

FABRICIU A. V. BENINI<sup>1</sup>, LUIZ GONÇALVES NETO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Professor EBTT, IFSP, Câmpus São Carlos, benini@ifsp.edu.br.

<sup>2</sup> Professor Associado, USP - São Carlos, lgneto@usp.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.06.01-3 Teoria Eletromagnética, Microondas, Propagação de Ondas, Antenas

Apresentado no  
4º Congresso de Pós-Graduação do IFSP  
27 e 28 de novembro de 2019- Sorocaba-SP, Brasil

**RESUMO:** O conceito da luz nos dias atuais está relacionado à teoria quântica, com a unidade do fóton como entidade mínima a descrever o fenômeno, porém as propriedades eletromagnéticas continuam nas aplicações da base teórica, principalmente no que concerne à holografia. As interações do campo eletromagnético com o meio de propagação, bem como os obstáculos, são complexos, por isso descrevê-las matematicamente para cálculos numéricos exigem uma série de condições de contorno e simplificações a fim de reduzir o custo computacional. Apesar dessas simplificações os resultados oriundos de simulação são muito próximos a inúmeros experimentos práticos. Para compreender como se chegou no patamar atual de conhecimento sobre os fenômenos ópticos, foi realizado um estudo histórico apresentando os principais pontos determinantes para a construção desse conhecimento. Os resultados demonstraram que, muitas vezes, opiniões de grandes nomes da ciência, podem interferir no rumo de investigação de outros cientistas, atrasando o desenvolvimento do conhecimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** revisão bibliográfica; história da luz; fenômenos ópticos, holografia, difração, frente de onda.

### A HISTORICAL STUDY ON THE EVOLUTION OF OPTICS

**ABSTRACT:** The concept of light today is related to quantum theory, with the photon unit as the minimum entity to describe the phenomenon, but the electromagnetic properties continue in the applications of the theoretical basis, especially with regard to holography. Interactions of the electromagnetic field with the propagation medium, as well as obstacles, are complex, so describing them mathematically for numerical calculations requires a number of boundary conditions and simplifications in order to reduce the computational cost. Despite these simplifications, the simulation results are very close to numerous practical experiments. To understand how the current level of knowledge about optical phenomena was reached, a historical study was carried out presenting the main determining points for the construction of this knowledge. The results showed that often the opinions of big names in science can interfere with the direction of research of other scientists, delaying the development of knowledge.

**KEYWORDS:** literature review; history of light; optical phenomena, holography, diffraction, wavefront.

### INTRODUÇÃO

A fim de compreender o atual patamar de tecnologia, relacionada à luz, que redundou em uma das áreas mais completas que tira proveito de todo conhecimento formado em torno desse assunto, a

holografia, buscou-se identificar e compreender, desde a raiz, nos primórdios da filosofia, acompanhar a evolução até os dias de hoje.

No decorrer da história da humanidade diversos ferramentais foram desenvolvidos e utilizados para o amadurecimento de toda teoria envolvendo a luz da forma que a conhecemos hoje. Pode-se dizer que a filosofia foi a mola propulsora de todo processo, questionando a natureza e os efeitos da luz, associando sua irradiação com a formação de imagens na mente humana. Em seguida, a matemática contribuiu para um melhor entendimento, principalmente na determinação da trajetória, reflexão e refração da luz. Os árabes foram vanguarda nesse campo, durante o século X-XI. Eles desenvolveram o *Ray-Tracing*, empregado até os dias de hoje (EL-BIZRI, 2005). Com um conjunto incipiente de teoria formado, foi necessário chegar avanços relacionados à produção do vidro para que novas descobertas surgissem. Além disso, a metalurgia teve papel de destaque nesse ponto, na construção de armações e suportes aos vidros. Com a possibilidade de analisar o comportamento da luz ao atravessar diferentes meios refringentes e suas respectivas formas geométricas, abriu caminho para associar tais fenômenos com as leis da física que apenas começavam a serem elaboradas. A guinada definitiva para o conceito de onda eletromagnética, foi fruto de um longo período de conflitos teóricos e de amadurecimento dos fenômenos observados. O mais conhecido embate, que reflete esse conflito, está entre aqueles que acreditavam no conceito da luz corpuscular, cuja trajetória poderia ser descrita como um raio, onde Newton era o defensor mais famoso, e os que defendiam o comportamento ondulatório da luz, com Christiaan Huygens (1629-1695) como maior referência nesse campo. Aos poucos o conceito ondulatório foi ganhando força através dos experimentos, com o surgimento de novos vidros, aliado a diferentes teorias elaboradas. No mundo contemporâneo, com a teoria da relatividade, a luz adquiriu características duais, dentro do conceito quântico, onde passa a ser considerada partícula de energia representada pelo fóton. Esse novo entendimento abriu as portas para o processamento de imagem digital, área em exploração nos dias de hoje, dentre os principais encontra-se CGH (*Computer Generated Hologram*) ou holograma gerado por computador, tema na qual o presente trabalho se encerra.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Foi realizado um levantamento a respeito de estudos de fenômenos ópticos, desde os primeiros registros conhecidos. As fontes bibliográficas referentes à história, nas quais o trabalho se baseou, foram selecionadas pelo critério de receberem dezenas ou mais citações e de serem recentes, para contemplar um ponto de vista contemporâneo. As bibliografias antigas, foram aquelas que conceituaram alguma nova teoria, como Planck ou Albert Einstein. Buscou-se as publicações que apresentasse maior impacto no âmbito nacional e internacional nessas publicações separadas. Com base nos estudos realizados foi montado uma cronologia, descritiva, com os principais fatos históricos.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os primeiros registros relacionados ao estudo e análise dos fenômenos ópticos remontam no ano de 300 A.C., através do enunciado de Euclides sobre a lei da reflexão, também é considerado por muitos como uma primeira aproximação para a lei da refração, a qual foi expressa por Ptolomeu da Alexandria, por volta do século I D.C. Ptolomeu considerava que a razão entre os ângulos de passagem através da interface dos meios era constante, hoje sabe-se que na verdade são os senos dos ângulos (STRONG, 2012). Sem levar em consideração o relato metódico a respeito dos fenômenos ópticos, desde o século IX A.C., o filósofo Homero já levantava questões sobre a natureza da luz e seus efeitos.

Após a primeira aproximação a respeito dos fenômenos da refração, um evento que contribuiu para a evolução da óptica, foi o aprimoramento das técnicas de produção do vidro na cidade de Veneza, Itália, após o ano de 1270. De acordo com Mait (2006), coincidentemente naquele ano houve uma série de eventos aparentemente isolados que parecem ter desencadeado na maturidade de duas tecnologias necessárias para a produção de mecanismos ópticos, a metalurgia, responsável pela fixação e na fabricação do vidro. Esse conhecimento tornou-se uma questão de segredo de estado, suscitando

em leis duras contra quem levasse a outras cidades. As leis duras impetradas por Veneza perduraram por mais de 300 anos e começaram a se tornar obsoletas no começo do século XVII, principalmente com uma publicação, em 1611, de Antonio Neri intitulada "A Arte do Vidro" (*L'arte vetraria*), onde é revelada a apropriada proporção de sódio, cal e silicatos necessárias para a produção de vidros de alta qualidade. Ainda segundo Mait (2006), na mesma época de Antonio Neri, houveram mais importantes eventos coincidentes, como a introdução de dois telescópios diferentes por Lippershey e Galileo e o conceito de dioptria de Kepler. A aplicação prática desse conceito ficou restrita a apenas pequenas diferenças entre os ângulos, uma vez que Kepler apoiou seus estudos em dados cheios de falhas de Vitello, impossibilitando em finalizar a lei da refração. Somente em 1621 que Snell conseguiu explicar completamente os fenômenos associados à refração. Aparentemente, a lei da refração aparece publicada independentemente por Descartes em 1637 na publicação denominada *Dioptrique*. Graças aos estudos paralelos de Descartes que o mesmo derivou a forma de uma lente que seria necessária para corrigir a aberração esférica. A lei da refração, foi um marco para o design óptico, a partir dele, foi possível estabelecer uma relação direta entre a curvatura da lente e o índice de refração com a distância focal, feito realizado por Cavalieri em 1647, que acabou conhecido como "fórmula de fabricante de lente".

O ponto culminante para o design óptico ocorreu em 1670, com a derivação da equação da imagem, feita por Newton. Nela a distância focal é relacionada com a distância entre um objeto e o plano da imagem. Vale notar as contribuições de Newton no campo da óptica e o impacto de duas conclusões equivocadas, a primeira foi sua declaração em 1704, que a propagação da luz se dava como um raio, através da publicação *Óptica*, e a segunda era de que a dispersão cromática era a mesma para qualquer vidro, impossibilitando assim de ocorrer correção de aberrações cromáticas por meio refrativo. A declaração de Newton teve peso contra as investigações que possuíam conclusões diferentes, dentre elas a de Huygens, que em 1678 reforçaria sobre a natureza da luz com característica pulsante e em 1690 publicou sua maior obra, *Tratado sobre a luz* (MOURA, 2016). A questão cromática direcionou os estudos para soluções baseadas na reflexão, redundando no surgimento de uma série de telescópios com elementos refletivos, até que em 1662, a tradução do livro de Antonio Neri para o inglês causou uma mudança na produção do vidro. O fabricante inglês de vidro, George Ravenscroft, adicionou chumbo na composição de seu produto, patenteando a inovação como vidro de sílex. Após 60 anos do surgimento da inovação de Ravenscroft, o astrônomo amador Hall tirou proveito das propriedades de dispersão cromática de conjunto de vidros de sílex para corrigir a aberração cromática (MAIT, 2006). Pode-se afirmar, portanto, que o século XVII foi um importante marco na consolidação dos principais conceitos da geometria da óptica conhecidos hoje, além de ser o início de uma série de vestígios a despeito da propagação da luz.

No final do século XVII, antes da declaração de Newton, começam a surgir estudos questionando a natureza da luz, talvez instigados pela precoce sugestão de Robert Hooke em 1665, de que a luz possui comportamento como se fosse uma onda e ainda nesse mesmo ano pela descoberta da difração por Grimaldi. Até o próprio Isaac Newton estudou os fenômenos ligados à difração, o que ele chamou de "infração de obstáculo". Não foi essa a única evidência direta com interferência da luz que Newton trabalhou, ele teve contato com os estudos de Robert Boyle (1663), de anéis concêntricos em torno de lentes convexas em contato com lâminas de vidro. Por causa desses estudos mais aprofundados, o experimento acabou sendo conhecido por Anéis de Newton (STRONG, 2012).

Aqui vale um parêntese para discorrer sobre a difração, uma vez que ela é o principal fenômeno aproveitado na produção de um holograma. A difração pode ser caracterizada como uma dispersão na forma de interferências da frente de onda. Portanto, a frente de onda, ao se defrontar com um obstáculo, sofre difração nas bordas. Além da difração, é a interferência das ondas eletromagnéticas o *kernel* central que possibilita a reconstrução de uma imagem.

O século XVIII pode ser considerado como sem grandes acontecimentos para a óptica, talvez o único evento significativamente relevante seja a publicação de Euler, "*Nova teoria lucis et colorum*" (1746), nela o famoso matemático introduz a periodicidade na luz "pulsante" de Huygens, muito embora em nenhum momento Euler o tenha citado (MOURA, 2016). Basicamente esse século tirou

proveito das inovações tecnológicas ocorridas previamente para amadurecer as ideias surgidas até então. Segundo Moura (2016), apesar de muitos acreditarem que possa ter acontecido uma batalha, durante esse período, entre os que se alinhavam com Newton, com sua teoria corpuscular, e os que estavam do lado de Huygens, defendendo uma luz "vibracional", não foi isso que aconteceu, a compreensão acerca dos fenômenos da luz se tornaram muito mais profundos e modernos do que antes. Além de ser considerado um período de amadurecimento sobre as teorias vigentes, o século XVIII testemunhou grandes avanços no campo da biologia, em função dos desenvolvimentos de microscópios cada vez melhores e também na astronomia (MAIT, 2006).

O início do século XIX foi marcado por importantes trabalhos, também foi quando ocorreu o registro de imagens através do uso do nitrato de prata por Thomas Wedgewood, em 1802 (MARRACCINI, 2015). Para a consolidação da teoria defendendo a luz como onda, entre 1800 e 1807, Thomas Young publicou uma série de trabalhos sob esse tema, em especial em 1804 quando introduziu o conceito crítico da interferência (MOURA, 2016). Um *workshop* sobre fusão de vidros na Baviera com Fraunhofer à frente, pareceu ser o ponto de partida para o surgimento de uma série de composições de vidros, onde o próprio Fraunhofer caracterizou as propriedades dispersivas de uma série delas através de sua nascente técnica de espectroscopia (MAIT, 2006). Augustin Jean Fresnel, através de um memorial de cálculo que se baseava nas ideias de Huygens e Young, conseguiu calcular a distribuição do padrão de interferência de uma luz difratada com boa acurácia (GOODMAN, 2005). A dominância da óptica de Newton sobre a natureza da luz foi minguando rapidamente até receber seu golpe de misericórdia em 1865 com as equações de Maxwell e suas descrições da luz como onda eletromagnética. Mas foi uma fundamentação puramente matemática para as ideias de Huygens e Fresnel, conhecido como princípio de Huygens-Fresnel, que em 1882 Gustav Kirchhoff fez a demonstração robusta da natureza ondulatória da luz (BOUWKAMP, 1954). Hoje sabe-se que a formulação de Kirchhoff para difração é uma primeira aproximação, uma vez que sua previsão coincide com grande parte de experimentos. Os responsáveis por encontrarem inconsistências na formulação de Kirchhoff foram Poincaré em 1892 e Sommerfeld em 1894. A teoria da difração de Rayleigh-Sommerfeld, nasceu das revisões de Sommerfeld, de 1894, aplicando a teoria das funções de Green. O conceito conhecido como teoria da difração de Rayleigh-Sommerfeld, assim como a de Kirchhoff, contam em parte com algumas simplificações cujo resultados obtidos são uma boa aproximação, quando comparado com diversos tipos de experimentos. Ambos tratam a luz como uma grandeza escalar. Pode-se dizer que o século XIX foi determinante para o direcionamento e consolidação da irradiação eletromagnética da luz.

No começo do século XX, Planck (1900a), Planck (1900b) descreve pela primeira vez o quantum, elemento unitário, atrelado à radiação. Aliado a isso, a teoria da relatividade causou uma verdadeira revolução, abrindo de vez o caminho para a mecânica quântica, primeiro com a teoria especial (EINSTEIN, 1905) e após 10 anos com a geral (EINSTEIN, 1915), ambos trabalhos do renomado Albert Einstein. No campo da óptica, como efeito, a luz passou a ser vista como uma partícula de energia representada pelo fóton, termo cunhado pela primeira vez por Lewis (1926). O fóton pode ser considerado o elo entre a mecânica quântica e a luz, onde o mérito da primeira é devido à capacidade de se explicar fenômenos físicos em escala atômica. Essa teoria é o principal elemento que ajudou na construção do primeiro laser, pelo físico americano Maiman (1960), utilizando um cristal de rubi como meio ativo produzindo uma luz vermelha com comprimento de onda de 694.3nm. Isso causou grande impacto sobre formação e análise de imagens, dando início ao conceito de processamento digital de imagens, após Boyle e Smith (1970) terem inventado o CCD (Charge Coupled Device). Essa nova área viabilizou a eliminação e simplificação de inúmeros elementos ópticos, reduzindo sistemas que outrora seriam custosos e sensíveis a uma grande variedade de perturbações (MARRACCINI, 2015).

Não só no campo da mecânica quântica que o século XX foi marcado, mas também no desenvolvimento de novos materiais que impactaram significativamente os avanços atuais. Quando Schottky, Ulich e Wagner (1929) comprovaram através de experimento a barreira de potencial formada na junção entre semicondutores, abriu-se caminho para o descobrimento de diversos

dispositivos eletrônicos. Outra contribuição que deu impulso a novas descobertas de materiais para a área deu-se com a publicação de Veselago (1968) postulando a respeito de materiais que oferecem índice de refração negativo. Naquele mesmo ano Heilmeyer e Zanoni(1968) relatam um efeito até então desconhecido em cristais líquidos nemáticos (BENINI\* e NETO, 2018), a reorientação de suas moléculas quando submetidos a um campo elétrico, esses efeitos podem ser aproveitados em CGH (BENINI et al., 2017,2018, 2019).

## CONCLUSÕES

A análise histórica dos eventos relacionados à óptica coloca a filosofia como ponto de partida. Também é ilustrativo o impacto da opinião de uma pessoa renomada como Isaac Newton, pôde interferir no amadurecimento da compreensão dos fenômenos ópticos, cuja discussão em torno da natureza da luz perdurou por aproximadamente dois séculos. Pode-se observar que a partir das publicações de Maxwell e de Planck ocorreu um avanço exponencial, quando comparado com os períodos anteriores, inclusive com o surgimento de dispositivos dedicados à manipulação de frente de ondas, o que propiciou o surgimento do conceito envolvendo a holografia.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador de doutorado, Prof. Luiz Gonçalves Neto e ao IFSP - Câmpus São Carlos por permitir que eu concluísse através do afastamento.

## REFERÊNCIAS

- BENINI, F. A. V., & Neto, L. G. (2017). Fresnel holograms generation using the fast Cosine Transform. **Optics InfoBase Conference Papers**, Part F47-D, 1–2.
- BENINI, F. A. V., B. V. Borges, and L. G. Neto, "Fresnel Holograms Generation Using Partitioned Holograms and Fast Cosine Transform," in **Imaging and Applied Optics 2018** (3D, AO, AIO, COSI, DH, IS, LACSEA, LS&C, MATH, pcAOP), OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), paper JM4A.31.
- BENINI\*, F.A.V; NETO, L.G. An Analysis of the Evolution in the Fingerprint Verification Procedures. Anais WVC 2018 - **XIV Workshop de Visão Computacional**. 2018, pp. 6. Ilhéus/BA, Brazil.
- BENINI, F. A. V., B. V Borges, e L. G. Neto, "Phase-only Fresnel Hologram Generation From Halftone Images", in **Digital Holography & 3-D Imaging** - DH2019, 2019, no 19-23 May 2019, p. 2.
- BOUWKAMP, C. J. Diffraction Theory. **Reports on Progress in Physics**, IOP Publishing, v. 17, n. 1, p. 302, jan 1954. ISSN 00344885.
- BOYLE, W. S.; SMITH, G. E. Charge coupled semiconductor devices. **Bell System Technical Journal**, Wiley Online Library, v. 49, n. 4, p. 587–593, 1970.
- EINSTEIN, A. On the special theory of relativity. **Ann Phys**, v. 17, p. 891–921, 1905.
- \_\_\_\_\_. On the general theory of relativity. **Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math.Phys.)**, v. 1915, p. 799–801, 1915.
- EL-BIZRI, Nader. (2005). A philosophical perspective on Alhazen's optics. *Arabic Sciences and Philosophy*. 15. 189 - 218. 10.1017/S0957423905000172.
- GOODMAN, J. W. Introduction to Fourier Optics. **McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering**. 3rd. ed. Englewood, Colorado: Roberts & Company Publishers,2005. v. 8. 491 p. ISSN 13555111. ISBN 0974707724.
- HEILMEIER, G. H.; ZANONI, L. Guest-host interactions in nematic liquid crystals. a new electro-optic effect. **Applied Physics Letters**, AIP, v. 13, n. 3, p. 91–92, 1968.
- LEWIS, G. N. The Conservation of Photons. **Nature**, v. 118, n. 2981, p. 874–875, 1926. ISSN 0028-0836.
- MAIMAN, T. Stimulated optical radiation in ruby. **Nature**, v. 187, p. 493–494, 1960.

MAIT, J. N. A history of imaging: Revisiting the past to chart the future. **Opt. Photon. News**, OSA, v. 17, n. 2, p. 22–27, Feb 2006.

MARRACCINI, P. J. **Novel smart modules for imaging, communications, and displays**. 198 p. Tese (Doutorado) — University College Cork, 2015.

MOURA, B. A. Newton versus Huygens: como (não) ocorreu a disputa entre suas teorias para a luz. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 111–141, 2016. ISSN 2175-7941.

PLANCK, M. On an improvement of wien's equation for the spectrum. **Verh. Deut. Phys. Ges.**, v. 2, p. 202–204, 1900.

\_\_\_\_\_. On the theory of the energy distribution law of the normal spectrum. **ibid**, v. 2, p. 237–245, 1900.

SCHOTTKY, W.; ULICH, H.; WAGNER, C. *Thermodynamik*. Berlin, 1929.

STRONG, J. *Concepts of classical optics*. [S.l.]: **Courier Corporation**, 2012.

VESELAGO, V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . **Soviet physics uspekhi**, IOP Publishing, v. 10, n. 4, p. 509, 1968.