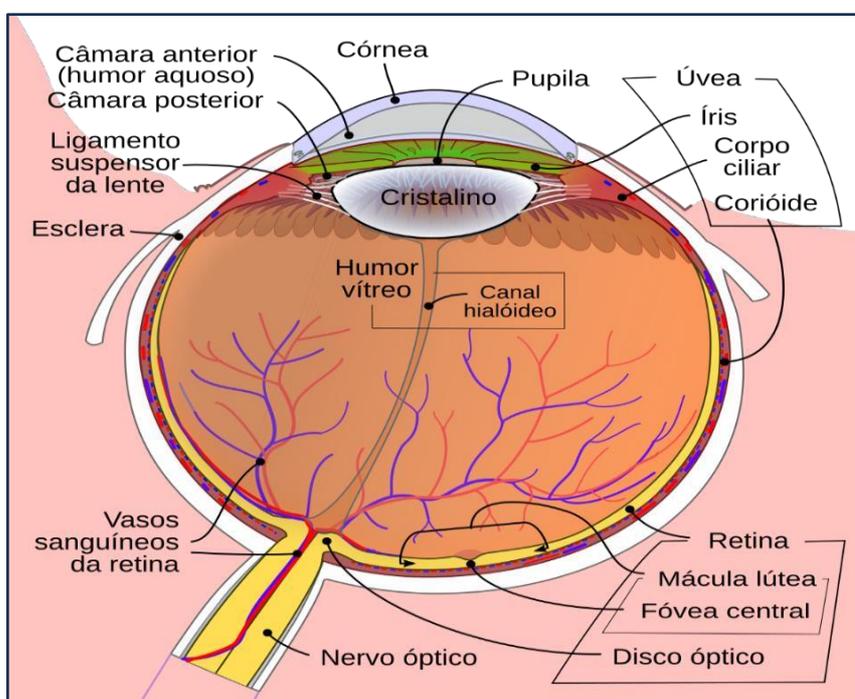
$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

3 O OLHO HUMANO COMO SISTEMA ÓPTICO

O termo "anatomia", de origem grega (*ἀνατέμνω* - *anatemnō*), significa "cortar em partes". Historicamente, referia-se à exploração das estruturas do corpo humano através de instrumentos cortantes, um ato antes conhecido como "anatomizar" e hoje denominado "dissecar". Esse método foi fundamental para o entendimento da estrutura e função do corpo humano por séculos. Graças ao trabalho contínuo de inúmeros estudiosos dedicados ao aprendizado e à evolução do conhecimento sobre o corpo humano, compreendemos seu funcionamento nos dias atuais, embora ainda existam mistérios a serem desvendados.

O olho humano, cuja estrutura é vista na Figura 6, em particular, constitui um sistema óptico notavelmente complexo e sofisticado, responsável pela nossa percepção visual do mundo. Comparável a uma câmera fotográfica, o olho captura a luz refletida pelos objetos e a converte em sinais elétricos que são interpretados pelo cérebro como imagens.

Figura 6: Anatomia do olho humano



Fonte: <https://www.jcabral.pt/GD/AFGO>

3.1 Componentes Ópticos do Olho Humano: Uma Análise Funcional para a Formação da Imagem Retiniana

O sistema óptico do olho humano constitui um arranjo altamente especializado de estruturas transparentes cuja interação funcional é essencial para a formação de imagens nítidas

sobre a retina. A qualidade da visão depende da precisão óptica e da integridade biológica de cada componente ocular, os quais atuam de maneira coordenada (ADLER, 2011; KANDEL et al., 2013; WANDELL, 1995).

I. Córnea: O Elemento Refrativo Primário

A córnea é a superfície mais anterior do globo ocular e representa a principal estrutura responsável pela refração da luz incidente. Sua transparência depende da regularidade das fibras colágenas e da ausência de vasos sanguíneos, o que evita dispersão da luz (ADLER, 2011). Devido à sua curvatura convexa constante e ao contraste entre os índices de refração do ar ($n \approx 1,00$) e do tecido corneano ($n \approx 1,376$), a córnea responde por cerca de dois terços (aproximadamente 67–70%) do poder dióptrico² total do olho, com valor médio de +43 dioptrias (KANDEL et al., 2013).

Essa refração inicial é essencial para a convergência dos raios luminosos em direção à retina, funcionando como um elemento óptico fixo e de alta potência.

II. Humor Aquoso: Manutenção da Homeostase Ocular e Suporte Metabólico

O humor aquoso é um fluido transparente continuamente produzido pelos processos ciliares e drenado pela malha trabecular, preenchendo as câmaras anterior e posterior do olho. Ele exerce papel crucial na manutenção da pressão intraocular (valores normais entre 10 e 21 mmHg), sendo determinante para a estabilidade estrutural do globo ocular (ADLER, 2011).

Além disso, o humor aquoso nutre tecidos avasculares como a córnea e o cristalino, fornecendo glicose e aminoácidos e promovendo a remoção de metabólitos (KANDEL et al., 2013).

III. Íris e Pupila: O Diafragma e a Abertura de Controle de Luminância

A íris, estrutura pigmentada do olho, regula a entrada de luz por meio da abertura pupilar. Sua coloração decorre da quantidade e da distribuição de melanina em seu estroma (ADLER, 2011). A pupila é controlada por dois músculos lisos: o esfíncter pupilar (inervado pelo sistema parassimpático), responsável pela miose, e o músculo dilatador (inervado pelo

² *Dioptrias (D)* medem a *potência refrativa de uma lente*, ou seja, sua capacidade de curvar a luz e focar imagens ($D=1/f$). *Watts (W)*, por outro lado, medem a *potência luminosa de uma fonte*, ou seja, quanta energia por segundo ela emite como luz (*e calor*). Não há conversão direta entre elas, pois descrevem características físicas distintas: a dioptria lida com a *geometria da luz*, enquanto o watt com a *energia emitida pela fonte*.

sistema simpático), que causa a midríase. O diâmetro pupilar varia entre 1,5 mm e 8 mm, permitindo a adaptação à luminância e controlando a profundidade de campo do sistema óptico (WANDELL, 1995).

IV. Cristalino: A Lente Acomodativa

O cristalino é uma estrutura biconvexa, avascular e transparente, sustentada pelas fibras zonulares (zônula de Zinn), que o conectam ao corpo ciliar. Contribui com cerca de 30–33% do poder dióptrico total ocular, com potência média em repouso de +18 a +20 dioptrias (ADLER, 2011).

Sua principal função é a acomodação, ou seja, o ajuste do foco para diferentes distâncias:

- Visão próxima: A contração do músculo ciliar reduz a tração zonular, permitindo que o cristalino adote forma mais esférica e aumente seu poder refrativo.
- Visão distante: O relaxamento muscular aumenta a tração sobre o cristalino, tornando-o mais plano e diminuindo seu poder dióptrico (KANDEL et al., 2013).

Com o envelhecimento, a elasticidade do cristalino diminui, comprometendo a acomodação e originando a presbiopia (WANDELL, 1995).

V. Humor Vítreo: Suporte Estrutural e Transparência Óptica

O humor vítreo é um gel translúcido formado principalmente por água (99%), colágeno e ácido hialurônico, preenchendo a cavidade vítrea entre o cristalino e a retina. Esse componente contribui para a manutenção da forma esférica do olho e promove o suporte da retina ao epitélio pigmentar subjacente (ADLER, 2011).

Sua alta transparência e propriedades viscoelásticas são essenciais para a propagação da luz sem dispersão até os fotorreceptores retinianos (KANDEL et al., 2013).

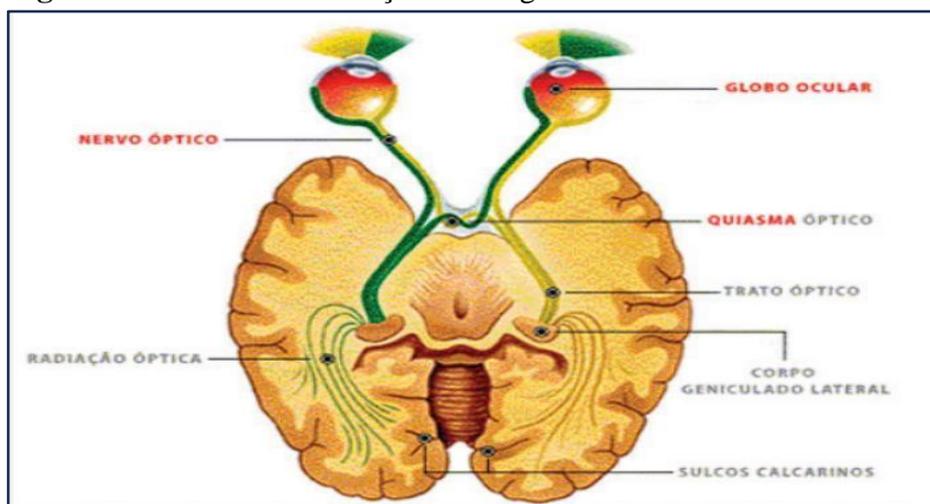
VI. Retina: Transdução Fotoquímica e Processamento Neural Primário

A retina é uma estrutura neural composta por diversas camadas de células. Nela se localizam os fotorreceptores, especializados na conversão da energia luminosa em sinais elétricos.

- Cones: Fotorreceptores predominantemente localizados na mácula, especializados na visão fotópica (em alta luminosidade), percepção cromática e alta acuidade visual. Existem três tipos de cones, cada um expressando opsinas³ com sensibilidade espectral distintas: S (Short-wavelength, azul): Sensíveis principalmente a comprimentos de onda curtos, com pico de absorção em torno de 420-440 nm (luz azul/violeta). M (Medium-wavelength, verde): Sensíveis a comprimentos de onda médios, com pico de absorção em torno de 530-535 nm (luz verde). L (Long-wavelength, vermelho): Sensíveis a comprimentos de onda longos, com pico de absorção em torno de 560-565 nm (luz amarelo-esverdeada, mas contribuem para a percepção do vermelho), responsáveis pela visão cromática tricomponente (WANDELL, 1995).
- Bastonetes: Distribuídos principalmente na periferia retiniana, atuam na visão escotópica (baixa luz) e possuem rodopsina (pico \approx 498 nm), que permite detectar luz com alta sensibilidade, porém sem distinção de cores (ADLER, 2011).

Os sinais gerados por esses fotorreceptores são processados por células bipolares, horizontais, amácrinas e ganglionares, antes de serem transmitidos ao cérebro via nervo óptico (KANDEL et al., 2013). Processo de formação da imagem visual representado na Figura 7.

Figura 7: Processo de formação de imagem visual



Fonte: <https://proenem.com.br/enem/biologia/sistema-nervoso-humano/>

1. A luz é inicialmente refratada pela córnea.

³ Opsinas são um grupo de *proteínas sensíveis à luz* que desempenham um papel fundamental na visão e em outras respostas biológicas à luz em animais. Elas pertencem a uma grande família de receptores de membrana celular chamados *receptores acoplados à proteína G (GPCRs)*.

2. O humor aquoso permite a condução do feixe luminoso até a pupila, cujo diâmetro é ajustado pela íris conforme a intensidade luminosa.
3. O cristalino ajusta o foco pela acomodação, projetando uma imagem real, invertida e reduzida na retina.
4. Os fotorreceptores realizam a transdução da luz em impulsos elétricos, por meio da isomerização dos pigmentos visuais.
5. A informação é processada por circuitos neurais retinianos, especializados em detectar contraste, movimento e bordas.
6. As células ganglionares geram potenciais de ação transmitidos ao nervo óptico.
7. As fibras do nervo óptico convergem no quiasma óptico, onde há cruzamento parcial.
8. Os tratos ópticos conduzem os sinais até o núcleo geniculado lateral (NGL) do tálamo.
9. Por fim, os sinais são enviados ao córtex visual primário (área V1), localizado no lobo occipital, onde ocorre a percepção consciente da imagem (KANDEL et al., 2013).

4 INSTRUMENTOS ÓPTICOS NA MEDICINA

Neste momento vamos traçar uma breve história da oftalmologia, continuando o nosso percurso para o entendimento das condições físicas e anatômicas do olho humano, no olhar dos cientistas muito além dos conhecidos e que geralmente não são citados em aulas convencionais.

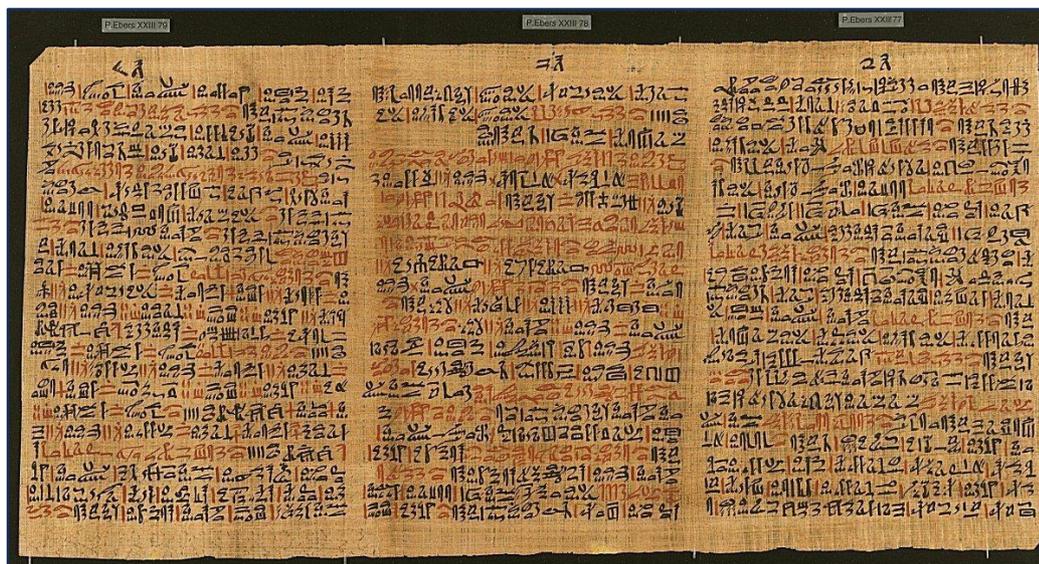
A palavra "oftalmologia" tem origem no grego antigo: ὀφθαλμός (ophthalmos), que significa "olho", e -λογία (-logia), que significa "estudo de" ou "discurso". Nesse sentido, literalmente, oftalmologia significa "o estudo dos olhos". Sendo uma disciplina médica, a oftalmologia se dedica ao estudo, diagnóstico e tratamento de doenças e distúrbios que afetam os olhos e a visão. Essa área do conhecimento não se restringe aos olhos humanos, abrangendo também a saúde ocular de animais. As diferenças na prática oftalmológica entre humanos e animais são mínimas, geralmente relacionadas a variações anatômicas ou à prevalência de determinadas doenças, e não a diferenças fundamentais nos processos patológicos.

Segundo Wheeler (1946), por volta de 2250 a.C., Hamurabi, um rei da Babilônia-Assíria, promulgou uma coleção de leis. Um número considerável de seções dessas leis relaciona-se com a oftalmologia ou, mais especificamente, com negligência ou imperícia oftálmica. Uma das leis afirmava que, se um homem destruísse o olho de outro homem, o seu próprio olho seria destruído. No caso de um homem livre, ele pagaria um maná de prata e, no caso de um escravo, ele pagaria metade de seu preço. Outra lei estabelecia que, se um médico abrisse um abscesso no olho de um homem com uma lanceta de bronze e salvasse o olho daquele homem, ele receberia dez siclos de prata; se o olho fosse destruído, seus dedos seriam cortados; e se o olho de um escravo fosse destruído, ele pagaria metade do preço do escravo.

Naquele período, a linha entre a medicina e a magia era tênue. Monges e sacerdotes, muitas vezes os únicos letrados da comunidade, eram os curandeiros, mas seus tratamentos se baseiam tanto em ervas e unguentos quanto em palavras de poder e rituais arcanos. Nenhum doente escapava sem ouvir as palavras mágicas que, acreditava-se, afastariam os espíritos malignos e trariam a cura. Mudando o cenário da Babilônia de 2250 a.C. para o Egito de 1500 a.C., aproximadamente um documento inestimável, encontrado entre as pernas de uma múmia em Assasif, foi adquirido pelo egiptólogo Ebers em uma banca de papiros. Atualmente, esse papiro está em exibição na biblioteca da Universidade de Lípsia e foi batizado em homenagem ao monge alemão Georg Ebers (visto na Figura 8), que o comprou em 1872 (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, [s.d.]).

Segundo o Dr. Emilio Suarez o Papiro Ebers, como era chamado, consistia em 110 colunas (páginas), de 20 a 22 metros, subdividido em 877 seções, mencionando cerca de 700 drogas, combinadas em mais de 800 fórmulas. Destas 110 colunas, oito são dedicadas

Figura 8: Papiro de Ebers, acervo do Museu do Universo da Farmácia (MUFA).



Fonte: <https://museudouniversodafarmacia.com.br/acervo/linha-do-tempo/papiro-de-ebers/>

exclusivamente a doenças dos olhos e o tratamento é aconselhado para problemas como dor, lacrimejamento, pus, sangue, desvio, visão turva, etc. Os medicamentos comuns empregados eram cebolas, alho-poró e feijão, óleo de rícino, romã, sais de cobre, oximel de escila, cicuta e ópio. Sendo estes os ensinamentos passados nas escolas dos templos, onde os sacerdotes eram médicos, e os médicos, sacerdotes. O conhecimento anatômico era geralmente pobre, o que é um tanto extraordinário quando uma particularidade da religião à época era o embalsamamento de todos os corpos, tanto ricos quanto pobres.

A especialidade médica da oftalmologia avançou e se aperfeiçoou significativamente ao longo do tempo. Conforme o Dr. Hilton Oliveira (s.d.), nomes como Hipócrates, Descartes e Kepler contribuíram para o progresso nos estudos da anatomia e das doenças oculares, embora tais estudos tenham se tornado mais aprofundados apenas no século XVII.

Nos séculos XVII e XVIII, ocorreram descobertas importantes sobre a refração e as primeiras intervenções cirúrgicas específicas, como as de estrabismo. Já nos séculos XIX e XX, a evolução da área foi mais consistente e acelerada, com avanços significativos em relação a distúrbios, exames, tratamentos e, principalmente, procedimentos cirúrgicos, que se aprimoraram rapidamente com os progressos tecnológicos (DUARTE; BARBOSA, 2019). No Brasil, a especialidade é regulamentada desde 1930, determinando que exames e a prescrição de lentes são atividades de responsabilidade exclusiva do médico oftalmologista.

4.1 Oftalmoscopia: funcionamento e aplicações

O oftalmoscópio é um instrumento que permite examinar a parte interior do olho. O instrumento é composto por um espelho angulado, várias lentes e uma fonte de luz (KANSKI; BOWLING, 2016). Com esse aparelho, o médico consegue ver a retina, o nervo óptico, a veia e as artérias da retina, e alguns problemas que podem afetar o humor vítreo (a substância gelatinosa do olho). Um oftalmoscópio direto é um dispositivo manual, semelhante a uma pequena lanterna com lente de aumento. Com o oftalmoscópio o médico ilumina o olho para examinar a córnea, cristalino, humor vítreo (substância gelatinosa que preenche a parte posterior do olho), retina, nervo óptico e veias e artérias da retina (consulte Estrutura e função dos olhos). A pessoa olha para a frente enquanto o raio de luz ilumina dentro do olho. É comum usar colírio para dilatar a pupila, o que permite ao médico ter uma visão melhor do olho.

Figura 9: Oftalmoscópio



Fonte: Imagem adaptada da fonte <https://optometriainfoco.blogspot.com/p/fundo.html>

A oftalmoscopia é um procedimento indolor e uma parte essencial do exame oftalmológico regular. Embora o uso de colírio para dilatar as pupilas possa causar visão temporariamente turva e aumentar a sensibilidade à luz por algumas horas, os benefícios do exame superam esse leve desconforto. Essa técnica não só permite detectar alterações na retina decorrentes de doenças oculares específicas, mas também é crucial para identificar sinais de algumas doenças que afetam outras partes do corpo (MANUAL MSD, [s.d.]). Por exemplo, ela é usada para

- Detectar as alterações causadas nos vasos sanguíneos da retina, em pessoas que sofrem de hipertensão arterial, arteriosclerose e diabetes mellitus.
- Indicar pressão elevada dentro do cérebro, o que resulta em edema (dilatação) do disco óptico normalmente em forma de concha (papiledema).

Os tumores na retina podem ser observados através da oftalmoscopia. Também pode ser diagnosticada a degeneração da mácula por meio da oftalmoscopia (KANSKI; BOWLING, 2016).

O oftalmoscópio indireto é uma ferramenta indispensável utilizada por oftalmologistas e optometristas. Nesse procedimento, um dispositivo binocular é posicionado na cabeça do examinador, que simultaneamente segura uma lente de mão em frente ao olho do paciente. Essa lente tem a função de focalizar a imagem do interior do olho, possibilitando uma visualização tridimensional.

A grande vantagem da oftalmoscopia indireta é sua capacidade de oferecer uma percepção de profundidade superior, o que é crucial para a identificação de condições como o descolamento de retina. Além disso, o instrumento emprega uma fonte de luz intensa, característica fundamental em casos onde o meio interno do olho está opaco, como ocorre na catarata. Comparado ao oftalmoscópio direto, o oftalmoscópio indireto proporciona um campo de visão mais amplo da retina, permitindo ao profissional examinar uma área significativamente maior (KANSKI; BOWLING, 2016).

4.2 Laser em oftalmologia: tipos e usos (cirurgia refrativa, glaucoma, etc.)

A utilização de lasers em tratamentos médicos, incluindo a correção da visão, é uma realidade desde a década de 1980. No campo da cirurgia refrativa, o trabalho do Dr. José Barraquer foi crucial para a transição para as técnicas modernas. Inspirado pela teoria do Dr. Lendeer Jans Lans, que em 1896 propôs que incisões na córnea poderiam corrigir sua curvatura e o astigmatismo, Barraquer, na década de 1930, defendeu a modificação do formato corneano como forma de tratar miopia e hipermetropia. Sua contribuição fundamental e o pioneirismo na área renderam-lhe o merecido título de Pai da cirurgia refrativa moderna (DUKE-ELDER; MILLER, 1972; WANG; WILKINS, 2008).

A compreensão aprofundada das técnicas baseadas em laser exige um conhecimento dos princípios físicos que nortearam seu desenvolvimento. A história dessa tecnologia inicia-se com o conceito de emissão estimulada de radiação, postulado por Albert Einstein em 1917 (MAIMAN, 1960). Einstein propôs que um fóton, ao interagir com um átomo em estado

excitado, poderia induzir a emissão de um segundo fóton com as mesmas características, um fenômeno essencial para o funcionamento dos *lasers*. Contudo, a materialização do *laser* como dispositivo prático demandaria décadas de avanços significativos na física e em tecnologias correlatas.

Em 1954, Charles Townes e Herbert Zeiger, juntamente com James Gordon, demonstraram o primeiro *maser* (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), um dispositivo que amplifica micro-ondas com base no princípio da emissão estimulada, previsto por Albert Einstein em 1917. Esse avanço marcou o início da tecnologia de amplificação de radiação por emissão estimulada (GORDON; ZEIGER; TOWNES, 1955). Posteriormente, em 1958, Townes e Arthur Schawlow propuseram teoricamente o conceito de um *laser óptico*, estendendo os fundamentos do maser para frequências mais altas, no espectro da luz visível (SCHAWLOW; TOWNES, 1958).

O primeiro laser funcional foi construído em 1960 pelo físico americano Theodore H. Maiman, utilizando um cristal de rubi como meio ativo. O sistema foi bombeado por uma lâmpada de flash, resultando em emissão pulsada de luz coerente — um marco que inaugurou a era dos lasers (MAIMAN, 1960).

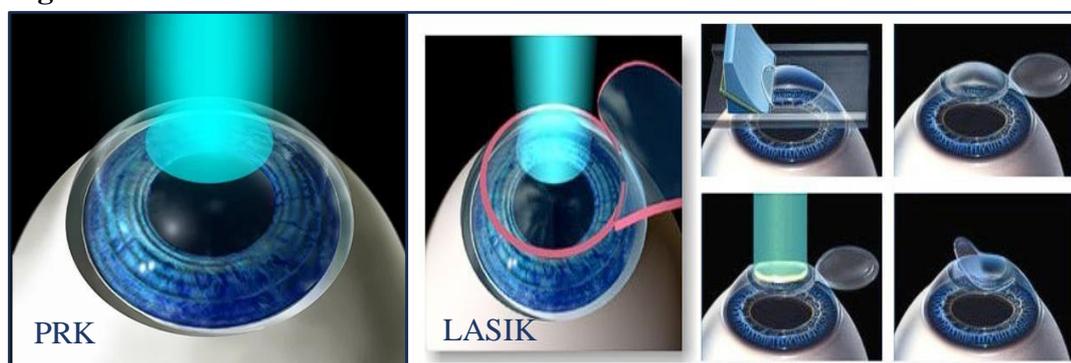
Poucos meses depois, ainda em 1960, Ali Javan, junto a William Bennett e Donald Herriott, desenvolveu o primeiro *laser* de emissão contínua, empregando uma mistura gasosa de hélio e néon. Esse modelo tornou-se notável por sua estabilidade e capacidade de emissão sustentada (JAVAN; BENNETT; HERRIOTT, 1961).

Ao longo das décadas de 1960 e 1970, o desenvolvimento de novos tipos de lasers foi intensificado, incluindo o *laser de dióxido de carbono* (CO_2) e o *laser de argônio*, que ampliaram as aplicações na medicina, indústria e comunicações. Já nos anos 1980, surgiram os *lasers de fibra óptica*, que revolucionaram a transmissão de dados em sistemas de telecomunicações, consolidando os lasers como uma das tecnologias fundamentais da era moderna.

Os avanços tecnológicos relacionados aos lasers elevaram a correção da visão a um patamar de precisão sem precedentes. A capacidade de sintonizar o comprimento de onda da luz laser possibilita a geração de feixes altamente concentrados e com potência excepcional. Tais feixes possuem intensidade suficiente para cortar materiais robustos, como aço industrial, e moldar substâncias extremamente duras, como diamantes (SILVA, 2014). Durante a década de 1970, estudos envolvendo moléculas diatômicas e gases nobres levaram ao desenvolvimento do *laser excimer*, que em virtude de suas propriedades únicas tornou-se fundamental para aplicações médicas e oftalmológicas (KROLIKOWSKI; MINDELL, 1976).

Caracteristicamente, a luz ultravioleta emitida por um *laser excimer* é fortemente absorvida por materiais biológicos e compostos orgânicos, sem provocar queimaduras ou cortes tradicionais, em vez disso, a energia do *laser* é direcionada com precisão para romper as ligações químicas nas camadas superficiais do tecido, promovendo uma desintegração controlada, fenômeno conhecido como fotoablação (SRINIVASAN et al., 1983). Na década de 1980, Rangaswamy Srinivasan, pesquisador da IBM, observou essa capacidade do *laser* excimer de realizar cortes limpos e precisos em tecidos orgânicos, minimizando os danos térmicos ao tecido adjacente (SRINIVASAN, 1983). Este avanço possibilitou a aplicação do *laser* em cirurgias oculares de alta precisão. Em 1983, Srinivasan, em colaboração com Stephen Trokel, realizou a primeira ceratectomia fotorrefrativa *in situ* assistida por *laser*, abrindo caminho para as modernas técnicas de correção refrativa ocular (TROKEL; SRINIVASAN, 1983).

Figura 10: Método PRK e LASIK



Fonte: Imagem adaptada da <https://cl clinicardiegovieira.com.br/portfoli o/cirurgia-refrativa-a-laser/>

A Ceratectomia Fotorrefrativa (PRK) foi aprovada para uso geral em 1995, tornando-se a primeira cirurgia ocular a laser amplamente disponível. Diferente do LASIK (ceratomileusis *in-situ* assistida por laser), a PRK envolve a remoção completa do epitélio, a camada externa da córnea, antes da remodelação a laser, visto na Figura 10 (TROKEL; SRINIVASAN, 1983). Apesar de ser um avanço significativo, a PRK apresentava um tempo de recuperação prolongado, o que motivou o desenvolvimento de técnicas mais aprimoradas (WALDMAN, 2000).

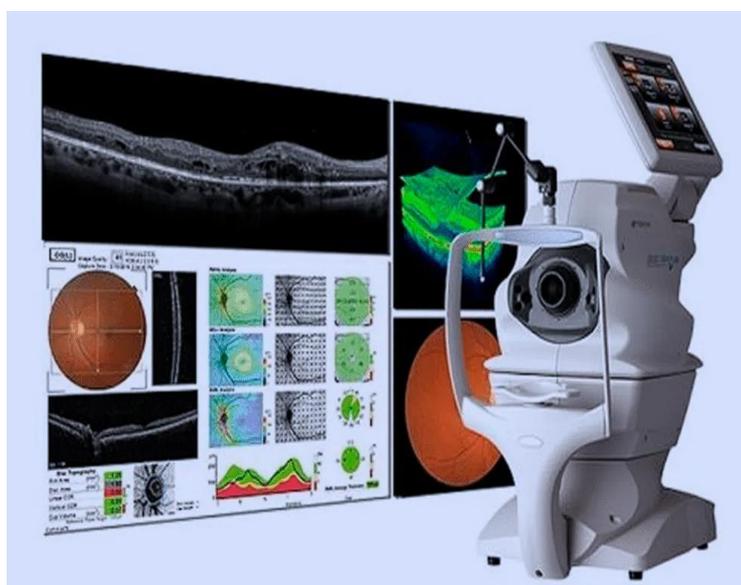
Nesse contexto, o microcerátomo, instrumento criado para realizar o corte de um *flap* (tampa) corneano, abriu caminho para o LASIK moderno em 1990 (ROTH, 1993). O LASIK, procedimento menos invasivo e com recuperação mais rápida, inicialmente utilizava o microcerátomo (dispositivo semelhante a um pequeno motor de passos) para criar o *flap*, seguido da aplicação do *laser excimer* para corrigir erros de refração. Atualmente, o laser de

femtosegundo (*laser* cuja duração de pulso é da ordem de 10^{-15} s) é frequentemente empregado na criação do *flap*, oferecendo maior precisão e segurança (SANDERS; VAIKUNTAM, 2016).

4.3 Tomografia de coerência óptica (OCT)

A Tomografia de Coerência Óptica (OCT, do inglês *Optical Coherence Tomography*) esta representado na Figura 11, é uma técnica de imagem não invasiva baseada nos princípios da interferometria de baixa coerência, que permite a obtenção de imagens em alta resolução de estruturas oculares, especialmente da retina, da mácula e do nervo óptico (DREXLER; FUJIMOTO, 2008).

Figura 11: Tomografia de coerência óptica (OCT)



Fonte: <https://blog.eyecarehealth.com.br/tomografia-de-coerencia-optica/>

A OCT opera de maneira análoga ao ultrassom, porém substitui ondas sonoras por luz infravermelha próxima, tipicamente com comprimento de onda entre 800 e 1.050 nm. O sistema óptico divide a luz em dois feixes: um direcionado ao tecido ocular e outro refletido por um espelho de referência. Ao se recombinarem, as ondas formam um padrão de interferência que é detectado e processado para gerar imagens tomográficas das camadas internas do tecido (KANDEL et al., 2013; ADLER, 2011).

O princípio físico utilizado é baseado na interferometria de Michelson, em que a diferença de caminho óptico entre os dois feixes refletidos fornece informação espacial detalhada da amostra analisada. A utilização de fontes de luz de banda larga (que abrange vários comprimentos de onda) e detectores altamente sensíveis, aliada ao processamento digital de

sinais, permite a reconstrução precisa de imagens tridimensionais com resolução micrométrica (entre 1 e 15 μm) (DREXLER; FUJIMOTO, 2008).

A principal vantagem da OCT reside na sua capacidade de produzir imagens de alta resolução e em tempo real, permitindo a visualização de detalhes anatômicos que não são perceptíveis por métodos clínicos convencionais, como a fundoscopia ou a retinografia. Essa acurácia viabiliza o diagnóstico precoce e o monitoramento de diversas patologias oculares (WANDELL, 1995).

A OCT revolucionou a prática oftalmológica ao proporcionar avaliação detalhada e não invasiva de diferentes camadas retinianas e do nervo óptico. Dentre suas aplicações clínicas mais relevantes, destacam-se:

- ✓ Degeneração macular relacionada à idade (DMRI): Permite a detecção de acúmulo de fluido sub-retiniano e a identificação de neovascularizações, contribuindo para o diagnóstico precoce e para a avaliação da resposta terapêutica.
- ✓ Glaucoma: Avalia a espessura da camada de fibras nervosas da retina (RNFL) e detecta alterações na cabeça do nervo óptico, possibilitando o diagnóstico precoce e a progressão da neuropatia óptica (ADLER, 2011).
- ✓ Retinopatia diabética: Identifica a presença de edema macular diabético, exsudatos e microhemorragias, orientando intervenções clínicas.
- ✓ Buraco macular e membrana epirretiniana: Fornece imagens precisas para avaliação do grau de comprometimento foveal e para a tomada de decisão cirúrgica.
- ✓ Acompanhamento pós-operatório: Especialmente em cirurgias vítreo-retinianas ou transplantes de córnea, permitindo a avaliação de sucesso terapêutico e identificação de complicações.

Do ponto de vista físico, a Tomografia de Coerência Óptica representa um dos exemplos mais sofisticados da aplicação da interferometria na prática médica. A técnica deriva do princípio de interferência de Michelson, sendo aplicada com adaptações que envolvem fontes de luz de baixa coerência e técnicas de varredura espectral (Fourier-domain OCT) (DREXLER; FUJIMOTO, 2008).

A OCT evidencia a sinergia entre Física, Engenharia e Medicina, sendo uma das tecnologias diagnósticas mais relevantes da oftalmologia contemporânea. Seu contínuo aprimoramento reflete o impacto do conhecimento físico na preservação da visão e na melhoria da qualidade de vida dos pacientes (KANDEL et al., 2013).

5 A INVENÇÃO DOS ÓCULOS REVISITADA

A obra de Vincent Ilardi, *Renaissance Vision from Spectacles to Telescopes*, intitulado “The Invention of Spectacles Revisited”, apresenta uma reavaliação crítica das origens históricas dos óculos, combinando rigor documental, análise de fontes primárias e crítica historiográfica (ILARDI, 2007). Ilardi parte da premissa de que, apesar de sua importância monumental, os óculos são uma das inovações mais subestimadas e obscuras em termos de autoria e desenvolvimento técnico. O autor destaca que os óculos dobraram, de forma efetiva, a vida útil de leitura e trabalho minucioso de milhões de pessoas desde sua invenção, comparando seu impacto à influência dos computadores na vida contemporânea. Essa afirmação serve como ponto de partida para defender a centralidade dos óculos na história da ciência aplicada e da cultura letrada do Ocidente.

Apesar da relevância, a identidade do inventor dos óculos permanece desconhecida. Ilardi explora a escassez de registros diretos e a natureza artesanal da invenção, observando que os primeiros fabricantes possivelmente eram artesãos que não registravam formalmente suas criações, confiando apenas na transmissão oral e na tradição prática. Entre os documentos citados, destaca-se o sermão de Frei Giordano da Pisa, de 1306, que afirma ter conhecido o inventor dos óculos, então recentemente criados, o que fornece um marco temporal confiável para sua origem: cerca de 1286 (ILARDI, 2007). Esta data, também sugerida por Edward Rosen em seus estudos clássicos, é aceita por Ilardi como a mais plausível.

5.1 Pisa e Veneza: Disputa pela Prioridade

Ilardi analisa a disputa histórica entre Pisa e Veneza pela primazia na invenção dos óculos. Pisa é favorecida por evidências textuais (como o sermão de Giordano e a crônica dominicana de Bartolomeo da San Concordio), enquanto Veneza oferece registros corporativos mais robustos, como os estatutos das corporações dos *cristalleri* (vidreiros), que em 1300 já mencionavam “*rodoli da ogli*” (lentes para os olhos) (ILARDI, 2007). Apontando que, embora Veneza tivesse uma indústria vidreira poderosa, faltam-lhe registros diretos de produção ou invenção dos óculos nos séculos XIII e XIV. Pisa, por outro lado, mesmo com uma indústria menor, apresenta testemunhos mais próximos do momento da invenção, o que fortalece seu protagonismo.

O autor sugere que a invenção dos óculos foi provavelmente resultado do conhecimento prático de artesãos anônimos, associados ou não a oficinas religiosas. Frei Alessandro della

Spina, por exemplo, é citado como alguém que, ao ver os primeiros óculos, aprendeu a reproduzi-los e divulgou sua fabricação — uma atitude que contrasta com o comportamento reservado do possível inventor original. Essa dinâmica ilustra como as ordens mendicantes, notadamente os dominicanos, não apenas utilizaram os óculos para leitura e ensino, mas também atuaram como vetores de sua difusão (ILARDI, 2007). Os conventos, ao contrário do que se imagina, funcionavam também como polos de inovação técnica e adaptação prática.

O capítulo da obra *Renaissance Vision from Spectacles to Telescopes*, de Vincent Ilardi, encerra-se com uma crítica à construção de mitos em torno da invenção dos óculos. Ilardi desmonta a lenda do florentino Salvino degli Armati como inventor, alegando tratar-se de uma falsificação surgida no século XVII, promovida por interesses patrióticos locais. Essa análise serve para denunciar o "campanalismo" (rivalidade regional) que contamina a historiografia tradicional sobre o tema.

5.2 Difusão Inicial dos Óculos

A obra *Renaissance Vision from Spectacles to Telescopes*, de Vincent Ilardi, o Capítulo 2, "Early Diffusion", oferece uma análise aprofundada sobre a disseminação dos óculos na Europa, com foco especial no século XIV. Ilardi contesta a suposição comum de que havia escassez documental nesse período, demonstrando que, embora relativamente raras, as menções a óculos existem em testamentos, inventários, registros alfandegários e obras literárias — sobretudo na Itália, em contraste com outras regiões como a Inglaterra e a França. O autor mostra que os óculos já estavam presentes em diversas cidades italianas poucos anos após sua invenção, com registros como o das despesas dos inquisidores dominicanos em 1316, que indicam a compra de um par de óculos de vidro com estojo pelo equivalente a seis soldos bolonheses — valor considerado surpreendentemente acessível. Isso contradiz a crença de que os óculos eram artigos de luxo restritos às elites. Ilardi também examina a resistência da medicina medieval ao uso dos óculos. Autores como Guy de Chauliac mencionam os óculos como último recurso para a visão fraca, ainda preferindo receitas herbais. Esse conservadorismo médico retardou o reconhecimento formal dos óculos como instrumentos terapêuticos, mesmo com sua ampla utilização prática.

A difusão além da Itália também é abordada. Por exemplo, na França, há a referência clássica de Guy de Chauliac em *Chirurgia Magna* (1363), além de relatos médicos espanhóis e descobertas arqueológicas em navios afundados com centenas de óculos na Croácia —

indicando que o comércio e o uso desses objetos se espalharam por rotas marítimas e redes comerciais amplas (ILARDI, 2007).

No Capítulo 3, *Glasses for All Ages in Italy*, da obra *Renaissance Vision from Spectacles to Telescopes*, Ilardi apresenta um dos pontos mais inovadores de sua pesquisa: o surgimento da personalização dos óculos de acordo com a idade dos usuários. Esse avanço é evidenciado por documentos como a carta da corte dos Sforza, datada de 1466, solicitando óculos para diferentes faixas etárias (dos 30 aos 70 anos) com menções explícitas a graus de presbiopia e à necessidade de lentes “finas” para estágios iniciais. Esse nível de especificidade mostra que, ao final do século XV, já havia um conhecimento técnico significativo sobre as exigências ópticas ligadas ao envelhecimento. O pedido incluía também óculos para jovens míopes, divididos em “meia visão” e “visão distante”, antecipando categorias que permaneceriam em uso até o século XVII.

Florença emerge, nesse contexto, como o principal polo de fabricação e inovação na produção de óculos. Os registros comerciais revelam uma indústria organizada, com divisão de trabalho entre fabricantes de armações, lapidadores de lentes e comerciantes, incluindo ourives como os de Pisa que firmaram contratos para produção em massa de óculos com armações de osso. Além disso, documentos alfandegários de Roma mostram a exportação em grande escala de óculos florentinos, muitas vezes embalados em caixas junto com outros artigos, como facas e cartas de baralho. Isso reforça a ideia de que os óculos já estavam plenamente inseridos nas práticas comerciais da época.

6 A TRANSFORMAÇÃO DA ÓPTICA NO RENASCIMENTO: FUNDAMENTOS FÍSICOS, AVANÇOS TECNOLÓGICOS E IMPACTOS NA MEDICINA E ASTRONOMIA SEGUNDO VINCENT ILARDI

O Renascimento representou muito mais do que um renascimento artístico ou filosófico: foi uma reestruturação profunda da epistemologia científica e da maneira como o ser humano percebia e interagia com o mundo (ILARDI, 2007). Dentre os vários campos do saber que floresceram nesse período, a óptica se destacou não apenas por seu impacto nas artes visuais, mas por sua integração direta com a matemática, a física e a medicina. No cerne dessa revolução encontra-se a obra de Vincent Ilardi, *Renaissance Vision: From Spectacles to Telescopes*, em que os capítulos 4, 5 e 6 oferecem uma análise detalhada da transição das lentes rudimentares de óculos às aplicações avançadas nos telescópios e na instrumentação científica.

O capítulo 6 deste trabalho, visa aprofundar o conteúdo desses três capítulos, ampliando a discussão com fundamentos físicos, reconstruções históricas críticas e interseções com a evolução da oftalmologia, trazendo à tona não apenas uma revisão do que foi feito, mas uma interpretação moderna da relevância dessas transformações.

6.1 Lentes de Óculos no Renascimento: A Gênese da Óptica Aplicada

No capítulo 4 de sua obra, Ilardi aborda a fabricação de lentes na Itália e na Alemanha entre os séculos XIII e XVI. Estas lentes eram, em sua essência, esféricas e feitas por experimentação empírica, baseadas na habilidade artesanal dos vidreiros. Os fundamentos físicos, porém, já estavam lançados desde a Antiguidade. O índice de refração do vidro (cerca de 1,5) foi empiricamente explorado antes de ser formalmente compreendido. A equação da refração (Lei de Snell), que relaciona os ângulos de incidência e refração com os índices de refração dos meios, só foi formulada no século XVII, mas já operava implicitamente na construção de lentes convexas e côncavas. A construção de lentes positivas (convexas) para hipermetropia e negativas (côncavas) para miopia foi uma das primeiras formas de aplicar a óptica geométrica na correção visual. Durante o Renascimento, matemáticos como Maurolico (1494–1575) já discutiam as propriedades da refração e focalização da luz, antecipando a formalização da óptica geométrica moderna por Kepler e Descartes.

Ilardi destaca que as oficinas venezianas de vidro, especialmente em Murano, foram cruciais para a inovação óptica. A manipulação da curvatura das lentes se deu empiricamente, mas havia uma intuição da relação entre a curvatura da lente e seu poder dióptrico. A equação (ILARDI, 2007)

$$P = \left(\frac{n - 1}{R} \right) \quad (4)$$

já era intuída, onde P é o poder dióptrico, n é o índice de refração e R é o raio de curvatura. O avanço técnico na esfericidade das superfícies visava reduzir aberrações esféricas, um problema frequente nas lentes da época. A refração desigual em diferentes partes da lente causava distorções na imagem, algo que começava a ser compreendido qualitativamente.

6.2 A Invenção e Aplicação Científica do Telescópio: O Salto da Visão Natural à Visão Cósmica

No capítulo 5, Ilardi descreve como a aplicação combinada de lentes convergentes e divergentes permitiu a criação dos primeiros telescópios refratores. A física envolvida na construção do telescópio de Galileu baseava-se na combinação de uma lente objetiva convexa com uma ocular côncava, o que permitia uma imagem ereta e aumentada. O telescópio galileano era limitado pelo campo de visão estreito, mas sua capacidade de ampliação era notável para a época. O fator de aumento angular era dado por (ILARDI, 2007):

$$\text{Ampliação} = \frac{f_{obj}}{f_{ocular}} \quad (5)$$

onde f_{obj} é a distância focal da objetiva, e f_{ocular} a da ocular. Galileu, ao construir um telescópio de até 30 aumentos, conseguia observar fenômenos nunca antes vistos, como as luas de Júpiter — um marco não apenas técnico, mas cosmológico. A instrumentação óptica permitiu a refutação visual do geocentrismo. A observação das fases de Vênus era impossível de ser conciliada com o modelo ptolomaico. A óptica tornou-se, portanto, uma ferramenta de validação de modelos físicos — um novo paradigma na filosofia natural. Ilardi enfatiza a relação entre instrumento e paradigma científico: o telescópio não apenas aumentava a visão, mas também “aumentava” a confiança na observação como método científico. Essa mudança epistemológica foi a base do método experimental moderno.

6.3 A Expansão da Óptica: Medicina, Engenharia e Arte

No capítulo 6, Ilardi mostra como as lentes, antes limitadas à correção da visão, passaram a ser aplicadas em instrumentos médicos. O uso de lentes de aumento possibilitou o desenvolvimento do microscópio, ainda rudimentar no século XVII, mas já em gestação

conceitual durante o Renascimento. A ampliação de tecidos e a visualização de estruturas anatômicas antes invisíveis aos olhos humanos permitiram uma abordagem mais empírica da medicina. A dissecação, prática antes restrita e condenada, tornou-se uma ciência baseada na observação. O olho humano passou a ser “melhorado” por dispositivos ópticos, dando início à era dos diagnósticos visuais e da instrumentação médica.

Instrumentos como o teodolito, o astrolábio e o sextante, que usavam princípios de reflexão e refração, foram fundamentais para a engenharia civil, a cartografia e a navegação (ILARDI, 2007). A óptica deixou de ser uma curiosidade filosófica para se tornar tecnologia aplicada, com impacto direto nas expansões geográficas da época. A aplicação dos princípios ópticos também influenciou profundamente as artes visuais. A perspectiva linear e aérea, popularizadas por artistas como Brunelleschi e Leonardo da Vinci, refletem uma compreensão intuitiva, mas precisa, das leis da propagação da luz e da geometria da visão. Espelhos esféricos e planos começaram a ser usados por artistas para estudar reflexos e simetrias, e há indícios de que câmaras escuras e lentes de aumento já eram utilizadas para auxiliar em pinturas hiper-realistas, como postulado por David Hockney na *Lens Hypothesis* (ILARDI, 2007).

7. CONCLUSÃO

Considerando a visão como um dos sentidos mais preciosos, a presente análise explora o papel fundamental da Física na evolução da Oftalmologia, destacando sua relevância na compreensão da visão, no diagnóstico e no tratamento de doenças oculares. Por meio de uma abordagem histórica e conceitual, revisamos os fundamentos da óptica e sua aplicação em instrumentos médicos e técnicas modernas. Inicialmente, discutimos os avanços na compreensão da luz, desde as teorias da Antiguidade até os modelos contemporâneos da Física Quântica. Foram abordadas contribuições fundamentais de pensadores como Ibn al-Haytham, pioneiro nos estudos da óptica; Newton, com seus estudos sobre a natureza da luz branca e a decomposição espectral, lançando as bases para a compreensão de fenômenos ópticos essenciais para o funcionamento da visão e o desenvolvimento de instrumentos de diagnóstico; Huygens, com sua teoria ondulatória da luz; Maxwell, que unificou eletricidade e magnetismo, estabelecendo a natureza eletromagnética da luz; e Einstein, com a teoria da relatividade e a dualidade onda-partícula da luz.

Compreendida a estrutura ocular sob a ótica da Física, como um sistema óptico complexo cujos elementos trabalham sinergicamente para formar a imagem visual, discutimos a correção de distúrbios visuais como miopia, hipermetropia e astigmatismo por meio de lentes que manipulam a refração da luz e da cirurgia refrativa que remodela a córnea. Exploramos também a atuação de dispositivos ópticos cruciais, como o oftalmoscópio (baseado na reflexão da luz para examinar o interior do olho), o *laser* (utilizando a emissão estimulada de radiação para diversos tratamentos) e a tomografia de coerência óptica (OCT), que emprega a interferometria de baixa coerência para obter imagens de alta resolução das estruturas oculares.

A compreensão física dos fenômenos de refração, reflexão e interferência possibilitou o desenvolvimento de técnicas precisas de diagnóstico e tratamento de patologias como catarata (opacidade do cristalino que afeta a refração da luz), glaucoma (dano ao nervo óptico frequentemente associado à pressão intraocular, cuja medição se baseia em princípios físicos) e degeneração macular (afeta a mácula, investigada com técnicas ópticas avançadas). Adicionalmente, a análise da obra de Vincent Ilardi lança luz sobre a importância dos óculos, uma inovação tecnológica de base física que revolucionou a correção visual e teve um impacto profundo na história da ciência e da saúde ocular. Em suma, a integração da Física e da Medicina não é apenas desejável, mas sim indispensável para o contínuo avanço da Oftalmologia moderna. A Física fornece não só a base teórica para entender a complexidade da visão, mas também as ferramentas tecnológicas que revolucionam o diagnóstico, o tratamento e, conseqüentemente, a saúde ocular e a qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS

- ADLER, Francis H. *Physiology of the eye: clinical application*. 11. ed. St. Louis: Mosby, 2011.
- ASM. *Ibn Al-Haytham: pai da óptica moderna*. Disponível em: <https://doi.org/10.5144/0256-4947.2007.464>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- BOYLAN, Michael. Hippocrates. *Internet Encyclopedia of Philosophy*, 2006. Disponível em: <https://iep.utm.edu/hippocra/>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- BRITANNICA. *Willebrord Snell*. In: *Encyclopaedia Britannica*. Disponível em: <https://www.britannica.com/biography/Willebrord-Snell>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- CARRON, Wilson; GUIMARÃES, Osvaldo. *As faces da física* (vol. único). 1. ed. São Paulo: Moderna, 1997.
- DA CRUZ SILVA, Boniek Venceslau. Young fez, realmente, o experimento da fenda dupla? *Latin-American Journal of Physics Education*, v. 3, n. 2, p. 16, 2009.
- DREXLER, W.; FUJIMOTO, J. G. *Optical coherence tomography: technology and applications*. New York: Springer, 2008.
- DUARTE, M. R.; BARBOSA, M. C. *História da Oftalmologia: Da Antiguidade à Era Contemporânea*. São Paulo: Editora Médica Paulista, 2019.
- DUKE-ELDER, S.; MILLER, J. W. *System of Ophthalmology: Ophthalmic Optics and Refraction*. London: Henry Kimpton, 1972.
- DUNLOP, M.; SMITH, A. *Science, vision, and religion in medieval Europe and the Islamic world*. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- EL MÉDICO EN LA CASA. *Papiro de Ebers*. 2 jun. 2013. Disponível em: <https://elmedicoenlacasa.com/papiro-de-ebers/>. Acesso em: 23 fev. 2025.
- FERREIRA, Pedro L.; MARSHALL, Fernando J. *História da física moderna: da luz à quântica*. São Paulo: Editora Ciência Atual, 2018.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman lectures on physics. Vol. III: Quantum mechanics*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1965.

FEYNMAN, R. P. Space-time approach to quantum electrodynamics. *Physical Review*, v. 76, n. 6, p. 769, 1949.

FRANKLIN, Allan. *A história da mecânica quântica: experimentos e interpretações*. Rio de Janeiro: Zahar, 2015.

FRENCH, Anthony P. *Ondas e oscilações*. São Paulo: Edgard Blücher, 1979.

GORDON, J. P.; ZEIGER, H. J.; TOWNES, C. H. The Maser—New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer. *Physical Review*, v. 99, n. 4, p. 1264–1274, 1955.

GUTAS, D. *Greek thought, Arabic culture*. London: Routledge, 2012.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos da física: óptica e física moderna*. Vol. 4. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de física: eletromagnetismo, luz e ondas*. Vol. 3. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

HEALY, W. P. Electrodynamics, Quantum. In: MEYERS, Robert A. (Ed.). *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2003. p. 199–217. ISBN 978-0-12-227410-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00207-6>. Acesso em: 26 dez. 2024.

HECHT, Eugene. *Óptica*. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2017.

HEISENBERG, W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, v. 43, n. 3–4, p. 172–198, 1927.

HEWITT, Paul G. *Física conceitual*. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

HOGENDIJK, J. P.; SABRA, A. I. *The enterprise of science in Islam: new perspectives*. Cambridge, MA: MIT Press, 2003. 386 p.

HUANG, D. et al. Optical coherence tomography. *Science*, v. 254, n. 5035, p. 1178–1181, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1957169>.

HUYGENS, C. *Traité de la lumière; ou y sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la reflexion et dans la refraction et particulièrement dans l'étrange refraction du cristal d'islande*. [S.l.]: Gressner & Schramm, 1885. 134 p.

ILARDI, V. *Renaissance vision: from spectacles to telescopes*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2007.

ISAACSON, Walter. *Einstein: sua vida, seu universo*. Tradução de Alves Calado. São Paulo: Companhia das Letras, 2007.

JACKSON, John David. *Eletrodinâmica clássica*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

JAVAN, A.; BENNETT, W. R.; HERRIOTT, D. R. Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He–Ne Mixture. *Physical Review Letters*, v. 6, n. 3, p. 106–110, 1961.

KALDERON, A. E. A evolução do design do microscópio desde sua invenção até os dias atuais. *American Journal of Surgical Pathology*, v. 7, n. 1, p. 95–102, 1983.

KANDEL, Eric R. et al. *Princípios de neurociência*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

KANSKI, J. J.; BOWLING, B. *Oftalmologia Clínica: Uma Abordagem Sistemática*. 7. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

KRISS, T. C.; KRISS, V. M. História do microscópio cirúrgico: da lupa à microneurocirurgia. *Neurocirurgia*, v. 42, n. 4, p. 899–907, 1998.

KUHN, Thomas S. *A revolução copernicana: a astronomia planetária no desenvolvimento do pensamento ocidental*. 5. ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 2005.

KWAN, A.; DUDLEY, J.; LANTZ, E. Quem realmente descobriu a lei de Snell? *Physics World*, v. 15, n. 4, p. 64, 2002.

LAMB, W. E.; RETHERFORD, R. C. Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method. *Physical Review*, v. 72, n. 3, p. 241, 1947.

LINDBERG, D. C. *The beginnings of Western science*. 2. ed. Chicago: University of Chicago Press, 2008.

MAIMAN, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, v. 187, n. 4736, p. 493–494, 1960.

MANUAL MSD. Exame oftalmológico. [s.d.]. Disponível em: <https://www.msdmanuals.com/pt-br/casa/dist%C3%BArbios-dos-olhos/diagn%C3%B3stico-e-terapias-oculares/exame-oftalmo%C3%B3gico>. Acesso em: 7 jun. 2025.

MERCK & CO, Inc. O que é o oftalmoscópio. Rahway, NJ, EUA (conhecida como MSD fora dos EUA e Canadá). Disponível em: <https://www.msdmanuals.com/pt/casa/multimedia/imag e/o-que-%C3%A9-o-oftalmosc%C3%B3pio>. Acesso em: 23 mar. 2025.

MUDRY, A. A história do microscópio para uso em cirurgia de ouvido. *American Journal of Otolaryngology*, v. 21, n. 6, p. 877–886, 2000.

MUFA. *Papiro de Ebers – 1500*. Disponível em: <https://museudouniversodafarmacia.com.br/acervo/linha-do-tempo/papiro-de-ebers/>. Acesso em: 23 fev. 2025.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. *Curso de física básica: óptica, relatividade e física quântica*. Vol. 4. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2014.

OCL VISION. Quem inventou a cirurgia ocular a laser – qual é a sua história? 23 abr. 2020. Disponível em: <https://www.oclvision.com/blog/who-invented-laser-eye-surgery/>. Acesso em: 27 abr. 2025.

OLIVEIRA, Hilton. Dia do oftalmologista: história e curiosidades. 7 maio 2020. Disponível em: <https://drhiltonoliveira.com.br/dia-do-oftalmologista/>. Acesso em: 9 mar. 2025.

PLATO (2005–2024). *Descartes' Physics*. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Stanford University. Disponível em: <https://plato.stanford.edu/entries/descartes-physics/>. Acesso em: 27 abr. 2025.

PREDIGER, Grazielle Molinari et al. James Clerck Maxwell: um grande nome na Ciência. In: *8ª Mostra de Ensino, Pesquisa e Extensão – MOEPEX*. 2019.

RASHED, R. A pioneer in anaclastics: Ibn Sahl on burning mirrors and lenses. *Isis*, v. 81, p. 464–491, 1990.

ROTH, A. S. *Microkeratome development and LASIK surgery*. *Journal of Refractive Surgery*, v. 9, n. 1, p. 4-9, 1993.

SABRA, A. I. Ibn al-Haytham's revolutionary project in optics. *Journal of the American Philosophical Society*, v. 153, n. 3, p. 273–284, 2003.

SANDERS, D. R.; VAIKUNTAM, M. *Femtosecond laser technology in LASIK*. *Ophthalmology Clinics*, v. 29, n. 3, p. 265-270, 2016.

SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, C. H. Infrared and Optical Masers. *Physical Review*, v. 112, n. 6, p. 1940–1949, 1958.

SCHWINGER, J. On quantum electrodynamics and the magnetic moment of the electron. *Physical Review*, v. 73, n. 4, p. 416, 1948.

SILVA, Rui Miguel Moreira da. *Experiências históricas para a determinação da velocidade da luz*. 2002.

SRINIVASAN, R. et al. *Photoablation of biological tissues by ultraviolet lasers*. *Science*, v. 220, n. 4597, p. 524–525, 1983.

TBAKHI, A. Ibn al-Haytham: Father of Optics and Pioneer of the Scientific Method. *Annals of Saudi Medicine*, v. 30, n. 6, p. 464–465, 2010.

TOMONAGA, S. On a relativistically invariant formulation of the quantum theory of wave fields. *Progress of Theoretical Physics*, v. 1, n. 2, p. 27–42, 1946.

TROKEL, S. L.; SRINIVASAN, R. *Laser surgery of the cornea*. *Laser Surgery*, v. 2, n. 4, p. 223–228, 1983.

WADE, N. J.; FINGER, S. O olho como um instrumento óptico: da câmera escura à perspectiva de Helmholtz. *Percepção*, v. 30, n. 10, p. 1157–1177, 2001.

WALDMAN, M. P. *Photorefractive keratectomy and laser eye surgery*. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, v. 26, n. 9, p. 1332-1335, 2000.

WANDELL, Brian A. *Foundations of vision*. Sunderland: Sinauer Associates, 1995.

WANG, M. Y.; WILKINS, M. *Refractive Surgery*. In: YANOFF, M.; DUKER, J. S. (Ed.). *Ophthalmology*. 3. ed. St. Louis: Mosby Elsevier, 2008. p. 255–270.

WHEELER, J. R. History of ophthalmology through the ages. *The British Journal of Ophthalmology*, v. 30, n. 5, p. 264–275, 1946.

WOLF, Kurt Bernardo. *Geometric optics on phase space*. New York: Springer Science & Business Media, 2004. 376 p.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. *Física IV: Sears e Zemansky: óptica e física moderna*. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016. Colaborador: A. Lewis Ford. Tradução: Daniel Vieira. Revisão técnica: Adir Moysés Luiz.

YOUNG, Thomas. The Bakerian Lecture. Experiments and calculations relative to physical optics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 94, p. 1–16, 1804.

ZEISS. A história dos óculos. 12 nov. 2021. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol4/Num2/v4n2a09.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2024.