



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

Pedro Miguel Pereira

**Simulação e Reconstrução de Hologramas de Objetos 2D e 3D por Camadas
usando Python**

São Carlos
2026

Pedro Miguel Pereira

**Simulação e Reconstrução de Hologramas de Objetos 2D e 3D por Camadas
usando Python**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em
Engenharia Física do Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas da Universidade Federal de São Carlos
como requisito para a obtenção do título de Enge-
nheiro Físico.

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Tribuzi Rodrigues Pi-
nheiro Gomes

São Carlos

2026

Pereira, Pedro Miguel

Simulação e reconstrução de hologramas de objetos 2D e 3D por camadas usando Python / Pedro Miguel Pereira -- 2026.
38f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Vinicius Tribuzi Rodrigues Pinheiro Gomes

Banca Examinadora: Filippo Giovanni Ghiglieno, Paulo Henrique Dias Ferreira

Bibliografia

1. Holografia digital. I. Pereira, Pedro Miguel. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

Pedro Miguel Pereira

**Simulação e Reconstrução de Hologramas de Objetos 2D e 3D por Camadas
usando Python**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de
"Engenheiro Físico" e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em
Engenharia Física.

São Carlos, 7 de Julho de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vinicius Tribuzi Rodrigues
Pinheiro Gomes
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Filippo Giovanni Ghiglieno
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Paulo Henrique Dias Ferreira
Universidade Federal de São Carlos

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de rotinas para a geração e leitura de hologramas digitais utilizando a linguagem de programação Python e a biblioteca LightPipes. A metodologia utilizada consistiu na realização de simulações de propagação e difração da luz — pelo método da convolução — em objetos bidimensionais e tridimensionais compostos por camadas, adotando-se a configuração de holografia *in-line*. Em seguida, as rotinas implementadas foram aplicadas à leitura de hologramas extraídos de artigos sobre zooplâncton marinho. Os resultados obtidos demonstram que os hologramas gerados computacionalmente por essas rotinas preservam adequadamente as informações de forma, transmitância e profundidade dos objetos simulados, as quais podem ser recuperadas com boa fidelidade. Também é demonstrada a capacidade dessas rotinas em reconstruir imagens a partir de hologramas obtidos em experimentos reais, mesmo quando parte dos parâmetros experimentais não está disponível.

Palavras-chave: holografia digital; holografia *in-line*; método da convolução

ABSTRACT

This work presents the development and evaluation of routines for generating and reading digital holograms using the Python programming language and the LightPipes library. The methodology involved simulating light propagation and diffraction—using the convolution method—for two-dimensional and layered three-dimensional objects, employing an in-line holography configuration. Subsequently, the implemented routines were applied to process holograms sourced from papers on marine zooplankton. The results demonstrate that the holograms computationally generated by these routines adequately preserve information regarding the shape, transmittance, and depth of the simulated objects, allowing for high-fidelity recovery. The routines' ability to reconstruct images from holograms obtained in real experiments is also demonstrated, even when some experimental parameters are unavailable.

Keywords: digital holography; in-line holography; convolution method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Duas ondas planas se sobrepondo. (HECHT, 2017)	10
Figura 2 – Princípio de Huygens. (SCHNARS; JÜPTNER, 2005)	12
Figura 3 – Difração por uma abertura pontual. (SCHNARS; JÜPTNER, 2005) . .	13
Figura 4 – Ângulos para o cálculo do fator de inclinação. (SCHNARS; JÜPTNER, 2005)	14
Figura 5 – Holografia <i>in-line</i> . (HECHT, 2017)	15
Figura 6 – Holografia <i>off-axis</i> . (GABOR, 1972)	17
Figura 7 – Holografia de algumas formas geométricas simples: (a) Objetos; (b) Holograma; (c) Reconstrução pelo método da convolução ($d = 2$ cm). .	22
Figura 8 – Holografia de figuras com formas complexas: (a) Objetos; (b) Holograma; (c) Reconstrução pelo método da convolução ($d = 2$ cm). . . .	23
Figura 9 – Holografia de um objeto semi-transparente: (a) Objeto; (b) Holograma; (c) Reconstrução pelo método da convolução ($d = 2$ cm).	24
Figura 10 – Diagrama mostrando as posições dos diferentes planos que compõe um objeto tridimensional.	25
Figura 11 – Holografia de um objeto composto por camadas: (a) Holograma; (b) Reconstrução no plano $d = 3$ cm; (c) Reconstrução no plano $d = 2$ cm.	25
Figura 12 – Holografia de um copépode: (a) Holograma <i>in-line</i> (TAN; WANG, 2013); (b) Reconstrução obtida por simulação ($d = 1,2$ m); (c) Reconstrução do artigo original (TAN; WANG, 2013).	26
Figura 13 – Holografia de um indivíduo do gênero <i>Temora</i> : (a) Holograma (MORENO <i>et al.</i> , 2026); (b) Reconstrução obtida por simulação ($d = 102$ mm); (c) Reconstrução do artigo original (MORENO <i>et al.</i> , 2026). . . .	27
Figura 14 – Holografia de um decápode em estágio larval: (a) Holograma (MORENO <i>et al.</i> , 2026); (b) Reconstrução obtida por simulação ($d = 87$ mm); (c) Reconstrução do artigo original (MORENO <i>et al.</i> , 2026).	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	9
2.1	OBJETIVO GERAL	9
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
3.1	INTERFERÊNCIA	10
3.2	DIFRAÇÃO	11
3.2.1	Princípio de Huygens-Fresnel	11
3.2.2	Teoria Escalar de Kirchhoff	13
3.3	HOLOGRAFIA	14
3.3.1	Holografia de Gabor ou <i>in-line</i>	15
3.3.2	Holografia de Leith-Upatnieks ou <i>off-axis</i>	16
3.4	HOLOGRAFIA DIGITAL	18
4	METODOLOGIA	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1	TESTES INICIAIS	22
5.2	RECONSTRUÇÃO DE OBJETOS BIDIMENSIONAIS	23
5.3	RECONSTRUÇÃO DE OBJETOS TRIDIMENSIONAIS	24
5.4	RECONSTRUÇÃO A PARTIR DE HOLOGRAMAS REAIS	26
6	CONCLUSÃO	29
	Referências	30
	APÊNDICE A – Programa teste.py	31
	APÊNDICE B – Programa gerador.py	33
	APÊNDICE C – Programa leitor.py	35
	APÊNDICE D – Programa gerador-3d.py	36
	APÊNDICE E – Programa leitor-varredura.py	38

1 INTRODUÇÃO

Uma fotografia convencional registra apenas a distribuição de intensidade da luz proveniente de um objeto. As informações de fase da onda luminosa, entretanto, são perdidas durante o processo de aquisição da imagem. Como consequência, não é possível reconstruir integralmente a frente de onda original e reproduzir todos os efeitos ópticos presentes na cena, como a percepção de profundidade e as diferentes perspectivas do objeto.

A holografia surgiu como uma solução para essa limitação. Trata-se de uma técnica de captura de imagens capaz de armazenar tanto a amplitude quanto a fase da onda luminosa proveniente do objeto, possibilitando a reconstrução completa dessa frente de onda. Quando iluminado adequadamente, o holograma reproduz a mesma onda que originalmente atingiu o meio de registro, fazendo com que o observador perceba uma imagem visualmente indistinguível do objeto original, incluindo suas características tridimensionais e efeitos de perspectiva. (HECHT, 2017).

Em um holograma, as informações de amplitude e fase não são armazenadas diretamente, mas codificadas na forma de um padrão de interferência produzido pela superposição entre a onda proveniente do objeto e uma onda de referência. Essa forma de codificação decorre da natureza ondulatória da luz, princípio físico que fundamenta a holografia. A recuperação dessas informações pode ser realizada de maneira óptica, iluminando o holograma com a mesma onda de referência usada na sua gravação, ou por meio de processamento computacional, no qual a propagação da luz é simulada numericamente. (SCHNARS; JÜPTNER, 2005). Essa última abordagem caracteriza a holografia digital, tema central deste trabalho.

Em comparação com a holografia feita em laboratório, a holografia digital oferece algumas vantagens. Além da praticidade em se trabalhar com um holograma no formato digital, nas simulações é possível utilizar uma fonte de luz verdadeiramente monocromática e com distância de coerência infinita. Essas características tornam a holografia digital uma técnica útil em aplicações como microscopia, interferometria, caracterização de materiais e visualização de organismos microscópicos.

Devido às especificidades de cada área, várias ferramentas computacionais voltadas para holografia digital foram desenvolvidas independentemente. Apesar dessa multiplicidade de ferramentas, todas elas devem ao menos permitir a gravação e a leitura de hologramas. Assim, torna-se pertinente investigar se, utilizando uma dessas ferramentas, é possível realizar a geração de hologramas e a reconstrução de objetos bidimensionais e tridimensionais. A investigação dessa questão possui grande relevância, visto que, independentemente da área considerada, as etapas de gravação e reconstrução são essenciais para se fazer holografia digital.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e avaliar rotinas computacionais para a geração de hologramas e reconstrução da imagem de objetos bidimensionais e tridimensionais, compostos por camadas, utilizando a linguagem Python e métodos numéricos de propagação da luz.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar uma biblioteca da linguagem Python voltada à simulação de fenômenos ópticos para o desenvolvimento das rotinas computacionais.
- Implementar rotinas para gerar hologramas e reconstruir a imagem de objetos bidimensionais com diferentes níveis de complexidade e de transmitância.
- Investigar a capacidade de hologramas gerados por computador em representar informações tridimensionais por meio da reconstrução de objetos compostos por múltiplos planos.
- Aplicar as rotinas desenvolvidas a hologramas obtidos experimentalmente e publicados na literatura científica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INTERFERÊNCIA

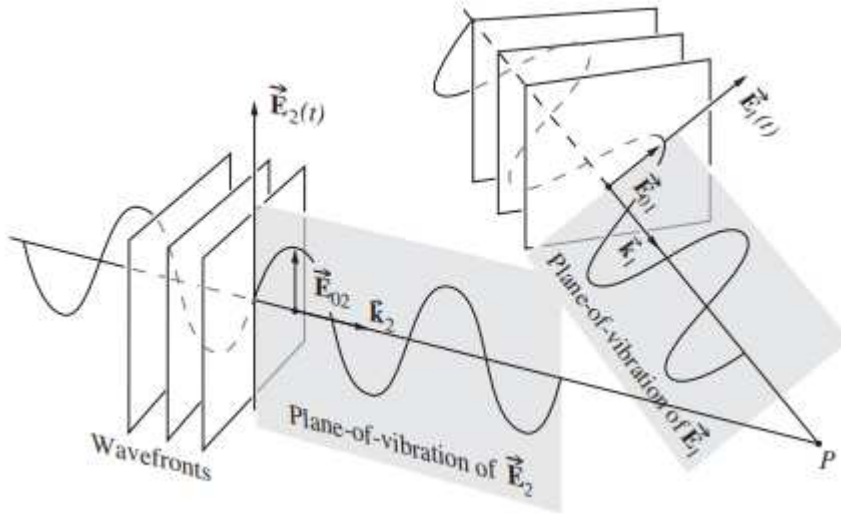


Figura 1 – Duas ondas planas se sobrepondo. (HECHT, 2017)

No contexto do eletromagnetismo clássico, a luz é entendida como uma onda eletromagnética. Uma consequência direta dessa natureza ondulatória é a ocorrência de interferência quando duas ou mais ondas luminosas se sobrepõem em uma mesma região do espaço. Para analisar esse fenômeno, consideremos duas ondas planas de mesma frequência ω (Figura 1), descritas por

$$\vec{E}_1(\vec{r}) = \vec{E}_{01} \exp\{i(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \delta_1)\} \quad (1a)$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}) = \vec{E}_{02} \exp\{i(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \delta_2)\} \quad (1b)$$

onde $\vec{E}_{01}$ e $\vec{E}_{02}$ representam as amplitudes dos campos elétricos, $\vec{k}_1$ e $\vec{k}_2$ são os vetores de onda, e δ_1 e δ_2 correspondem às fases iniciais. Em unidades do SI, a intensidade de cada uma dessas ondas é dada por

$$I_1 = \frac{\varepsilon\nu}{2} \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1^* = \frac{\varepsilon\nu}{2} E_{01}^2 \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{\varepsilon\nu}{2} E_{02}^2 \quad (2)$$

sendo ε a permissividade elétrica e ν a velocidade da luz no meio considerado. Sobrepondo as ondas (1)a e (1)b, a intensidade resultante será tal que

$$\begin{aligned} I &\propto (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^* \\ &= \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1^* + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2^* + \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1^* \end{aligned} \quad (3)$$

Os dois primeiros termos em (3) são proporcionais às intensidades individuais das ondas, enquanto que os termos cruzados são responsáveis pelo fenômeno da interferência. Definindo

$$\phi_1 = \vec{k}_1 \cdot \vec{r} + \delta_1 \quad \text{e} \quad \phi_2 = \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \delta_2 \quad (4)$$

e utilizando a identidade de Euler, vê-se que

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1^* &= (\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}) (e^{i(\phi_1 - \phi_2)} + e^{-i(\phi_1 - \phi_2)}) \\ &= 2(\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}) \cos(\phi_1 - \phi_2)\end{aligned}\quad (5)$$

Por simplificação, geralmente supõe-se que as ondas envolvidas na sobreposição estão polarizadas na mesma direção. Assumindo que os vetores $\vec{E}_{01}$ e $\vec{E}_{02}$ são paralelos, obtemos então

$$\begin{aligned}\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1^* &= 2E_{01}E_{02} \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ &= \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{\varepsilon \nu} \cos(\phi_1 - \phi_2)\end{aligned}\quad (6)$$

Utilizando (2) e (6) em (3), temos

$$I \propto I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (7)$$

Para cada posição $\vec{r}$, a relação (7) fornece, a menos de uma constante, a intensidade resultante da sobreposição de duas ondas planas de mesma frequência. Ao considerar a distribuição de intensidade em um plano do espaço, diz-se que se trata de um padrão de interferência.

3.2 DIFRAÇÃO

A difração é outro fenômeno característico das ondas. Na óptica, a difração é a alteração da direção de propagação de um feixe luminoso ao interagir com obstáculos, sem que esse desvio possa ser atribuído aos processos de reflexão ou refração. (SOMMERFELD, 1954)

A primeira descrição teórica desse fenômeno foi proposta a partir do princípio de Huygens e posteriormente refinada por Fresnel, resultando na teoria de Huygens-Fresnel. Mais tarde, com o estabelecimento da teoria eletromagnética da luz por Maxwell, tornou-se possível formular uma abordagem mais rigorosa e fundamentada para a difração. Nesse contexto, Kirchhoff desenvolveu uma teoria baseada nas equações do eletromagnetismo clássico, fornecendo uma descrição matemática mais consistente do fenômeno.

3.2.1 Princípio de Huygens-Fresnel

O princípio de Huygens estabelece que “cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado como um ponto de origem para ondas esféricas secundárias”. (SCHNARS; JÜPTNER, 2005). A frente de onda em um instante posterior é então determinada pela envoltória dessas ondas secundárias. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática da ideia.

Existem duas principais críticas à formulação de Huygens. A primeira delas está relacionada ao fato de que apenas parte das ondas secundárias é considerada na construção

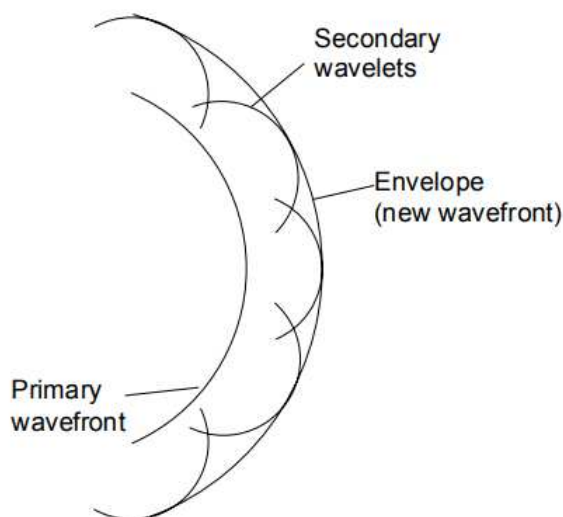


Figura 2 – Princípio de Huygens. (SCHNARS; JÜPTNER, 2005)

da nova frente de onda. Se as frentes de todas as ondas secundárias forem traçadas integralmente, surgem duas curvas envoltórias distintas. Uma dessas curvas corresponde à frente de onda que efetivamente se propaga na direção do movimento da onda. Entretanto, a segunda envoltória indica a existência de outra onda propagando-se em sentido contrário. Ainda que tal onda regressiva não é observada experimentalmente, a exclusão dessa solução por Huygens não tem respaldo científico.

A segunda crítica a ser feita refere-se à ausência do comprimento de onda na formulação do princípio. Evidências experimentais mostram que os efeitos de difração dependem fortemente da relação entre o comprimento da onda incidente e as dimensões do obstáculo ou abertura. Em particular, a difração é mais pronunciada quando essas dimensões são da mesma ordem de grandeza. Como essa dependência não está explícita no princípio de Huygens, conclui-se que ele é incapaz de fornecer uma descrição quantitativa do fenômeno da difração.

Na tentativa de aprimorar a ideia de Huygens, Fresnel postulou que a amplitude da onda original observada em um ponto do espaço resulta da interferência entre todas as ondas secundárias que não estivessem obstruídas. Fazendo algumas suposições acerca da amplitude e fase dessas ondas secundárias, Fresnel pôde realizar previsões quantitativas que eram consistentes com resultados de experimentos de difração. (GOODMAN, 1996). Essa nova formulação, conhecida como princípio de Huygens-Fresnel, foi um grande avanço na compreensão da difração. Entretanto, as hipóteses utilizadas por Fresnel não tinham uma justificativa física. Além disso, sua teoria não deixava claro qual era a influência da polarização da luz no caso de ondas eletromagnéticas.

3.2.2 Teoria Escalar de Kirchhoff

Após a consolidação da teoria eletromagnética da luz, Kirchhoff conseguiu desenvolver uma descrição mais robusta da difração, enfim fundamentando com rigor matemático as ideias anteriormente propostas por Huygens e Fresnel. Partindo das equações de Maxwell, ele demonstrou que, sob determinadas condições, o caráter vetorial da luz pode ser desconsiderado, permitindo que certos problemas de difração possam ser tratados por meio de uma teoria escalar.

Consideremos o arranjo da Figura 3. Uma fonte pontual S , localizada nas coordenadas (ξ, η) , ilumina uma tela opaca contendo uma abertura pontual situada em (x, y) . Deseja-se determinar a intensidade num ponto arbitrário P do plano de observação $\xi'\eta'$, separado por uma distância d da tela. Para tanto, é necessário saber o campo em $P(\xi', \eta')$. Como toda a frente de onda proveniente de S é bloqueada pela tela, exceto no ponto (x, y) , a única contribuição para o campo observado em P provém da onda secundária gerada nessa abertura.

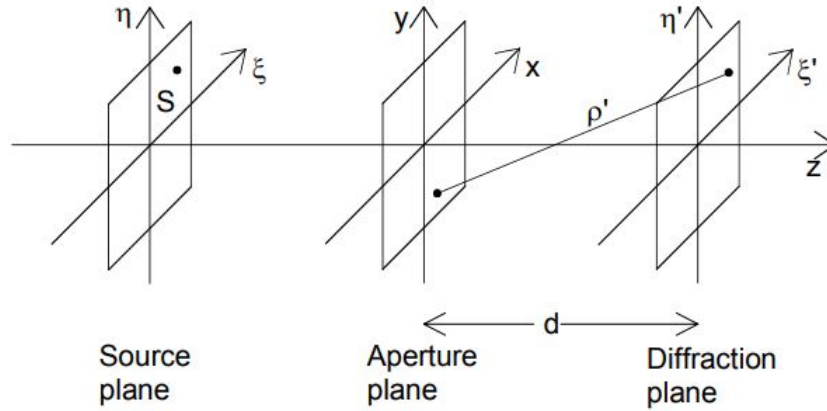


Figura 3 – Difração por uma abertura pontual. (SCHNARS; JÜPTNER, 2005)

Utilizando a notação complexa, a onda esférica emitida por S é representada por

$$E_S(\vec{r}) = E_{0S} \frac{\exp(ikr)}{r} \quad (8)$$

onde $\vec{r}$ é o vetor posição com origem em S . Note que a direção do campo $\vec{E}_S$ não é especificada, pois na formulação de Kirchhoff apenas seu módulo, chamado de amplitude complexa, é considerado. De início, Fresnel assumiu que a onda secundária com origem em (x, y) , que também é esférica, deve ter amplitude λ vezes menor que $E_S(x, y)$ e oscilar com uma defasagem de $\pi/2$ em relação à onda primária. (BORN; WOLF, 2019). Portanto, a onda secundária seria representada por

$$\begin{aligned} E(\vec{\rho}) &= \frac{1}{\lambda} \cdot E_S(x, y) \cdot \frac{\exp(ik\rho)}{\rho} \cdot \exp\left(i\frac{\pi}{2}\right) \\ &= \frac{i}{\lambda} E_S(x, y) \frac{\exp(ik\rho)}{\rho} \end{aligned} \quad (9)$$

onde $\vec{\rho}$ é o vetor posição com origem em (x, y) .

No entanto, Fresnel logo percebeu que a contribuição das ondas secundárias deveria ser multiplicada por um fator K chamado de fator de inclinação. Segundo Kirchhoff, esse fator é dado por

$$K = \frac{\cos \theta + \cos \theta'}{2} \quad (10)$$

onde os ângulos θ e θ' são medidos em relação à normal $\vec{n}$ ao plano xy , como mostra a Figura 4. Dessa forma, a amplitude observada em P seria

$$E(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} E_S(x, y) \frac{\exp(ik\rho')}{\rho'} K \quad (11)$$

onde ρ' é dado por

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2} \quad (12)$$

Determinada a amplitude do campo em P , a intensidade nesse ponto é calculada por $I = |E(\xi', \eta')|^2$.

No problema considerado, há apenas um ponto de abertura na tela, o que significa que apenas uma onda secundária é levada em conta. Em geral, tem-se uma abertura ou obstáculo de tamanho finito. Nesse caso, deve-se levar em conta uma infinidade de ondas secundárias, pois todos os pontos do plano xy que não estão obstruídos contribuem para a intensidade observada em P . Para fazer esse cálculo, devemos integrar a equação (11) sobre toda a região R do plano xy que é transparente ao comprimento de onda utilizado. Obtemos, assim, a chamada integral de Fresnel-Kirchhoff:

$$E(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \iint_R E_S(x, y) \frac{\exp(ik\rho')}{\rho'} K \, dx dy \quad (13)$$

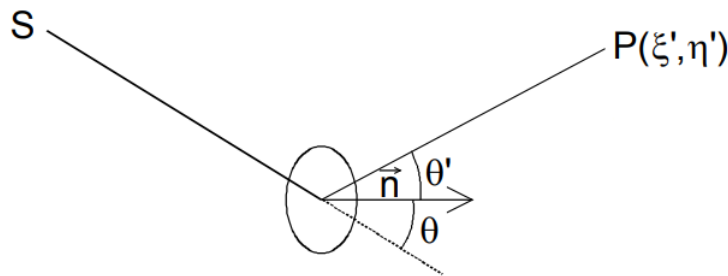


Figura 4 – Ângulos para o cálculo do fator de inclinação. (SCHNARS; JÜPTNER, 2005)

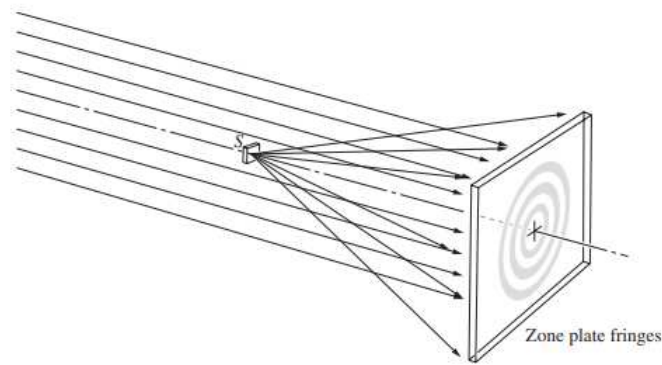
3.3 HOLOGRAFIA

A integral (13) indica que, se for gravado o padrão de interferência proveniente da difração da luz por um objeto, cada ponto do padrão terá informações sobre vários pontos do objeto. A técnica de gravação desse padrão de interferência é chamada de holografia, e a

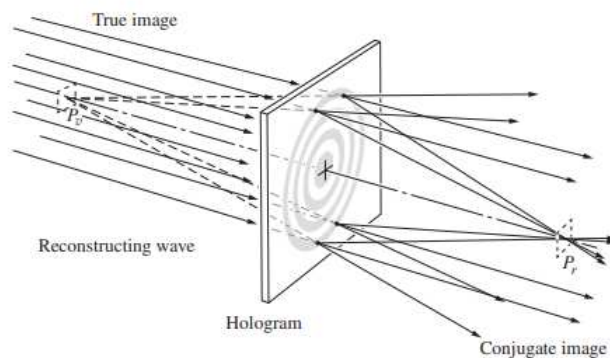
imagem obtida, de holograma. Tradicionalmente, a gravação do holograma é realizada em um material fotossensível capaz de registrar variações de intensidade. Uma vez gravado, o holograma pode ser utilizado para reconstruir as informações ópticas do objeto original, gerando uma imagem dele.

3.3.1 Holografia de Gabor ou *in-line*

Dennis Gabor é creditado com a invenção da holografia, em 1948. Em seus trabalhos iniciais, Gabor utilizava ondas de elétron em um microscópio eletrônico; posteriormente, ele passou a usar lâmpadas de mercúrio como fonte luminosa. Para gravar um holograma, Gabor iluminou um objeto semi-transparente com uma onda plana cujo vetor $\vec{k}$ fosse ortogonal ao plano de observação. Esse arranjo, atualmente conhecido como *in-line* está ilustrado na Figura 5a.



(a) Gravação.



(b) Reconstrução.

Figura 5 – Holografia *in-line*. (HECHT, 2017)

No instante em que a frente de onda atinge o objeto, o campo pode ser decomposto em duas partes. A parte que efetivamente interage com o objeto corresponde à onda do objeto $E_O(x, y)$, e a parte que não sofre os efeitos da difração corresponde à onda de referência $E_R = a \exp(i\phi)$. Por simplicidade, assumimos que E_R é uma onda plana; logo, sua amplitude real a é constante e sua fase ϕ depende apenas do plano xy considerado. A

distribuição de intensidade resultante da interferência entre essas duas ondas, observada em um plano localizado a uma distância d do objeto, é dada por

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |E_O(x, y) + E_R|^2 \\ &= |E_O(x, y)|^2 + a^2 + E_O(x, y)E_R^* + E_RE_O^*(x, y) \end{aligned} \quad (14)$$

O registro dessa distribuição é feito em uma placa fotográfica, que responde de forma linear à intensidade observada e ao tempo τ de exposição por meio da função de transmitância

$$h(x, y) = h_0 + \beta\tau I(x, y) \quad (15)$$

onde h_0 e β são constantes que dependem do material da placa.

O processo de reconstrução consiste em iluminar o holograma com a mesma onda plana de referência E_R usada na etapa de gravação, como se ele fosse um objeto. Na prática, o holograma atua como um modulador de amplitude. Assim, a frente de onda resultante nesse plano é obtida pelo produto entre a transmitância $h(x, y)$ do holograma e a onda incidente $E_R(x, y)$, sendo então descrita por

$$\begin{aligned} E_R \cdot h(x, y) &= E_R [h_0 + \beta\tau I(x, y)] \\ &= (h_0 + \beta\tau a^2)E_R + \beta\tau |E_O(x, y)|^2 E_R + \beta\tau a^2 E_O(x, y) + \beta\tau E_R^2 E_O^*(x, y) \end{aligned} \quad (16)$$

onde foram empregadas, respectivamente, as equações (15) e (14). O primeiro termo em (16) representa uma onda plana que não sofreu difração. Tratando-se de um objeto com alta transmissibilidade, o segundo termo pode ser desprezado, já que a onda do objeto $E_O(x, y)$ teria intensidade muito menor que a da onda de referência E_R . (GOODMAN, 1996). O terceiro termo de (16) corresponde à reconstrução da onda proveniente do objeto, diferindo desta apenas pelo fator constante $\beta\tau a^2$. Focalizando no plano situado a uma distância d à frente do holograma, observa-se uma imagem reconstruída do objeto. Essa imagem é virtual, uma vez que resulta do prolongamento das frentes de onda na direção oposta à de propagação da luz. Por fim, o quarto termo da equação implica na formação de uma segunda imagem, nesse caso real, localizada a uma distância d atrás do holograma.

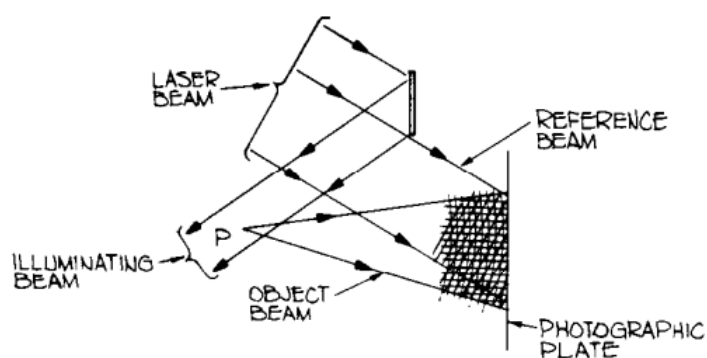
Verifica-se, então, que o processo de reconstrução gera simultaneamente uma imagem virtual e uma imagem real do objeto original, conforme ilustrado na Figura 5b. Como ambas as imagens coexistem no espaço, ao focalizar em uma delas, a imagem correspondente é observada com nitidez, enquanto a outra aparece desfocada. A sobreposição dessas duas imagens impacta negativamente na qualidade visual da reconstrução e constitui uma das principais limitações do arranjo proposto por Gabor.

3.3.2 Holografia de Leith-Upatnieks ou *off-axis*

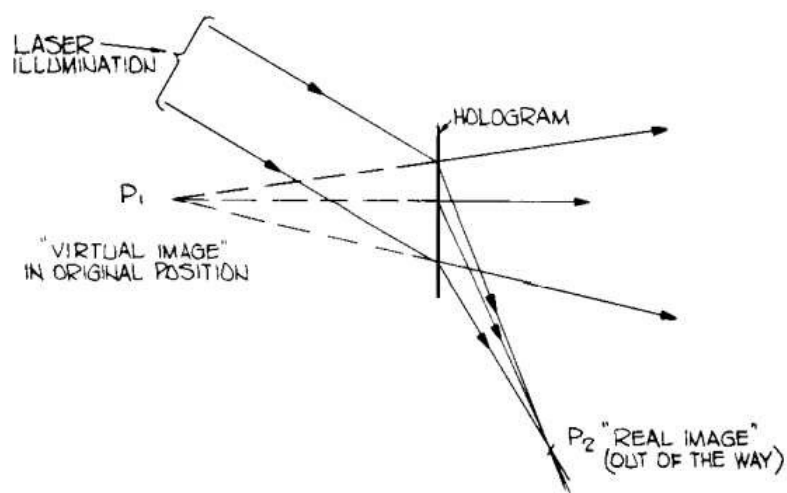
Na ausência de avanços tecnológicos capazes de aprimorar a técnica de Gabor, a holografia entrou em um período de estagnação por volta de 1955. O interesse pela área

foi retomado apenas em 1963, com os trabalhos de Emmett N. Leith e Juris Upatnieks. A invenção do laser, aliada a anos de trabalho teórico desenvolvido por Leith, forneceu as condições necessárias para o desenvolvimento da chamada holografia *off-axis*, técnica que permitiu a obtenção de hologramas de qualidade significativamente superior aos produzidos pelo método de Gabor. (GABOR, 1972).

Nesse novo arranjo, Leith e Upatnieks separaram a onda de referência E_R da onda do objeto E_O . Conforme ilustrado na Figura 6a, a configuração permite que a onda de referência incida sobre a placa fotográfica em uma direção diferente do eixo óptico do sistema. Durante o processo de reconstrução, representado na Figura 6b, a iluminação do holograma pela onda de referência dá origem tanto à imagem real quanto à imagem virtual do objeto. Entretanto, diferentemente da holografia *in-line*, essas imagens passam a ser formadas em direções distintas, deixando de se sobrepor. Como consequência, a imagem virtual pode ser observada com maior clareza, sem interferência da imagem real, resultando em uma reconstrução de qualidade superior.



(a) Gravação.



(b) Reconstrução.

Figura 6 – Holografia *off-axis*. (GABOR, 1972)

3.4 HOLOGRAFIA DIGITAL

Na holografia digital, os filmes fotossensíveis utilizados na gravação dos hologramas são substituídos por sensores eletrônicos, geralmente do tipo CCD ou CMOS. Dessa forma, o holograma é armazenado como uma imagem digital, podendo ser processado e analisado por meio de ferramentas computacionais. Em particular, pode-se reconstruir digitalmente a imagem do objeto original. Isso é feito simulando-se a propagação da onda $E_R \cdot h(x, y)$, que emerge do holograma, através da resolução da integral de Fresnel-Kirchhoff.

Referindo-se à Figura 4, podemos considerar que a onda de referência E_R é plana se assumirmos que a fonte pontual S está muito longe do holograma. Nesse caso, o ângulo θ será pequeno, de modo que vale a aproximação $\cos \theta \approx 1$. De forma análoga, se o plano de observação $\xi'\eta'$ estiver localizado a uma distância suficientemente grande do holograma, também será válida a aproximação $\cos \theta' \approx 1$. Sob essas condições, o fator de inclinação (10) pode ser aproximado por $K \approx 1$. Como a onda $E_R \cdot h(x, y)$ já contém as informações referentes à contribuição de cada ponto do holograma na geração de ondas secundárias, a integral de Fresnel-Kirchhoff pode ser feita sobre todo o plano do holograma:

$$E(\xi', \eta') = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_R \cdot h(x, y) \frac{\exp(ik\rho')}{\rho'} dx dy \quad (17)$$

sendo ρ' definido por (12). Resolvida a integral (17), a imagem reconstruída do objeto é obtida pelo cálculo da distribuição de intensidade $I(\xi', \eta') = |E(\xi', \eta')|^2$.

Um dos métodos para se resolver a integral (17) é o chamado método da convolução, que recebe este nome porque é baseado no teorema da convolução da transformada de Fourier. A transformada de Fourier de uma função $f(x, y)$ de duas variáveis é dada por

$$\mathcal{F}\{f(x, y)\} = F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (18)$$

enquanto sua transformada inversa é

$$\mathcal{F}^{-1}\{F(u, v)\} = f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv \quad (19)$$

Sejam $f(x, y)$ e $g(x, y)$ duas funções cujas transformadas de Fourier são $F(u, v)$ e $G(u, v)$, respectivamente. A convolução de f com g , denotada por $f * g$, é definida por

$$(f * g)(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(s, t) g(x - s, y - t) ds dt \quad (20)$$

O teorema da convolução estabelece que a transformada de Fourier da convolução de duas funções é igual ao produto das transformadas individuais, isto é,

$$\mathcal{F}\{(f * g)(x, y)\} = F(u, v) \cdot G(u, v) \quad (21)$$

Ao analisar a integral (17), observa-se que ela pode ser interpretada como a convolução entre as funções

$$f(x, y) = E_R \cdot h(x, y) \quad \text{e} \quad g(x, y) = \frac{\exp\left(ik\sqrt{x^2 + y^2 + d^2}\right)}{\sqrt{x^2 + y^2 + d^2}} \quad (22)$$

Então, em vez de calcular diretamente a integral (17) no domínio espacial, pode-se proceder calculando as transformadas de Fourier de f e g , multiplicando-as no domínio da frequência e, em seguida, aplicando a transformada inversa ao resultado. Essa abordagem reduz significativamente o custo computacional da reconstrução, especialmente quando implementada por meio do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT). É interessante notar que o mesmo método empregado na reconstrução de imagens a partir de um holograma pode ser usado para a geração de hologramas a partir da imagem de um objeto.

4 METODOLOGIA

A primeira etapa da metodologia consistiu na realização de um levantamento de bibliotecas da linguagem Python voltadas para cálculos de propagação da luz e aplicações em holografia digital. O objetivo dessa etapa foi identificar qual era a ferramenta computacional mais adequada para a simulação de fenômenos ópticos e para a geração e reconstrução de hologramas digitais. De início, foram selecionadas três bibliotecas desenvolvidas especialmente para essa área: pyDHM, HoloPy e LightPipes.

A análise comparativa entre essas bibliotecas foi conduzida a partir de critérios práticos relacionados à implementação do trabalho. Um dos aspectos avaliados foi a qualidade da documentação fornecida pelos desenvolvedores, observando-se o nível de detalhamento teórico, clareza das instruções, existência de exemplos de código e frequência de atualização. Também foram consideradas a facilidade de instalação e configuração das bibliotecas, a simplicidade de utilização de seus métodos e a estabilidade que apresentaram durante a execução de testes básicos. Os testes realizados consistiram na geração de hologramas de formas geométricas simples, como círculos e retângulos, seguida da reconstrução das imagens originais. O arranjo de Gabor foi escolhido para executar essas tarefas devido a sua facilidade de implementação. Ao final, foi definido que se utilizaria a biblioteca LightPipes para o desenvolvimento do trabalho.

Definida a ferramenta, iniciou-se uma etapa de aprofundamento na utilização de seus recursos. O foco passou a ser a geração de hologramas de objetos com formatos arbitrários, incluindo caracteres alfanuméricos e outras figuras irregulares de imagens disponíveis na internet. Apenas imagens em escala de cinza foram usadas, sendo a transmitância de cada ponto do objeto representada pela tonalidade do pixel correspondente. Assim, considerou-se a cor branca como totalmente transparente, enquanto a cor preta seria totalmente opaca com relação ao comprimento de onda da luz empregada na simulação. Com isso, buscou-se analisar a capacidade dos métodos em preservar informações sobre a transmitância de um objeto durante os processos de geração e reconstrução holográfica.

Em seguida, os estudos concentraram-se na geração e leitura de hologramas de objetos tridimensionais. Essa etapa teve como objetivo verificar a possibilidade de recuperação da informação tridimensional do objeto original por meio da reconstrução do holograma. Para isso, imagens bidimensionais foram posicionadas em planos distintos ao longo da direção de propagação da luz, simulando a distribuição espacial de um objeto tridimensional. Após a geração do holograma, realizou-se o processo de reconstrução variando-se a distância de foco, de modo a permitir a focalização individual das diferentes imagens que compunham o objeto. Novamente, foi empregada a técnica de holografia *in-line* nas rotinas.

Por fim, realizou-se um levantamento bibliográfico de artigos científicos relacionados à holografia digital, com o objetivo de extrair alguns hologramas obtidos experimental-

mente e tentar reconstruir imagens reais a partir deles. A seleção dos artigos foi baseada na presença de informações consideradas essenciais para se fazer a leitura correta dos hologramas. Dentre essas informações, inclui-se o comprimento de onda da luz utilizada; especificações da câmera empregada, como resolução e tamanho dos pixels; indicação da escala e/ou ampliação das figuras apresentadas; e distância de foco usada na reconstrução. As imagens obtidas foram então comparadas com aquelas expostas nos artigos, o que permitiu avaliar a capacidade dos métodos implementados de processar hologramas reais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TESTES INICIAIS

Os testes iniciais feitos com a biblioteca `LightPipes` podem ser acompanhados no Apêndice A. A biblioteca disponibiliza funções para a criação de imagens simples, compostas por algumas figuras geométricas pré-definidas. Nos testes realizados, utilizou-se uma combinação das funções `CircScreen` e `RectScreen` para gerar a composição ilustrada na Figura 7a. A iluminação foi feita por uma fonte pontual simulada pela função `PointSource`. Como a fonte foi posicionada a uma distância de 10 m, muito superior às dimensões dos objetos (inferiores a 1 mm), a frente de onda incidente pode ser considerada aproximadamente plana.

Após interagir com os objetos, a onda resultante foi propagada por uma distância de 2 cm utilizando a função `Fresnel`. Segundo a documentação da biblioteca, essa função implementa o método da convolução para propagação de ondas luminosas. A distribuição de intensidade obtida no plano de observação foi calculada com a função `Intensity`, resultando em um holograma totalmente gerado por computador, o qual é mostrado na Figura 7b.

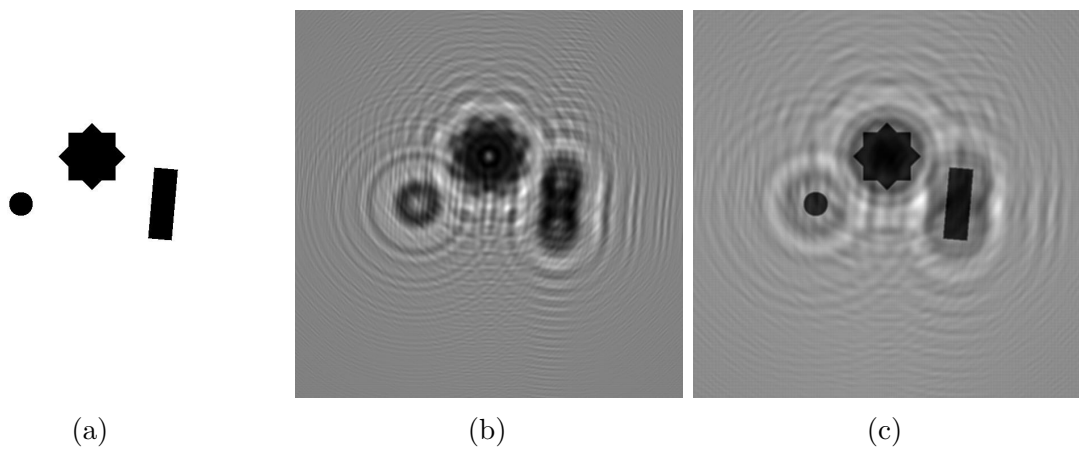


Figura 7 – Holografia de algumas formas geométricas simples: (a) Objetos; (b) Holograma; (c) Reconstrução pelo método da convolução ($d = 2$ cm).

A etapa final do teste consistiu na reconstrução da imagem dos objetos originais. Para isso, a onda de referência empregada durante a gravação foi modulada pela distribuição de intensidade do holograma por meio da função `MultIntensity`. A onda resultante foi então propagada a mesma distância de 2 cm usada na gravação, novamente através da função `Fresnel`. A imagem produzida é apresentada na Figura 7c. Observa-se que as formas geométricas originais são recuperadas com boa definição, permitindo distinguir claramente seus contornos e dimensões relativas. Esse resultado demonstra que o holograma preservou corretamente as informações necessárias para reconstruir os objetos, o que valida a escolha da ferramenta para a condução do trabalho.

Entretanto, além da imagem principal, verifica-se a presença de uma segunda imagem desfocalizada que está sobreposta ao objeto reconstruído. Esse comportamento é característico da técnica de holografia *in-line*, proposta originalmente por Dennis Gabor. Nessa configuração, as imagens real e virtual são formadas ao longo do mesmo eixo óptico e, portanto, aparecem sobrepostas durante a reconstrução. Como a implementação da função **Fresnel** permite focalizar apenas em planos no mesmo sentido que o da propagação da luz, deduz-se que a Figura 7c mostra a imagem real em foco. Consequentemente, a imagem virtual se apresenta desfocalizada.

5.2 RECONSTRUÇÃO DE OBJETOS BIDIMENSIONAIS

Após a validação dos testes iniciais, o programa `gerador.py` foi desenvolvido com o intuito de gerar computacionalmente hologramas de objetos arbitrários, não limitados às formas geométricas disponibilizadas pela biblioteca `LightPipes`. O código-fonte desse programa é apresentado integralmente no Apêndice B. Sua função consiste em ler uma imagem, utilizada como representação de um ou mais objetos, simular o processo de gravação holográfica e salvar o holograma produzido como um arquivo de imagem. Esse arquivo pode, posteriormente, ser utilizado como entrada do programa `leitor.py`, apresentado no Apêndice C, responsável pela reconstrução numérica do objeto a partir do holograma.

A fim de avaliar o correto funcionamento desses programas, utilizou-se inicialmente uma imagem contendo alguns caracteres do alfabeto, uma vez que eles apresentam formas facilmente reconhecíveis. A Figura 8a mostra a imagem dos objetos empregados na simulação, enquanto a Figura 8b mostra o holograma correspondente obtido. A leitura desse holograma resulta na imagem reconstruída que é exibida na Figura 8c.

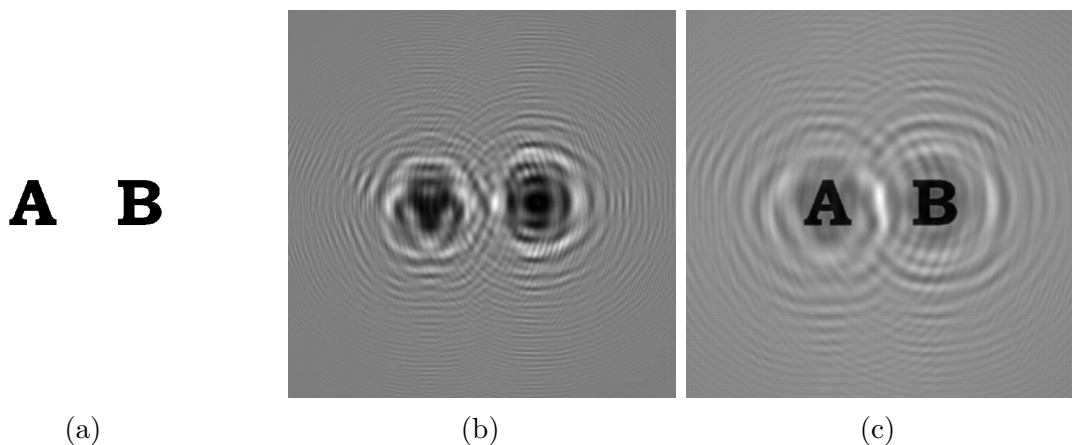


Figura 8 – Holografia de figuras com formas complexas: (a) Objetos; (b) Holograma; (c) Reconstrução pelo método da convolução ($d = 2$ cm).

Assim como observado nos testes realizados com figuras geométricas simples, verifica-se a sobreposição entre imagem real e imagem virtual, fenômeno que advém da configuração de holografia *in-line* adotada. Como a reconstrução foi realizada focalizando

a imagem real, esta aparece com boa definição, ao passo que a imagem virtual permanece desfocalizada. Apesar da sobreposição das imagens, os contornos dos caracteres são preservados e podem ser identificados sem ambiguidades, demonstrando que as informações do objeto original foram corretamente registradas e recuperadas durante os processos de gravação e reconstrução, respectivamente.

Muitas vezes, a holografia de Gabor é feita com amostras que são semi-transparentes ao comprimento de onda da luz empregada. Para simular esse tipo de objeto, foi escolhida uma imagem ilustrativa de um copépode, um pequeno crustáceo que habita ecossistemas de água doce, apresentada na Figura 9a. O diagrama destaca a estrutura interna translúcida do organismo, mostrando seus órgãos internos e a organização segmentada de seu corpo. Como a imagem original era colorida, foi necessário convertê-la para escala de cinza por meio da função `rgb2gray`, definida no programa `gerador.py` (Apêndice B). Nessa representação, as regiões mais claras correspondem a regiões de maior transmitância da luz incidente, enquanto regiões mais escuras absorvem mais a luz.

O holograma obtido por simulação é apresentado na Figura 9b, ao passo que a Figura 9c mostra o resultado da reconstrução numérica. Observa-se que, além da forma geral do organismo, os procedimentos implementados também são capazes de preservar informações relativas à transmitância do objeto.

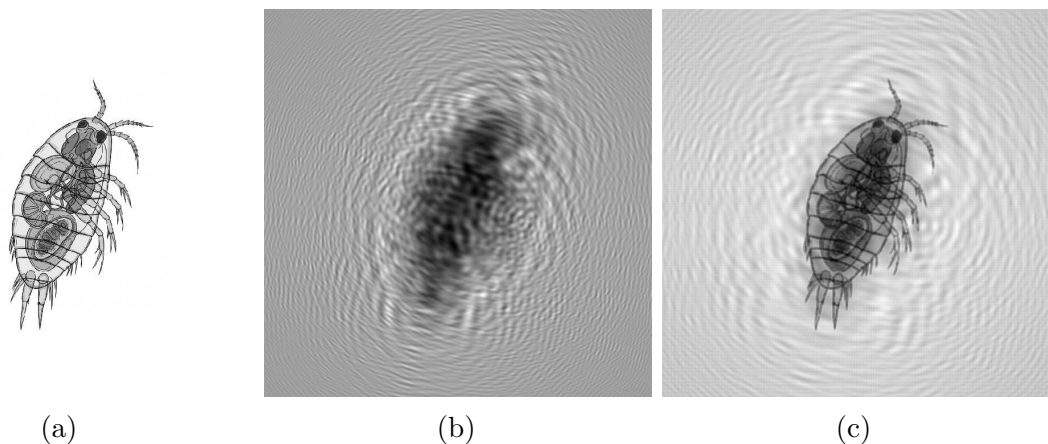


Figura 9 – Holografia de um objeto semi-transparente: (a) Objeto; (b) Holograma; (c) Reconstrução pelo método da convolução ($d = 2$ cm).

5.3 RECONSTRUÇÃO DE OBJETOS TRIDIMENSIONAIS

Para simular um objeto tridimensional, foram utilizadas duas imagens bidimensionais posicionadas em planos distintos ao longo da direção de propagação da luz, assim como ilustrado na Figura 10. Essas imagens representando diferentes seções transversais de um mesmo objeto. Para tornar essa configuração possível, foi necessário modificar o programa `gerador.py` de forma a permitir que cada imagem fosse inserida em uma distância específica em relação ao plano do sensor. O código modificado encontra-se no

Apêndice D. A principal alteração feita consistiu na propagação em etapas da luz entre os diferentes planos do objeto, possibilitando que cada imagem interagisse com a onda de maneira sequencial. A execução do código resultou no holograma apresentado na Figura 11a.

Em seguida, a reconstrução foi realizada utilizando o programa apresentado no Apêndice C. Conforme sugerido pela Figura 10, para reconstruir as imagens das letras A e B, foi necessário focalizar nos planos que estão localizados a 3 cm e a 2 cm do holograma, respectivamente. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 11b e 11c. Tais resultados demonstram que, embora seja um registro bidimensional, o holograma contém simultaneamente as informações provenientes dos dois planos do objeto. Essa característica evidencia uma das principais propriedades da holografia: a capacidade de armazenar informações tridimensionais em um único holograma, permitindo que diferentes planos do objeto sejam reconstruídos seletivamente por meio da variação da distância de focalização.

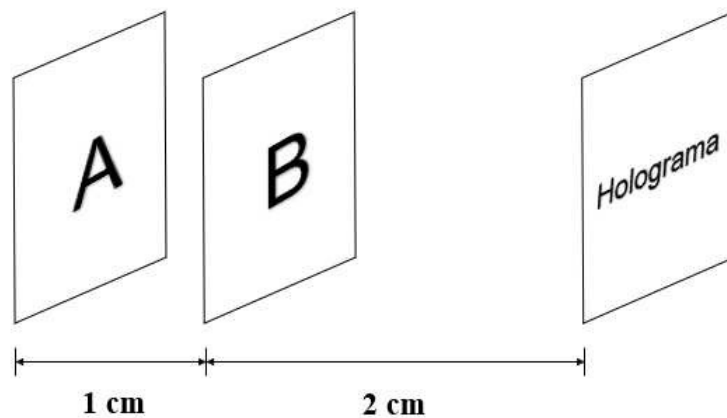


Figura 10 – Diagrama mostrando as posições dos diferentes planos que compõe um objeto tridimensional.

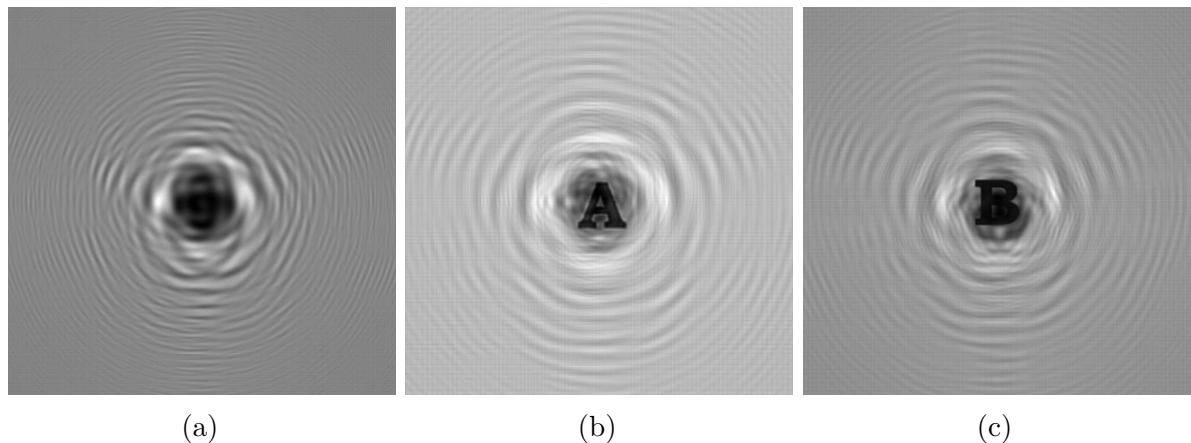


Figura 11 – Holografia de um objeto composto por camadas: (a) Holograma; (b) Reconstrução no plano $d = 3$ cm; (c) Reconstrução no plano $d = 2$ cm.

Notavelmente, a qualidade das reconstruções é inferior à observada nos experimentos com objetos bidimensionais. Isso ocorre porque cada uma das camadas que compõe o objeto origina uma imagem real e uma imagem virtual durante a reconstrução, resultando na presença simultânea de quatro imagens sobrepostas. Ao focalizar uma das imagens reais, as outras permanecem desfocalizadas, porém continuam contribuindo para a intensidade observada no plano de reconstrução. Essa sobreposição reduz o contraste e a nitidez da imagem focalizada, dificultando a visualização dos detalhes. Apesar dessa limitação, ainda é possível identificar qual dos planos está sendo reconstruído em cada distância de foco.

5.4 RECONSTRUÇÃO A PARTIR DE HOLOGRAMAS REAIS

Após a validação das rotinas implementadas, o trabalho voltou-se à reconstrução de hologramas obtidos em experimentos reais, com foco em aplicações voltadas à visualização de zooplâncton marinho. Como primeiro estudo de caso, utilizou-se o holograma apresentado na Figura 12a. A reconstrução foi realizada por meio do programa apresentado no Apêndice C, sendo necessárias algumas adaptações para reproduzir as condições experimentais descritas no artigo original. Assim, o tamanho físico do holograma, representado pela variável **grid**, foi ajustado para 12,3 mm e a distância de reconstrução foi definida como 1,2 m, conforme informado pelos autores. A imagem reconstruída é apresentada na Figura 12b.

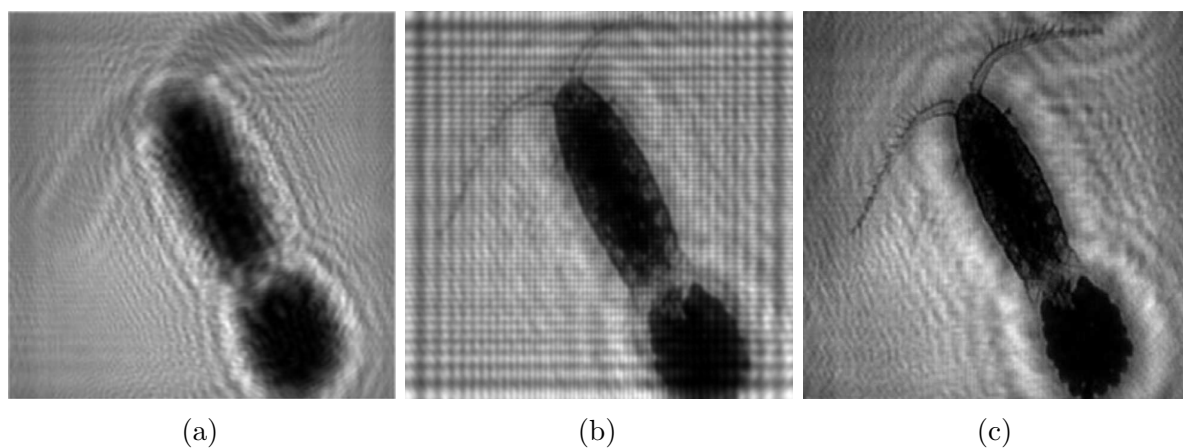


Figura 12 – Holografia de um copépode: (a) Holograma *in-line* (TAN; WANG, 2013); (b) Reconstrução obtida por simulação ($d = 1,2$ m); (c) Reconstrução do artigo original (TAN; WANG, 2013).

A comparação entre a reconstrução obtida e aquela publicada no artigo original, reproduzida na Figura 12c, mostra que o organismo encontra-se adequadamente focalizado. Entretanto, observam-se algumas diferenças em relação ao resultado publicado, principalmente a perda de detalhes nas antenas do copépode e o aparecimento de listras horizontais e verticais sobre a imagem reconstruída. Essas diferenças podem ser explicadas pela resolução do holograma disponibilizado no artigo. Embora o holograma original tenha

sido registrado com resolução de 1024×1024 pixels, a versão publicada foi reduzida para compor a figura do artigo, o que implicou na perda de informações e, consequentemente, na perda de qualidade da imagem reconstruída.

Um segundo estudo de caso foi realizado utilizando o holograma apresentado na Figura 13a. Diferentemente do exemplo anterior, o artigo original não deixava explícito qual era a distância exata entre o organismo e o sensor. No entanto, o artigo informava que o espécime encontrava-se no interior de uma cubeta, cujo volume estava posicionado entre 80 mm e 115 mm do sensor. Assim, assumiu-se que o organismo poderia estar localizado em qualquer plano compreendido nesse intervalo. Para determinar a posição correta de focalização, foi implementada uma rotina de reconstrução por varredura, apresentada no Apêndice E, que reconstrói a imagem em sucessivos planos espaçados de 1 mm. Ao final do processo, selecionou-se a reconstrução que apresentava o melhor foco para o organismo analisado.

O tamanho físico do holograma também precisou ser estimado, uma vez que essa informação não estava disponível no artigo. Para essa estimativa, consideraram-se as dimensões típicas de indivíduos do gênero *Temora* e as especificações das câmeras utilizadas pelos pesquisadores. Com esses parâmetros, foi feita a reconstrução focalizando-se em vários planos, sendo um deles apresentado na Figura 13b. A comparação com a imagem publicada no artigo, reproduzida na Figura 13c, permite verificar que, mesmo sem a disponibilidade de todos os parâmetros experimentais, foi possível obter uma reconstrução satisfatória da imagem do organismo.

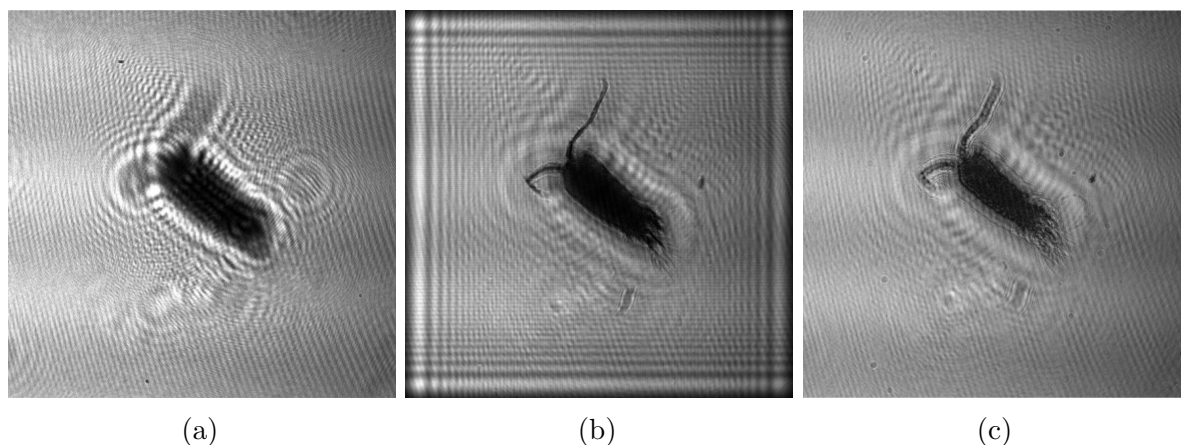


Figura 13 – Holografia de um indivíduo do gênero *Temora*: (a) Holograma (MORENO *et al.*, 2026); (b) Reconstrução obtida por simulação ($d = 102$ mm); (c) Reconstrução do artigo original (MORENO *et al.*, 2026).

No mesmo artigo, encontram-se outros hologramas, como por exemplo aquele mostrado na Figura 14a. Utilizando o mesmo procedimento de reconstrução por varredura, obteve-se, dentre outras, a imagem da Figura 14b, a qual pode ser comparada com a da Figura 14c, que foi publicada no artigo. Vale ainda destacar que ambas as reconstruções feitas por simulação (Figuras 13b e 14b) se basearam em imagens reduzidas do holograma

original e, portanto, não apresentam a mesma qualidade que aquelas divulgadas pelos autores.

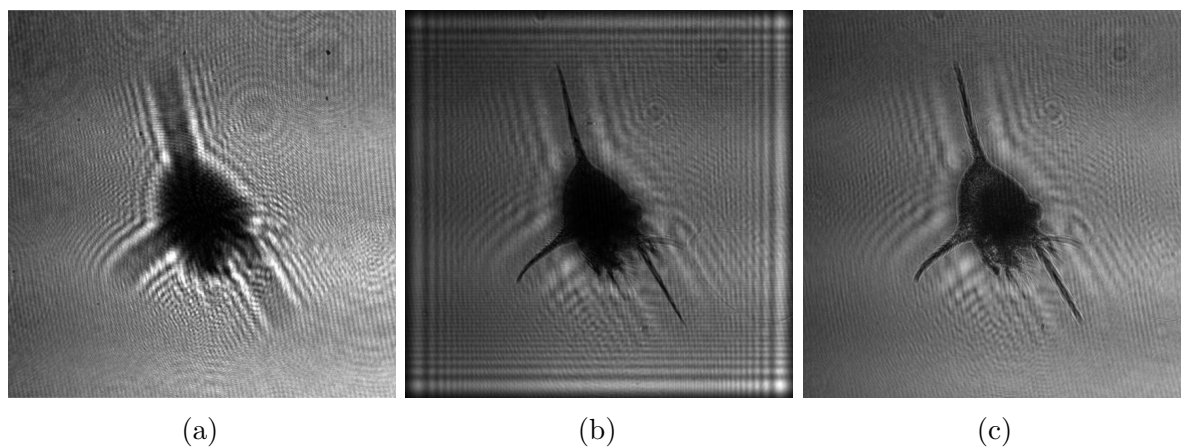


Figura 14 – Holografia de um decápode em estágio larval: (a) Holograma (MORENO *et al.*, 2026); (b) Reconstrução obtida por simulação ($d = 87$ mm); (c) Reconstrução do artigo original (MORENO *et al.*, 2026).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo investigar a utilização de bibliotecas da linguagem Python para a geração e leitura de hologramas digitais, com foco especial na biblioteca LightPipes. Inicialmente, diferentes bibliotecas voltadas a aplicações em óptica foram consideradas, sendo a LightPipes selecionada em função de sua estabilidade, documentação detalhada e facilidade de uso. A partir dela, foram desenvolvidas rotinas capazes de simular a propagação e a difração da luz por meio do método da convolução, possibilitando o cumprimento integral dos objetivos específicos que foram estabelecidos.

Os resultados obtidos demonstraram o bom funcionamento das rotinas implementadas. Foram gerados e processados corretamente hologramas de objetos bidimensionais e tridimensionais em camadas. Também foram processados com êxito hologramas reais obtidos experimentalmente. Em todos os casos, as reconstruções apresentaram resultados compatíveis com o comportamento esperado, evidenciando que a biblioteca LightPipes constitui uma ferramenta confiável para aplicações de holografia digital e pode ser facilmente empregada em atividades de pesquisa.

As limitações observadas decorreram, principalmente, da utilização da configuração de holografia *in-line*. Como esperado para esse arranjo, as reconstruções apresentaram a sobreposição entre as imagens real e virtual, reduzindo a qualidade das imagens obtidas, especialmente nas simulações envolvendo objetos constituídos por múltiplos planos. Apesar disso, foi possível recuperar de maneira satisfatória informações qualitativas dos objetos, incluindo forma e transmitância.

Tendo em vista trabalhos futuros, recomenda-se a implementação da técnica de holografia *off-axis*, na qual as imagens real e virtual são separadas angularmente durante a reconstrução, proporcionando resultados de maior qualidade. Também podem ser explorados outros algoritmos de propagação luminosa além do método da convolução, bem como a aplicação das rotinas desenvolvidas a hologramas experimentais obtidos em diferentes contextos e áreas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

BORN, Max; WOLF, Emil. **Principles of Optics**. 7. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.

GABOR, Dennis. Holography, 1948-1971. **Proceedings of the IEEE**, v. 60, n. 6, p. 655–668, 1972.

GOODMAN, Joseph W. **Introduction to Fourier Optics**. [S.l.]: McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics, 1996.

HECHT, Eugene. **Optics**. 5. ed. Boston: Pearson Education, Inc, 2017.

MORENO, Gelayisi; CRUZ, Leandro De La; OLIVEIRA-SOUZA, Wilson; LOPES, Rubens M. Comparative evaluation of autofocus criteria for reconstructing digital in-line holograms of plankton. **Optics Communications**, v. 600, n. 132666, 2026.

SCHNARS, Ulf; JÜPTNER, Werner. **Digital Holography**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2005.

SOMMERFELD, Arnold. **Optics**. New York: Academic Press, Inc, 1954. v. 4. (Lectures on Theoretical Physics).

TAN, Shizhe; WANG, Shengxu. An approach for sensing marine plankton using digital holographic imaging. **Optik**, v. 124, n. 24, p. 6611–6614, 2013.

APÊNDICE A – Programa teste.py

```

from LightPipes import *
import matplotlib.pyplot as plt

# Configurações
lmbda = 632.8 * nm      # Comprimento de onda para o laser HeNe
pixel = 2.4 * um       # Especificação de uma CCD IMX183
numPx = 2048           # Número de pixels na imagem
grid = pixel * numPx

# Criando uma onda aprox. plana a partir de uma fonte pontual
Er = Begin(grid, lmbda, numPx)
Er = PointSource(Er); Er = Fresnel(Er, 10*m)

# Criando alguns objetos
Eo = CircScreen(Er, 50*um, -300*um, 0*um)
Eo = RectScreen(Eo, 100*um, 300*um, 300*um, 0*um, -5.0)
Eo = RectScreen(Eo, 200*um, 200*um, 0*um, -200*um, 0.0)
Eo = RectScreen(Eo, 200*um, 200*um, 0*um, -200*um, 45.0)
objeto = Intensity(Eo)

# Gravando o holograma
d = 2 * cm             # Distância entre objeto e sensor
Eo = Fresnel(Eo, d)    # Propagação pelo método da convolução
holograma = Intensity(Eo)

# Reconstruindo imagem do objeto
Eh = MultIntensity(Er, holograma)
Eh = Fresnel(Eh, d)    # Focando na imagem real
imagem = Intensity(Eh)

# Visualização
plt.imshow(objeto[683:1366, 683:1366], cmap='gray')
plt.title(f"Objeto"); plt.axis('off'); plt.show()

plt.imshow(holograma[683:1366, 683:1366], cmap='gray')
plt.title(f"Holograma"); plt.axis('off'); plt.show()

```

```
plt.imshow(imagem[683:1366, 683:1366], cmap='gray')  
plt.title(f"Reconstrução"); plt.axis('off'); plt.show()
```

APÊNDICE B – Programa gerador.py

```

from LightPipes import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.image as mpimg

# Função para converter imagem colorida em escala de cinza
def rgb2gray(rgb):
    return np.dot(rgb[...,:3], [0.299, 0.587, 0.114])

# Carregando imagem do objeto
img_obj = mpimg.imread('objeto.png')
img_obj = rgb2gray(img_obj)

# Configurações
lmbda = 632.8 * nm          # Comprimento de onda para o laser HeNe
pixel = 2.4 * um            # Especificação de uma CCD IMX183
num_px = img_obj.shape[0]
grid = pixel * num_px

# Criando uma onda aprox. plana a partir de uma fonte pontual
Er = Begin(grid, lmbda, num_px)
Er = PointSource(Er); Er = Fresnel(Er, 10*m)

# Definindo o objeto
Eo = MultIntensity(Er, img_obj)
objeto = Intensity(Eo)

# Gravando o holograma
d = 2 * cm                  # Distância entre objeto e sensor
Eo = Fresnel(Eo, d)
holograma = Intensity(Eo)

# Definindo janela de visualização
xh = yh = int(num_px/3)
xl = yl = xh * 2

# Visualização

```

```
plt.subplot(1,2,1); plt.imshow(objeto[yh:yl, xh:xl], cmap='gray')
plt.title(f"Objeto"); plt.axis('off')

plt.subplot(1,2,2); plt.imshow(holograma[yh:yl, xh:xl], cmap='gray')
plt.title(f"Holograma"); plt.axis('off'); plt.show()

# Salvando imagem do holograma
plt.imsave("holograma.png", holograma, cmap='gray')
```

APÊNDICE C – Programa leitor.py

```

from LightPipes import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.image as mpimg

# Carregando imagem do holograma
img_holo = mpimg.imread('holograma.png')

# Configurações
lmbda = 632.8 * nm          # Comprimento de onda para o laser HeNe
pixel = 2.4 * um            # Especificação de uma CCD IMX183
num_px = img_holo.shape[0]
grid = pixel * num_px

# Criando uma onda aprox. plana a partir de uma fonte pontual
Er = Begin(grid, lmbda, num_px)
Er = PointSource(Er); Er = Fresnel(Er, 10*m)

# Modulando a onda de referência com o holograma
Eh = MultIntensity(Er, img_holo)
holograma = Intensity(Eh)

# Reconstrução
d = 2 * cm                  # Distância de foco
Eh = Fresnel(Eh, d)         # Focando na imagem real
reconstrucao = Intensity(Eh)

# Definindo janela de visualização
xh = yh = int(num_px/3)
xl = yl = xh * 2

# Visualização
plt.subplot(1,2,1); plt.imshow(holograma[yh:yl, xh:xl], cmap='gray')
plt.title(f"Holograma"); plt.axis('off')

plt.subplot(1,2,2); plt.imshow(reconstrucao[yh:yl, xh:xl], cmap='gray')
plt.title(f"Reconstrução"); plt.axis('off'); plt.show()

```

APÊNDICE D – Programa gerador-3d.py

```

from LightPipes import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.image as mpimg

# Função para converter imagem colorida em escala de cinza
def rgb2gray(rgb):
    return np.dot(rgb[...,:3], [0.299, 0.587, 0.114])

# Carregando imagens dos objetos
img_obj_1 = mpimg.imread('A.png'); img_obj_1 = rgb2gray(img_obj_1)
img_obj_2 = mpimg.imread('B.png'); img_obj_2 = rgb2gray(img_obj_2)

# Configurações
lmbda = 632.8 * nm          # Comprimento de onda para o laser HeNe
pixel = 2.4 * um            # Especificação de uma CCD IMX183
num_px = img_obj_1.shape[0]  # Dimensões das duas imagens devem ser iguais
grid = pixel * num_px

# Criando uma onda aprox. plana a partir de uma fonte pontual
Er = Begin(grid, lmbda, num_px)
Er = PointSource(Er); Er = Fresnel(Er, 10*m)

# Definindo 1a camada - Letra A
Eo = MultIntensity(Er, img_obj_1)

# Definindo 2a camada - Letra B
d1 = 1 * cm                # Distância entre as letras A e B
Eo = Fresnel(Eo, d1)
Eo = MultIntensity(Eo, img_obj_2)

# Gravando o holograma
d2 = 2 * cm                # Distância entre letra B e sensor
Eo = Fresnel(Eo, d2)
holograma = Intensity(Eo)

# Definindo janela de visualização

```

```
xh = yh = int(num_px/3); xl = yl = xh * 2

# Visualização
plt.imshow(holograma[yh:yl, xh:xl], cmap='gray')
plt.title(f"Holograma"); plt.axis('off'); plt.show()

# Salvando imagem do holograma
plt.imsave("holograma.png", holograma, cmap='gray')
```

APÊNDICE E – Programa leitor-varredura.py

```

from LightPipes import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.image as mpimg

# Função para converter imagem colorida em escala de cinza
def rgb2gray(rgb):
    return np.dot(rgb[...,:3], [0.299, 0.587, 0.114])

# Carregando imagem do holograma
img_holo = mpimg.imread('holograma.png')
img_holo = rgb2gray(img_holo)

# Configurações
lmbda = 632.8 * nm      # Comprimento de onda para o laser HeNe
grid = 5.3 * mm        # Estimativa do tamanho real da imagem
num_px = img_holo.shape[0]

# Criando uma onda aprox. plana a partir de uma fonte pontual
Er = Begin(grid, lmbda, num_px)
Er = PointSource(Er); Er = Fresnel(Er, 10*m)

# Modulando a onda de referência com o holograma
Eh = MultIntensity(Er, img_holo)

# Reconstrução nos planos 80-115 mm com separação de 1 mm
for d in range(80, 116):
    print(f"d = {d} mm")
    E = Fresnel(Eh, d * mm)
    reconstrucao = Intensity(E)
    plt.imsave(f"reconstrucao/plano-{d}mm.jpg", reconstrucao, cmap='gray')

```